



## مطالعه تجربی رفتار ضربه‌پذیری کامپوزیت‌های پایه فوم تقویت شده با پارچه‌های دوجداره حلقوی تاری

امیرحسین دودانکه<sup>1</sup>، هادی دبیریان<sup>2\*</sup>، سعید حمزه<sup>3</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

2- دانشیار، مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

3- کارشناس ارشد، مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

\* تهران، صندوق پستی 15875-4413، dabiryan@aut.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

استفاده از منسوجات به عنوان جز تقویت کننده کامپوزیت‌ها سبب بهبود چشم‌گیر برخی از خواص مکانیکی این مواد از جمله مقاومت در برابر بار ضربه می‌شود. در این پژوهش، رفتار ضربه‌پذیری کامپوزیت‌های برپایه فوم پلی یورتان تقویت شده با پارچه‌های دوجداره حلقوی تاری مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، پارچه‌های حلقوی تاری دوجداره با متغیرهای ساختمانی از جمله دو ضخامت متفاوت، اندازه‌ی مش‌های بزرگ و کوچک و هم‌چنین، موقعیت قرارگیری روبرو و غیرروبرو مش‌ها نسبت به هم تولید شد. سپس نمونه‌های کامپوزیتی متشکل از پارچه دوجداره حلقوی تاری به عنوان جز تقویت‌کننده و فوم پلی یورتان به عنوان زمینه تولید و خواص فیزیکی مدنظر از جمله وزن واحد سطح و کسر حجمی الیاف در آنها اندازه‌گیری شده است. در آزمون شبه استاتیکی ضربه، مقدار انرژی شکست اندازه‌گیری شد و در نهایت همه نمونه‌ها مورد آزمون ضربه سرعت پایین با انرژی اولیه 5 ژول قرار گرفته‌اند. نتایج نشان داد با قراردادن پارچه تقویت کننده در نمونه‌های فوم انرژی ضربه این نمونه‌ها حداقل 3 برابر شده است. بیشینه جذب انرژی در نمونه دارای پارچه با مش بزرگ، ضخامت زیاد و قرارگیری غیرروبروی مش‌ها نسبت به هم رخ داده است که این مقدار برابر 2.858 ژول می‌باشد. به طور میانگین، جذب انرژی کامپوزیت‌ها با افزایش ضخامت نمونه‌ها، 21.2 درصد، با تغییر اندازه مش‌ها از کوچک به بزرگ 9.5 درصد و با تغییر موقعیت مش‌ها از حالت روبرو به حالت غیرروبرو 47.3 درصد افزایش پیدا کرده است.

دریافت: 1399/09/22

پذیرش: 1400/03/30

### کلیدواژگان:

پارچه دو جداره حلقوی تاری

کامپوزیت

ضربه سرعت پایین

فوم

پارامترهای ساختمانی

## Experimental Study of the Impact Properties of Foam Based Composites Reinforced with Warp-Knitted Spacer Fabric

Amirhossein Dodankeh<sup>1</sup>, Hadi Dabiryan<sup>1\*</sup>, Saeid Hamze<sup>1</sup>

1-Textile Engineering Department, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran.

\* P.O.B. 15875-4413, Tehran, Iran, dabiryan@aut.ac.ir

### Keywords

Warp knitted spacer fabric  
Composites  
Low velocity impact  
Foam  
Geometrical parameter

### Abstract

Using fabrics as reinforcement of composites considerably leads to improve some of mechanical properties include resistance to the impact loads. In this paper, the impact behavior of polyurethane foam-based composites reinforced with warp-knitted spacer fabric is investigated, experimentally. For this purpose, warp-knitted spacer fabric with different structures such as two different thickness, small and large mesh sizes and position of the meshes facing each other and not facing each other were produced. Then composite samples were fabricated using warp-knitted spacer fabrics as reinforcement, and polyurethane foam as matrix. The physical properties of samples like weight per unit area and fiber volume fraction of composite were measured. The failure energy of prepared samples was measured during quasi-static impact test, and finally low velocity impact with an initial energy of 5 J was carried out on composite samples. The results showed that the impact energy of samples is increased at least tripled by using the reinforcement. The maximum energy absorption is 2.858 J which is related to the samples reinforced with fabric with large mesh, high thickness and not facing of the meshes relative to each other. Generally, the energy absorption on average has been increased 21.2% by increasing the thickness, 9.5% by increasing the size of the meshes from small to big, and 47.3% by changing the position of the meshes from facing to non-facing.

### 1- مقدمه

گسترده مواد کامپوزیتی در ساخت اجزای مکانیکی، شناخت خواص ضربه‌های این مواد (از سرعت کم تا زیاد) همچون خواص ایستای آنها به منظور اطمینان یافتن از قابلیت اطمینان سازه حین باربری امری ضروری است [1]. پارچه‌های

امروزه، استفاده از مواد کامپوزیتی به عنوان ماده انتخابی به جای مواد فلزی در بسیاری از کاربردهای فناوری مشاهده می‌شود. بنابراین، با توجه به کاربردهای

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Dodankeh, A.H., Dabiryan, H., and Hamze, S., "Experimental Study of the Impact Properties of Foam Based Composites Reinforced with Warp-Knitted Spacer Fabric", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 1, pp. 1353-1362, 2021.

حلقوی تار از قبیل جنس الیاف، طرح بافت و موقعیت قرارگیری جداره‌ها یا نخ کشی، زاویه نخ‌های اتصال<sup>۲</sup> و تعداد نخ‌های اتصال توسط ارمکان و روی [11] بررسی شده است. جهت گیری الیاف در بعد سوم نقش اساسی در خواص مکانیکی کامپوزیت‌های ساندویچی تقویت‌شده با پارچه‌های دوجداره دارند [12]. همچنین تحقیق دیگری [13] نشان داد، جهت‌گیری نخ‌های اتصال نقش مهمی در خواص ضربه‌پذیری کامپوزیت‌های تقویت شده با پارچه‌های دوجداره حلقوی‌بودی دارند. چاووژی و هایرولانگ [14] به بررسی تجربی رفتار فشارپذیری فوم مصنوعی تقویت شده با پارچه‌های دوجداره حلقوی تار پرداختند و مشاهده کردند که همه نمونه‌های کامپوزیتی در مقایسه با منظم-ترین نمونه فوم، مقاومت فشاری و نقطه تسلیم به مراتب بهتری دارند. نتایج نشان داد که تمام پارامترهای ساختمانی پارچه بر فشارپذیری نمونه‌های کامپوزیتی تأثیرگذار هستند.

فوم‌ها از ماده اصلی مختلف از جمله پلیمر و فلز ساخته می‌شوند. این مواد به علت ریزساختار خاصی که دارند، دارای خواص جالبی چون نسبت استحکام به وزن بالا، جذب بالای انرژی در اثر اعمال ضربه، قابلیت بالای تغییرشکل پلاستیک، خواص گرمایی و صوتی مطلوب و... هستند [15-17]. فوم‌های ترد<sup>۳</sup> به طور گسترده در صنایع حمل و نقل جهت جلوگیری از صدمه به سرنشینان در برخوردهای از جلو یا پهلو استفاده می‌گردند. استفاده از این مواد منجر به بهبود قابل توجهی در ایمنی غیر فعال وسایل نقلیه با مکانیزم اتلاف و جذب انرژی می‌شود [18]. استحکام بالای فشاری و جذب بالای انرژی در طول فاز تنش پایا<sup>۴</sup> سبب شده است که فوم‌ها به ویژه فوم‌های فلزی سلول باز دارای ویژگی جذب انرژی بر وزن مطلوبی باشند [19].

