



## ارائه مدل نیمه تجربی جهت پیش بینی رفتار ضربه با سرعت پایین کامپوزیت های تقویت شده با پارچه های دوجداره حلقوی پودی

فاطمه حسنعلی زاده<sup>1</sup>، هادی دبیریان<sup>1\*</sup>، مجتبی صدیقی<sup>2</sup>

1- مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

2- مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

\* تهران، صندوق پستی 16846-13114، Dabiryan@aut.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

دریافت: 96/4/26

پذیرش: 96/6/31

### کلیدواژگان:

ضربه سرعت پایین

پارچه های دو جداره حلقوی پودی

کامپوزیت های منسوجی

مدل نیمه تجربی

استفاده از منسوج به عنوان جزء تقویت کننده، سبب بهبود چشمگیر برخی از خواص مکانیکی کامپوزیت ها می شود. یکی از ویژگی های مهم مکانیکی، مقاومت در برابر بارهای ضربه ای است. از اینرو، در مقاله حاضر، رفتار ضربه پذیری کامپوزیت های تقویت شده با پارچه های دوجداره حلقوی پودی مورد مطالعه قرار گرفت. از آنجا که ماهیت مکانیکی ضربه ناشی از نیروهای خارج از صفحه است، تقویت کامپوزیت ها در راستای ضخامت به منظور تحمل بارهای ضربه ای از اهمیت بالایی برخوردار است. پارچه های دو جداره حلقوی پودی به دلیل وجود نخ های اتصال ساختار مناسبی برای تقویت در راستای ضخامت کامپوزیت ها به شمار می روند. در این تحقیق، ابتدا اصول کلی حاکم بر رفتار ضربه سرعت پایین کامپوزیت ها مورد مطالعه قرار گرفت؛ سپس، با به کارگیری پارامترهای ساختاری منسوج مانند هندسه، ساختمان بافت و خواص نخ، معادلات حاکم بر رفتار ضربه ای لایه ها استخراج و در قالب مدلی مکانیکی ارائه گردید. در ادامه پارچه های دوجداره حلقوی پودی با آرایش متفاوتی از نخ های اتصال که بر اساس مدل ارائه شده مهم ترین پارامتر موثر در ضربه پذیری است، بافته شد و به عنوان تقویت کننده های کامپوزیت مورد استفاده قرار گرفت. در انتها نمونه ها تحت آزمون ضربه با سرعت پایین قرار گرفتند. انطباق نتایج تئوری و تجربی نشان داد که مدل ارائه شده به خوبی قادر به پیش بینی رفتار ضربه ای کامپوزیت های تقویت شده با پارچه های دوجداره حلقوی پودی است.

## A semi-empirical model to predict the low-velocity impact behavior of weft-knitted spacer fabrics reinforced composites

Fatemeh Hasanalizadeh<sup>1</sup>, Hadi Dabiryan<sup>1\*</sup>, Mojtaba Sadighi<sup>2</sup>

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

2- Mechanical Engineering Department, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

\*P.O.B. 16846-13114, Tehran, Iran, Dabiryan@aut.ac.ir

### Keywords

Low velocity impact  
Weft-knitted spacer fabrics  
Composite  
Semi-empirical model

### Abstract

Using fabrics as reinforcement of composites considerably leads to improve some of mechanical properties. One of the important mechanical properties is resistance to impact forces. Therefore, in the present study, the impact behavior of composites reinforced with weft-knitted spacer fabrics has been studied. Due to the out of plane nature of impact force, the through-the-thickness reinforcement of composite play a key rule in undergoing the impact forces. Weft-knitted spacer fabrics are adequate structures to reinforce through-the thickness of composite due to the existence of spacer yarns. In this study, at first, principle of low velocity impact behavior of composites was studied. Then, a semi-empirical model was generated to predict the impact behavior of composites considering the structural parameters of weft-knitted spacer fabrics as reinforcement of composites. In order to validate the proposed model, weft-knitted spacer fabrics with different types of spacer yarn's orientation were produced and used as reinforcement of composites. The low-velocity impact test was carried out on the prepared samples. A good correlation was found between theoretical and experimental results.

