



## تحلیل تجربی و عددی ضربه سرعت پایین بر روی پانل ساندویچی با هسته مشبک کامپوزیتی

علی داور<sup>1</sup>، رضا آذرآفا<sup>2\*</sup>، جواد فرجی شعاع<sup>3</sup>

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

3- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

\* تهران، صندوق پستی 15875-1774، azarmut@mut.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

پانل ساندویچی با هسته مشبک کامپوزیتی، پانلی متشکل از یک هسته با ساختار مشبک کامپوزیتی از نوع آگوم، به همراه دو صفحه فوقانی و تحتانی در دو طرف این هسته می‌باشد. این سازه‌ها می‌توانند جایگزین سازه‌های تقویت شده با استرینگر، پانل‌های ساندویچی با هسته لانه‌زنبوری و سازه‌های مشبک آلومینیومی گردند. در این پژوهش، با انجام تست‌های تجربی و با کمک نرم‌افزار آباکوس، به بررسی تجربی و عددی ضربه سرعت پایین در پانل ساندویچی با هسته مشبک پرداخته شده است. برای انجام تست ضربه سرعت پایین، دو پانل ساندویچی با هسته مشبک ساخته شده و تحت بارگذاری سقوط آزاد ضربه‌زننده فولادی با نوک نیم کروی قرار گرفته‌اند. برای شبیه‌سازی عددی، از انواع المان‌های سه بعدی و حل آسیب پیشرونده به کمک زیربرنامه‌نویسی با زبان فرترن در نرم‌افزار آباکوس، کمک گرفته شده است. مقایسه بین نتایج عددی و تجربی نشان می‌دهد که روش المان محدود، روشی کارآمد جهت کاهش زمان و هزینه برای پیش‌گویی رفتار این نوع سازه‌ها در مقابل بارهای ضربه‌ای است. در بارگذاری ضربه، آنچه که موجب جذب انرژی در سازه می‌شود، آسیب دیدن بخشی از سازه است که در مقابل ضربه‌زننده قرار دارد. بسته به میزان انرژی وارد، این آسیب دیدگی می‌تواند شامل صفحه فوقانی یک پانل ساندویچی و یا ریب‌های درون هسته آن باشد و صلبیت بیشتر محل برخورد ضربه‌زننده، موجب کاهش سطح آسیب قابل مشاهده در سازه شده است. همچنین در اثر ضربه روی نقاطی مانند محل تقاطع ریب‌ها که نسبت به فضای بین ریب‌ها، از سفتی بیشتری برخورداراند، مدت زمان برخورد کاهش و حداکثر نیروی تماس افزایش می‌یابد.

دریافت: 98/04/14

پذیرش: 98/07/29

### کلیدواژگان

پانل ساندویچی

هسته مشبک

ضربه سرعت پایین

آسیب پیشرونده

زیر برنامه نویسی VUMAT

## Experimental and numerical analysis of low-velocity impact on composite sandwich panels with grid stiffened core

Ali Davar, Reza Azarafza\*, Javad Faraji Shooa

Faculty of Materials & Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

\*P.O.B. 15875-1774, Tehran, Iran, azarmut@mut.ac.ir

### Keywords

Sandwich panel  
Grid-stiffened core  
Low-velocity impact  
Progressive damage  
VUMAT subroutines

### Abstract

Composite sandwich panels with grid stiffened core, are composed of composite face sheets and kagome type lattice core. These structures can be used as alternative to the structures reinforced with stringer, sandwich panels with honeycomb core and aluminum grid structures. In this study, experimental tests and finite element analysis using ABAQUS software are applied for low-velocity impact on grid stiffened sandwich panels. In the experimental method, two sandwich panels with grid stiffened core are manufactured and undergo drop weight impact with a hemispherical steel impactor. Also, in the numerical method, the results are compared with the three-dimensional elements and progressive damage model is applied by employing user defined material subroutines in finite element method using ABAQUS software. Making comparison between the present numerical results with experimental results, shows that the finite element method is an efficient way to reduce the time and cost for understanding the behavior of this type of structure against impact loads. The energy absorption occurs in the structures mainly due to the induced damage in the impact region of the structure. This damage may affect the top face sheets or the ribs within the core of the sandwich panel and the rigidity of the impact position, reduces the visible damaged area in the structure. Also, the impact on the points such as the ribs' intersections, which are more rigid than the space between the ribs, causes the contact time to be decreased and the maximum contact force to be increased.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Davar, A. Azarafza, R. Faraji Shooa, J., "Experimental and numerical analysis of low-velocity impact on composite sandwich panels with grid stiffened core", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 6, No.4, pp. 615-626, 2020.

## ۱- مقدمه

پانل‌های ساندویچی اصطلاحاً به آن دسته از سازه‌هایی اطلاق می‌شوند که از یک هسته مرکزی ضعیف و لایه‌های خارجی قوی تشکیل شده‌اند. معمولاً هسته ضعیف میانی از جنس فوم یا لانه زنبوری می‌باشد و پوسته‌های واقع در دو طرف هسته، از کامپوزیت‌هایی با الیاف شیشه و یا الیاف‌های دیگر هستند. امروزه استفاده از سازه‌های مشبک از جنس خود الیاف در هسته این پانل‌ها رو به افزایش است و مطالعات زیادی در مورد شناخت ویژگی‌ها و رفتارهای این سازه‌ها در مقابل انواع بارگذاری‌های استاتیکی و دینامیکی، در دنیا انجام گرفته است.

مطالعه اثرات بارهای ضربه‌ای بر روی سازه‌های صفحه‌ای دارای سابقه‌ای طولانی از حدود 200 سال قبل می‌باشد که البته 150 سال اول آن تقریباً به طور انحصاری به مطالعات تجربی اختصاص داشته است. اولین کار تحقیقاتی در مورد بارهای فشاری درون صفحه‌ای در سازه‌های ساندویچی توسط مارگور<sup>1</sup> در سال 1944 انجام شده است [1]. از آن زمان به بعد، تحقیق در مورد کامپوزیت‌ها و پانل‌های ساندویچی کامپوزیتی رونق گرفت و کتاب‌های بسیاری راجع به سازه‌های کامپوزیتی منتشر شد که یکی از این کتاب‌ها توسط آلن<sup>2</sup> در سال 1969 [2] نوشته شده است که هنوز هم به عنوان یکی از مراجع اصلی در این زمینه، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

تاکنون پانل‌های ساندویچی کامپوزیتی در معرض بارهای ضربه‌ای، به روش‌های تجربی، مدل‌سازی ریاضی و عددی، به طور گسترده‌ای مورد بررسی قرار گرفته‌اند. فن<sup>3</sup> و همکارش با استفاده از مدل آسیب پیش‌رونده<sup>4</sup> با زیربرنامه<sup>5</sup> نویسی در نرم‌افزار آباکوس<sup>6</sup>، و با در نظر گرفتن الیاف‌های چسب بین لایه‌ها، به بررسی پاسخ ضربه سرعت پایین و مکانیزم‌های شکست در یک صفحه کامپوزیتی به روش تجربی و عددی پرداخته‌اند. تحلیل‌های عددی آن‌ها نشان می‌دهد که پیاده‌سازی مود تورق صفحه کامپوزیتی بر اثر ضربه، نیاز به یک شبیه‌سازی دقیق سه بعدی دارد [3]. مطالعات سایتو و کیمپارا<sup>7</sup> تأثیرات ضربه در پانل‌های کامپوزیتی دوخته شده چند محوری، ساخته شده به روش تزریق خلاء و قالبگیری انتقالی رزین را نشان می‌دهد [4]. بیون<sup>8</sup> و همکارانش آزمون ضربه سرعت پایین را بر روی صفحات کامپوزیتی سه بعدی انجام دادند و دریافتند که سطح آسیب در کامپوزیت‌های سه بعدی نسبت به پانل‌های دو بعدی، به طور قابل توجهی کمتر است [5]. ایبکوی<sup>9</sup> و همکارانش تأثیر ضربه سرعت پایین برای تیرهای کامپوزیتی با الیاف تک جهته و عمود بر هم را تحت دماهای مختلف مطالعه کردند و به این نتیجه رسیدند که دما تأثیر زیادی بر روی پاسخ ضربه دارد و میزان آسیب بر اثر ضربه، هنگامی که دما کمتر است، افزایش می‌یابد [6].

یانگ<sup>10</sup> و همکارانش به بررسی عددی و تجربی صفحه کامپوزیتی از جنس آرامید/پوکسی در ضخامت‌های مختلف و تحت انرژی‌های مختلف در معرض ضربه سرعت پایین پرداختند. نتایج تجربی آن‌ها نشان داد که انرژی ضربه‌زننده تأثیر بسیار زیادی بر شکل تاریخچه نیروی تماس دارد، به گونه‌ای که هنگامی که انرژی ضربه‌زننده کم است، نمودار نیرو-زمان بدون نوسان و به

شکل نیم سینوسی است. در حالی که افزایش انرژی ضربه باعث می‌شود نمودار، دارای نوسانات بالایی باشد و اغلب پس از حداکثر نیروی تماس، یک افت ناگهانی در نمودار اتفاق می‌افتد. همچنین، حداکثر نیروی تماس، با افزایش انرژی ضربه و افزایش ضخامت صفحات، افزایش می‌یابد. معمولاً پس از ضربه با انرژی ضربه پایین، در سطح صفحه فرورفتگی و آسیبی قابل مشاهده نیست، تا اینکه انرژی ضربه‌زننده، به اندازه کافی افزایش یابد. همچنین سطح آسیب به وجود آمده در سطح پایینی صفحات، پس از ضربه، به شکل واضح و معمولاً به صورت بیضوی و در راستای الیاف صفحه پایینی است [7].