مطالعاتی نیز بر روی تاثیر ساختمان پارچه‌های دوجداره در مواجهه با بارگذاری ضربه بر روی این پارچه‌ها انجام شده است. حسامی و همکاران [20] ظرفیت جذب انرژی در کامپوزیت‌های تقویت شده با پارچه‌های حلقوی پودی سه‌بعدی را مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که بافت ریب نسبت به بافت اینترلاک، برای تولید کامپوزیت سه‌بعدی در برابر ضربه مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهند. یکی از مشکلات کامپوزیت‌های ساندیچی رایج تحت اصابت ضربه با سرعت کم، تورق پوسته‌ها و جدا شدن هسته از پوسته تحت اصابت ضربه می‌باشد [21]. ما و همکاران [22] 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 را بررسی کردند. ژائو فانگ و همکاران [23] به مطالعه تجربی رفتار ضربه‌پذیری و فشارپذیری پس از ضربه بر روی پارچه‌های دوجداره حلقوی تار پرداختند. نتایج بررسی نشان داد که پارچه دارای سطح بسته تر و نخ اتصال ضخیم تر، دارای قله نیروی کمتر، توانایی جذب انرژی بیشتر، عمق آسیب کمتر و نرخ افت بیشتر در مقاومت مانده است. همچنین بیان کردند پارچه‌های با ضخامت بیشتر دارای ویژگی‌های بهتر هستند ولی نرخ افت ویژگی‌ها در آنها کمتر است.

تحقیقات پیشین نشان داد خواص ضربه کامپوزیت‌ها کاملاً متأثر از خواص مکانیکی مواد تشکیل دهنده آن‌ها است، اما یکی از مواردی که در این تحقیقات به آن‌ها کمتر اشاره شده است بررسی تاثیر پارامترهای ساختمانی پارچه دوجداره حلقوی تار بر خواص ضربه کامپوزیت‌های تولیدی از آنها می‌باشد. به این مفهوم که سهم هر یک از پارامترهای ساختمانی پارچه دوجداره حلقوی تار از قبیل ضخامت، اندازه مش، موقعیت یا زاویه مش و حتی تراکم مش در خواص ضربه این نوع پارچه‌ها یا کامپوزیت‌های تولیدی از آنها به چه میزان

دوجداره به‌علت ویژگی‌های منحصر به فرد، امروزه در کاربردهای جدیدی همچون صنایع حمل و نقل و صنایع عمرانی مورد استفاده قرار می‌گیرند. از طرف دیگر، چندین سال است که کامپوزیت‌ها به علت ویژگی‌های خاص خود از جمله سبکی سازه و ارزان تر بودن مورد توجه صنایع مختلف قرار رفته‌اند. در این بین، توجه به بارهای دینامیکی به خصوص رفتار سازه‌ها در برابر ضربه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. پارچه‌های دوجداره حلقوی تار، پارچه‌هایی تشکیل شده از دولایه پارچه‌ی حلقوی تار هستند که این دولایه توسط نخ‌های واسط به هم متصل می‌گردند. این اتصال بین دولایه توسط نخ‌ها به گونه‌ای است که فضای خالی بین دولایه توسط همین نخ‌ها پر میشود و به ساختار پارچه حالت سه‌بعدی میدهد از این رو پارچه‌های دوجداره ضخامت بیشتری نسبت به پارچه‌های معمولی دارند [2] به عنوان پارچه‌ای برای استفاده به عنوان رویه‌ی صندلی‌ها، پارچه‌ی دوجداره‌ی حلقوی تار دارای خاصیت بسیار بهتری در انتقال رطوبت، خواص فشارپذیری بهتر، قابلیت عبور هوای بهتر و مقاومت حرارتی کمتر از فوم پلی‌یورتان است. به همین دلیل این پارچه‌ها به‌طور گسترده‌ای در منسوجات حمل و نقل، منسوجات ورزشی و پوشاک همانند پدها و کفش‌های ورزشی استفاده می‌شوند [3]. شکل 1 تصویری از پارچه دوجداره حلقوی تار را نشان می‌دهد. پارچه‌های دوجداره به دلیل ساختاری خاص و سه‌بعدی در راستای ضخامت دارای المان‌هایی است که قادرند در برابر بار ضربه که ماهیت آن نیروی خارج صفحه<sup>۱</sup> ای است، مقاومت کنند [4].

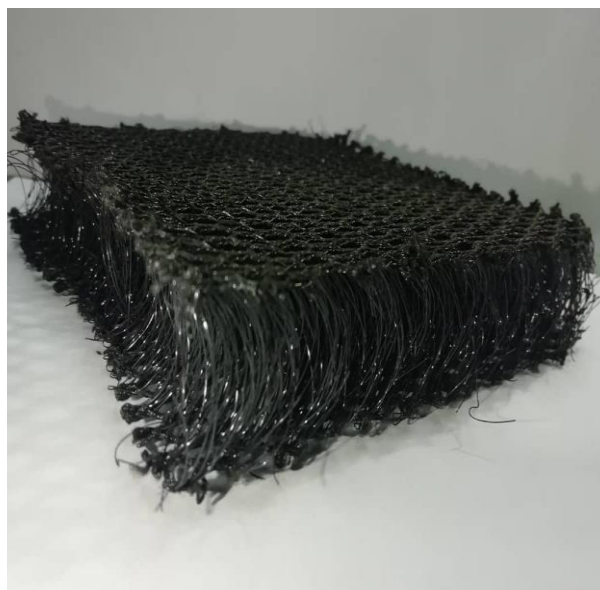


Fig. 1 warp knitted spacer fabric

شکل 1 پارچه دو جداره حلقوی تار

در مطالعات پیشین [5-10] تعاریف مختلفی برای ضربه سرعت پایین ارائه شده است، اما مفهومی از ضربه‌ی سرعت پایین در این مقاله مدنظر است که در آن سرعت ضربه‌زننده در آن کمتر از 10 m/s باشد.

مطالعات زیادی بر روی خواص فشارپذیری پارچه‌های حلقوی تار به صورت ایستا انجام شده است که بیشتر آنها تحت عناوینی چون رفتار جذب صوت، توزیع فشار، قابلیت گذردهی هوا، مقاومت حرارتی و ... به چاپ رسیده‌اند. همچنین بعضی از فاکتورهای تاثیرگذار در رفتار فشار پذیری ایستا پارچه‌های

3 Crushable foams  
4 Plateau stress

1 Out of plane  
2 Pile yarns

معرفی می‌شود، تفاوت در تعداد حلقه‌های پارچه در اضلاع 2 و 5 است. به این ترتیب که اندازه اضلاع 2 و 5 یا اندازه مش نمونه‌های سوراخ بزرگ 5c و اندازه مش نمونه‌های دارای سوراخ کوچک 3c می‌باشد. لازم به ذکر است که پارامتر  $c$  عکس<sup>1</sup> CPC (تعداد رج در واحد طول) می‌باشد.

جدول 3 ویژگی‌های فنی پارچه‌های تولیدی

Table 3 Technical characteristics of manufactured fabrics

کد نمونه	WPC <sup>2</sup>	CPC <sup>2</sup>	ضخامت اسمی (mm)	اندازه مش (mm)	وزن واحد سطح (g/m <sup>2</sup> )
BLN	4.41	7.91	7	5c	525.81
BLF	3.29	8.32	7	5c	406.75
SLN	4.8	8.09	7	3c	619.42
BHF	3.3	8.27	14	5c	641.97
BHN	4.77	7.7	14	5c	791.29
SHN	4.69	7.82	14	3c	828.11

CPC(Corse per centimeter) (تعداد رج در واحد طول(سانتی متر))

WPC(Wale per centimeter) (تعداد ردیف در واحد طول(سانتی متر))

شکل 2 تصویری شماتیک از هندسه شش ضلعی مش‌ها را به نمایش می‌گذارد.

