



## کامپوزیت‌های ساندویچی سه بعدی حلقوی پودی ابداعی تحت ضربات ثقلی با سطوح مختلف انرژی

محمد آزادیان<sup>1</sup>، حسین حسنی<sup>2\*</sup>، محمود مهرداد شکریه<sup>3</sup>

1- دانشجوی دکترا، مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

2- دانشیار، مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

\* اصفهان، صندوق پستی 8415683111، [h\\_hasani@cc.iut.ac.ir](mailto:h_hasani@cc.iut.ac.ir)

### چکیده

### اطلاعات مقاله

دریافت: 96/10/13

پذیرش: 96/10/25

### کلیدواژگان:

کامپوزیت ساندویچی سه بعدی حلقوی

پودی

ضربه ثقلی

سطح انرژی

آسیب

اثر هندسی هسته کامپوزیت

در این تحقیق رفتار ضربه ثقلی نوع جدیدی از هسته‌های سه بعدی بافته شده به روش بافندگی حلقوی پودی بررسی شده است. هسته‌های سه بعدی بافته شده به روش بافندگی حلقوی پودی و بوسیله یک ماشین تخت باف با دو سطح مقطع هندسی مثلثی و مستطیلی بافته شدند. کامپوزیت‌های ساندویچی از این هسته‌های سه بعدی به روش تزریق رزین به کمک کیسه خلا تولید شدند. نتایج نیروی تماس ضربه ثقلی در سه سطح انرژی مختلف بر روی نمونه‌های کامپوزیت ساندویچی سه بعدی با سطح مقطع مستطیل و مثلث نشان داد که استحکام نمونه با سطح مقطع مثلثی در مقایسه با نمونه با سطح مقطع مستطیلی در تمام سطوح انرژی ضربه ثقلی بیشتر بوده است. همچنین با افزایش سطح انرژی ضربه ثقلی نیروی تماس ضربه برای تمام نمونه‌ها افزایش داشته است. آسیب وارد شده به نمونه‌ها شامل ترک‌های عرضی ایجاد شده در پوسته و ترک در لایه‌های اتصال در هسته بود. همچنین با افزایش سطح انرژی ترک در پوسته زیرین و تورفتگی در نقطه مورد اصابت ضربه مشاهده شد. هیچگونه تورق میان پوسته و هسته در کامپوزیت‌های ساندویچی سه بعدی حلقوی پودی مشاهده نشد.

## The novel three dimensional weft knitted sandwich composites under drop-weight impacts in different energy levels

Mohammad Azadian<sup>1</sup>, Hossein Hasani<sup>1\*</sup>, Mahmood M. Shokrieh<sup>2</sup>

1- Department of Textile Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

2- School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

\* P.O.B. 8415683111, Isfahan, Iran, [h\\_hasani@cc.iut.ac.ir](mailto:h_hasani@cc.iut.ac.ir)

### Keywords

3D Integrated weft knitted Sandwich composites  
 Drop-weight impact  
 Energy level  
 Damage  
 Effect of core cross-sectional shape Composite

### Abstract

In this study the behavior of a novel 3D integrated weft knitted sandwich composite (3DIWKSCs) were investigated. The weft knitted spacer fabrics produced by E-glass fibers on a flat knitted machine with tow cross-sectional shapes (rectangular and triangular). The 3DIWKSCs manufactured by use of the vacuum assisted resin transfer molding (VARTM). The results of the 3DIWKSCs with tow cross-sectional shapes under drop-weight impact tests in three energy levels showed that the triangular-shape of 3DIWKSC has the higher strength in all energy levels of impact than the rectangular-shape of 3DIWKSC. Furthermore the contact force of 3DIWKSCs was increased by increasing of the energy level of impacts. The main damage modes of 3DIWKSCs under impacts were the transverse cracks on the upper face-sheets and the cracks on the connecting layers of the core. Also, by increasing the energy level, cracks occurred in the lower face-sheets as the curved area and the local indentation were created underneath the impactor. There is no any de-bonding between the core-face of the 3DIWKSCs under drop-weight impact tests.

### Please cite this article using:

Azadian, M. Hasani, H. and Shokrieh, M.M., "The novel three dimensional weft knitted sandwich composites under drop-weight impacts in different energy levels", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 05, No. 02, pp. 271-278, 2018.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

## 1- مقدمه

استفاده از کامپوزیت‌های ساندویچی<sup>1</sup> به دلیل مزایای آنها از جمله وزن کم و استحکام بالا در صنایع مختلف همانند حمل و نقل، هوافضا و دریایی بطور چشمگیری افزایش یافته است. معمولاً کامپوزیت‌های ساندویچی شامل دو بخش، هسته که از می‌تواند از فوم‌ها، لانه زنبوری<sup>2</sup> و موج‌دار و پوسته که از مواد مختلفی همانند چندلایه‌های کامپوزیتی، تشکیل شده‌اند [1]. آذرافزا و همکارانش [2] نتیجه گرفتند استفاده از هسته مشبک برای تقویت پوسته-های کامپوزیتی، سبب افزایش استحکام این ساختارها در برابر بارگذاری خمشی می‌شود. به دلیل اهمیت مسئله رفتار این ساختارها تحت اصابت ضربه تحقیقات گسترده‌ای برای بررسی رفتار و مقاومت در برابر ضربه این ساختارها انجام شده است [3-6].

یکی از مشکلات کامپوزیت‌های ساندویچی رایج تحت اصابت ضربه با سرعت کم، تورق<sup>3</sup> پوسته‌ها و جدا شدن هسته از پوسته تحت اصابت ضربه می‌باشد. ما و همکارانش [7] رفتار تحت اصابت ضربه کامپوزیت‌های ساندویچی با هسته فومی و پوسته تشکیل شده از نانو کامپوزیت تقویت شده با پارچه حلقوی تار تحت اصابت ضربه عرضی بررسی کردند. آنها مشاهده کردند که با افزایش سرعت ضربه و مقدار نانو تیوب‌های کربنی، مساحت آسیب و انرژی جذب شده به ترتیب افزایش می‌یابد. همچنین مدهای اصلی شکست شامل شکست فوم و جدایش پوسته از هسته بود. پارک و همکارانش [8] مقاومت در برابر آسیب ساختارهای ساندویچی را تحت اصابت ضربه با سرعت کم بررسی کردند. آنها نتیجه گرفتند که مقاومت در برابر آسیب ضربه ساختارهای ساندویچی بطور عمده به نوع پوسته و ضخامت هسته وابسته است. همچنین آسیب اصلی وارد شده به ساختارهای ساندویچی بصورت تورق پوسته‌ها بود. ایملینسکا [9] و همکارانش اثرهای نوع اتصال بین هسته و پوسته را در کامپوزیت‌های ساندویچی متداول در صنایع دریایی که از پارچه شیشه و رزین پلی استر و هسته فوم PVC ساخته شده بود را تحت اصابت ضربه با سرعت کم بررسی کردند. آنها نتیجه گرفتند که شروع آسیب و مکانیزم شکست به نمودار نیرو-زمان وابسته است. همچنین نوع اتصال پوسته و هسته بر روی نیروی آستانه تورق تأثیر نمی‌گذارد و این به خصوصیات پوسته چندلایه وابسته می‌باشد. هی و همکارانش [10] آسیب وارد شده به کامپوزیت‌های ساندویچی با پوسته چندلایه کربن/اپوکسی و هسته لانه زنبوری تحت ضربات با انرژی کم و با استفاده از تست غیرمخرب بررسی کردند. آنها مشاهده کردند با افزایش انرژی ضربه محدوده آسیب افزایش می‌یابد و عمق نفوذ در ساختار تحت ضربه تا 10 ژول افزایش و پس از آن تا 12 ژول ثابت می‌باشد.