لی و جونز<sup>11</sup> با بررسی پاسخ ضربه در سرعت‌های پایین برای یک سازه ساندویچی با هسته هیبریدی با پوشش لاستیکی، دریافتند که استفاده از چنین هسته‌ای در مقایسه با یک هسته از جنس اپوکسی خالص و یا هر جنس دیگری بدون پوشش لاستیکی، انرژی ضربه‌ای خیلی بیشتری جذب می‌کند [8]. در مطالعه‌ای دیگر، استفاده از لاستیک خرد شده در هسته پانل‌ها وضعیت را بهبود داده است [9]. چن و سای<sup>12</sup> یک مدل المان محدود با دقت مناسب برای سازه مشبک ارائه دادند و از این مدل برای مقایسه عملکرد سازه‌های مشبک با چندلایه‌ها و ساندویچ‌ها استفاده کردند [10]. آن‌ها همچنین از این مدل برای بهینه‌سازی سازه‌های مشبک استفاده کردند. پاسخ ضربه سرعت پایین در پانل‌های ساندویچی لانه‌زنبوری<sup>13</sup> توسط کاستینی<sup>14</sup> و همکارانش به روش المان محدود مدل‌سازی شده است و دقت خوبی بین نتایج عددی با نتایج تجربی به دست آمده است [11]. تأثیر بارهای عرضی بر روی پانل‌های کامپوزیتی با ساختار مشبک توسط جدها و<sup>15</sup> و همکارانش مورد مطالعه قرار گرفت و با یک تحلیل پارامتری، با تغییر ضخامت ریب‌ها، ضخامت پوسته‌ها و فاصله ریب‌ها، پانل را بهینه‌سازی کردند [12]. آنالیزهای عددی استفاده شده در این تحلیل پارامتری نشان داد که هنگامی که پانل از سمتی که پوسته وجود دارد، مورد بارگذاری قرار بگیرد، میزان جذب انرژی افزایش می‌یابد.

ماتیالا<sup>16</sup> نیز با مطالعه تجربی بر روی یک پانل ساندویچی با هسته مشبک مربعی که فضاهای خالی هسته مشبک آن با استفاده از پرکننده‌هایی پر شده بود، به این نتیجه دست یافت که پانل‌های ساندویچی با ساختار شبکه‌ای کوچکتر در هسته، ظرفیت تحمل بار ضربه‌ای بیشتری دارند و آسیب‌های محلی وارده ناشی از ضربه نیز کم‌تر می‌شود [13].

گیوکیانگ لی<sup>17</sup> و همکارش ضربه سرعت پایین را بر روی پانل ساندویچی تمام کامپوزیتی با هسته مشبک مورد بررسی قرار دادند. برای ساخت هسته پانل، ابتدا به روش رشته پیچی خشک، الیاف در قالب مورد نظر و حول پین‌های در نظر گرفته شده، پیچیده شده و سپس ماده فوم مخلوط با رزین به آن اضافه می‌شود. برخی از نتایج بدست آمده از این تحقیق عبارتند از:

- 1- هر سلول از هسته مشبک در مقابل ضربه، یک رفتار شبه استاتیکی از خود نشان می‌دهد.
- 2- هسته مشبک و فوم پر شده درون آن، تأثیر هم‌افزا بر روی مواردی چون انتقال انرژی ضربه، جذب انرژی و ظرفیت تحمل بار دارند.

1 Marguerre

2 Allen

3 Feng

4 Progressive Damage

5 Subroutine

6 ABAQUS

7 Saito and Kimpara

8 Byun

9 Ibekwe

10 Yang

11 Li and Jones

12 Chen and Tsai

13 honeycomb

14 Castanied

15 Jadhav

16 Muthyala

17 Guoqiang Li

پیچی ساختار مشبک هسته، با استفاده از روش لایه‌گذاری تَر و به صورت دستی درون یک قالب صورت گرفته است. در شکل 1، قالب و قید و بند ساخته شده برای لایه‌گذاری هسته، جهت ایجاد نیروی کششی ثابت در الیاف، نشان داده شده است. از جنس لاستیک سیلیکونی با طرح شیارها با عمق و ابعاد مقطع، مطابق نقشه، برای قالب استفاده شده است. الیاف مورد استفاده برای پیچش، ابتدا در حمام رزین به طور کامل با رزین آغشته شده‌اند. به منظور آغشته‌سازی بهتر الیاف در مدت زمان حضور در حمام، دمای رزین توسط یک گرم‌کن، 40 درجه سانتی‌گراد نگه داده شده است.

پس از پایان لایه‌چینی هسته مشبک، به منظور پخت رزین، سازه در اتوکلاوی مطابق شکل 2 و تحت سیکل پخت با شرایط دو ساعت در دمای 80 درجه سانتی‌گراد و سه ساعت در دمای 140 درجه سانتی‌گراد قرار داده شده است. هسته مشبک ساخته شده، در شکل 3 نشان داده شده است.

پس از ساخت هسته مشبک، صفحات طرفین پانل ساخته شده است. به منظور یکسان بودن شرایط ساخت این صفحات، طی یک مرحله و به صورت یک صفحه واحد ساخته شده‌اند. پس از آماده شدن هسته مشبک و صفحات، می‌توان این دو جزء را به یکدیگر چسباند تا پانل ساندویچی کامل شود. صفحات فوقانی و تحتانی توسط رزین اپوکسی سرد، به هسته چسبانده شده‌اند و با قرار دادن وزنه‌هایی بر روی آن‌ها، زمان کافی برای پخت کامل رزین و برقراری اتصال کامل، داده شده است. شکل 4 پانل ساندویچی نهایی را پس از تکمیل شدن فرآیند پخت و برش لبه‌ها تا رسیدن به اندازه نهایی نشان می‌دهد.

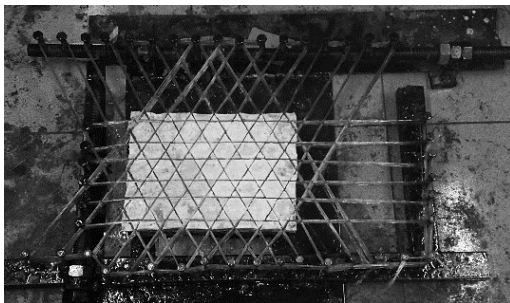


Fig. 1 Fixtures for tensioning fibers after placement in the rubber mold  
شکل 1 قید و بند جهت اعمال کشش الیاف پس از لایه‌گذاری درون قالب لاستیکی



Fig. 2. Curing grid stiffened core in autoclave

شکل 2 پخت هسته مشبک در درون اتوکلاو

3- افزایش مساحت سلول باعث کاهش جذب انرژی آن می‌شود و استحکام باقیمانده پانل را کاهش می‌دهد. لذا برای مساحت سلول‌ها باید مقدار بهینه را به دست آورد.

آذرفزا و همکارانش تست خمش سه نقطه‌ای ورق ساندویچی فلزی و کامپوزیتی با هسته مشبک را به صورت تجربی بررسی نمودند و نشان دادند که حتی بعد از واماندگی رویه‌ها، هسته مشبک به تحمل بار ادامه می‌دهد. و همچنین نشان دادند که تغییر جنس رویه‌ها از پارچه با الیاف شیشه به کربن، به جای افزایش ضخامت رویه‌های الیاف شیشه، در سازه‌های ساندویچی نتیجه بهتری دارد [14]. احمد رضا قادری و همکارانش به بررسی تجربی نفوذ شبه استاتیکی بر روی پانل ساندویچی کامپوزیتی ساخته شده از الیاف بازالت با لحاظ نانوگرافن پرداختند و نشان دادند که میزان جذب انرژی پانل ساندویچی کامپوزیتی حاوی نانوگرافن بالاست و نمونه با درصد وزنی 0.7 نانوگرافن بیشترین جذب انرژی را قبل از شکست پانل ساندویچی کامپوزیتی و کمترین آسیب را بعد از نفوذ کامل دارد [15]. محمد هدایتیان و همکارانش به بررسی عددی و تجربی نفوذ پرتابه با سرعت بالا در کامپوزیت‌های مشبک استوانه‌ای پرداختند و نشان دادند که در سازه‌های مشبک، تقویت‌کننده‌ها برای هر سلول، همانند تکیه‌گاه الاستیک عمل می‌کنند، که نتیجه آن، کاهش جابجایی سازه در محل برخورد و کاهش تغییر شکل کلی و موضعی سازه می‌باشد [16]. کرامت ملک‌زاده و همکارانش مدل تحلیلی را برای پیش‌بینی پاسخ دینامیکی ورق ساندویچی با صفحات فوقانی و تحتانی از جنس الیاف-فلز تحت ضربه با سرعت پایین ارائه دادند. نتایج نشان داد که در انرژی ثابت، افزایش مقاومت به ضربه در سازه، مستقل از سرعت و جرم ضربه‌زننده می‌باشد. همچنین با کاهش ضخامت صفحات در سازه‌های ساندویچی منحنی تغییرات ماکزیمم نیروی برخورد-فرورفتگی، به حالت خطی نزدیک‌تر می‌شود [17].

تحقیقات گذشته در زمینه ضربه سرعت پایین در پانل‌های ساندویچی، عموماً بر روی پانل‌هایی با هسته‌های لانه‌زنبوری و یا ساختارهای خاصی از هسته بوده است. پانل‌های ساندویچی با هسته مشبک کامپوزیتی در کاربردهای عملی، برتری خوبی نسبت به پانل‌های ساندویچی با سایر هسته‌ها از خود نشان داده‌اند. به منظور شناخت بیشتر این پانل‌ها، لازم است رفتار این نوع سازه‌ها در مقابل بارهای دینامیکی و ضربه نیز مورد بررسی قرار گیرد. این تحقیق با رویکرد ساخت پانل ساندویچی تمام کامپوزیت با هسته مشبک، و همچنین استفاده از مدل‌های عددی دقیق و سه بعدی، به بررسی تجربی و عددی این پانل‌ها پرداخته است. هسته مشبک پانل ساندویچی، با استفاده از روش رشته پیچی دستی و با الیاف پیوسته و آغشته‌سازی همزمان، ساخته شده است. پیچش پیوسته به همراه کشش در الیاف، می‌تواند یک ساختار مشبک مستحکم را به وجود آورد. همچنین در این تحقیق برای مدل‌سازی عددی ضربه و آسیب، از مدل‌های سه بعدی آسیب پیش‌رونده در مواد کامپوزیتی و با کمک برنامه‌نویسی در نرم‌افزار آباکوس، استفاده شده است.

## 2- ساخت پانل ساندویچی با هسته مشبک کامپوزیتی

برای ساخت هسته پانل‌ها از الیاف شیشه و رزین اپوکسی با پخت گرم<sup>1</sup> استفاده شده است. برای ساخت صفحات دو طرف پانل‌های ساندویچی نیز الیاف شیشه‌ای به صورت پارچه تک جهت استفاده شده است و رزین مورد استفاده در این صفحات از نوع رزین اپوکسی با پخت سرد<sup>2</sup> می‌باشد. رشته

<sup>1</sup> Hot Cure

<sup>2</sup> Cold Cure

نتایج به شمار می‌آیند. به طوری که می‌توان گفت امروزه هر یک از شاخه‌های علوم، به روش‌های مستقیم و غیرمستقیم از این ابزار قوی بهره می‌گیرند. با توجه به قابلیت‌های نرم‌افزار آباکوس، در تحقیق حاضر، مدل‌سازی ضربه و آسیب ناشی از آن، به کمک این نرم‌افزار صورت پذیرفته است.