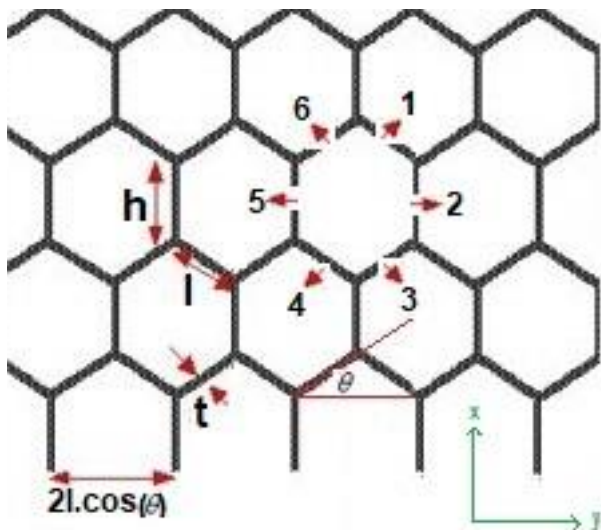


Fig. 2 Schematic of the hexagonal geometry of the meshes

شکل 2 شماتیکی از هندسه شش ضلعی مش‌ها

همچنین در شکل 3 تصویر واقعی از نمونه‌های پارچه تولیدی با ضخامت متفاوت، موقعیت قرارگیری مش‌ها نسبت به هم و اندازه مش‌های متفاوت دیده می‌شود.

می‌باشد. به همین علت در این پژوهش به بررسی تاثیر پارامترهای ساختمانی ضخامت، اندازه مش و موقعیت قرارگیری مش‌های پارچه حلقوی تار دوجداره به کار رفته در کامپوزیت تهیه شده از این پارچه بر پایه فوم پلی یورتان، در برابر بار ضربه سرعت پایین پرداخته شده است. در این پژوهش انتظار می‌رود با قرار گرفتن فوم پلی یورتان در بین پارچه دوجداره حلقوی تار مقاومت در برابر ضربه کامپوزیت‌های تقویت شده با پارچه‌های دوجداره حلقوی تار نسبت به نمونه‌های فوم بدون تقویت کننده بهبود یابد. همچنین به بررسی سهم تاثیر هر یک از پارامترهای ساختمانی پارچه دوجداره حلقوی تار در بهبود خواص ضربه کامپوزیت‌های پایه فوم تقویت شده با آنها پرداخته خواهد شد.

## 2- بررسی تجربی

### 2-1- مواد

جهت تولید نمونه‌های پارچه دوجداره حلقوی تار، از نخ پلی استر استیپل برای بافت جداره‌ها و نخ پلی استر تک رشته جهت استفاده در نخ‌های اتصال استفاده شد. جدول 1 اطلاعات نخ‌های مورد استفاده برای بافت نمونه‌های پارچه را نشان می‌دهد.

جدول 1 اطلاعات نخ‌های مورد استفاده در بافت پارچه‌ها

Table 1 yarns information used in knitting of fabric

نوع نخ	ظرافت خطی (Tex)	مدول الاستیسیته (gf/Tex)
پلی استر- استیپل	18.5	242.9
پلی استر- تک رشته	42.3	440.7

پارچه‌ها با دو آرایش متفاوت در نخ‌های اتصال، دو اندازه‌ی متفاوت مش‌های جداره‌ها و دو ارتفاع (ضخامت) متفاوت طبق نیاز این پژوهش بر روی ماشین راشل دو میله سوزن تولید شده‌اند. برای سهولت در نام‌گذاری پارچه‌ها با پارامترهای ساختمانی متفاوت از یک کدگذاری خاص برای این پارچه‌ها استفاده شده است که این کدگذاری در جدول 2 موجود است. برای مثال، طبق جدول 2، نمونه BHN نمونه‌ی دارای مش بزرگ، ضخامت زیاد و موقعیت مش‌های غیر روبرو نسبت به هم است.

جدول 2 کدگذاری نمونه‌های پارچه

Table 2 Coding of fabric specimens

مورد	شرح
اندازه مش	بزرگ/کوچک (Big/Small)
ضخامت	کم/زیاد (Low/High)
موقعیت مش‌ها نسبت به هم	روبرو/غیر روبرو (Face to face /Not face to face)

پس از بافت نمونه‌ها با پارامترهای ساختمانی متفاوت، برخی از ویژگی‌های فنی پارچه‌های تولیدی اندازه‌گیری شد که در جدول 3 ارائه شده است. با توجه به طرح بافت پارچه‌ها و توجه به شکل 2 که در آن هندسه شش ضلعی مش‌ها به نمایش گذاشته شده است، تمام نمونه‌ها در اضلاع 1، 3، 4 و 6 دارای دو حلقه هستند؛ تنها تفاوت در مش نمونه‌هایی که در ادامه به عنوان اندازه مش

<sup>2</sup> The values were measured according to ASTM D8007-15e1.

<sup>1</sup> Course Per Centimeter

برای تولید کامپوزیت‌های تقویت شده به وسیله‌ی پارچه‌های دوجداره حلقوی تار بر پایه فوم منحصر به فرد و توصیه شده‌ی خاصی در هیچ مرجعی مشاهده نشد، به همین منظور با مطالعه در پژوهش‌های تقریباً مشابه پیشین این نتیجه حاصل شد با توجه به اندازه نهایی نمونه در آزمون ضربه سرعت پایین، باید قالبی با ابعاد  $15 \times 15$  سانتی متر مربع تهیه شود. هم‌چنین، قالب مناسب باید از تمام جهات محصور باشد تا رشد فوم در فضای بین جداره‌ها و هم‌چنین مش‌های جداره‌ها به صورت کامل صورت گیرد، به همین منظور و با استفاده از پلی آمید فشرده و دستگاه فرز، مکعبی به ابعاد نهایی از صفحه پلی آمیدی خارج گردیده و سطح قالب به کمک دستگاه سنگ هموار و صیقلی گردیده است. برای مشاهده‌ی چگونگی انجام واکنش و هم‌چنین محصور شدن نهایی از شیشه برای پوشاندن کامل قالب استفاده شده است.

از هر ۶ نمونه پارچه تولید شده ۴ نمونه پارچه در ابعاد  $15 \times 15$  سانتیمتر تهیه شد و بعد از قرارگرفتن در قالب، فرآیند تهیه کامپوزیت‌ها با استفاده از فوم دو جزئی روی این نمونه‌های پارچه‌ها به انجام رسید. در مرحله بعد با توجه به ویژگی‌های ظاهری مناسب نمونه‌ها از جمله سطح صاف و ضخامت ثابت ۷ و ۱۴ میلیمتر، ۳ نمونه کامپوزیت جهت آزمون ضربه سرعت پایین انتخاب شدند تا به این شکل تکرار پذیری آزمایش‌ها نیز مورد ارزیابی قرار گیرد.

جدول ۵ مشخصات نمونه‌های کامپوزیتی تولید شده را نشان می‌دهد.

جدول ۵ مشخصات نمونه کامپوزیتی تولید شده

نمونه	وزن واحد سطح ( $g/m^2$ )	کسر حجمی الیاف (%)
BLN	1660.34	15.05
BLF	1541.25	14.09
SLN	1630.32	14.64
BHF	1840.32	11.12
BHN	2407.80	14.61
SHN	2400.11	14.54

## 2-2- آزمون شبه استاتیکی ضربه

آزمون شبه استاتیکی ضربه با استفاده از سنبه ضربه‌زننده<sup>۱</sup> ته صاف و با شعاع ۱۳ میلی‌متر و با نوک آبکاری و سخت شده جهت تعیین محدوده‌ی انرژی نفوذ و ضربه نمونه‌های موجود و با توجه به محدودیت‌های تعداد نمونه‌های آزمایش تنها بر روی نمونه فوم بدون تقویت کننده با ضخامت ۷ میلیمتر و هم‌چنین نمونه‌هایی BLF و BHN به ترتیب در ضخامت‌های ۷ و ۱۴ میلیمتر که قبل از انجام آزمایشات با توجه به ویژگی ساختاری پارچه تقویت کننده به نظر می‌رسید کمترین انرژی نفوذ را داشته باشند انجام شد. رابطه‌ی تجربی نیرو بر حسب جابجایی ضربه‌زننده در محل تماس سنبه، برای شرایط مرزی گیره‌ی محکم غیرمتحرک (چهار طرف گیردار) رسم شد. آزمون شبه استاتیکی ضربه بر روی سه نمونه ذکر شده انجام شد. نتایج حاصل از اندازه‌گیری سطح زیر منحنی نیرو-جابجایی یعنی انرژی جذب شده‌ی ضربه برای نمونه فوم بدون تقویت کننده با ضخامت ۷ میلیمتر و نمونه BLF نشان می‌دهد که انرژی ضربه در نمونه BLF بیش از ۳ برابر نمونه فوم بدون تقویت کننده است. شکل ۵ نمودار نیرو-جابجایی نمونه فوم با ضخامت ۷ میلیمتر بدون تقویت کننده و نمونه BLF را نشان می‌دهد.