یک راه حل مقابله با مشکل تورق در ساختارهای ساندویچی تحت اصابت ضربه استفاده از تقویت کننده‌های سه بعدی نساجی است که می‌تواند به روش‌های بافندگی تار-پودی، حلقوی، دوخت و غیره تولید شوند [11]. پلازانو و همکارانش [12] مشخصات آسیب پنل‌های ساندویچی تقویت شده با الیاف در راستای ضخامت را تحت اصابت ضربه با سرعت کم را بصورت تجربی بررسی کردند. فن و همکارانش [13] خصوصیات تحت ضربه کامپوزیت‌های ساندویچی با هسته فومی دوخته شده و دوخته نشده را در سطوح انرژی بین 1 تا 70 ژول بررسی کردند. آنها مشاهده کردند در سطوح انرژی 1 تا 30 ژول

دو بیشینه نیرو و یک ناحیه مسطح در نمودار نیرو-زمان وجود دارد که بیشینه‌های نیرو می‌توانند به عنوان مشخصه سوراخ شدن پوسته رو و زیر و ناحیه مسطح مربوط به آسیب وارد شده به هسته می‌باشد که این ناحیه مسطح با افزایش سطح انرژی کوچک می‌شود. همچنین بیشینه عرض کرک و عمق نفوذ نمونه‌های دوخته شده در سطح انرژی ضربه 25 ژول کاهش یافت. برال و همکارانش [14] کارایی پنل‌های ساندویچی در سازه‌های دریایی را با استفاده از تقویت کننده در راستای ضخامت بهبود دادند. آنها ضربه وارد شده توسط آب بر قایق را با طراحی یک آزمایش و استفاده از یک توپ الاستومری شبیه سازی کردند. آنها نتیجه گرفتند که این ساختارهای ساندویچی مقاومت در برابر ضربه موج را به طور قابل ملاحظه ای افزایش داده است. سلترز و همکارانش [15]، آسیب به وجود آمده در کامپوزیت‌های تقویت شده با تقویت کننده‌های سه بعدی تار-پودی تحت اصابت ضربه با سرعت کم را بررسی کردند. آنها کامپوزیت‌های تقویت شده با پارچه‌های سه بعدی از جنس الیاف شیشه و کربن و ترکیب این دو را تحت اصابت ضربه با سرعت کم قراردادند. آنها دریافتند کامپوزیت‌های سه بعدی تا دو برابر بیشتر انرژی جذب می‌کنند. نتایج اشعه ایکس آشکار کرد که این بهبود در عملکرد به وجود تقویت کننده در راستای ضخامت مربوط است و این مشخصه از تورق کامپوزیت جلوگیری کرده است. هوث و همکارانش [16]، واکنش کامپوزیت‌های تقویت شده با لایه‌های پارچه شیشه دوخته شده و دوخته نشده را تحت اصابت ضربه با سرعت کم بررسی کردند آنها نتیجه گرفتند انجام دوخت باعث کاهش ابعاد ناحیه آسیب می‌شود. هو و همکارانش [17]، واکنش در برابر ضربه کامپوزیت‌های تقویت شده با منسوجات سه بعدی را با پلیت آلومینیومی مقایسه کردند. آنها آسیب کمتری در کامپوزیت‌های سه بعدی مشاهده کردند. همچنین لایه‌لایه شدگی در کامپوزیت‌های سه بعدی دیده نشد. هوتر و همکارانش [18] اثر تقویت کننده در راستای ضخامت را در برابر آسیب ضربه با مقایسه کامپوزیت‌های چندلایه و کامپوزیت‌های تقویت شده با چندلایه‌های سه بعدی تولید شده به روش دوخت بررسی کردند. آنها نتیجه گرفتند که وجود تقویت کننده در راستای ضخامت باعث محدود کردن لایه‌لایه شدگی در کامپوزیت تحت اصابت ضربه می‌شود. همچنین کامپوزیت‌های تقویت شده با چندلایه‌های سه بعدی تولید شده به روش دوخت دارای استحکام بیشتری بودند. زانگ و همکارانش [19] واکنش کامپوزیت‌های چندلایه تقویت شده با الیاف تک جهته، پارچه دوبعدی و سه بعدی به ضربه با سرعت کم مقایسه کردند. آزمایش ضربه ثقلی با انرژی 35 ژول انجام شد. آنها مشاهده کردند که کامپوزیت‌های چندلایه تقویت شده با پارچه سه بعدی تک‌لا، ظرفیت جذب انرژی بیشتر و مقاومت در برابر آسیب ضربه بالاتری در مقایسه با کامپوزیت‌های چندلایه تقویت شده با الیاف تک جهته و پارچه دوبعدی دارند. هوتر و همکارانش [20]، کامپوزیت‌های ساندویچی سه بعدی با پوسته‌های کامپوزیتی تقویت شده با پارچه شیشه و کربن را تحت ضربه با سرعت کم با سه سطح انرژی 15، 30 و 45 ژول بررسی کردند. آنها مشاهده کردند که وجود نخ‌های تقویت کننده در راستای ضخامت باعث مقاومت کامپوزیت در برابر آسیب نیروی ضربه در تمامی سطوح انرژی می‌شود. همچنین در تحقیق دیگری بر روی کامپوزیت‌های ساندویچی سه بعدی با هسته فومی تحت ضربه با سرعت کم، وایدیا و همکارانش [21]، نتیجه گرفتند که آسیب حاصل از ضربه بر روی کامپوزیت محدود به مجاورت نقطه تحت اصابت ضربه بود. در تحقیقی بر روی کامپوزیت‌های با ساختار ساندویچی سه بعدی تحت اصابت ضربه با سرعت کم کاراهان و همکارانش