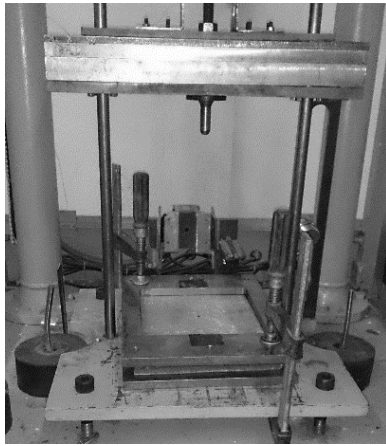


Fig. 5 Drop weight impact tester

شکل 5 دستگاه تست ضربه سقوط آزاد

### 3-1- اعتبارسنجی روش مدل‌سازی عددی ضربه بر روی کامپوزیت‌ها به کمک تحقیقات گذشته

جهت حصول اطمینان از قابلیت داده‌برداری کامل توسط دستگاه تست ضربه، ابتدا باید به کمک نرم‌افزار، حداکثر نیرو و مدت زمان تماس ضربه روی نمونه ساخته شده، پیش‌گویی شوند. لذا ابتدا روش مدل‌سازی در نرم‌افزار، باید اعتبارسنجی شود. به این منظور، در این بخش به مقایسه نتایج تحلیل ضربه سرعت پایین روی صفحه کامپوزیتی از جنس آرامید/اپوکسی<sup>1</sup> با نتایج تجربی و عددی مرجع [7] پرداخته شده است. در این مسأله، ضربه‌زننده عبارت است از یک کره به قطر 12.7 میلی‌متر و جرم 5.34 کیلوگرم که با سرعت 1.94 متر بر ثانیه (معادل انرژی برخورد 10 ژول) به صفحه کامپوزیتی برخورد می‌کند. همچنین آرایش الیاف به صورت  $45/0/-45/90$ <sub>2s</sub>، ضخامت هر لایه 0.125 میلی‌متر و ضخامت کل صفحه، 2 میلی‌متر است. در شکل 6، مدل صفحه کامپوزیتی و ضربه‌زننده نمایش داده شده‌اند.

در تحقیق حاضر، برای مش‌بندی صفحه کامپوزیتی از المان‌های سه بعدی (C3D8R) برای استفاده شده است. بین لایه‌های کامپوزیتی به ضخامت 0.01 میلی‌متر، لایه چسب با المان‌های COHD8 در نظر گرفته شده است. تماس بین گلوله و صفحه از نوع صفحه به صفحه اختیار شده، ضریب اصطکاک برابر 0.5 [18]، بین گوی ضربه‌زننده و صفحه کامپوزیتی اعمال گردیده است. همچنین با کمک زبان برنامه‌نویسی فرترن، معادلات آسیب، بر مبنای تئوری هاشین [19] اعمال شده‌اند. در شکل 7، نتایج تحلیل عددی انجام شده در تحقیق حاضر با استفاده از دو نوع المان دو بعدی (SC8R) و سه بعدی (C3D8R)، در مقایسه با نتایج مرجع [7]، نشان داده شده‌اند.

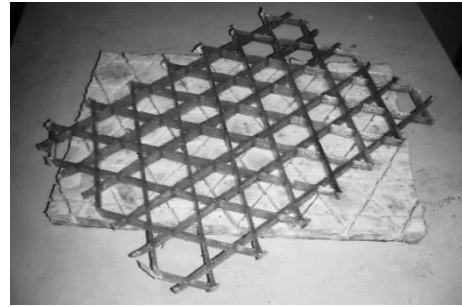


Fig. 3. Composite grid stiffened core made for sandwich panel

شکل 3 هسته مشبک کامپوزیتی ساخته شده برای پانل ساندویچی

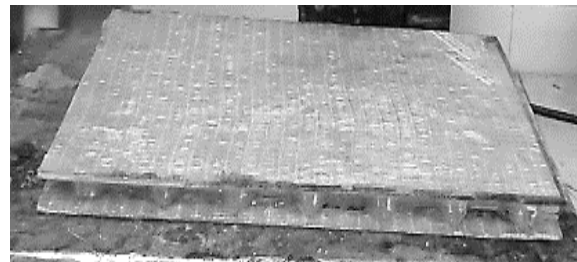


Fig. 4 Sandwich panels after complete curing process and trimming

شکل 4 پانل ساندویچی تکمیل شده پس از فرآیند پخت و برش لبه‌ها

### 3-2- تست تجربی ضربه سقوط آزاد

پس از آماده سازی پانل ساندویچی، تست ضربه سقوط آزاد بر روی پانل انجام شده است. دستگاه تست ضربه مطابق شکل می‌باشد.

تست ضربه با انتخاب پارامترهای زیر بر روی هر سه پانل، به صورت مشابه انجام شده است:

- جرم ضربه‌زننده: 11.6 کیلوگرم

- ارتفاع ضربه‌زننده: 30 سانتی‌متر

- شکل ضربه‌زننده: سنبه با نوک نیم‌کروی به قطر 16 میلی‌متر

برای انجام تست ضربه، از قید و بند مخصوص استفاده شده است که لبه‌های پانل را در بر گرفته، به نحوی که در وسط آن یک مربع به ابعاد  $20 \times 20$  سانتی‌متر، قابل رؤیت است. پس از قرار گرفتن پانل‌ها به همراه قید و بند در دستگاه تست، با دو عدد گیره بسته شده، فشار تماسی در راستای عمودی روی سطوح لبه‌های پانل، به صورت یکنواخت اعمال شده است (شکل 5). بدین منظور، صاف بودن سطح قطعه و صفحات قید و بند، حائز اهمیت است. این مهم به کمک ابزار تراز حبابی انجام شده است. برخی محدودیت‌های دستگاه تست ضربه عبارتند از حداکثر شتاب قابل ثبت 100g (متر بر مجذور ثانیه) و حداکثر زمان ثبت اطلاعات، 26 میلی‌ثانیه است. گام‌های زمانی داده‌برداری برای ثبت نیروی تماس، برابر  $1.3e-5$  ثانیه است. برای محاسبه نیروی ضربه، جرم ضربه‌زننده در شتاب اندازه‌گیری شده ضرب شده است.

### 3-3- بررسی عددی

در دنیای صنعتی امروز، همزمان با پیشرفت تکنولوژی و تولید وسایل و قطعات پیچیده و حساس، لزوم استفاده از روش‌های علمی مناسب برای کاهش هزینه و زمان، مطرح می‌باشد. استفاده از نرم‌افزارهای تخصصی در تحلیل مسایل تحقیقاتی و صنعتی، ابزاری قوی برای تخمین و پیش‌بینی

<sup>1</sup> Aramid/epoxy

میلی متر می باشد. صفحات طرفین پانل هر کدام دارای سه میلی متر ضخامت بوده، هسته مشبک 15 میلی متر از ضخامت پانل ساندویچی را به خود اختصاص داده است. برای مدل کردن هسته به صورت یک مدل سه بعدی، ابتدا یک سلول واحد از کل هسته مدل شده، سپس با تکرار در دو جهت، کل هسته، مدل شده است. در شکل 8 سلول واحد مورد استفاده برای تشکیل هسته پانل ها نشان داده شده است.

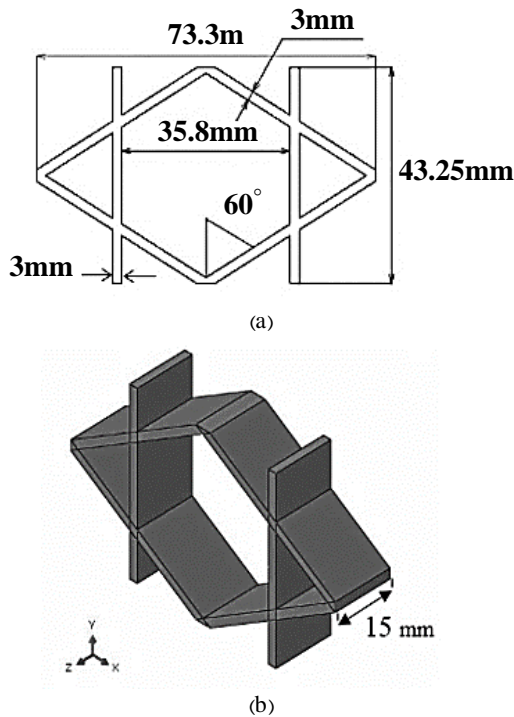


Fig. 8 Geometric dimensions of the unit cells of the core panel; a) Front view; b) Isometric view

شکل 8 ابعاد هندسی سلول واحد تشکیل دهنده هسته پانل، الف) نمای روبرو، ب) نمای ایزومتریک

همچنین شکل 9، هسته مشبک کامل نهایی را نشان می دهد.

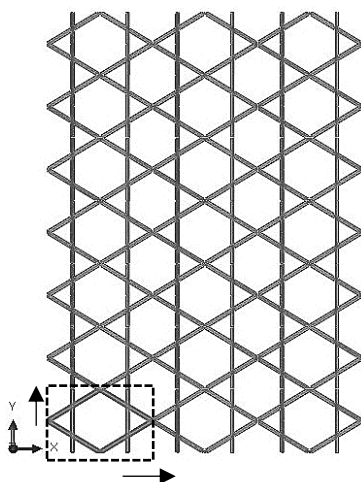


Fig. 9 Modeling core of the sandwich panels using a rectangular array of the unit cell

شکل 9 مدل سازی هسته پانل ساندویچی با استفاده از آرایه مستطیلی سلول واحد

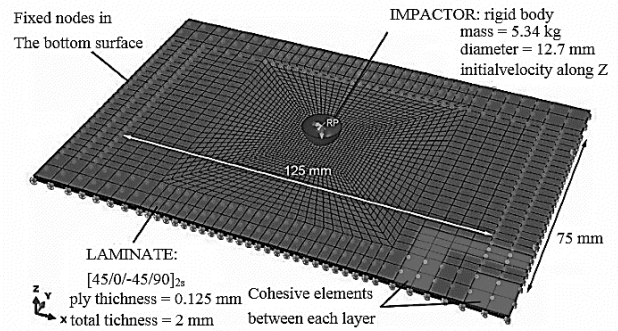


Fig. 6 Detailed finite element model of composite plate made of aramid / epoxy [7]