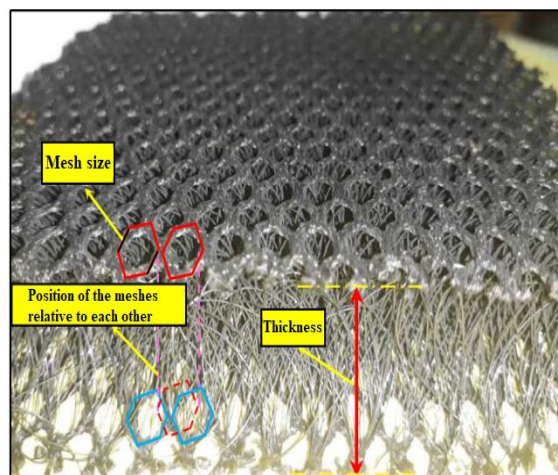


Fig. 3 Structural parameter of warp knitted spacer fabric

شکل ۳ پارامترهای ساختمانی پارچه دوجداره حلقوی تار

جهت تولید نمونه‌های کامپوزیتی بر پایه فوم لازم است تا از فوم پلی یورتان دوجزئی با نسبت ۱:۱ وزنی از ایزوسیانات و پلی آل که دارای رشد حجمی ۷-۱۰ برابر پس از تکمیل واکنش تولید فوم می‌باشد استفاده شده است. شکل ۴ پارچه آماده در قالب تولید کامپوزیت و هم‌چنین مراحل نهایی قالب‌گیری نمونه کامپوزیتی را نشان می‌دهد.

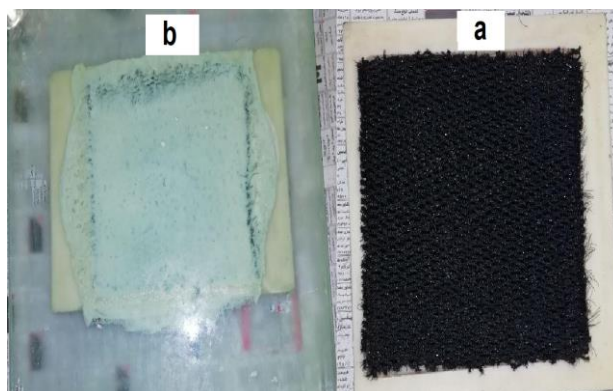


Fig. 4 Molded samples a) Fabric placed in the mold b) The final stages of molding

شکل ۴ نمونه‌های قالب‌گیری شده الف) پارچه قرار داده شده در قالب؛ ب) مراحل نهایی قالب‌گیری

در جدول ۴ برخی از ویژگی‌های فیزیکی فوم مورد استفاده در این پژوهش نشان داده شده است.

جدول ۴ ویژگی‌ها فیزیکی فوم پلی یورتان

ویژگی	ایزوسیانات	پلی آل
ویسکوزیته در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد (MPa.s)	270-180	550-350
زمان ژل شدن (S)	18-15	18-15
زمان پخت (S)	25-20	25-20

ضربه که اصطلاحاً به آن زنگوله تماس می‌گویند حاصل شود. در همین راستا، ابتدا خروجی‌های شتاب-زمان هر 3 نمونه کامپوزیتی از هر 6 نمونه پارچه تولیدی با استفاده از قوانین فیزیک ضربه به نمودارهای نیرو-جابجایی تبدیل شدند، سپس خروجی‌های نیرو-جابجایی نمونه‌های کامپوزیتی دارای پارچه‌های یک‌سان میانگین‌گیری شده و داده‌های میانگین هر 3 نمونه کامپوزیت مورد آزمون ضربه استخراج شده است. با استفاده از تابع *filtfilt* موجود در نرم افزار MATLAB R2018a که بر پایه‌ی میانگین‌گیری از نقاط انحرافی عمل می‌کند، نقاط انحرافی داده‌های میانگین 3 نمونه کامپوزیتی از هر پارچه که در مرحله قبل استخراج شد حذف گردید. با توجه به ساختار این تابع فیلتر، امکان تغییر مرتبه فیلتر وجود دارد تا منحنی هر چه بیشتر به شکل نرمال درآید. تابع *filtfilt* حد بالایی در فیلتر نقاط انحرافی ندارد به همین دلیل از توابع کمکی دیگر نیز برای نرمال کردن نتایج حاصل از میانگین آزمون ضربه استفاده شده است. شکل 6 نمونه‌ای از خروجی حاصل از آزمون ضربه برای نمونه BHN به صورت فیلتر شده و فیلتر نشده را نشان می‌دهد.

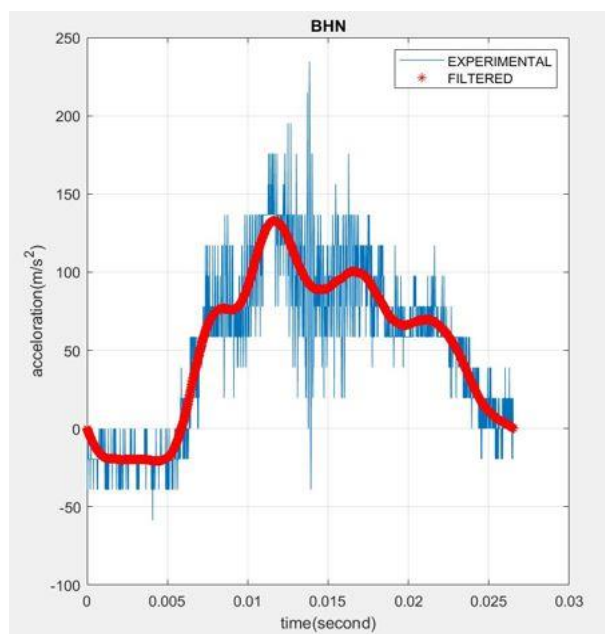


Fig. 6 Filtered and non-filtered impact output for BHN

شکل 6 خروجی آزمون ضربه به صورت فیلتر شده و فیلتر نشده برای نمونه BHN

خروجی دستگاه سقوط آزاد موجود در این پژوهش به صورت داده‌هایی از جنس شتاب و جابجایی نوک ضربه زننده است. جهت یافتن انرژی جذب شده ضربه و همینطور اطلاعات دیگر مورد نیاز از آزمون سقوط آزاد لازم است تا با انتگرال‌گیری به روش دوزنقه‌ای از شتاب به زمان و از زمان به جابجایی دست یافت و با استفاده از جرم ضربه زننده و قانون اول نیوتون نیرو متنا سب با شتاب در هر لحظه نیز محاسبه کرد تا بتوان بر سر سی دقیق‌تری از نتایج قرار گیری انواع نمونه‌های پارچه در کامپوزیت‌های مورد آزمایش به عمل آورد.