<sup>1</sup> Sandwich Composites

<sup>2</sup> Honeycomb

<sup>3</sup> Delamination

می‌شود، این ساختار، متشکل از دو لایه‌ی مجزا است که به کمک لایه‌های اتصال‌دهنده میانی بافته‌شده، به یکدیگر مرتبط شده‌اند. در ابتدا، سوزن‌های هر دو بستر ماشین تخت باف به دو دسته‌ی زوج و فرد تقسیم می‌گردد. در اولین مرحله، لایه‌های رویی و زیرین به صورت مجزا و همزمان، توسط سوزن‌های فرد هر دو بستر سوزن، بافته می‌شوند. در مرحله‌ی دوم، با مشارکت تمامی سوزن‌های زوج و فرد بستر جلو در فرایند بافت، نقطه اتصال لایه میانی و لایه رویی، شکل می‌گیرد. پس از ایجاد اتصال، عملیات بافت لایه اتصال‌دهنده میانی با مشارکت سوزن‌های زوج بستر جلو آغاز می‌شود؛ این در حالی است که سوزن‌های فرد هر دو بستر، حلقه‌های خود را برای ادامه بافت لایه‌های رویی و زیری، در زیر قلاب سوزن‌ها نگه داشته‌اند. طول لایه‌های میانی، به تعداد رج‌های بافته شده بستگی دارد. در ادامه، به منظور ایجاد دومین نقطه اتصال که در واقع لایه سطحی زیر را به لایه میانی متصل می‌کند، می‌بایست فرایند انتقال حلقه صورت گیرد. برای این کار لازم است تا انجام عمل جابجایی بسترها، سوزن‌های فرد بستر عقب در مقابل سوزن‌های زوج بستر جلو قرار گیرند. پس از انجام انتقال حلقه‌ها از سوزن‌های بستر جلو به سوزن‌های بستر عقب، تکرار عمل بافت بر روی سوزن‌های فرد هر دو بستر، دومین نقطه اتصال مابین لایه‌ها نیز شکل می‌گیرد [28]. در شکل 2 نمایی از ساختارهای بافته‌شده نشان داده شده است [28].

[22] گزارش کردند که لایه‌لایه شدگی بین هسته-پوسته در این کامپوزیت‌های ساندویچی تقویت‌شده با منسوجات سه‌بعدی به‌طور کامل از بین رفته است و همچنین محدوده آسیب به همسایگی نقطه آسیب محدوده شده و یکپارچگی ساختار حفظ‌شده است. هرب و همکارانش [23] آسیب بوجود آمده در کامپوزیت تقویت‌شده با پارچه سه‌بعدی از الیاف سرمایی سیلیکون کارباید تحت اصابت ضربه با سرعت کم را بررسی کردند. آن‌ها مشاهده کردند آسیب بوجود آمده در مجاورت ناحیه تحت آسیب باقی‌مانده است و ساختار سه‌بعدی از لایه‌لایه شدگی جلوگیری کرده است. در سال‌های اخیر استفاده از فناوری بافندگی حلقوی پودی<sup>1</sup> و ماشین‌های تخت باف به دلیل دستیابی به بافته‌های سه بعدی با هندسه‌های مختلف در سطح مقطع، قیمت مناسب و جذب انرژی بالای این ساختارها برای ساخت کامپوزیت از آنها مورد توجه قرار گرفته‌اند. اخیراً تعدادی از محققین به مطالعه بر روی تولید این ساختارها پرداخته‌اند [24-28]. ابونعیم و همکارانش [24-26] برای نخستین بار پارچه‌های با نخ هیبریدی شیشه/پلی‌پروپیلن با استفاده از تکنولوژی بافندگی حلقوی پودی و بر روی ماشین تخت باف تولید کردند. آن‌ها برای تولید کامپوزیت‌های سه بعدی گرم‌نرم از این پارچه‌ها، قالب‌های مخصوصی را طراحی کردند. حامدی و همکارانش [27] با استفاده از نخ پلی استر با استحکام بالا، پارچه‌های فاصله‌دار با لایه اتصال بافت میانی با سطح مقطع مستطیلی تولید کردند. آنها کامپوزیت گرم‌سخت از این پارچه‌ها را به روش اینفیوژن ساختند. سپس رفتار این کامپوزیت‌ها را بصورت تجربی و عددی تحت آزمون خمش بررسی کردند. آنها مشاهده کردند که جدایش پوسته از هسته رخ نداد و همچنین نتایج تجربی با عددی تطبیق خوبی داشت. آزادیان و همکارانش [28] رفتار خمشی کامپوزیت‌های ساندویچی ساخته شده از هسته‌های سه بعدی حلقوی پودی با سطح مقطع مختلف بررسی و با کامپوزیت‌های ساندویچی با هسته فومی مقایسه کردند. آنها مشاهده کردند که کامپوزیت‌های ساندویچی با هسته سه بعدی حلقوی پودی و سطح مقطع مثلثی سختی بیشتری در مقایسه با دیگر ساختارها داشت. با توجه به افزایش استفاده از ساختارهای ساندویچی در وسایل مختلف حمل و نقل، قبیل هواپیما، کشتی و غیره و اهمیت مقاومت در برابر آسیب ضربه در این ساختارها، تحقیقات گسترده‌ای برای شناسایی رفتارشان تحت اصابت ضربه و بهبود کارایی این ساختارها در برابر چنین بارگذاری‌هایی انجام شده است. موضوع اصلی این تحقیق تولید و ساخت کامپوزیت‌های ساندویچی تقویت شده با ساختارهای سه بعدی بافته شده به روش بافندگی حلقوی پودی با دو هندسه مختلف در راستای سطح مقطع بصورت مثلثی و مستطیلی شکل و بررسی رفتار آنها تحت اصابت ضربه با سرعت کم در سطوح انرژی مختلف می‌باشد. بافته‌های سه بعدی تولیدی به روش بافندگی حلقوی پودی توسط یک ماشین تخت باف با دو هندسه مختلف تولید شدند. برای تولید کامپوزیت از این ساختارها از روش تزریق رزین به کمک پمپ خلا استفاده شد. سپس رفتار کامپوزیت‌های سه بعدی تولیدی تحت اصابت ضربه با سرعت کم در سطوح مختلف انرژی بررسی شدند.

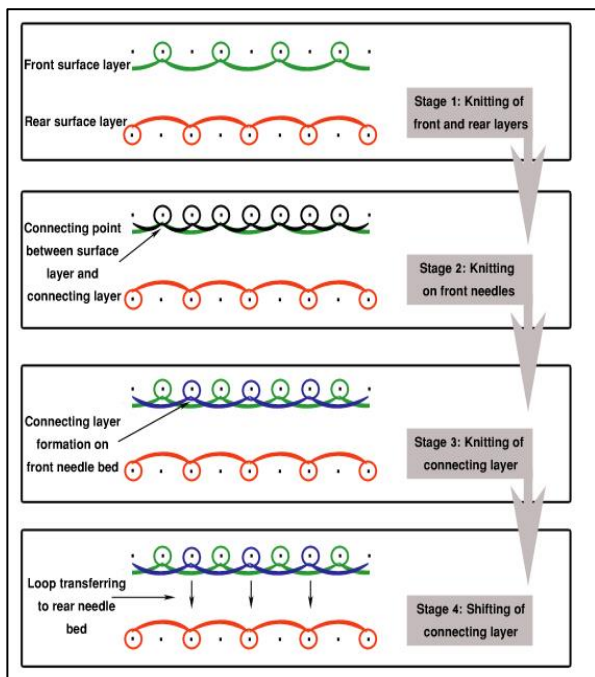


Fig. 1 The manufacture stages of 3D weft knitted spacer fabric [28]