شکل 6 جزئیات مدل المان محدود صفحه کامپوزیتی از جنس آرامید/اپوکسی [7]

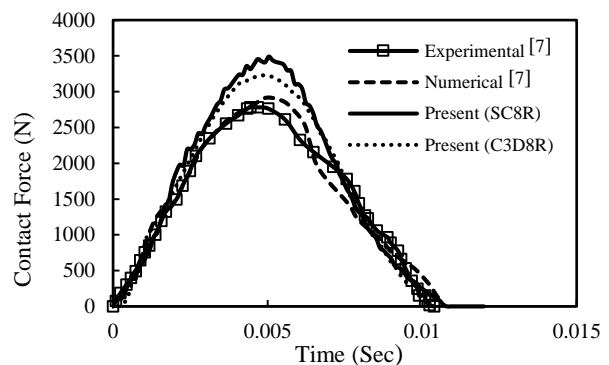


Fig. 7 Comparing the results of the impact response for composite plate made of aramid / epoxy (considering the effect of impact damage)

شکل 7 مقایسه نتایج پاسخ ضربه برای صفحه کامپوزیتی از جنس آرامید/اپوکسی (با نظر گرفتن اثر آسیب ناشی از ضربه)

### 3-2- حل عددی ضربه بر روی پانل ساندویچی

در این بخش، به مسأله اصلی در تحقیق حاضر یعنی شبیه سازی تست تجربی ضربه سقوط آزاد ذکر شده در بخش 1-2 پرداخته شده، موضوع پاسخ ضربه سرعت پایین و آسیب بر روی پانل ساندویچی با هسته مشبک و از جنس کامپوزیت شیشه/اپوکسی، مورد تحلیل عددی قرار گرفته است. فرضیات زیر در این تحلیل مد نظر قرار گرفته اند:

- ضربه زننده به صورت یک جسم صلب کروی در نظر گرفته شده است و تمامی جرم های متعلق به دستگاه تست ضربه، به صورت معادل و در مرکز جرم کره در نظر گرفته شده است.
- تماس بین ضربه زننده و پانل ساندویچی، از نوع صفحه به صفحه و با ضریب اصطکاک 0.5 در نظر گرفته شده است.
- از اثر نیروی گرانش در حین ضربه صرف نظر شده است.
- شرایط مرزی اعمال شده در تحلیل عددی، با توجه به شرایط واقعی تست، معادل سازی شده اند.

### 3-2-1- مدل سازی هندسی پانل ساندویچی

پانل های ساندویچی مورد مطالعه در این تحقیق، از دو بخش هسته مشبک و صفحات فوقانی و تحتانی تشکیل شده است. با توجه به نمونه پانل های ساخته شده، ابعاد کلی پانل 220x303 میلی متر مربع بوده و ضخامت کلی پانل 21

کلی تغییر خواهد داد. لذا در تعیین خواص، باید به هر دو موضوع لایه چینی و جهت لایه‌ها توجه داشت.

برای مواد کامپوزیتی، در صورتی که هندسه جسم در نرم‌افزار به صورت سه بعدی مدل شده باشد، می‌توان از المان‌های پوسته‌ای پیوسته<sup>2</sup> و از تئوری شکست هاشین موجود در نرم‌افزار آباکوس استفاده کرد. همچنین می‌توان از المان‌های آجری<sup>3</sup> نیز استفاده نمود. در این المان‌ها برای مدلسازی شکست، باید از زیربرنامه نویسی کمک گرفت.

در این تحقیق برای مدلسازی صفحات دو طرف پانل ساندویچی، طبق مدل تجربی ساخته شده، سه لایه از الیاف تک‌جهته با چینش متقارن [0/90/0] در نرم‌افزار ایجاد شده و خواص الاستیک و شکست مواد، مطابق با جدول 1 وارد شده‌اند. در صورتی که برای مشبندی بخواهیم از المان‌های آجری استفاده کنیم، می‌بایست هر لایه به صورت یک مکعب مستطیل مجزا مدلسازی شود و با استفاده از قابلیت نرم‌افزار، جهت یا زاویه لایه، به آن اختصاص یابد. در صورت استفاده از المان پوسته‌ای پیوسته، می‌توان هر سه لایه را باهم و به عنوان یک صفحه با ضخامت معادل با ضخامت سه لایه، مدل کرد و ترتیب لایه‌ها و همچنین جهت الیاف، توسط نرم‌افزار به مدل تخصیص داده می‌شود. برای مدلسازی هسته مشبک، تعیین جهت در هر یک از ریب‌ها (دستگاه مختصات مادی) باید مطابق شکل 11، به صورت جداگانه انجام شود. در محل‌های تقاطع نیز از همین دستگاه مختصات استفاده شده است. لیکن تصویر مدول‌های سفتی دو ریب متقاطع، به عنوان مدول در محل تقاطع وارد شده است.

مطالعات انجام شده و نتایج تجربی نشان داده است که در سازه‌های مشبک، محل تقاطع ریب‌ها نسبت به سایر نقاط ساختار مشبک، ضعیف‌تر می‌باشند و در بارگذاری‌های استاتیکی، معمولاً آغاز شکست‌ها در مجاورت محل‌های تقاطع صورت می‌گیرند [21]. لذا بر این اساس، در این تحقیق به منظور مدلسازی واقعی‌تر شکست یا خرابی، خواص استحکام در محل تقاطع ریب‌ها، معادل 70٪ خواص استحکام در محل ریب‌ها در نظر گرفته شده است. خواص مواد مورد استفاده در ریب‌ها، مطابق جدول 2 می‌باشد.

جدول 1 خواص مکانیکی اندازه‌گیری شده صفحات طرفین پانل ساندویچی

Table 1 Mechanical properties measured for side facesheets of the sandwich panel

| خواص الاستیک            | استحکام |             |     |
|-------------------------|---------|-------------|-----|
| $E_1$ (GPa)             | 17.8    | $X_t$ (MPa) | 450 |
| $E_{2z} = E_3$ (GPa)    | 4.2     | $X_c$ (MPa) | 283 |
| $\nu_{12} = \nu_{13}$   | 0.275   | $Y_t$ (MPa) | 24  |
| $\nu_{23}$              | 0.38    | $Y_c$ (MPa) | 80  |
| $G_{12} = G_{13}$ (GPa) | 3.6     | $S_L$ (MPa) | 21  |
| $G_{23}$ (GPa)          | 2.2     | $S_T$ (MPa) | 21  |

<sup>2</sup> Continuum shell

<sup>3</sup> Solid

مدل نهایی پانل ساندویچی مطابق شکل 10 می‌باشد.

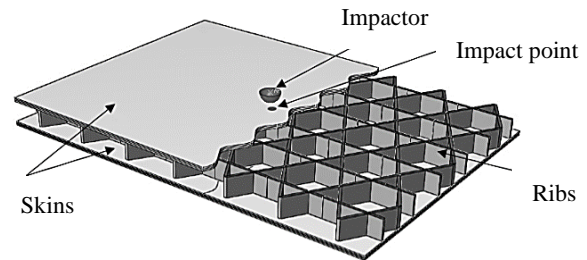


Fig. 10 The impact model of the sandwich panel

شکل 10 مدل ضربه روی پانل ساندویچی

### 3-2-2- مدل‌سازی ضربه‌زننده

در ادامه به مدلسازی ضربه‌زننده پرداخته شده است. سه روش برای مدلسازی ضربه‌زننده وجود دارد [20]:

1- در روش اول که کاربرد بیشتری دارد، ضربه‌زننده به صورت صلب فرض می‌شود و هیچ‌گونه خواص مکانیکی برای ضربه‌زننده تعریف نمی‌شود، که در نتیجه، یک صلبیت بی‌نهایت به ضربه‌زننده اعمال می‌شود.

2- در روش دوم که یکی از روش‌های متداول مدلسازی ضربه‌زننده می‌باشد، ضربه‌زننده به صورت صلب فرض می‌شود، ولی خواص مکانیکی مورد نظر نیز برای آن تعریف می‌شود. در نتیجه، صلبیت واقعی برای ضربه‌زننده تعریف می‌شود.

3- در روش سوم، ضربه‌زننده به صورت جسمی شکل‌پذیر و با خواص فیزیکی معین تعریف می‌شود. استفاده از این روش، منجر به شبیه‌سازی واقعی‌تر برخورد می‌شود، اما نیاز به مدل سه بعدی ضربه‌زننده بوده و زمان حل مسأله را به طور قابل توجهی افزایش خواهد داد.

در این تحقیق نیز به منظور کاهش زمان حل، ضربه‌زننده با استفاده از روش دوم و به عنوان یک جسم صلب مدلسازی شده است.

### 3-3-3- مدل‌سازی تماس ضربه

در این تحقیق به منظور شبیه‌سازی ضربه بین ضربه‌زننده و پانل ساندویچی، تماس صفحه به صفحه در نظر گرفته شده است. برای تعریف خواص تماس در راستای مماسی بین گلوله ضربه‌زننده و صفحه پانل ساندویچی، ضریب اصطکاک مساوی 0.5 انتخاب شده است [18]. همچنین برای راستای عمودی بین ضربه‌زننده و پانل ساندویچی، شرایط تماس، از نوع سخت<sup>1</sup> انتخاب شده است.