### 3-نتایج و بحث

پس از انجام آزمون ضربه سقوط آزاد بر روی نمونه‌ها به بررسی تاثیر ضربه بر روی هریک از نمونه‌ها پرداخته شد. نتایج این بررسی به طور کلی نشان داد

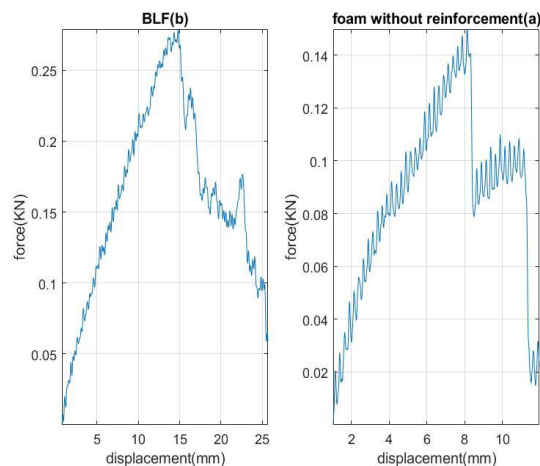


Fig. 5 Impactor displacement-force diagram from quasi-static penetration test of a) foam without reinforcement b) BLF

شکل 5 نمودار نیرو جابجایی ضربه زننده در آزمایش شبه‌استاتیکی نفوذ نمونه

الف) فوم بدون تقویت کننده ب) BLF

با توجه به شکل 5 هم بیشینه نیرو تحمل شده و هم جابجایی نوک سنبه تا قبل از شکست کامل نمونه BLF نسبت به نمونه فوم بدون تقویت کننده به مقدار قابل توجهی بیشتر شده است. در نمونه BLF به نظر می‌رسد قله‌ی اول نمودار مربوط به پارگی جداره‌ی بالایی پارچه تقویت کننده می‌باشد پس از آن سنبه وارد بعد ضخامت کامپوزیت و درگیری میان فوم و نخ‌های اتصال پارچه تقویت کننده شده است و قله‌های بعدی مربوط به شکست نخ‌های پللی می‌باشد. در بخش نزولی نمودار مربوط به نمونه BLF یک قله‌ی دوم هم مشاهده می‌شود که می‌تواند مربوط به شکست جداره‌ی زیرین پارچه دوجداره باشد. در رابطه با نمونه فوم بدون تقویت کننده نیز قله‌ی نمودار نیرو مربوط به تسلیم نمونه در مقابل بار فشاری شبه‌استاتیکی می‌باشد، بعد از آن نمونه فوم مقاومت خود را از دست داده و قله بعدی نیز به نظر مربوط به مرحله فشرده شدن<sup>1</sup> فوم می‌باشد.

### 2-3-آزمایش ضربه سرعت پایین

آزمایش‌های بار ضربه‌ای سرعت پایین بر روی تمام نمونه‌های کامپوزیتی ساخته شده، توسط دستگاه استاندارد سقوط آزاد انجام شد. پیش از قرار دادن هر نمونه تحت بارگذاری ضربه‌ای، ابتدا آن نمونه در محل مناسب خود با تکیه گاهی که شرایط مرزی چهارطرفه گیردار و ثابت را ارضا کند، قرار داده شد. در تمامی آزمایش‌ها، فقط اولین ضربه در نظر گرفته شده و از برخورد ضربه‌زننده با نمونه و ثبت ضربه‌های مکرر بعدی جلوگیری به عمل آمده است. در تمامی آزمایش‌های استاتیکی و ضربه، سنبه از یک نوع و اندازه با سطح ضربه‌ی صاف، شعاع 13 میلی‌متر و نوک آبکاری و سخت شده بود. همچنین، جرم وزنه متصل به دستگاه ضربه 2.707 کیلوگرم بود. با توجه به خروجی نمونه‌ها از آزمون شبه‌استاتیکی نفوذ و محدودیت‌های دستگاه آزمون ضربه در تنظیم حداقل انرژی اولیه ضربه، ارتفاع دستگاه بر روی 20 سانتی‌متر تنظیم شد که انرژی نفوذ در این آزمون با شرایط ذکر شده برابر 5 ژول خواهد بود. تعداد نقاط انحرافی که توسط حسگر شتاب سنج موجود در نوک ضربه زننده دستگاه ثبت شده است بسیار زیاد است، لذا برای اینکه تحلیل نتایج به درستی صورت گیرد، لازم است که نقاط انحرافی حذف شود تا نمودار نرمال

به همین دلیل افزایش نیرو قابل ملاحظه است. با دیدی مشابه در رابطه با قله شماره 3 نیز بیان می‌گردد که بنظر می‌رسد این قله مربوط به مقاومت جداره پایینی پارچه و انرژی شکست جداره پایینی می‌باشد.

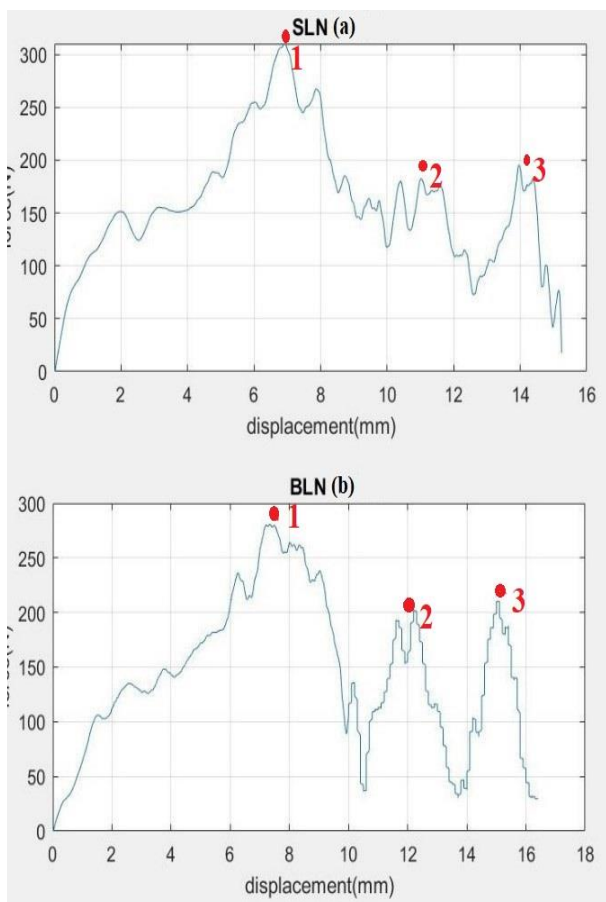


Fig. 8 Displacement-force diagram of composite samples with mesh size a) Small b) Big

شکل 8 نمودار نیرو جابجایی نمونه‌های کامپوزیتی با اندازه مش الف) کوچک ب) بزرگ

شکل 9 نمودار نیرو-جابجه جایی نمونه‌های BLF و BHF را نشان می‌دهد. طبق شکل 9 تفاوت نمونه‌ها در ارتفاع پارچه تقویت‌کننده است؛ بدین ترتیب، نمونه‌های با ضخامت بیشتر، نیروی ضربه‌ی بیشتری را تحمل می‌کنند. اما در توضیح مکانیزم‌های شکست این دو نمونه که از لحاظ ضخامت با یکدیگر تفاوت دارند باید ذکر شوند تفسیر قله‌های نمودار دقیقاً مانند شکل 9 می‌باشد که بنظر می‌رسد قله‌ی شماره 1 مربوط به شکست جداره بالایی و عبور از جداره‌ی بالایی می‌باشد، قله‌ی شماره 2 مربوط به غلبه نیروی ضربه بر مقاومت نخ‌های اتصال و فوم در بعد ضخامت پارچه تقویت‌کننده بوده و قله‌ی شماره 3 مربوط به خروج ضربه زنده از بعد شوم نمونه و شکست جداره پایینی می‌باشد.

منطقی است از آنجایی که هنگام برخورد اولیه ضربه زنده با نمونه کامپوزیتی به علت سالم بودن نمونه تقویت‌کننده و فوم هردو باهم در مقابل بار ضربه مقاومت می‌کنند به همین دلیل قله‌ی اول نمودار از قله سوم بیشتر باشد در حالی که بیان می‌شود عامل اصلی مقاومت در برابر ضربه جداره‌های بالایی و پایینی هستند.

نمونه‌های SLN, BLF, BLN به طور کامل دچار شکست شده و ضربه زنده از آنها گذشته است. نمونه‌ی BHF دچار صدمات زیادی شده اما ضربه زنده به طور کامل از آن عبور نکرده و نمونه‌های SHN, BHN نیز تنها دچار صدماتی سطحی شده‌اند. برای بررسی دقیق‌تر، چگونگی رفتار آنها در مقابل بار ضربه باید به داده‌های حاصل از آزمایش توجه بیشتری شود. شکل 7 نمای جلویی و پشتی شکست برای نمونه‌های SLN, BHN را نشان می‌دهد. در نمونه‌هایی که ضربه زنده به طور کامل از آنها عبور کرده یا به آنها صدماتی جدی وارد کرده است، جذب انرژی ضربه همراه با قله‌های زیاد و شوک بوده است.