شکل 1 مراحل بافت منسوج ساندویچی سه بعدی با لایه اتصال بافته شده [28]

جدول 1 مشخصات مکانیکی نخ شیشه مورد استفاده در تولید ساختارها

Table 1 The mechanical properties of E-glass yarn

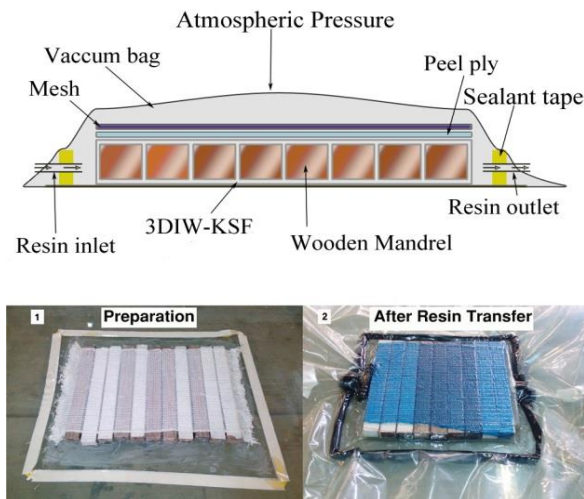
نوع الیاف	نمره نخ (Tex)	چگالی (g/cm <sup>3</sup> )	استحکام کششی (MPa)	سفتی (GPa)
E-Glass	200	2.5	3400	76

## 2- مواد و آزمایش‌ها

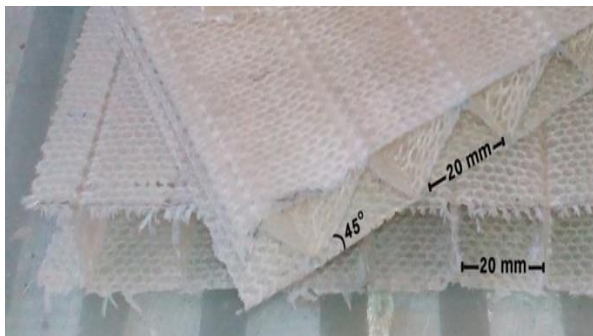
### 2-1- تولید ساختارهای سه بعدی به روش بافندگی حلقوی پودی

در شکل 1، مراحل بافت ساده‌ترین نوع هسته سه‌بعدی تولیدی به روش بافندگی حلقوی پودی را نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل مذکور دیده

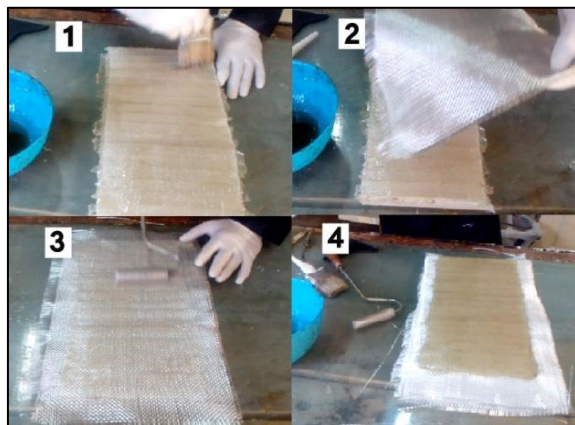
<sup>1</sup> Weft knitting technology



**Fig. 3** The VARTM method for manufacture of 3DIWKSCs  
 شکل 3 تولید کامپوزیت‌های ساندویچی ساخته‌شده با هسته‌های حلقوی پودی به روش تزریق رزین به کمک کیسه خلاء



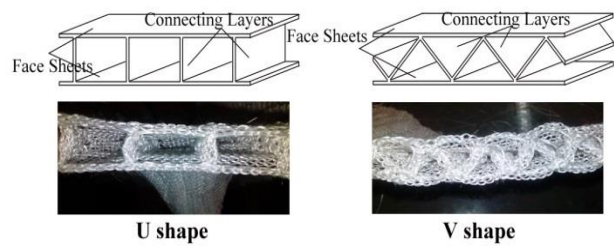
**Fig. 4.** The 3DIWKSCs with tow cross-sectional shape  
 شکل 4 هسته‌های کامپوزیتی ساخته‌شده با پارچه‌های سه بعدی حلقوی پودی به روش تزریق رزین به کمک کیسه خلاء



**Fig. 5** Reinforcing the face-sheets by hand-layup method [28]  
 شکل 5 لایه گذاری دستی هسته‌های سه بعدی حلقوی پودی [28]

**2-3- آزمایش ضربه ثقلی**

برای انجام این آزمایش از دستگاه ضربه ثقلی ساخته شده توسط موسسه کامپوزیت ایران استفاده شد. روش انجام آزمایش ضربه ثقلی بصورت شماتیک در شکل 6 نشان داده شده است. اصول کار این دستگاه بدین صورت می‌باشد که یک ضربه زننده مخروطی از یک ارتفاع مشخص آزاد می‌شود و بر روی



**Fig. 2** The produced weft knitted spacer fabrics [28]

شکل 2 ساختارهای سه بعدی تولیدی به روش بافندگی حلقوی پودی [28] این پارچه‌ها بر روی ماشین تخت‌باف اشتول CMS400 با گیج 5 بافته شدند. برای تولید این پارچه‌ها از نخ شیشه (E-glass) با نمره 200 تکس استفاده شد. مقدار CPC و WPC پارچه‌های فاصله‌دار حلقوی پودی 3 بود. مشخصات مکانیکی نخ شیشه با توجه به استاندارد ASTM-D2256 اندازه-گیری شو که در جدول 1 نشان داده شده است.

**2-2- تولید کامپوزیت تقویت شده با ساختارهای سه بعدی تولیدی به روش**

تزریق رزین به کمک کیسه خلاء روش شماتیک تولید کامپوزیت ساندویچی تقویت شده با ساختارهای سه بعدی تولیدی به روش بافندگی حلقوی پودی در شکل 3 نشان داده شده است. برای تولید نمونه کامپوزیت‌های ساندویچی از پارچه‌های فاصله دار حلقوی پودی و برای آنکه ساختار مشبک کامپوزیت‌ها در طی فرآیند تولید حفظ شود از قالب‌های چوبی استفاده شد. ابتدا به قالب‌های چوبی واکس زده شد و سپس درون پارچه‌ها جایگذاری شدند. سپس پارچه‌ها درون قالبی که کف آن واکس خورده بود قرار داده شد. دور قالب به کمک خمیر سیل آبندی شد سپس بروی قالب به ترتیب پارچه داکرون، مش قرار داده شد و با کیسه مخصوص خلا روی آن پوشیده شد. عملیات تزریق رزین به کمک کیسه خلاء انجام گرفت. از رزین پلی استر غیراشباع برای عملیات تزریق رزین استفاده شد. همچنین شکل نهایی کامپوزیت‌های گرماسخت ساندویچی ساخته‌شده با پارچه‌های فاصله دار حلقوی پودی به روش تزریق رزین به کمک کیسه خلاء در شکل 4 نشان داده شده‌اند.