### 3-2-4- اختصاص دادن خواص مواد و لایه چینی

تعیین مواد برای سازه‌های کامپوزیتی نسبت به سازه‌های فلزی از اهمیت بیشتری برخوردار است. چرا که در سازه‌های کامپوزیتی، علاوه بر این که نحوه لایه‌چینی، تأثیر زیادی بر نتایج تحلیل دارد، انتخاب جهت نیز، به دلیل متفاوت بودن خواص کامپوزیت‌ها در جهات مختلف، پاسخ‌ها را به طور

<sup>1</sup> Hard Contact

که برهم کنش تنش در لایه‌ها را در نظر گرفته است. در ذیل، موده‌های مختلف این معیار آورده شده است:

$$\sigma_{22} > 0 \text{ برای مود شکست کششی ماتریس}$$

$$\left(\frac{\sigma_{22}}{\sigma_{22T}^u}\right)^2 + \left(\frac{S_{12}}{S_{12}^u}\right)^2 + \left(\frac{S_{23}}{S_{23}^u}\right)^2 \geq 1 \quad (1)$$

$$\sigma_{22} < 0 \text{ برای مود شکست فشاری ماتریس}$$

$$\left(\frac{\sigma_{22}}{\sigma_{22C}^u}\right)^2 + \left(\frac{S_{12}}{S_{12}^u}\right)^2 + \left(\frac{S_{23}}{S_{23}^u}\right)^2 \geq 1 \quad (2)$$

$$\sigma_{11} > 0 \text{ برای مود شکست کششی الیاف}$$

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{\sigma_{11T}^u}\right)^2 + \left(\frac{S_{12}}{S_{12}^u}\right)^2 + \left(\frac{S_{13}}{S_{13}^u}\right)^2 \geq 1 \quad (3)$$

$$\sigma_{11} < 0 \text{ برای مود شکست فشاری الیاف}$$

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{\sigma_{11C}^u}\right)^2 \geq 1 \quad (4)$$

$$\sigma_{11} < 0 \text{ مود شکست برشی الیاف-ماتریس}$$

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{\sigma_{11C}^u}\right)^2 + \left(\frac{S_{12}}{S_{12}^u}\right)^2 + \left(\frac{S_{13}}{S_{13}^u}\right)^2 \geq 1 \quad (5)$$

$$\sigma_{33} > 0 \text{ مود شکست تورق برای}$$

$$\left(\frac{\sigma_{33}}{\sigma_{33T}^u}\right)^2 + \left(\frac{S_{13}}{S_{13}^u}\right)^2 + \left(\frac{S_{23}}{S_{23}^u}\right)^2 \geq 1 \quad (6)$$

$$\sigma_{33} < 0 \text{ مود شکست تورق برای}$$

$$\left(\frac{\sigma_{33}}{\sigma_{33C}^u}\right)^2 + \left(\frac{S_{13}}{S_{13}^u}\right)^2 + \left(\frac{S_{23}}{S_{23}^u}\right)^2 \geq 1 \quad (7)$$

### 3-2-6- قوانین کاهش خواص مواد

با توجه به این‌که در ناحیه‌هایی که در آنها شکست رخ می‌دهد، دیگر خواص مکانیکی ماده به صورت دست نخورده باقی نمی‌ماند، در تحلیل‌هایی که به بررسی آسیب پیشرونده پرداخته می‌شود، می‌بایست خواص ماده با توجه به نوع آسیب، کاهش یابد تا نتایج آن با واقعیت تطابق پیدا کند. با توجه به اینکه در گذشته، تحلیل‌ها به صورت دو بعدی انجام شده است، لذا قوانین کاهش خواص مواد نیز به صورت دو بعدی ارائه شده است که از جمله آنها می‌توان به مدل چانگ و لیزارد [22]، اشاره کرد که در آن به بررسی پنج مود شکست کششی و فشاری الیاف، کششی و فشاری ماتریس و برشی الیاف و ماتریس پرداخته شده، قوانین کاهش خواص ماده با توجه به مود شکست رخ داده، اعمال شده است. در سال‌های بعد، با گسترش مدل‌ها و تحلیل‌ها به صورت سه بعدی، قوانینی سه بعدی نیز منتشر گردید، به طوری که بعضی از آن‌ها ترکیبی از قوانین گذشته را مورد استفاده قرار دادند یا اینکه از در مورد مودهایی خاص، قوانینی جدید اتخاذ کردند [23]. در این تحقیق، مدل کاهش خواص بلاکتر [24] مورد استفاده قرار گرفته است. از مهم‌ترین خصوصیات این مدل برای کاهش خواص ماده، در نظر گرفتن تمامی موده‌های شکست همچون شکست فشاری و کششی الیاف، شکست فشاری و کششی ماتریس، شکست فشاری و کششی جدایی یا تورق لایه‌ها و در نهایت مود شکست برشی الیاف و ماتریس می‌باشد که در این صورت، برای مد نظر قرار

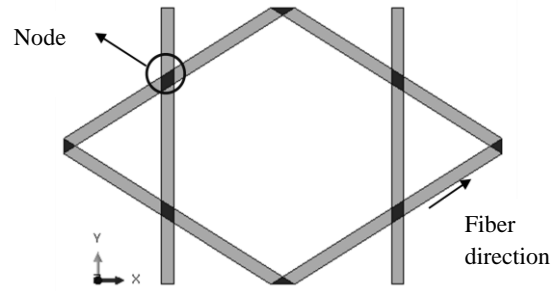


Fig. 11 Determination of material orientation for assigning material properties for the ribs

شکل 11 تعیین جهت برای تخصیص خواص مواد برای ریب‌ها

جدول 2 خواص مکانیکی اندازه‌گیری شده ریب‌های هسته مشبک پانل ساندویچی

Table 2 Mechanical properties measured for ribs of the grid stiffened core of the sandwich panel

| خواص الاستیک            | استحکام |             |             |
|-------------------------|---------|-------------|-------------|
| $E_1$ (GPa)             | 22.5    | $X_t$ (MPa) | <b>514</b>  |
| $E_2 = E_3$ (GPa)       | 7.63    | $X_c$ (MPa) | <b>300</b>  |
| $\nu_{12} = \nu_{13}$   | 0.22    | $Y_t$ (MPa) | <b>81.7</b> |
| $\nu_{23}$              | 0.29    | $Y_c$ (MPa) | <b>197</b>  |
| $G_{12} = G_{13}$ (GPa) | 2.37    | $S_L$ (MPa) | <b>69</b>   |
| $G_{23}$ (GPa)          | 3.13    | $S_T$ (MPa) | <b>69</b>   |

### 3-2-5- اعمال آسیب برای مواد کامپوزیتی به کمک زیربرنامه‌نویسی

در شبیه‌سازی عددی به کار گرفته شده در این تحقیق، به منظور حصول حل‌های دقیق از پاسخ ضربه، از روابط سه بعدی آسیب پیشرونده در مواد کامپوزیتی با کمک تئوری هاشین<sup>1</sup> استفاده شده است. بررسی موده‌های شکست، به کمک زیربرنامه به زبان فرترن<sup>2</sup> انجام شده است که قابلیت ارتباط بین زیربرنامه موجود در حین حل، در نرم افزار آباکوس وجود دارد. در این زیربرنامه، پس از فراخوانی تنش‌ها، به بررسی موده‌های شکست پرداخته شده است. در صورتی که هر یک از موده‌های مورد نظر رخ دهد، با توجه به قوانینی که به منظور کاهش خواص ماده با توجه به آن مود شکست وجود دارد، خواص مواد کاهش می‌یابد. در صورتی که مود شکستی رخ ندهد و یا پس از اعمال کاهش خواص مواد، بار افزایش می‌یابد و سپس تنش‌ها و موده‌های شکست، مجدداً بررسی می‌شوند و این فرآیند، تا شکست نهایی ادامه می‌یابد. این معیار که به صورت سه بعدی در نظر گرفته شده است، از موده‌های شکست مختلفی شامل مود شکست کششی و فشاری الیاف، مود شکست کششی و فشاری ماتریس، مود شکست برشی و مود شکست کششی و فشاری تورق تشکیل شده است. معیار هاشین [15,18,19] از جمله معیارهایی است

<sup>1</sup> Hashin

<sup>2</sup> Fortran



استفاده شده است. در واقع، برای ریب‌ها از المان‌های شش وجهی<sup>۱</sup> و تکنیک المان‌بندی جارویی<sup>۲</sup> و برای صفحات طرفین پانل، از المان‌های شش وجهی و تکنیک المان‌بندی ساختار یافته<sup>۳</sup> استفاده شده است. همه‌ی المان‌های فوق، سه بعدی بوده و در نرم‌افزار آباکوس با عنوان المان C3D8R شناخته می‌شوند. در شکل 13 و شکل 14 به ترتیب، یک سلول واحد از ریب‌های هسته مشبک و صفحات پانل ساندویچی، پس از مش‌بندی نشان داده شده‌اند. نکته‌ی قابل ذکر برای مش‌بندی صفحات طرفین پانل این است که با حرکت از سمت مرزها به طرف مرکز محل برخورد گلوله، ابعاد المان‌ها به صورت تدریجی کوچک‌تر انتخاب شده است که باعث افزایش دقت پاسخ‌ها و همچنین کاهش زمان حل نرم‌افزار در مقایسه با مدل غیربهرینه‌ای که در آن، ابعاد تمام المان‌ها به کوچکی ابعاد المان‌های مرکز برخورد باشد، خواهد شد.

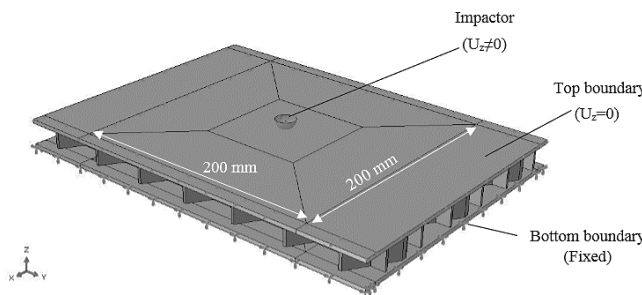


Fig. 12 Detailed boundary conditions in the finite element model

شکل 12 جزئیات شرایط مرزی در مدل المان محدود

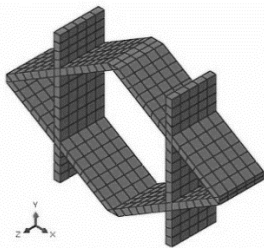


Fig. 13 Element mesh of a unit cell of the ribs of grid core of sandwich panels

شکل 13 مش‌بندی یک سلول واحد از ریب‌های هسته مشبک پانل ساندویچی

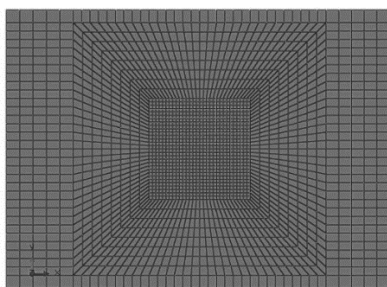


Fig. 14 Element mesh pattern of the facesheets at the two sides of the sandwich panel

شکل 14 الگوی مش‌بندی صفحات طرفین پانل ساندویچی

دادن تمامی موده‌ها، نیاز به استفاده ترکیبی از مدل‌ها وجود ندارد و در سال‌های اخیر، این مدل مورد استفاده قرار گرفته است [25]. مطابق جدول 3، بر اساس هر نوع مود شکستی که رخ می‌دهد، ضرایب کاهش خواص در نظر گرفته شده است تا پس از ایجاد مود شکست مورد نظر، خواص مکانیکی ماده با اعمال این ضرایب، کاهش یابند. در مورد ضرایب پواسون، با توجه به کاهش‌ی که در مدول مربوط به آنها رخ داده است، کاهش می‌یابند.