### 1- مقدمه

است [1]. کامپوزیت های منسوجی در اثر ضربه های وارده احتمالی توسط اجسام خارجی در حین فرآیند ساخت و یا در مراحل تعمیر و نگهداری، نسبت به فلزات آسیب پذیرتر هستند و آسیب وارده به آن ها داخلی بوده و با چشم غیر مسلح قابل تشخیص نیست. لذا مطالعه رفتار کامپوزیت ها در برابر ضربه خارجی به منظور پیش بینی آسیب های ممکن حائز اهمیت است. در مقاله حاضر، رفتار کامپوزیت های تقویت شده با پارچه های دوجداره حلقوی پودیدر برابر بارگذاری ضربه با سرعت پایین مورد مطالعه قرار گرفته است.

امروزه، استفاده از مواد کامپوزیتی به عنوان ماده انتخابی به جای مواد فلزی در بسیاری از کاربردهای فناوری مشاهده می شود. بنابراین، با توجه به کاربردهای گسترده مواد کامپوزیتی در ساخت اجزای مکانیکی، شناخت خواص ضربه ای این مواد (از سرعت کم تا زیاد) همچون خواص ایستای آن ها به منظور اطمینان یافتن از قابلیت اطمینان سازه حین باربری امری ضروری

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Please cite this article using:

Hasanalizadeh, F. Dabiryan, H. and Sadighi, M., "A semi-empirical model to predict the low-velocity impact behavior of weft-knitted spacer fabrics reinforced composites", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 5, No. 1, pp. 117-126, 2018.

ساختار پارچه های حلقوی پودی دوجداره به عنوان جزء تقویت کننده، به بررسی رفتار ضربه با سرعت پایین کامپوزیت های تقویت شده با آنها می پردازد. هدف از انجام این تحقیق، ارائه مدلی جهت مطالعه رفتار ضربه با سرعت پایین کامپوزیت های تقویت شده با پارچه های دوجداره ی حلقوی پودی بر اساس متغیرهای ساختمانی این نوع پارچه است تا بتوان به کمک آن برای جذب میزان مشخصی انرژی ضربه توسط کامپوزیت، پارچه ای با پارامترهای هندسی مشخص به عنوان جزء تقویت کننده استفاده نمود.

## 2- تئوری ضربه با سرعت پایین

ضربه، حالت خاصی از تماس بین دو جسم است. لذا برای مطالعه و ورود به این بحث لازم است به تئوری های مربوط به برخورد دو جسم پرداخته شود [2]. بر اساس قانون هرترز<sup>۸</sup>، در اثر تماس جسم کروی ایزوتروپ و یک جسم صاف، ناحیه تماس دایره ای به شعاع  $a$  خواهد بود (شکل 1) که مقدار آن از رابطه زیر به دست می آید:

$$F = \frac{4}{3}ER^{\frac{1}{2}}d^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

که در آن  $F$ ، نیروی تماسی،  $d$  عمق نفوذ و  $E$  مدول الاستیسیته ترکیبی است و از رابطه زیر به دست می آید:

$$\frac{1}{E} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \quad (2)$$

زیر نویس های 1 و 2 در رابطه (2) به ترتیب معرف کره (جسم ضربه زننده) و سطح صاف (هدف مورد ضربه) و  $\nu$  ضریب پواسن است. همچنین سفتی تماس<sup>۹</sup> دو جسم به صورت زیر تعریف می شود:

$$K = \frac{4}{3}ER^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

جایگذاری ضریب سفتی تماس از رابطه (3) در رابطه (2)، آن را به صورت زیر تغییر می دهد:

$$F = Kd^{\frac{3}{2}} \quad (4)$$

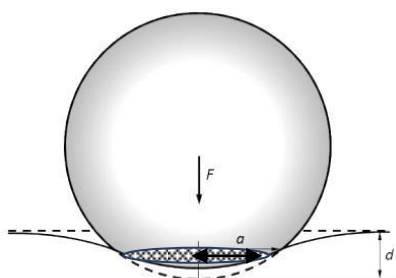


Fig. 1 Contact area between isotropic sphere and flat layer [15]

شکل 1 شکل حاصل از تماس کره ایزوتروپ و جسم صاف [15]

برای شبیه سازی رفتار اجسام در برخورد با جسم خارجی، دو مدل ارائه گردیده است؛ مدل جرم و فنر<sup>۱۰</sup> و مدل تعادل انرژی<sup>۱۱</sup>. در پژوهش حاضر استفاده از مدل انرژی ترجیح داده شده است لذا به بیان جزئیات این مدل پرداخته می شود. فرض مدل تعادل انرژی این است که تمام انرژی جنبشی