به دلیل نازک بودن هسته‌های سه بعدی ساخته‌شده، پوسته هسته‌ها به روش لایه‌گذاری دستی تقویت شد. برای این کار 6 لایه پارچه تار پودی شیشه که مشخصات آن در جدول 2 نشان داده شده است، در هر طرف بوسیله رزین پلی استر غیراشباع چسبانده شد که در شکل 5 نشان داده شده است.

یکی از مهمترین فاکتورهای تاثیرگذار بر خصوصیات مکانیکی کامپوزیت‌ها کسر حجمی الیاف می‌باشد. برای مشخص کردن کسر حجمی کامپوزیت ساندویچی تولیدی که شامل هسته سه بعدی و پوسته تار پودی بود، روش سوزاندن به کار گرفته شد. بر همین اساس برای هسته سه بعدی کسر حجمی الیاف برابر 23 درصد و برای کامپوزیت چندلایه تار پودی برابر 36 درصد بود.

جدول 2 مشخصات پارچه تار پودی شیشه

**Table 2** The specification of glass woven fabric

نوع الیاف	نمره نخ	نمره نخ	تراکم تار	تراکم پودی	جرم سطحی
	(Tex)	(Tex)	(ends/cm)	(ends/cm)	(g/m <sup>2</sup> )
E-Glass	250	250	4	4	200

3-2- بررسی آسیب وارد شده به نمونه کامپوزیت‌های ساندویچی تحت ضربه ثقلی در سطوح مختلف انرژی  
 برای ارزیابی آسیب وارد شده به نمونه کامپوزیت‌های ساندویچی سه بعدی از روش تصویربرداری استفاده شد. تصویر نمونه کامپوزیت‌های ساندویچی تحت ضربه ثقلی در سطوح مختلف انرژی در شکل‌های 10 الی 15 نشان داده شده اند. بر همین اساس در سطح انرژی 13.72 ژول سطح زیرین نمونه ساختارهای مستطیلی و مثلثی بدون آسیب باقی مانده است و آسیب بر روی پوسته رویی بصورت ترک عرضی و در هسته بصورت ترک در لایه‌های اتصال بوده است. با افزایش سطح انرژی ضربه ثقلی در سطوح انرژی 27.44 و 41.16 آسیب ایجاد شده در پوسته زیرین نمونه کامپوزیت‌های ساندویچی سه بعدی افزایش یافته است. همچنین آسیب ایجاد شده در پوسته رویی بصورت ترک‌های عرضی می‌باشد که به سمت لبه‌های نمونه رشد کرده اند و آسیب ایجاد شده در هسته بصورت ترک در لایه‌های اتصال می‌باشد. همچنین با افزایش سطح انرژی ضربه ثقلی در نقطه تحت اصابت ضربه در نمونه‌ها آسیب بصورت تورفتگی مشاهده شد. برای ساختار با سطح مقطع مستطیلی با افزایش سطح انرژی تورق میان پوسته تار پودی که به عنوان تقویت کننده استفاده شده است و پوسته کامپوزیت ساندویچی سه بعدی حلقوی پودی مشاهده شد. با این حال هیچگونه تورقی در بین پوسته و هسته بافته شده حلقوی پودی بصورت یکپارچه در تمام سطوح انرژی و برای تمام نمونه‌ها مشاهده نشد.

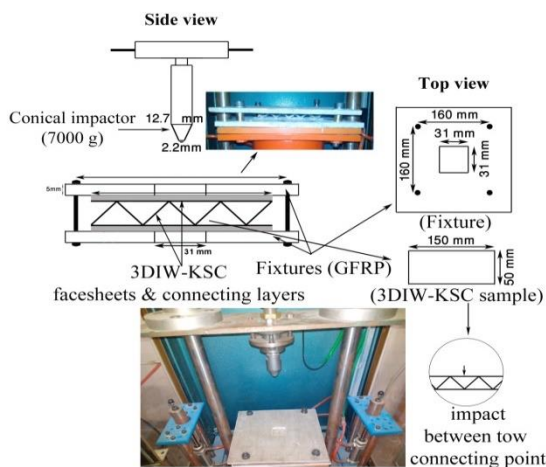


Fig. 6 The drop-weight impact test method

شکل 6 نحوه انجام آزمایش ضربه ثقلی

جدول 3 مشخصات نمونه‌های مورد استفاده در آزمون ضربه ثقلی

Table 3 The specification of samples

کد نمونه	نوع هسته	ارتفاع (mm)	جرم سطحی (kg/m <sup>2</sup> )
A	سطح مقطع مستطیلی	20.13	6.8
B	سطح مقطع مثلثی	18.19	6.93

جدول 4 مقادیر میانگین بیشینه نیروی ضربه ثقلی بر روی نمونه‌های کامپوزیت ساندویچی در سطوح مختلف انرژی

Table 4 The results of contact force of 3DIWKSCs under impact tests

نمونه	مقدار بیشینه نیروی تماس ناشی از ضربه ثقلی (N)
انرژی (J)	13.72
سطح مقطع مثلثی	2200
سطح مقطع مستطیلی	1980

نمونه ای که در زیر آن ثابت شده است سقوط می‌کند. همزمان با سقوط وزنه بر روی نمونه اطلاعات مربوط به نیرو بر حسب زمان توسط حسگر دستگاه ثبت می‌شود و به کامپیوتر منتقل می‌شود. برای ثابت کردن نمونه‌ها در زیر ضربه زننده، دوگیره کامپوزیتی به شکل مربع ساخته شدند، که ابعاد و شکل نصب شده آن در دستگاه در شکل 6 نمایش داده شده است. برای انجام آزمون ضربه نمونه‌ها بین این دوگیره قرار گرفته و با استفاده از پیچ و مهره ثابت شدند و سپس آزمون ضربه بر روی نمونه‌ها انجام گرفت.

آزمایش‌های ضربه ثقلی در سه سطح انرژی 13.72، 27.44 و 41.16 ژول انجام گرفت. ناحیه میان نقاط اتصال هسته با پوسته در نمونه‌ها برای اصابت ضربه ثقلی انتخاب شد. نمونه‌ها در ابعاد 5 در 15 سانتیمتر برش زده شدند و برای هر نمونه 3 تکرار در نظر گرفته شد. مشخصات نمونه‌ها در جدول 3 نشان داده شده است.