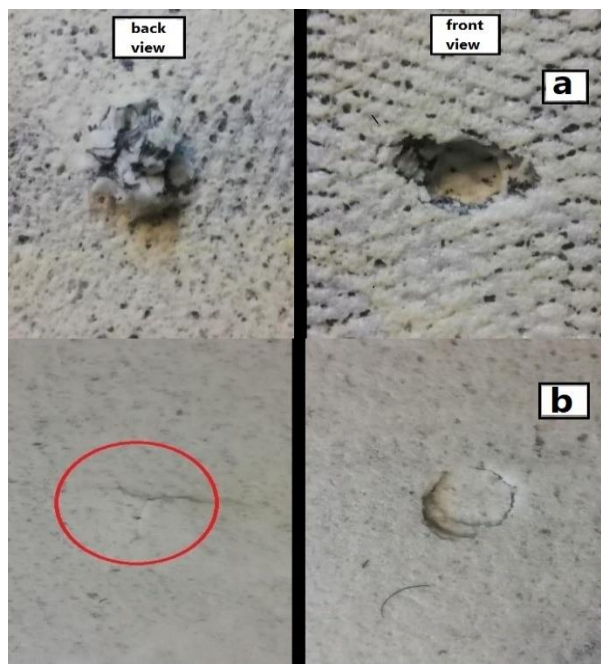


Fig. 7 Front and back failure view of samples a)SLN b)BHN

شکل 7 نمای جلویی و پشتی شکست در نمونه‌های الف) SLN ب) BHN

در بررسی موردی نمونه‌ها مشهود است نمونه‌های دارای ضخامت بیشتر توانایی بیشتری برای جذب انرژی ضربه دارند. همچنین برای مقایسه دقیق‌تر نمونه‌ها با یکدیگر، بهتر است تا نمودار نیرو-جابجایی نوک ضربه‌زنده در برخورد با نمونه‌های کامپوزیتی تولید شده رسم و اطلاعات مورد نیاز از این نمودارها برداشت شود.

شکل 8 نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌های BLN و SLN را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل 7 دیده می‌شود، تفاوت دو نمونه مورد مقایسه در اندازه مش است و به‌طور کلی تفاوت چشم‌گیری بین نیروی ضربه در دو نمونه دیده نمی‌شود.

روی هر دو نمودار شکل 8 سه نقطه عطف نمودار (قله) مشخص گردیده است، در توضیح مکانیزم شکست این نمونه‌ها باید ذکر شود به نظر می‌رسد نقطه شماره 1 مربوط به شکست و پارگی جداره بالایی پارچه یا کامپوزیت تولیدی است یعنی بیشترین نیروی وارد شده به نوک سنبه در هنگام ورود به ضخامت نمونه‌ها بوده است. بنظر می‌رسد قله‌ی شماره 2 مربوط به عبور ضربه زنده از فضای داخلی نمونه‌های کامپوزیتی می‌باشد، به علت این که در این فضا نخ‌های اتصال همراه فوم وجود دارد. ضربه زنده جهت عبور باید به نیروهای فوم-نخ اتصال و نخ اتصال-پارچه جداره که به صورت بافت می‌باشد غلبه کند

همانطور که از شکل 10 در مقایسه با شکل های 8 و 9 دیده می شود قله‌ی اصلی یا دارای بیشترین نیرو ضربه در نمونه های با ضخامت بالا موقعیتی متفاوت دارند. در نمونه های با ضخامت زیاد بعد از برخورد ضربه زنده با نمونه ابتدا قله شماره 1 مربوط به مقاومت نمونه و مخصوصا جداره بالایی در برابر ضربه مشاهده می شود، از آنجایی که ضربه زنده توانایی و انرژی لازم برای شکست جداره بالا و عبور از نمونه را ندارد، قله‌ی شماره 2 به علت فشردگی نمونه رخ داده و بعد از اینکه نیروی ضربه به جداره دوم رسید یعنی جداره دوم نیز نقش خود را در برابر بار ضربه بازی کرد قله‌ی شماره 3 رخ می‌دهد

شکل 11 نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌های SHN و BHN که دارای بیشترین نیروی ضربه و بیشترین انرژی ضربه در بین همه‌ی نمونه‌ها هستند را برای ضربه سقوط آزاد نشان می‌دهد.

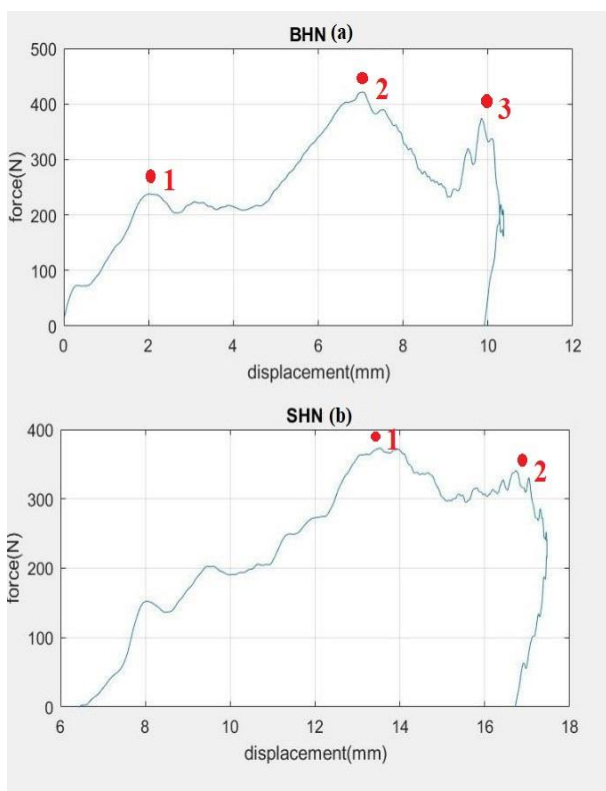


Fig. 11 Displacement-force diagram of composite samples a) BHN b) SHN

شکل 11 نمودار نیرو جابه‌جایی نمونه‌های کامپوزیتی الف) BHN ب) SHN

همانطور که قابل انتظار بود بیشترین انرژی ضربه و بیشترین نیروی ضربه در نمونه های با ضخامت زیاد رخ داد اما از مقایسه نمودار نیرو-جابجایی نمونه های BHN و SHN در شکل 11 می‌توان پی برد شکل این دو نمونه با یکدیگر دارای تفاوت های اساسی است به حدی که نمیتوان برای نمونه SHN مانند 5 نمونه دیگر 3 قله را مشخص کرد. این طور بنظر می‌رسد که نمونه SHN به علت قرارگیری غیر روبرو مش‌ها نسبت به هم و همین طور ضخامت زیاد توانایی بالایی در میرایی انرژی ضربه و از بین بردن تمرکز تنش ناشی از برخورد نوک ضربه زنده با نمونه دارد. قله‌ی شماره 1 در نمونه SHN ناشی از برخورد ضربه زنده با نمونه و پاشی نمونه در فرآیند فشردگی است و قله‌ی شماره 2 بعد از همراهی جداره دوم در مقاومت نسبت به نیروی ضربه رخ داده است.