پارچه های دو جداره به دلیل ساختاری خاص و سه بعدی در راستای ضخامت دارای المان هایی است که قادر است در برابر ضربه که ماهیت آن نیروی خارج صفحه ای<sup>۱</sup> است، مقاومت کند. بنابر این نگاهی دقیق تر به پارامترهای ساختمانی منسوج به خصوص ویژگی های هندسی مربوط به آرایش نخ های اتصال که در راستای ضخامت پارچه ایفای نقش می کند، از اهداف اصلی این مقاله است.

تعاریف متعددی برای ضربه سرعت پایین ارائه شده است [2-7]. در مقاله حاضر، مفهومی از سرعت پایین مدنظر است که سرعت ضربه زننده را معیار قرار می دهد و ضرباتی که در آن سرعت ضربه زننده کمتر از 10 m/s است به عنوان ضربه سرعت پایین نامیده می شود [2].

مطالعات زیادی در خصوص بررسی رفتار ضربه پذیری منسوجات و کامپوزیت های تقویت شده با آن صورت گرفته است [8-14]. حسامی<sup>۲</sup> و همکاران [8]، ظرفیت جذب انرژی در کامپوزیت های تقویت شده با پارچه های حلقوی پودی سه بعدی را مورد بررسی قرار دادند. در مطالعه آن ها پارچه های حلقوی پودی به روش گرما شکل دهی به حالت سه بعدی درآمدند و نتایج آزمون هانشان داد قالب کروی برای شکل دهی پارچه نسبت به قالب مخروطی، تراکم سلولی زیاد نسبت به تراکم سلولی کم و بافت ریب نسبت به بافت اینترلاک برای تولید کامپوزیت سه بعدی در برابر ضربه مقاومت بیشتری از خود نشان می دهد. ونگ<sup>۳</sup> و همکاران [9] در پژوهشی دیگر، تاثیر آرایش الیاف در کامپوزیت های هیبریدی تار-پودی سه بعدی را بر خواص ضربه سرعت پایین آن ها مورد بررسی قرار دادند. به این منظور کامپوزیت های تولیدی با الیاف آرامید/بازالت و رزین اپوکسی در دو آرایش سه بعدی مختلف درون لایه ای<sup>۴</sup> (در هر لایه ترکیبی از دو نخ به کار رفته است) و بین لایه ای<sup>۵</sup> (در هر لایه تنها یک نوع نخ به کار رفته است) تهیه شده است. نتایج مطالعه فوق نشان داد، ضربه پذیری و انرژی جذب شده کامپوزیت هیبریدی با آرایش بین لایه ای به دلیل هم پوشانی بین اجزاء سازنده و تقویت سازه بیشتر از آرایش درون لایه ای در هر دو جهت تار و پود است. ژاو<sup>۶</sup> و همکاران [10]، تاثیر نوع دوخت کامپوزیت های سه بعدی تار-پودی را بر خواص ضربه ای و کششی آن مورد بررسی قرار داده اند. نتایج آزمایشات آن ها نشان داد مقاومت نمونه های دارای دوخت نسبت به نمونه های بدون دوخت در برابر ضربه بیشتر است. زیرا در کامپوزیت های دارای دوخت المان های بیشتری در راستای مقاومت سازه وجود دارد که در برابر ضربه مقاومت می کند و همچنین کسر حجمی نمونه را افزایش می دهد.

صدیقی<sup>۷</sup> و همکاران [11-14] سایر پارامترهای موثر بر خواص ضربه ای ورقه های کامپوزیتی فلز-الیاف را مورد بررسی قرار دادند. نتایج مدلسازی های تئوری و آزمون های تجربی آن ها نشان داد، عواملی چون نوع الیاف و فلز، هندسه ضربه زننده و شرایط مرزی اعمال آزمون ضربه بر ضربه پذیری سازه مورد نظر است.