### 3. نتایج و مباحث

#### 3-1- تحلیل نتایج تاریخچه نیروی تماس ضربه ثقلی بر روی کامپوزیت‌های ساندویچی

مقادیر میانگین بیشینه نیروی تماس ضربه ثقلی بر روی نمونه کامپوزیت‌های ساندویچی سه بعدی با دو هندسه مختلف در سطح مقطع در جدول 4 نشان داده شده است. همچنین در تصاویر 7 الی 9 نمودار نیروی ضربه ثقلی بر حسب زمان، نمونه کامپوزیت‌های ساندویچی سه بعدی نشان داده شده اند. بر اساس جدول 4 مقادیر بیشینه نیروی تماس ضربه ثقلی کامپوزیت‌های ساندویچی سه بعدی حلقوی پودی با سطح مقطع مثلثی در تمام سطوح انرژی در مقایسه با سطح مقطع مستطیلی بیشتر می‌باشد که این مسئله دلیل نحوه قرارگیری لایه‌های اتصال در هسته بصورت مثلثی می‌باشد که باعث افزایش استحکام ساختار در برابر ضربه ثقلی شده است. همچنین بر اساس جدول 4 نیروی تماس ضربه ثقلی برای هر دو ساختار با سطح مقطع مثلثی و مستطیلی با افزایش سطح انرژی افزایش می‌یابد.

بر اساس شکل‌های 7، 8 و 9 نمودار نیروی ضربه ثقلی برای کامپوزیت ساندویچی سه بعدی با سطح مقطع مستطیل در تمام سطوح انرژی شامل دو پیک نیرو می‌باشد بر خلاف ساختار با سطح مقطع مستطیلی، نمودار نیروی ضربه ثقلی برای کامپوزیت ساندویچی با سطح مقطع مثلثی در تمام سطوح انرژی شامل فقط یک پیک نیرو است. بر همین اساس در سطح انرژی 13.72 ژول برای ساختار با سطح مقطع مستطیلی، پیک اول نیرو در زمان 2000 میکروثانیه رخ داده است و پیک دوم نیرو در زمان 7000 میکروثانیه و برای ساختار با سطح مقطع مثلثی پیک نیرو در زمان 9500 میکروثانیه رخ داده است. در سطح انرژی 27.44 ژول برای ساختار با سطح مقطع مستطیل پیک اول نیرو در زمان 1500 میکروثانیه و پیک دوم نیرو در زمان 11000 میکروثانیه و برای ساختار با سطح مقطع مثلثی پیک نیرو 5700 میکروثانیه رخ داده است. در سطح انرژی 41.16 ژول و برای ساختار با سطح مقطع مستطیل پیک اول نیرو در زمان 1200 میکروثانیه و پیک دوم نیرو در زمان 10900 میکروثانیه رخ داده است. بر طبق نمودارهای نیرو-زمان ضربه ثقلی برای ساختار با سطح مقطع مستطیلی با افزایش سطح انرژی ضربه پیک اول نیرو کوچک شده و پیک دوم نیرو بزرگتر شده است. همچنین برای ساختار با سطح مقطع مثلثی با افزایش سطح انرژی ضربه زمان رخداد پیک نیرو کاهش یافته است.