جدول 3 ضرایب کاهشده خواص ماده در موده‌های مختلف شکست [24]

Table 3 Degradation coefficients for material properties at different failure modes [24]

| مود شکست     | ضرایب کاهش      |                 |                 |                 |                 |                 |
|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|              | E <sub>11</sub> | E <sub>22</sub> | E <sub>33</sub> | G <sub>12</sub> | G <sub>23</sub> | G <sub>13</sub> |
| کششی الیاف   | 0.01            | 0.01            | 0.01            | 0.01            | 0.01            | 0.01            |
| فشاری الیاف  | 0.01            | 0.01            | 0.01            | 0.01            | 0.01            | 0.01            |
| کششی ماتریس  | 1.00            | 0.01            | 1.00            | 0.20            | 0.01            | 0.20            |
| فشاری ماتریس | 1.00            | 0.01            | 1.00            | 0.20            | 0.01            | 0.20            |
| برشی الیاف   | 1.00            | 0.01            | 1.00            | 0.01            | 1.00            | 0.01            |

### 3-2-7- شرایط مرزی و بارگذاری

در این بخش، بارگذاری و شرایط مرزی مشابه و مطابق با شرایط عملی در تست‌های تجربی اعمال شده است. در این تحقیق، تنها بارگذاری اعمالی، سقوط آزاد یک وزنه افتان با جرم مشخص می‌باشد. همان‌گونه که در بخش‌های قبل نیز اشاره شد، در تحلیل المان محدود، می‌توان به جای قرار دادن وزنه در یک ارتفاع مشخص، سرعت لحظه برخورد را برای جسم ضربه‌زننده تعریف نمود. لذا برای ضربه‌زننده در راستای برخورد، سرعت معادل ارتفاع‌ها شدن (طبق رابطه  $V = \sqrt{2gh}$ ) تعریف شده است.

مطابق با تست تجربی، به منظور انجام تست ضربه، پانل ساندویچی در یک فیکسچر با ابعاد داخلی 200×200 میلی‌متر مربع قرار گرفته است. همان‌طور که پیش‌تر نیز ذکر شد، ابعاد پانل‌ها حدود 220×303 میلی‌متر مربع می‌باشد که با قرار دادن در این فیکسچر، یک مربع به ابعاد گفته شده در وسط پانل، در معرض ضربه خواهد بود و مابقی پانل در میان دو صفحه بالایی و پایینی فیکسچر، کاملاً تثبیت شده است. هنگام انجام تست ضربه، صفحه زیرین این فیکسچر، بر روی صفحه‌ی صلب دستگاه تست قرار داده شده است و صفحه بالایی فیکسچر نیز توسط دو عدد گیره، به صورت قطری در دو نقطه، این صفحه را محکم به پایه صلب، نگه داشته است.

به منظور اعمال شرایط مرزی در نرم‌افزار، بخش‌هایی از صفحه زیرین پانل ساندویچی که در تماس با صفحه پایینی فیکسچر قرار می‌گیرد، در تمام جهات مقید شده است و بخش‌هایی از صفحه فوقانی پانل ساندویچی که در تماس با صفحه بالایی فیکسچر قرار می‌گیرد، در جهت عمود بر صفحه پانل، مقید شده است. شکل 12، جزئیات شرایط مرزی اعمال شده در نرم‌افزار المان محدود را نشان می‌دهد.

### 3-2-8- مش‌بندی

مش‌بندی سازه از نظر رسیدن به پاسخ‌های صحیح، حائز اهمیت می‌باشد. در این تحقیق، به منظور مش‌بندی پانل ساندویچی، از المان‌های سه بعدی

<sup>1</sup> Hexagonal  
<sup>2</sup> Sweep  
<sup>3</sup> Structured



## 3-2-9- مطالعه همگرایی مش

تعداد و اندازه مناسب المان‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است و در استخراج نتایج صحیح، تأثیر به سزایی دارد. لذا رسیدن به تعداد و نوع المان‌های مناسب باید در فرآیند مش‌بندی، مورد توجه قرار گیرد. نوع المان‌ها بر اساس مطالعات گذشته و راهنمای نرم‌افزار انتخاب شده، اندازه المان‌ها با استفاده از مطالعه همگرایی مش به دست آمده است. در نمودار شکل 15، با افزایش تعداد المان‌ها، حداکثر نیروی تماس حاصل از ضربه، مورد مطالعه قرار گرفته است. حداقل تعداد المان برای دستیابی به دقت کافی برای هندسه پانل مورد نظر، با توجه به شکل 15، تعداد حدود 4000 تعیین شده است. چون از این تعداد المان به بعد، شیب نمودار، به حالت افقی تغییر یافته است.

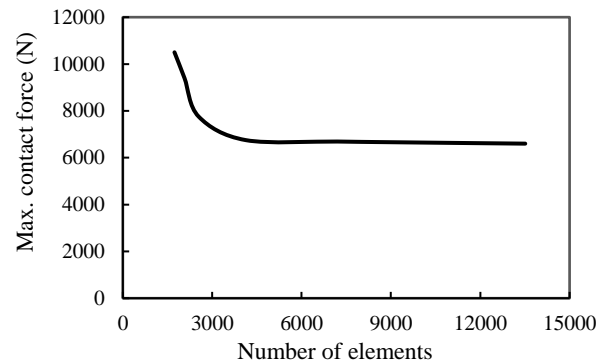


Fig. 15 Study of mesh convergence

شکل 15 مطالعه همگرایی مش

آسیب خورده در مدل عددی، با نتیجه تست تجربی مقایسه شده و انطباق مناسبی مشاهده شده است.

شکل 18، نمودار انرژی جنبشی ضربه‌زننده حین برخورد آن با پانل ساندویچی را نشان می‌دهد. همانطور که در نمودار مشخص است، انرژی جنبشی از 34.24 ژول که معادل با ارتفاع رها شدن ضربه‌زننده می‌باشد، تا مقدار صفر، در لحظه‌ای که بیشترین نفوذ در پانل ساندویچی رخ می‌دهد، کاهش می‌یابد و سپس انرژی جنبشی ضربه‌زننده تا 27.27 ژول افزایش می‌یابد. در حین برخورد ضربه‌زننده با پانل ساندویچی، بخشی از این انرژی اولیه، با آسیب زدن به سطح تماس پانل و انتشار امواج الاستیک در آن ذخیره می‌شود. مقدار انرژی ذخیره شده در پانل ساندویچی در این برخورد، بر اساس نتایج عددی، 6.97 ژول می‌باشد که حدود 20% از انرژی اولیه ضربه‌زننده می‌باشد.

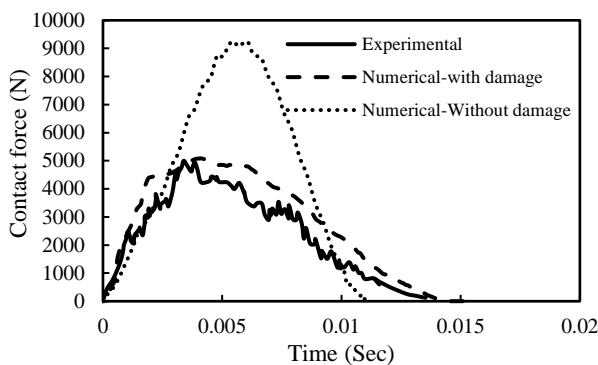


Fig. 16 Experimental and numerical histories of impact force on the sandwich panel at the middle point between the ribs distance

شکل 16 نمودار تجربی و عددی تاریخچه نیروی ضربه بر روی پانل ساندویچی در نقطه وسط فاصله بین ریب‌ها

## 4- نتایج و بحث

در نهایت پس از طی تمام مراحل مدلسازی، اختصاص خواص مواد، شرایط مرزی و بارگذاری و همچنین مش‌بندی، تحلیل‌های مورد نیاز بر روی دو پانل ساندویچی ساخته شده، انجام شده و نتایج حل عددی حاضر با نتایج تست‌های تجربی حاضر مقایسه شده‌اند که در ادامه، به بررسی و مقایسه نتایج به دست آمده، پرداخته شده است.

## 1-4- ضربه به پانل روی محل دور از ریب (فضای بین ریب‌ها در هسته)

شکل 16، نمودار نیروی تماس بین ضربه‌زننده و صفحه فوقانی پانل ساندویچی را بر حسب زمان نمایش می‌دهد. محل اعمال ضربه، نقطه‌ای است که زیر آن، ریب تقویتی در ناحیه نزدیک وجود ندارد. در این نمودار، نتایج تست تجربی با حل عددی مقایسه شده است.

در بررسی پاسخ ضربه، دو پارامتر زمان برخورد و حداکثر نیروی تماس ناشی از ضربه، حائز اهمیت می‌باشند. همانطور که در شکل 16 مشاهده می‌شود، بین زمان برخورد و حداکثر نیروی تماس در مدل عددی، با نتیجه تست تجربی مطابقت خوبی وجود دارد. تفاوت کم بین نتایج می‌تواند بر اثر عواملی چون اختلاف هندسی مدل تجربی و عددی، اختلاف جزئی در خواص مواد ساخته شده و یا نواقص موجود در ساخت مدل تجربی به وجود آمده باشد. همچنین، در شکل 16 مقایسه تاریخچه نیروی ضربه، بدون در نظر گرفتن اثر آسیب پیش‌رونده با حالت واقعی در نظر گرفتن این آسیب، نشان دهنده اهمیت مدلسازی اثر آسیب است. شکل 17 محل ضربه در فضای بین سلول پانل ساندویچی را پس از برخورد نمایش می‌دهد. در این شکل، سطح

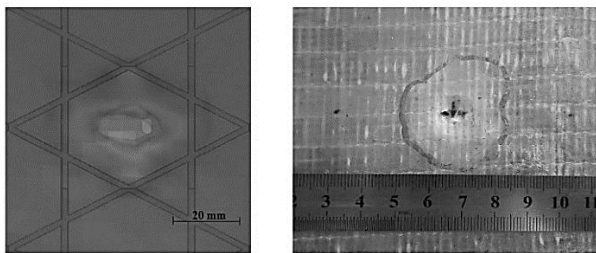


Fig. 17 Comparison of impact damaged area between the numerical and experimental models (impact point at the middle distance between the ribs)

شکل 17 مقایسه ناحیه متأثر از آسیب ضربه بین مدل‌های عددی و تجربی (محل اعمال ضربه در نقطه وسط فاصله بین ریب‌ها)

در شکل 19، نمودار نیروی تماس ضربه برای پانل ساندویچی در حالت بدون فوم و برای اعمال ضربه در فضای بین سلول نشان داده شده است. در این نمودار، نتایج حل عددی برای سرعت‌های مختلف ضربه‌زننده و برای سطح انرژی مشخص، استخراج شده و با یکدیگر مقایسه شده است. در این مطالعه، جرم ضربه‌زننده 11.6 kg در نظر گرفته شده و ضربه با سرعت‌های مختلف و در نتیجه، سطوح انرژی مختلف به پانل ساندویچی اعمال شده است. همان طور که از شکل 19 مشخص است، با افزایش سرعت برخورد ضربه‌زننده با

تست، در شکل 21، نمودار مقایسه تاریخچه نیروی تماس بین مدل عددی و تجربی نشان داده شده است. در این تست نیز مشاهده می‌شود که صلبیت موضعی بیشتر در نقطه تقاطع ریب‌ها در راستای ضخامت پانل، نسبت به صلبیت موضعی در فضای بین ریب‌ها، موجب کاهش زمان تماس و افزایش نیروی تماس شده است.