با اشاره به برخی مطالعات صورت گرفته در خصوص خواص ضربه با سرعت پایین کامپوزیت ها، چنین برمی آید که تاکنون اقدام مؤثری برای یافتن ارتباط بین خواص منسوجی جزء تقویت کننده کامپوزیت و خواص ضربه با سرعت پایین آن صورت نگرفته است. از این رو، در مقاله حاضر با تمرکز بر

<sup>1</sup>Out of Plane Force

<sup>2</sup>Hesami

<sup>3</sup>Wang

<sup>4</sup>Interaply

<sup>5</sup>Interply

<sup>6</sup>Zhao

<sup>7</sup>Sadighi

<sup>8</sup>Hertzian Law

<sup>9</sup>Contact Stiffness

<sup>10</sup>Spring-Mass Model

<sup>11</sup>Energy-Balanced Model

که در آن E مدول الاستیسیته ترکیبی و R شعاع ترکیبی است و به صورت زیر محاسبه می شوند.

$$\frac{1}{E} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \quad (12)$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (13)$$

و در آن زیر نویس 1 مربوط به جسم هدف، زیر نویس 2 مربوط به ضربه زننده و  $\nu$  ضریب پواسن است.

جدول 1 مقادیر  $K_m$  و  $K_b$  برای بارگذاری تماسی [4]

Table 1.  $K_m$  and  $K_b$  values in contact loading

نوع رابطه	سفتی غشایی ( $K_m$ )	سفتی خمشی ( $K_b$ )
تکیه گاه مرکب	$\frac{(353 - 191\nu_c)\pi E_c h}{648(1 - \nu_c)a^2}$	$\frac{4\pi E_c h^3}{3(1 - \nu_c^2)a^2}$
تکیه گاه ثابت	$\frac{191\pi E_c h}{648a^2}$	$\frac{4\pi E_c h^3}{3(1 - \nu_c^2)a^2}$
تکیه گاه ساده	$\left\{ \begin{aligned} &\frac{191}{648}(1 + \nu_c)^4 \\ &+ \frac{1}{48}(1 + \nu_c)^3 + \frac{32}{9}(1 + \nu_c)^2 \\ &+ \frac{40}{9}(1 + \nu_c) + \frac{8}{3} + \frac{1}{(1 - \nu_c)} \left[ \frac{(1 + \nu_c)^4}{8(1 + \nu_c)^2 + 16(1 + \nu_c) + 16} \right] \end{aligned} \right\} \frac{\pi E_c h}{(3 + \nu_c)^4 a^2}$	$\left\{ \begin{aligned} &\frac{4\pi E_c h^3}{3(3 + \nu_c)(1 - \nu_c)a^2} \\ &+ \frac{1}{48}(1 + \nu_c)^3 + \frac{32}{9}(1 + \nu_c)^2 \\ &+ \frac{40}{9}(1 + \nu_c) + \frac{8}{3} \end{aligned} \right\} \frac{\pi E_c h}{(3 + \nu_c)^4 a^2}$

### 3- مدل سازی رفتار کامپوزیت های دو جداره حلقوی پودی تحت

#### ضربه سرعت پایین

در صورتی که جسم مورد هدف کامپوزیت دو جداره حلقوی پودی باشد تغییر شکل های کلی سازه در دو بخش در نظر گرفته می شود: تغییر شکل های دو لایه بالایی و پایینی و تغییر شکل نخ های اتصال میانی. تغییر شکل ها در دو لایه بالا و پایین تنها از نوع خمشی و غشایی است. تغییر شکل های غشایی در اثر نیروی نگه دارنده نمونه کامپوزیتی در آزمایش ضربه برای جلوگیری از لغزش آن به وجود می آید. تغییر شکل نخ ها نیز تنها از نوع خمشی است. بنابراین انرژی برشی برای هر دو بخش قابل صرف نظر کردن است چرا که نیروی برشی در دو لایه بالایی و پایینی هر سازه، کمترین مقدار و در لایه میانی (تار خنثی) بیشترین مقدار است که در خصوص کامپوزیت های دو جداره حلقوی پودی تنها المان های موجود در لایه میانی نخ های اتصال هستند که قادر به تحمل نیروی برشی نیستند. لذا می توان رابطه (5) را برای کامپوزیت های دو جداره حلقوی پودی به صورت زیر باز نویسی کرد:

اولیه ضربه زننده به جسم هدف منتقل می شود که بخشی از آن به صورت انرژی قابل بازگشت تا پیش از تغییر شکل سازه در آن ذخیره شده و بخش دیگر انرژی به صورت غیر قابل بازگشت صرف تغییر شکل جسم هدف در طول ضربه می شود. با فرض اینکه رفتار سامانه شبه استاتیک باشد، زمانی که ساختار به بیشترین میزان تغییر شکل می رسد، سرعت ضربه زننده صفر شده و تمام انرژی جنبشی آن صرف تغییر شکل ساختار می شود. تغییر شکل های ممکن در حالت کلی شامل خمش و برش هستند اما در حالت تغییر شکل های بزرگ اثرات غشایی هم مطرح می شود. با این مفروضات معادله تعادل انرژی به صورت رابطه (5) بیان می شود.

$$\frac{1}{2}MV^2 = E_b + E_s + E_m + E_c \quad (5)$$

که در رابطه (5)،  $M$  جرم ضربه زننده،  $V$  سرعت ضربه زننده و  $E$  انرژی ناشی از تغییر شکل های مختلف که زیر نویس های  $b$ ،  $s$  و  $m$  به ترتیب معرف تغییر شکل های خمشی، برشی و غشایی ساختار هستند و زیر نویس  $c$  مربوط به انرژی ذخیره شده قابل بازگشت در ناحیه تماس است. همچنین ارتباط بین نیرو-تغییر شکل های این مسئله به صورت رابطه (6) تعریف می شود [2].

$$F = K_{bs}W + K_mW^3 \quad (6)$$

که در رابطه (6)،  $K_{bs}$  سفتی خطی موثر شامل اثرات خمش و برش،  $K_m$  سفتی ناشی از اثرات غشایی و  $W$  میزان انحنای در نقطه ضربه است. روابط مربوط به محاسبات ضرایب سفتی طبق جدول 1 از روابط (7) و (8) بدست می آید [2]:

$$\frac{1}{K_{bs}} = \frac{1}{K_b} + \frac{1}{K_s} \quad (7)$$

$$K_s = \frac{4\pi}{3} Gh \left( \frac{E}{E - 4wG} \right) \left( \frac{4}{3} + \log \frac{a}{a_c} \right) \quad (8)$$

که در آن،  $G$  مدول برشی،  $h$  ضخامت صفحه مورد هدف ضربه،  $a$  شعاع صفحه و  $a_c$  شعاع تماس است.  $K_b$  و  $K_m$  نیز متناسب با شرایط مرزی حاکم با استفاده از جدول 1 قابل محاسبه هستند. با تفکیک رابطه (5) به دو بخش انرژی برگشت پذیر و برگشت ناپذیر، برای بخش برگشت ناپذیر انرژی که مربوط به مجموع تغییر شکل های خمشی، برشی و غشایی است، با جایگذاری متوسط نیرو از رابطه (6) و محاسبه انرژی به صورت کار خارجی می توان نوشت:

$$E_b + E_s + E_m = \frac{1}{2}K_{bs}W_{max}^2 + \frac{1}{4}K_mW_{max}^4 \quad (9)$$

که در آن  $W_{max}$  عمق نفوذ یا میزان جابجایی به ازای بیشینه نیرو است. همچنین برای محاسبه بخش قابل بازگشت انرژی که همان میزان انرژی ذخیره شده در سازه پیش از رسیدن به نیروی بیشینه و بروز تغییر شکل ها است، رابطه زیر استفاده می شود [2]:

$$E_c = \frac{2}{5}KW_{max}^5 \quad (10)$$

که در آن  $K$  سفتی تماس<sup>1</sup> نام دارد و از قانون هرتز طبق رابطه زیر به دست می آید:

$$K = \frac{4}{3}ER^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

<sup>1</sup>Contact Stiffness

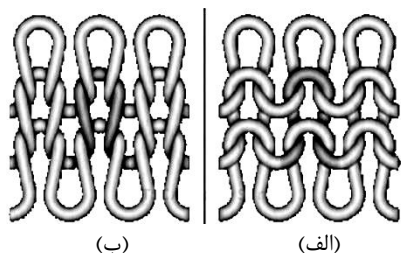


Fig. 3 schematic of loop in knit structure, a) Technical face, b) Technical back

شکل 3 نمایش حلقه در ساختمان بافت، الف- روی فنی، ب- پشت فنی

که در آن SD تراکم حلقه<sup>3</sup> در هر سانتی متر مربع، cpc و wpc به ترتیب تعداد رج و ردیف در هر سانتی متر است. لذا تعداد حلقه های هر لایه ( $N_l$ ) در مساحت ضربه زنده کروی به شعاع  $a$  برابر است با:

$$N_l = cpc \times wpc \times \pi a^2 \quad (18)$$

در نتیجه نیروی وارد به هر حلقه ( $f$ ) با در نظر گرفتن هر دو لایه برابر است با:

$$f = \frac{F}{2N_l} \quad (19)$$

در صورتی که مقدار  $N_l$  در رابطه (19) با مقدار این کمیت در رابطه (18) جایگزین شود، نیروی وارد به هر حلقه از رابطه زیر به دست می آید:

$$f = \frac{F}{2 \times cpc \times wpc \times \pi a^2} \quad (20)$$

با جایگذاری مقدار نیرو از رابطه (20) در رابطه (16) انرژی خمشی هر حلقه برابر خواهد بود با:

$$E_b = \frac{F^2 L^3}{348B_y (2 \times cpc \times wpc \times \pi a^2)^2} \quad (21)$$

در نهایت انرژی خمشی کل حلقه ها در مساحت ضربه زنده برابر است با انرژی هر حلقه در تعداد حلقه ها و از رابطه زیر به دست می آید:

$$E_{bf} = \frac{F^2 L^3}{696B_y \times cpc \times wpc \times \pi a^2} \quad (22)$$

لازم به ذکر است که با توجه به ماهیت کامپوزیتی سازه های مورد مطالعه، مقدار سختی خمشی ( $B_y$ ) مورد استفاده در روابط، مربوط به نخ آغشته به رزین است و برای محاسبه آن از رابطه (23) استفاده می شود [17]:

$$B_y = E_y I_y \quad (23)$$

که در آن  $E_y$  مدول الاستیسیته نخ آغشته به رزین و  $I_y$  ممان دوم سطحی آن است. مقدار  $E_y$  با استفاده از قانون مخلوطها<sup>4</sup> و رابطه زیر به دست می آید:

$$E_y = E_Y \nu_Y + E_r \nu_r \quad (24)$$

که در آن  $E_Y$  و  $E_r$  به ترتیب مدول الاستیسیته نخ و رزین،  $\nu_Y$  و  $\nu_r$  نیز به ترتیب کسر حجمی نخ (یا پارچه) و رزین می باشد.  $I_y$  هم با فرض دایروی بودن سطح مقطع نخ به شعاع ( $d$ ) از رابطه زیر به دست می آید:

$$\frac{1}{2} MV^2 = E_{bf} + E_{mf} + E_{by} + E_c \quad (14)$$

که در آن زیر نویس های  $f$  و  $Y$  به ترتیب مربوط به پارچه<sup>1</sup> و نخ<sup>2</sup> است.  $E_{bf}$  و  $E_{mf}$  به ترتیب انرژی خمشی و غشایی لایه ها،  $E_{by}$  انرژی خمشی نخ و  $E_c$  انرژی ذخیره شده در سازه پیش از رسیدن به تغییر شکل در بیشینه نیرو است.

### 1-3 محاسبه انرژی خمشی لایه ها ( $E_{bf}$ )

برای محاسبه میزان خمش لایه بالایی و پایینی، از رابطه زیر که میزان خیز نخ پود را تحت نیروی نخ تار در پارچه های تاری-پودی نشان می دهد، استفاده می شود [16].

$$Y_{max} = \frac{fL^3}{192B_y} \quad (15)$$

که در آن  $Y_{max}$  بیشینه خیز نخ پود توسط نیروی نخ تار،  $f$  نیروی نخ،  $L$  طول محصور بین دو نخ متوالی و  $B_y$  سختی خمشی نخ تحت خمش است. رابطه (15) مربوط به نخ با سطح مقطع دایروی است که نیروی خارج از صفحه بر مرکز آن وارد شده و آن را خم می کند. با توجه به اینکه لایه بالا و پایین پارچه دو جداره مجموعه ای از حلقه هایی از جنس نخ است که تحت نیروی ضربه خم می شود، می توان این رابطه را برای خمش لایه های تحت ضربه به کار گرفت.