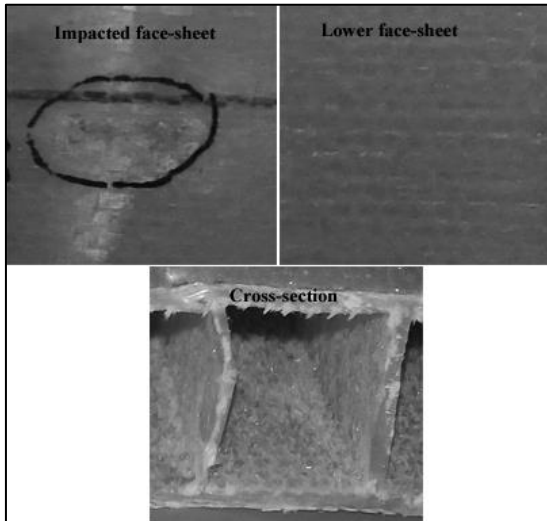


Fig. 10 The damaged 3DIWKSCs (U shape) in 13.72 J

شکل 10 تصویر آسیب وارد شده به نمونه با سطح مقطع مستطیلی در سطح انرژی 13.72

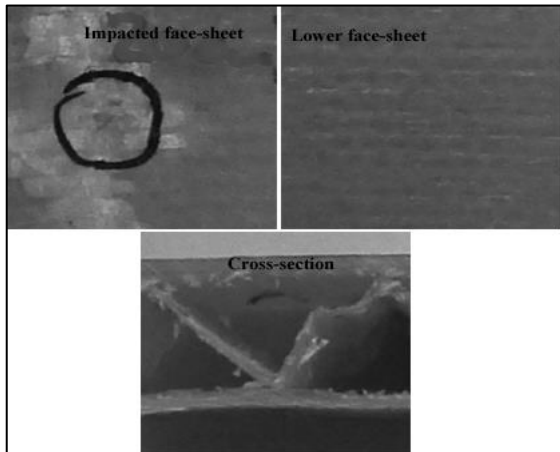


Fig. 11 The damaged 3DIWKSCs (V shape) in 13.72 J

شکل 11 تصویر آسیب وارد شده به نمونه با سطح مقطع مثلثی در سطح انرژی 13.72

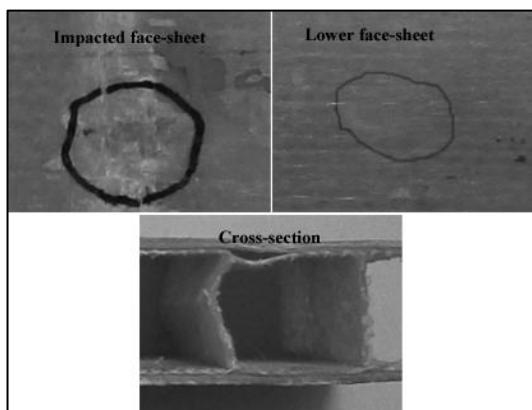


Fig. 12 The damaged 3DIWKSCs (U shape) in 27.44 J

شکل 12 تصویر آسیب وارد شده به نمونه با سطح مقطع مستطیلی در سطح انرژی 27.44

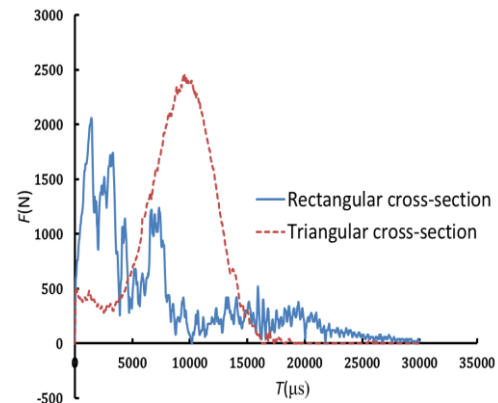


Fig. 7 The graph of contact force in 13.72 J

شکل 7 نمودار تاریخچه نیروی تماس ضربه ثقلی در سطح انرژی 13.72 ژول

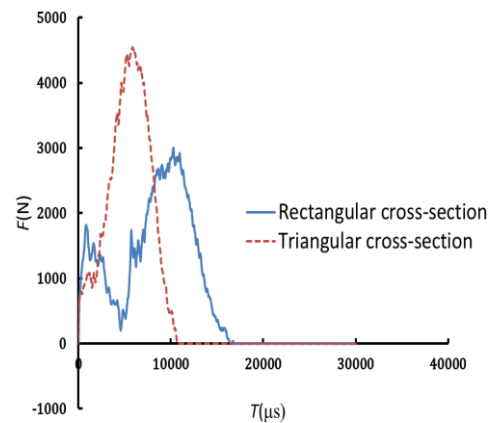


Fig. 8 The graph of contact force in 27.44 J

شکل 8 نمودار تاریخچه نیروی تماس ضربه ثقلی در سطح انرژی 27.44 ژول

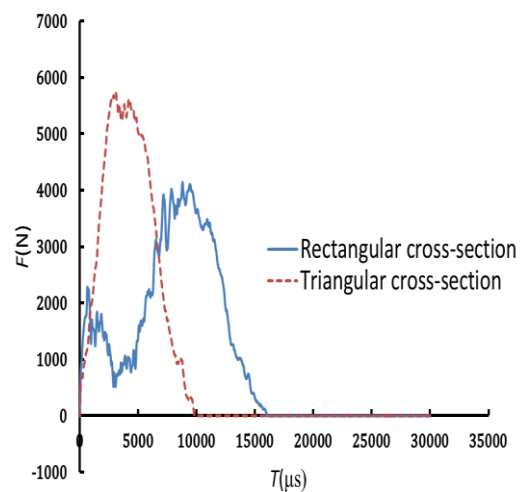


Fig. 9 The graph of contact force in 41.16 J

شکل 9 نمودار تاریخچه نیروی تماس ضربه ثقلی در سطح انرژی 41.16 ژول

## 4- نتیجه گیری

نتایج آزمون ضربه ثقلی در سطوح مختلف انرژی بر روی نمونه کامپوزیت‌های ساندویچی سه بعدی حلقوی پودی نشان می‌دهد که استحکام ساختار با سطح مقطع مثلثی در مقایسه با ساختار با سطح مقطع مستطیلی بیشتر بود. همچنین افزایش سطح انرژی ضربه ثقلی باعث افزایش مقدار نیروی تماس ضربه برای تمام نمونه‌ها شده است. نمودارهای نیرو-زمان ضربه ثقلی برای نمونه‌های کامپوزیت ساندویچی نشان می‌دهد که نمودار نیروی ضربه برای نمونه با سطح مقطع مثلثی شامل یک پیک نیرو و برای نمونه با سطح مقطع مستطیلی شامل دو پیک نیرو در تمام سطوح انرژی بود. ارزیابی آسیب وارد شده به نمونه کامپوزیت‌های ساندویچی سه بعدی تحت ضربه ثقلی نشان می‌دهد که آسیب وارد شده به پوسته روبی شامل ترک‌های عرضی و در هسته بصورت ترک در لایه‌های اتصال می‌باشد. افزایش سطح انرژی ضربه موجب ایجاد ترک در پوسته زیرین می‌شود و هرچه سطح انرژی افزایش یابد وسعت آسیب ایجاد شده در پوسته زیرین بیشتر می‌شود. همچنین هیچگونه جدایش بین هسته و پوسته در کامپوزیت‌های ساندویچی سه بعدی حلقوی پودی رخ نداد.

## 5- مراجع

- [1] Peters, S.T., "Handbook of composites", Second Edition, Chapman & Hall, Chap.12, pp.254-290, 1998.
- [2] Azarafza, R., Davar, A., 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.
- [3] Herup, E.J., Palazotto A.N., "Low-Velocity Impact Damage initiation in GRAPHITE/EPOXY/NOMEX HONEYCOMB-sandwich plates" Composites Science and Technology, Vol. 57, No. 1, pp.1581-1598, 1997.
- [4] He, W., Liu, J., Tao, B., Xie, D., Liu, J., Zhang M., "Experimental and numerical research on the low velocity impact behavior of hybrid corrugated core sandwich structures" Composite Structures, Vol.158, No. 1, pp. 30-43, 2016.
- [5] Vaidya, U. K., Pillay, S., Bartus, S., Ulven, C. A., Grow, D. T., Mathew B., "Impact and post-impact vibration response of protective metal foam composite sandwich plates" Materials Science and Engineering A, Vol. 428, No. 2, pp. 59-66, 2006.
- [6] Malekzadeh Fard, K., Khalili, S.M.R., Forooghi, S.H., Hosseini, M., "Low velocity transverse impact response of a composite sandwich plate subjected to a rigid blunted cylindrical impactor" Composites: Part B, Vol. 63, No. 1, pp. 111-122, 2014.
- [7] Ma, P., Zhang, F., Gao, Z., Jiang, G., Zhu, Y., "Transverse impact behaviors of glass warp-knitted fabric/foam sandwich composites through carbon nanotubes incorporation" Composites: Part B, Vol. 56, No. 1, pp. 847-856, 2014.
- [8] Park, J.H., Ha, S.K., Kang, K.W., Kim, C.W., Kim, H.S., "Impact damage resistance of sandwich structure subjected to low velocity impact" Journal of Materials Processing Technology, Vol. 201, No. 1, pp.425-430, 2008.
- [9] Imielin'ska, K., Guillaumat, L., Wojtyra, R., Castaigns, M., "Effects of manufacturing and face/core bonding on impact damage in glass/polyester-PVC foam core sandwich panels" Composites: Part B, Vol. 39, No. 1, pp.1034-1041, 2008.
- [10] He, Y., Tian, G.Y., Pan, M., Chen, D., "Non-destructive testing of low-energy impact in CFRP laminates and interior defects in honeycomb sandwich using scanning pulsed eddy current" Composites: Part B, Vol. 59, No. 1, pp.196-203, 2014.
- [11] Tong, L., Mouritz, A.P. and Bannister, M.K., "3D Fiber Reinforced Polymer Composites" Elsevier, 2002.
- [12] Palazotto, A.N., Gummadi, L.N.B., Vaidya, U.K., Herup, E.J., "Low velocity impact damage characteristics of Z-fiber reinforced sandwich panels - an experimental study" Composite Structures, Vol. 43, No. 1, pp.275-288, 1999.
- [13] Fan, X., Xiao-Qing, W., "Study on impact properties of through-thickness stitched foam sandwich composites" Composite Structures, Vol.92, No. 1, pp.412-421, 2010.