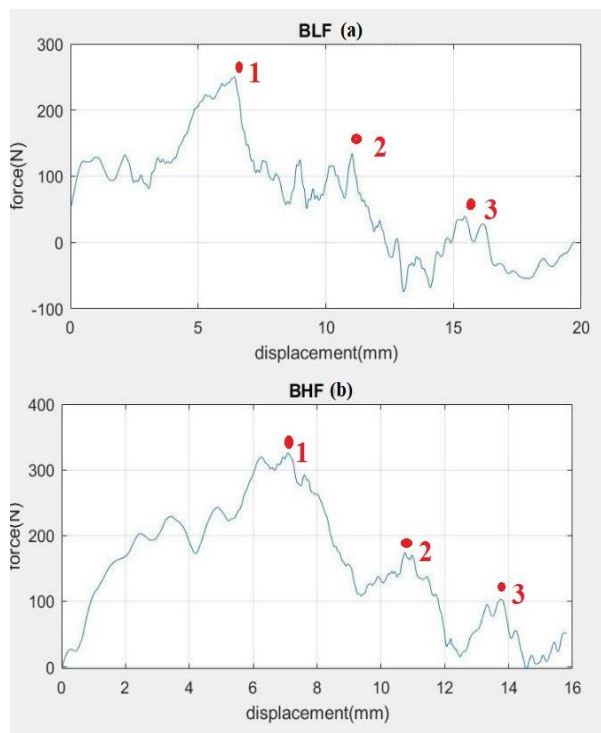


Fig. 9 Displacement-force diagram of composite samples with height a) Low b) High

شکل 9 نمودار نیرو جابه‌جایی نمونه‌های کامپوزیتی با ضخامت الف) کم ب) زیاد

در ادامه در شکل 10 نمودار نیرو جابه‌جایی نمونه‌های BHN و BHF که موقعیت قرارگیری دیواره‌ها در این نمونه‌ها متفاوت است دیده می‌شود.

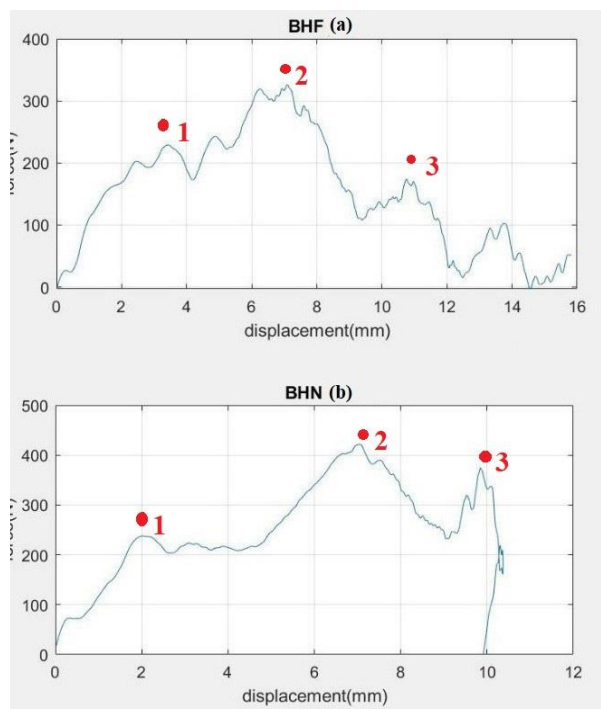


Fig. 10 Displacement-force diagram of composite samples with different position of the meshes a) Facing b) Non-facing

شکل 10 نمودار نیرو جابه‌جایی نمونه‌های کامپوزیتی با موقعیت قرارگیری

دیواره‌ها نسبت به هم الف) روبرو ب) غیرروبرو

افزایش می‌یابد، به همین دلیل، به نظر می‌رسد مش بزرگتر برای کاربردهای جذب و میرایی انرژی، پارامتر ساختمانی بهتر است. تأثیر موقعیت مش‌ها نسبت به هم در مقایسه‌ی نمونه‌های BLN و BLF باهم دیگر و همچنین مقایسه‌ی نمونه‌های BHF و BHN با یکدیگر قابل مشاهده خواهد بود. با توجه به جدول 6 و شکل 4 واضح است اگر موقعیت مش‌ها نسبت به هم غیر روبرو باشد یا به عبارت دیگر، تغییر حرکت لپینگ نخ‌های اتصال موجب اتصال غیرمستقیم جداره‌ها باشد، فارغ از ضخامت نمونه، بیشینه‌ی شتاب، بیشینه‌ی نیروی ضربه و مقدار انرژی جذب شده در اثر ضربه بیشتر خواهد شد. هم‌چنین با توجه به نمودار نیرو-جابجایی نمونه‌ها، به نظر می‌رسد در نمونه‌هایی با اتصال غیر مستقیم یا غیر روبرو، قله‌های کمتری در نمودار مشاهده می‌شود. به عبارت دیگر، میرایی انرژی در این نمونه‌ها بهتر صورت می‌گیرد.

#### 4- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، نمونه‌های کامپوزیتی با استفاده از تقویت‌کننده پارچه‌های حلقوی تار دوجداره بر پایه فوم پلی‌یورتان دوجزئی با روش قالب‌گیری در محیط بسته تهیه شد. به‌منظور بررسی تأثیر پارامترهای ساختمانی جزء تقویت‌کننده (پارچه دوجداره) از قبیل ضخامت، اندازه‌ی مش و موقعیت قرارگیری جداره‌ها نسبت به هم بر روی رفتار ضربه کامپوزیت‌ها، ابتدا آزمون شبه استاتیکی نفوذ و سپس آزمون ضربه سرعت پایین (سقوط آزاد) بر روی نمونه‌ها انجام شد. نتایج نهایی حاصل از این تحقیق تجربی به صورت زیر است:

- با قراردادن پارچه ی تقویت کننده در نمونه‌های فوم پلی‌یورتان با ضخامت 7 میلیمتر و مقایسه و شمشاده نتایج آزمون شبه استاتیکی خروجی های نمودار نیرو-جابجایی نشان داد ، انرژی جذب شده در نمونه های دارای پارچه تقویت کننده با اندازه سوراخ بزرگ، حالت روبروی مش ها و ضخامت کم حداقل 3 برابر شده است.
- با افزایش ضخامت پارچه‌های تقویت کننده، بیشینه‌ی نیروی ضربه و انرژی جذب شده ضربه در تمام نمونه های پارچه با پارامترهای هندسی مختلف، افزایش می‌یابد.
- با تغییر موقعیت مش‌ها از حالت مستقیم به حالت غیر مستقیم در پارچه تقویت کننده، بیشینه‌ی نیروی ضربه و هم‌چنین انرژی جذب شده ضربه توسط نمونه افزایش داشته است.
- به طور کلی در نمونه‌های پارچه تقویت کننده با مش بزرگ جذب انرژی و میرایی انرژی، هم‌چنین بیشینه شتاب و نیروی ضربه مقدار بزرگتری را از خود نشان می‌دهد. یعنی با نمونه‌ها با مش جداره بزرگ از نمونه‌های با مش جداره کوچک، خواص ضربه پذیری بهتری از خود نشان می‌دهند.

#### 5- مراجع

- [1] Omid, M. J. and Shokrieh, M. M., "The Impact resistance of Fiber-Reinforced Polymer Composite: A Review," In Persian, Iranian journal of polymer science and technology, Vol. 24, No. 4, pp. 255-277, 2011.
- [2] Yip, J. and Sun, P. N., "Study of Three-Dimensional Spacer Fabrics: Physical and Mechanical Properties," Journal of materials processing technology, Vol. 206, No. 1-3, pp. 359-364, 2008.
- [3] Xiaohua, Y., Hong, H. and Xunwei, F., "Development of the Warp Knitted Spacer Fabrics for Cushion Applications," Journal of industrial textiles, Vol. 37, No. 3, pp. 213-223, 2008.
- [4] Hasanalizadeh, F., Dabiryan, H. and Sadighi, M. A., "Semi-Empirical Model to Predict the Low-Velocity Impact Behavior of Weft-Knitted

جدول 6 برخی ویژگی‌های مکانیکی نمونه‌های مورد آزمایش ضربه را به صورت میانگینی از تکرار آزمایش نشان می‌دهد. انرژی جذب شده نمونه‌ها در این پژوهش با استفاده از محاسبه مساحت زیر نمودار نیرو-جابجایی هریک از آنها به دست آمد.