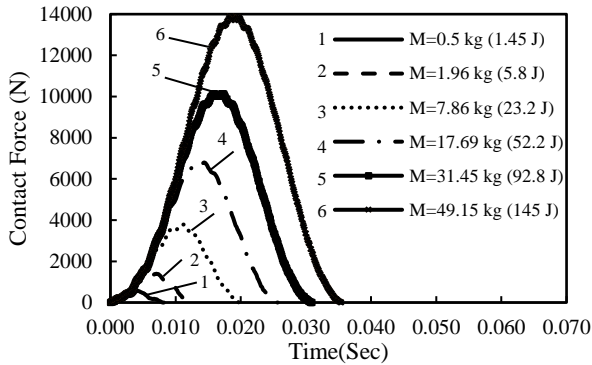


Fig. 20 Numerical impact solution on the sandwich panel for various masses of the impactor

شکل 20 نمودار حل عددی ضربه در پانل ساندویچی برای جرم‌های مختلف ضربه زنده

شکل 22، سطح آسیب را در محل برخورد ضربه‌زنده نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشخص است، در این تست، سطح آسیب و میزان فرورفتگی، نسبت به تست قبل، به طور قابل توجهی کاهش یافته است. در واقع، صلبیت حاصل از حضور ریب در محل برخورد، کمتر به ضربه‌زنده اجازه نفوذ در سازه را داده است و سازه دچار فرورفتگی و آسیب کمتری شده است.

شکل 23، نمودار انرژی جنبشی ضربه‌زنده حین برخورد در این نقطه با پانل ساندویچی را نشان می‌دهد. مطابق نمودار، انرژی جنبشی از 34.24 ژول در لحظه شروع برخورد به 28.17 ژول در انتهای زمان برخورد کاهش یافته است. لذا مقدار انرژی ذخیره شده در پانل ساندویچی در این برخورد، بر اساس نتایج عددی 6.07 ژول می‌باشد که حدود 17.5% انرژی اولیه ضربه‌زنده می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در این پانل نیز با توجه به آسیب کمتر بوجود آمده، انرژی کمتری جذب سازه شده است.

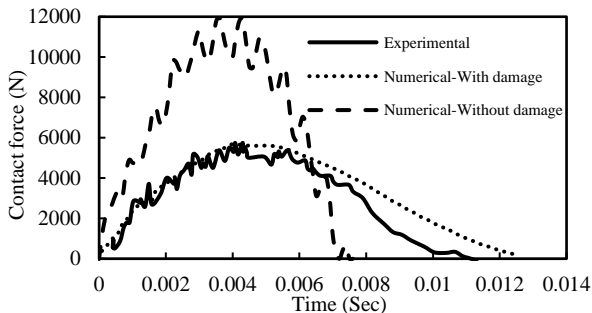


Fig. 21 Experimental and numerical histories of impact force on the sandwich panel at the intersection point of the ribs in the core

شکل 21 نمودار تجربی و عددی تاریخچه نیروی ضربه بر روی پانل ساندویچی در نقطه تقاطع ریب‌ها در هسته

پانل ساندویچی، مدت زمان تماس بین ضربه‌زنده و پانل ساندویچی کاهش می‌یابد و بالعکس، حداکثر نیروی تماس افزایش می‌یابد.

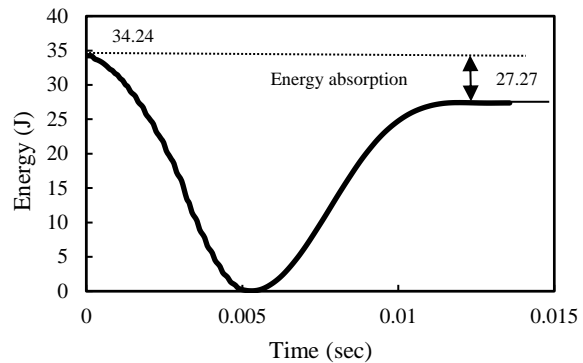


Fig. 18 Kinetic energy of the impactor vs. time of impact force on the sandwich panel at the middle point of the bay between the ribs

شکل 18 نمودار انرژی جنبشی ضربه‌زنده بر حسب زمان به ازای ضربه روی پانل ساندویچی در نقطه وسط حدفاصل بین ریب‌ها

در شکل 20، نمودار نیروی تماس ضربه برای پانل ساندویچی به ازای جرم‌های مختلف ضربه‌زنده نشان داده شده است. در این مطالعه، سرعت ضربه‌زنده ثابت و برابر با 2.43 m/s در نظر گرفته شده است و اعمال ضربه بر روی پانل، با تغییر در جرم ضربه‌زنده و در همان سطوح انرژی مورد بررسی در شکل 19 انجام شده است. مطابق شکل 20، با افزایش جرم ضربه‌زنده، مدت زمان تماس بین ضربه‌زنده و پانل ساندویچی و همچنین حداکثر نیروی تماس افزایش پیدا کرده‌اند. اگر نتایج شکل 19 و شکل 20 را با یکدیگر مقایسه کنیم، خواهیم دید که برای سطوح انرژی برخورد یکسان، حداکثر نیروی تماس، تقریباً برابر است ولی مدت زمان تماس، بین دو حالت سرعت متغیّر و جرم متغیّر، متفاوت است.

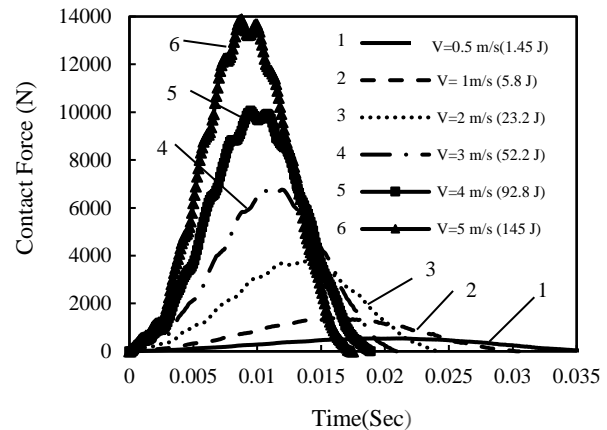
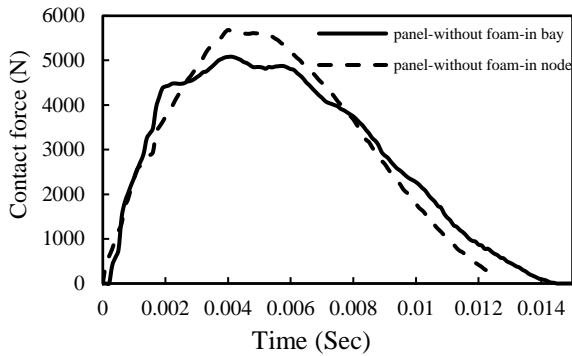


Fig. 19 Numerical impact solution on the sandwich panel for various velocities of the impactor

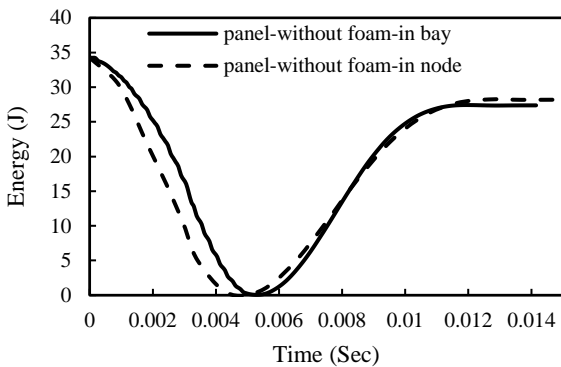
شکل 19 نمودار حل عددی ضربه در پانل ساندویچی برای سرعت‌های مختلف ضربه زنده

#### 4-2- ضربه به پانل روی محل تقاطع ریب‌های هسته

در این تست، محل اعمال ضربه در پانل ساندویچی نسبت به تست اول تغییر نموده، به جای فضای بین ریب‌ها در سلول واحد، ضربه روی محل تقاطع دو ریب مایل هسته و نزدیک به مرکز پانل ساندویچی اعمال شده است. برای این



**Fig. 25** Comparison of the impact force history for impacts on two locations (at the middle point of the bay between the ribs and at the intersection point of the ribs in the core) using numerical method  
 شکل 25 مقایسه تاریخچه نیروی ضربه برای ضربه روی دو نقطه (نقطه حدواسط بین دو ریب مجاور و نقطه تقاطع دو ریب در هسته) به روش عددی

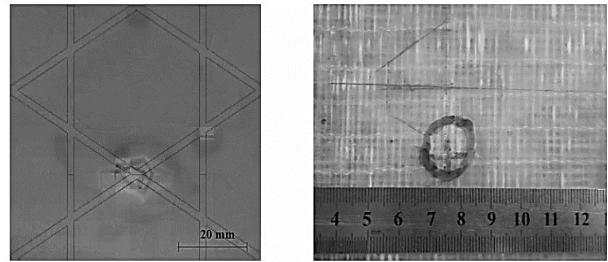


**Fig. 26** Comparison of the history of kinetic energy of the impactor for impacts on two locations (at the middle point of the bay between the ribs and at the intersection point of the ribs in the core) using numerical method  
 شکل 26 مقایسه تاریخچه انرژی جنبشی ضربه‌زننده برای ضربه روی دو نقطه (نقطه حدواسط بین دو ریب مجاور و نقطه تقاطع دو ریب در هسته) به روش عددی

همان‌طور که در شکل‌های 24 تا 26 مشاهده می‌شود، برخورد در نقطه تقاطع ریب‌ها در مقایسه با برخورد در فضای بین دو ریب مجاور در هسته پانل ساندویچی، حداکثر نیروی تماس بیشتری ایجاد می‌کند و زمان تماس را کاهش می‌دهد. در مورد جذب انرژی، مشاهده می‌شود که اختلاف زیادی بین جذب انرژی در این دو برخورد وجود ندارد. در نقطه تقاطع ریب‌ها، هرچند در صفحه فوقانی پانل آسیب کمتری مشاهده می‌شود، اما بخشی از ریب درون هسته، دچار آسیب شده و در مکانیزم جذب انرژی ضربه‌زننده، مشارکت داشته است. در واقع، صلبیت موضعی در راستای ضخامت، در محل برخورد ضربه‌زننده، موجب کاهش سطح آسیب قابل مشاهده و افزایش عمق آسیب شده است. به طور کلی جذب انرژی، وابسته به میزان آسیب وارده به صفحه فوقانی و ریب‌های درون هسته است.