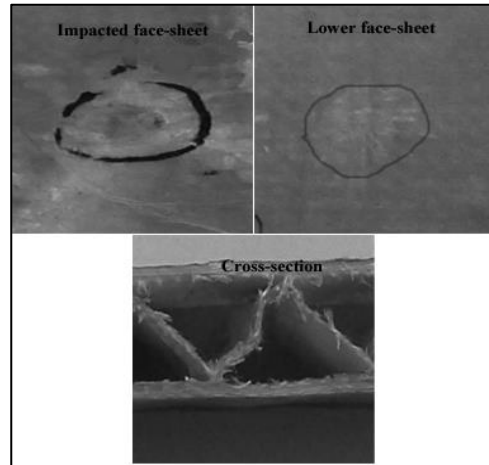


Fig. 13 The damaged 3DIWKSCs (V shape) in 27.44 J

شکل 13 تصویر آسیب وارد شده به نمونه با سطح مقطع مثلثی در سطح انرژی 27.44

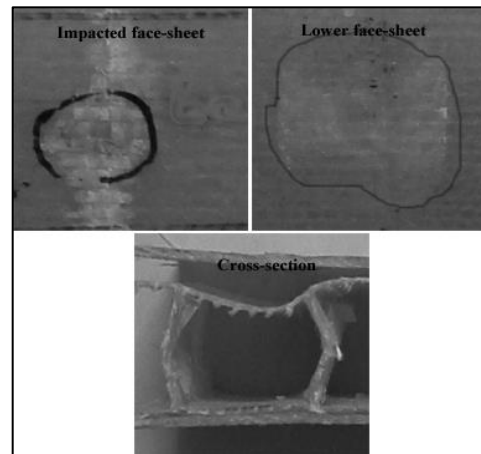


Fig. 14 The damaged 3DIWKSCs (U shape) in 41.16 J

شکل 14 تصویر آسیب وارد شده به نمونه با سطح مقطع مستطیلی در سطح انرژی 41.16

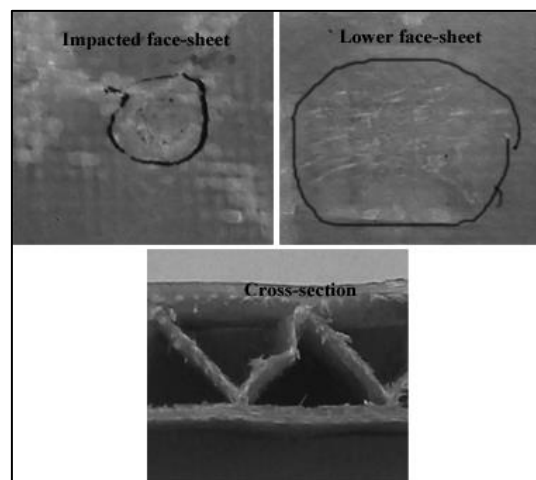


Fig. 15 The damaged 3DIWKSCs (V shape) in 41.16 J

شکل 15 تصویر آسیب وارد شده به نمونه با سطح مقطع مثلثی در سطح انرژی 41.16

- [14] Baral, N., Cartié, D.D.R., Partridge, I.K., Baley, C., Davies, P., "Improved impact performance of marine sandwich panels using through-thickness reinforcement: Experimental results" *Composites: Part B*, DOI: 10.1016/j.compositesb.2009.12.002.
- [15] Seltzer, R., González, C., Muñoz, R., Lorca, J., Blanco-Varela, T., "X-ray microtomography analysis of the damage micromechanisms in 3D woven composites under low-velocity impact" *Composites: Part A*, Vol.45, No. 1, pp.49-60, 2013.
- [16] Hosur, M.V., Karim, M.R., Jeelani, S., "Experimental investigations on the response of stitched/unstitched woven S2-glass/SC15 epoxy composites under single and repeated low velocity impact loading" *Composite Structures*, Vol.61, No. 1, pp.89-102, 2003.
- [17] Hu, H., Sun, B., Sun, H., Gu, B., "A Comparative Study of the Impact Response of 3D Textile Composites and Aluminum Plates" *Journal of Composite Materials*, Vol.44, No. 1, pp.593, 2010.
- [18] Hosur, M.V., Abraham, A., Jeelani, S. and Vaidya, U.K., "Studies on the Influence of Through-the-Thickness Reinforcement on Low-Velocity and High Strain Rate Response of Woven S2-Glass/Vinyl Ester Composites" *Journal of Composite Materials*, Vol.35, No. 1, pp.1111, 2001.
- [19] Zhang, D., Sun, Y., Chen, L., Pan N., "A comparative study on low-velocity impact response of fabric composite laminates" *Materials and Design*, Vol.50, No. 1, pp.750-756, 2013.
- [20] Hosur, M.V., Abdullah, M., Jeelani, S., "Manufacturing and low-velocity impact characterization of hollow integrated core sandwich composites with hybrid face sheets" *Composite Structures*, Vol.65, No. 1, pp.103-115, 2004.
- [21] Vaidya, U.K., Hosur, M.V., Earl, D., Jeelani, S., "Impact response of integrated hollow core sandwich composite panels" *Composites: Part A*, Vol.31, No. 1, pp.761-772, 2000.
- [22] Karahan, M., H. Ivens, G.J. and Karahan, N., "Low velocity impact characteristics of 3D integrated core sandwich composites" *Textile Research Journal*, Vol.82, No. 1, pp.945, 2012.
- [23] Herb, V., Martin, E., Couégnat, G., "Damage analysis of thin 3D-woven SiC/SiC composite under low velocity impact loading" *Composites: Part A*, Vol.43, No. 1, pp.247-253, 2012.
- [24] Abounaim, M., Hoffmann, G., Diestel, O., Cherif, C., "Thermoplastic composite from innovative at knitted 3D multi-layer spacer fabric using hybrid yarn and the study of 2D mechanical properties" *Composites Science and Technology*, Vol.70, No.2, pp.363-370, 2010.
- [25] Abounaim, M., Hoffmann, G., Diestel, O., Cherif, C., "Development of Flat Knitted Spacer Fabrics for Composites using Hybrid Yarns and Investigation of Two-dimensional Mechanical Properties" *Textile Research Journal*, Vol.79, No.7, pp.596, 2009.
- [26] Abounaim, M., Diestel, O., Hoffmann, G., Cherif, C., "Thermoplastic composites from curvilinear 3D multi-layer spacer fabrics" *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol.0731, pp.6844, 2010.
- [27] Hamedi, S., Hasani, H. and Dibajian, S. H., "Numerical simulating the flexural properties of 3D weft-knitted spacer fabric reinforced composites" *J Compos Mater*, Vol.13, No. 1, pp.1887-1899, 2017.
- [28] Azadian, M., Hasani, H. and Shokrieh, M.M., "Flexural behavior of composites reinforced with innovative 3D integrated weft-knitted spacer fabrics" DOI: 10.1177/1528083717721923., 2017.