جدول 6 برخی ویژگی‌های مکانیکی نمونه‌های کامپوزیتی

Table 6 Some mechanical properties of composite samples

کد نمونه	بیشینه شتاب (m/s <sup>2</sup> )	بیشینه نیروی ضربه (N)	انرژی جذب شده ضربه (J)	جابجایی متناظر با بیشینه نیرو (mm)
BLN	103.66	281.01	2.322	خارج از محدوده آزمایش
BLF	92.43	250.21	1.319	خارج از محدوده آزمایش
SLN	114.52	310.03	2.1555	خارج از محدوده آزمایش
BHF	120.33	325.73	2.407	7.1
BHN	155.71	421.5	2.858	7.06
SHN	139.5	373.13	2.572	13.53

از مقایسه‌ی نمونه‌های BHF و BHN باهم و مقایسه‌ی سه نمونه‌های BLN و BHN با هم و هم‌چنین، مقایسه‌ی سه نمونه‌های SLN و SHN با یکدیگر، تأثیر ضخامت نمونه یا ارتفاع پارچه‌ی تقویت کننده به وضوح دیده می‌شود. اختلاف کسر حجمی الیاف در نمونه‌ها در این دسته‌بندی اشاره شده که ضخامت پارامتر ساختمانی متغیر آنها است، کمتر از 3٪ است، ولی تفاوت مقدار بیشینه شتاب و نیروی ضربه و هم‌چنین انرژی جذب شده ضربه در نمونه‌های با ضخامت بیشتر با نمونه‌های با ضخامت کمتر، بسیار قابل توجه است. از بررسی تأثیر ضخامت در نمونه‌های مورد مقایسه در این قسمت برداشت می‌شود هرچه ضخامت نمونه‌های کامپوزیتی افزایش یابد، عملکرد نمونه در بی‌شینه نیروی ضربه، بیشینه شتاب ضربه و انرژی جذب شده، بهتر می‌شود. ولی باید توجه داشت، بین افزایش ضخامت و افزایش خواص ضربه پذیری نمونه‌ها هیچ ارتباط مشخصی یافت نشد؛ به‌طوری که با دوبرابر شدن ضخامت نمونه‌ها، چنین نسبی در افزایش انرژی جذب شده ضربه یا نیروی ضربه مشاهده نشد. با مقایسه‌ی تأثیر اندازه‌ی مش پارچه جداره‌ها در نمونه‌های BLN و SLN با هم و هم‌چنین نمونه‌های BHN و SHN با یکدیگر، مشاهده می‌شود که بین کسر حجمی نمونه‌هایی که با هم در یک گروه برای مقایسه قرار دارند، تفاوت قابل توجهی وجود ندارد و تفاوت کسر حجمی الیاف نمونه‌های این گروه کمتر از 0.5٪ است، بنابراین، تأثیر پارامترهای ساختمانی پارچه تقویت کننده به خصوص در این مقایسه یعنی اندازه مش قابل مشاهده خواهد بود. در نمونه‌های با ضخامت زیاد هنگامی که اندازه مش بزرگتر است بیشینه شتاب، بیشینه نیروی ضربه و انرژی جذب شده ضربه بیشتر از هنگامی است که اندازه مش‌ها کوچک است. در نمونه‌های با ضخامت کم، نمونه‌های دارای مش کوچکتر بیشینه شتاب و نیروی ضربه بزرگتر دارند ولی مقدار انرژی ضربه ی جذب شده آنها کمتر از نمونه‌های دارای مش بزرگ است.

به‌طور کلی، به نظر می‌رسد اندازه‌ی مش‌های جداره‌ها پارامتری است که به تنهایی نمی‌توان در مورد اثر آن بر روی خواص ضربه‌ای سازه تقویت شده با آن نظر داد، ولی نکته قابل توجه این است که در کامپوزیت‌های تهیه شده از پارچه‌های حلقوی تار دوجداره با مش بزرگ، ظرفیت نمونه در جذب انرژی



- Spacer Fabrics Reinforced Composite,” In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 05, No. 01, pp. 117-126, 2018.
- [5] Abrate, S., “Impact on Composite Structures,” ambridge, Cambridge university press, 1998.
- [6] Sjoblom, P., Hartness, J. and Cordell, T., “On Low-Velocity Impact Testing of Composite Materials,” Journal of composites material, Vol. 22, No. 01, pp. 30-52, 1988.
- [7] Shivakumar, K., Elber, W. and Illg, W., “Prediction of Low-Velocity Impact Damage in Thin Circular Laminates,” Journal of Applied Mechanics, Vol. 23, No. 03, pp. 442-449, 1985.
- [8] Cantwell, W. and Morton, J., “The Impact Resistance of Composite Materials-a Review,” Composites, Vol. 22, No. 05, pp. 347-362, 1991.
- [9] Liu, D. and Malvern, L., “Matrix Cracking in Impacted Glass/Epoxy Plates,” Journal of composites, Vol. 21, No. 07, pp. 594-609, 1987.
- [10] Joshi, S. and Sun, C., “Impact-Induced Fracture Initiation and Detailed Dynamic Stress Field in the Vicinity of Impact (Retroactive Coverage),” in American Society of Composites 2nd Tech.conf, pp.177-185, 1987.
- [11] Armakan, D. M. and Roye, A., “A Study on the Compression Behavior of Spacer Fabrics Designed for Concrete Applications,” Fibers and Polymers, Vol. 10, No. 01, pp. 116-123, 2009.
- [12] Delavari, K. and Dabiryan, H., “Effect of Z-fiber Orientation on the Bending Behavior of Sandwich-Structured Composite: Numerical and Experimental Study,” Composite structures, Vol. 256, pp. 113-140, 2021.
- [13] Dabiryan, H., Hasanalizade, F., and Sadighi, M., “Low-Velocity Impact Behavior of Composites Reinforced with Weft-Knitted Spacer Glass Fabrics,” Journal of Industrial Textile, Vol. 49, No. 04, pp. 465-483, 2019.
- [14] Chao, Z. and Hairu, L., “Compressive Properties of Syntactic Foam Reinforced by Warp-Knitted Spacer Fabric,” Cellular Polymers, Vol. 34, No. 04, pp. 173-188, 2015.
- [15] Buffel, B., Desplentere, F., Bracke, K. and Verpoest, I., “Modelling Open Cell-Foams Based on the WeairePhelan Unit Cell with a Minimal Surface Energy Approach,” International Journal of Solids and Structures, Vol. 51, No. 19-20, pp.3461-3470, 2014.
- [16] Zhiqiang, L., Changqing, X., Jing, L., Wangt, Z. and Zhao, L., “Effect of Loading Rate on the Compressive Properties of Open-Cell Metal Foams,” Materials Science & Engineering A, Vol. 592, No.1, pp. 221-229, 2014.
- [17] Ashby, Michael F., et al., “Metal foams: a Design Guide,” Elsevier, 2000.
- [18] Sadighi, M., and Salami, S. J., “An Investigation on Low-Velocity Impact Response of Elastomeric & Crushable Foams,” Central European Journal of Engineering, Vol. 02, No. 04, pp. 627-637, 2012.
- [19] Schüler, P., Fisher, S., Bührig-Polaczek, A. and Fleck, Cl., “Deformation and Failure Behaviour of Opencell Al Foams Under Quasistatic and Impact Loading,” Materials Science & Engineering, Vol. 587, No. 01, pp.250-261, 2013.
- [20] Hesami, R., Hassani, H., Ajeli, S. and Zadhooosh, A., “Investigation Into the Energy Absorption Capacity of Reinforced Composite by 3D weft-knitted Fabrics,” In Persian, Journal of Textile Science and Technology, Vol. 02, No. 02, pp. 65-70, 2012.
- [21] 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.
- [22] Ma, P., Zhang, F., Gao, Z., Jiang, G. and Zhu, Y., “Transverse Impact Behaviors of Glass Warp-Knitted Fabric/Foam Sandwich Composites Through Carbon Nanotubes Incorporation,” Composites: Part B, Vol. 56, No. 01, pp. 847-856, 2014.
- [23] Guo, X., Hairu L. and Li Z., “Investigation on the Impact and Compression-After-Impact Properties of Warp-Knitted Spacer Fabrics,” Textile Research Journal, Vol. 83, No. 9, pp. 904-916, 2013.