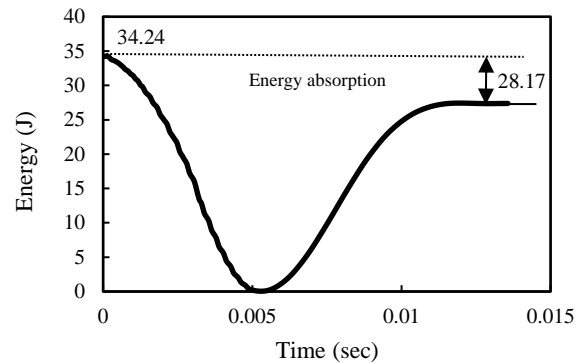
### 5- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، پاسخ ضربه سرعت پایین بر روی پانل ساندویچی با هسته مشبک، به روش‌های عددی و تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. هسته مشبک و صفحات فوقانی و تحتانی پانل، از جنس شیشه/اپوکسی هستند.



**Fig. 22** Comparison of impact damaged area between the numerical and experimental models (impact point at the intersection of the ribs)

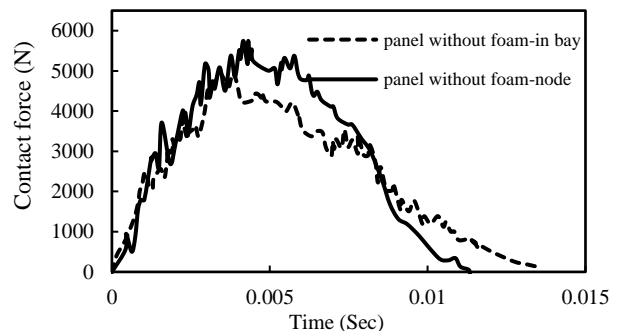
شکل 22 مقایسه ناحیه متأثر از آسیب ضربه بین مدل‌های عددی و تجربی (محل اعمال ضربه در نقطه تقاطع ریب‌ها)



**Fig. 23** Variation of the internal and kinetic energy for impact point at the intersection of the ribs in the core

شکل 23 نمودار انرژی درونی و جنبشی برای ضربه در نقطه تقاطع ریب‌های پانل ساندویچی

در ادامه، نتایج دو پانل ساندویچی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در شکل‌های 24 تا 26، به ترتیب، نمودار پاسخ ضربه حاصل از روش تجربی و نمودارهای پاسخ ضربه و انرژی جنبشی حاصل از حل عددی برای این دو پانل ساندویچی مقایسه شده‌اند.



**Fig. 24** Comparison of the impact force history for impacts on two locations (at the middle point of the bay between the ribs and at the intersection point of the ribs in the core) using experimental method

شکل 24 مقایسه تاریخچه نیروی ضربه برای ضربه روی دو نقطه (نقطه حدواسط بین دو ریب مجاور و نقطه تقاطع دو ریب در هسته) به روش تجربی

- [15] Ghaderi, A. M., Ghasemi, A. and Yarmohmmadi-Toski, M., "An experimental investigation of quasi-static indentation on a composite sandwich panel made of basalt fiber using nanographene", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 6, No. 1, pp. 109-118, 2019.
- [16] Hedayatian, M., Liaghat, Gh., Rahimi, Gh., Pol, M. H., "Numerical and experimental analyses projectile penetration in grid cylindrical composite structures under high velocity Impact", (In Persian) *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 9, pp. 17-26, 2014
- [17] Malekzadeh-Fard, K. Azarnia, A. H. and Zolghadr, N., "Analytical modeling to predict dynamic response of Fiber-Metal Laminated Panel subjected to low velocity impact", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 5, No. 3, pp. 331-342, 2018.
- [18] Lopes, C., Camanho, P., Gürdal, Z., Maimí, P. and González, E., "Low-velocity impact damage on dispersed stacking sequence laminates. Part II: Numerical simulations," *Composites Science and Technology*, Vol. 69, pp. 937-947, 2009.
- [19] Hashin, Z., "Failure criteria for unidirectional fiber composites," *Journal of applied mechanics*, Vol. 47, pp. 329-334, 1980.
- [20] Tarfaoui, M., Gning, P. B. and Hamitouche, L., "Dynamic response and damage modeling of glass/epoxy tubular structures: Numerical investigation," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 39, pp. 1-12, 2008.
- [21] Buragohain, M. and Velmurugan, R., "Study of filament wound grid-stiffened composite cylindrical structures," *Composite Structures*, Vol. 93, pp. 1031-1038, 2011.
- [22] Chang, F. K. and Lessard, L. B., "Damage tolerance of laminated composites containing an open hole and subjected to compressive loadings. I: Analysis," *Journal of Composite Materials*, Vol. 25, pp. 2-43, 1991.
- [23] Camanho, P. and Matthews, F., "A progressive damage model for mechanically fastened joints in composite laminates," *Journal of Composite Materials*, Vol. 33, pp. 2248-2280, 1999.
- [24] Blacketter, D., Walrath, D. and Hansen, A., "Modeling damage in a plain weave fabric-reinforced composite material," *Journal of composites technology & research*, Vol. 15, pp. 136-142, 1993.
- [25] Tserpes, K. and Labeas, G., "Mesomechanical analysis of non-crimp fabric composite structural parts," *Composite Structures*, Vol. 87, pp. 358-369, 2009.
- آسیب پیش‌رونده ناشی از ضربه، با در نظر گرفتن پارامترهای آسیب سه بعدی برای جنس ماده، مورد تحلیل قرار گرفته است. در نظر گرفتن آسیب پیش‌رونده برای مواد کامپوزیتی، باعث کاهش گام به گام سفتی آن‌ها در مقابل بارهای ضربه‌ای می‌شود. این کاهش سفتی، موجب افزایش مدت زمان تماس ضربه‌زننده با سازه کامپوزیتی و کاهش حداکثر نیروی تماس می‌شود. کاهش سفتی ناشی از آسیب پیش‌رونده، به ازای ضربه در نقاط مختلف سازه، تأثیری متفاوت داشته است. به عنوان مثال، مشاهده شده است که در ضربه روی نقاطی مانند محل تقاطع ریب‌ها که نسبت به فضای بین ریب‌ها، از سفتی بیشتری برخورداراند، مدت زمان تماس ضربه کاهش و حداکثر نیروی تماس، افزایش دارد. همچنین مشاهده شده است که مقدار جذب انرژی ضربه، وابسته به میزان آسیب وارده به صفحه فوقانی پانل و ریب‌های درون هسته است و صلبیت محل برخورد ضربه‌زننده، موجب کاهش سطح آسیب قابل مشاهده در سازه می‌شود.
- ### 6- مراجع
- [1] Marguerre, K., "The optimum buckling load of a flexibly supported plate composed of two sheets joined by a light weight filler when under longitudinal compression," *Deutsche Vierteljahrsschrift für Literaturwissenschaft und Geistes Geschichte*. DVL (ZWB UM1360/2), 1944.
- [2] Allen, H. G., "Analysis and design of structural sandwich panels Vol. 51: Pergamon press Oxford, 1969.
- [3] D. Feng, D. and Aymerich, F., "Finite element modelling of damage induced by low-velocity impact on composite laminates," *Composite Structures*, Vol. 108, pp. 161-171, 2014.
- [4] H. Saito, H. and Kimpara, I., "Evaluation of impact damage mechanism of multi-axial stitched CFRP laminate," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 37, pp. 2226-2235, 2006.
- [5] Byun, J. H., Song, S. W., Lee, C. H., Um, M. K. and Hwang, B. S., "Impact properties of laminated composites with stitching fibers," *Composite structures*, Vol. 76, pp. 21-27, 2006.
- [6] Ibekwe, S. I., Mensah, P. F., Li, G., Pang, S. S. and Stubblefield, M. A., "Impact and post impact response of laminated beams at low temperatures," *Composite structures*, Vol. 79, pp. 12-17, 2007.
- [7] Yang, L., Yan, y. and Kuang, N., "Experimental and numerical investigation of aramid fibre reinforced laminates subjected to low velocity impact," *Polymer Testing*, Vol. 32, pp. 1163-1173, 2013.
- [8] Li, G. and Jones, N., "Development of rubberized syntactic foam," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 38, No. 6, pp. 1483-1492, 2007.
- [9] Li, G. and John, M., "A crumb rubber modified syntactic foam," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 474, pp. 390-399, 2008.
- [10] Chen, H. J. and Tsai, S. W., "Analysis and optimum design of composite grid structures," *Journal of composite materials*, Vol. 30, pp. 503-534, 1996.
- [11] Castanié, B., Bouvet, C., Aminanda, Y., Barrau, J. J. and Thévenet, P., "Modelling of low-energy/low-velocity impact on Nomex honeycomb sandwich structures with metallic skins," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 35, pp. 620-634, 2008.
- [12] Jadhav, P. and Mantena, P. R., "Parametric optimization of grid-stiffened composite panels for maximizing their performance under transverse loading," *Composite structures*, Vol. 77, pp. 353-363, 2007.
- [13] Muthyala, V. D., "Composite sandwich structure with grid stiffened core," Faculty of the Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College In partial fulfillment of the requirements for the degree of MSc in Mechanical Engineering in The Department of Mechanical Engineering By Venkata Dinesh Muthyala BE, Osmania University, 2007.
- [14] Azarafza, R., Davar, A., and Mahmoodi, A., "Three-point bending test of metal and composite sandwich panels with grid stiffened core", In Persian, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 3, No. 4, pp. 377-388, 2017.