شکل 2 نمایی از وضعیت خمش نخ تحت نیروی نخهای متقاطع را نشان می دهد.

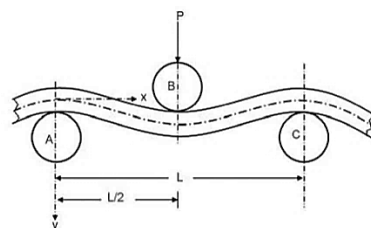


Fig. 2 Schematic of weft bending under warp loading [16]

شکل 2 نمایی از خمش نخ تحت نیروی نخهای متقاطع [16]

در نتیجه کار خارجی انجام شده بر روی نخ با فرض اینکه نیروی خارجی موثر، متوسط نیروی وارده از جانب نخهای متقاطع باشد، از رابطه زیر به دست می آید و برابر با انرژی خمشی لایه بالایی و پایینی خواهد بود.

$$E_b = \frac{1}{2} f Y_{max} = \frac{f^2 L^3}{348B_y} \quad (16)$$

حال می توان از این رابطه برای مدلسازی ضربه در ساختار پارچه های دو جداره حلقوی پودی استفاده کرد، به گونه ای که  $f$  نیروی ضربه وارده به هر حلقه و  $L$  طول محصور بین حلقه های مجاور به عنوان نقاط گیر است و در شکل 3 به رنگ تیره تری نشان داده شده است.

با توجه به شکل 3 طول محصور برابر با کل طول حلقه است. در صورتی که نیروی کل حاصل از ضربه  $F$  باشد، نیروی وارد بر هر حلقه از تقسیم  $F$  بر تعداد حلقه های موجود در مساحت ضربه زنده به دست می آید. تعداد حلقه ها در هر سانتی متر مربع از پارچه برابر است با:

$$SD = cpc \times wpc \quad (17)$$

<sup>3</sup>Stitch Density  
<sup>4</sup>Rule of Mixtures

<sup>1</sup>Fabric  
<sup>2</sup>Yarn

$$E_{by} = fL_0(1 - \sin\alpha) \left[ 1 - L_2 \sqrt{\frac{f}{2B_y}(1 + \sin\alpha)} \right] \quad (33)$$

که در آن،  $f$  نیروی خمشی وارد به هر نخ خاب،  $L_0$  طول اولیه نخ خاب بدون اعمال نیرو،  $\alpha$  مقدار نهایی زاویه  $\theta$  و  $L_2$  طول بخش صاف و مستقیم نخ خاب مطابق شکل 5 است.

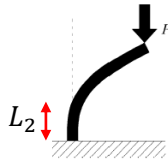


Fig. 5 Flat length of carpet pile [19]

شکل 5 طول بخش صاف در هندسه نخ خاب [19]

برای محاسبه انرژی کل نخ های میانی در ناحیه تماس در کامپوزیت دو جداره حلقوی پودی، لازم است تا بیشینه نیروی ضربه بر تعداد نخ های میانی موجود در ناحیه تماس تقسیم شود تا انرژی هر نخ اتصال میانی به دست آید. در صورتی که تعداد نخ های اتصال در هر سانتی متر مربع با  $psc^1$  و شعاع تماس برابر با شعاع ضربه زنده ( $a$ ) فرض شود، تعداد نخ های اتصال ( $N_p$ ) مساحت ضربه زنده برابر خواهد بود با:

$$N_p = psc \times \pi a^2 \quad (34)$$

در نتیجه نیروی وارد به هر نخ اتصال ( $f$ ) از تقسیم بیشینه نیروی ضربه ( $F$ ) بر تعداد نخ های اتصال مطابق با رابطه زیر محاسبه می شود:

$$f = \frac{F}{N_p} \quad (35)$$

با جایگذاری مقدار  $N_p$  از رابطه (34) در رابطه (35)، نیروی خمشی هر نخ اتصال برابر خواهد بود با:

$$f = \frac{F}{psc \times \pi a^2} \quad (36)$$

حال با جایگزینی مقدار  $f$  از رابطه (36) در رابطه (33) انرژی خمشی هر نخ اتصال بر حسب بیشینه نیروی ضربه به صورت رابطه زیر قابل بازنویسی است:

$$E_{by} = \frac{F}{psc \times \pi a^2} \times L_0(1 - \sin\alpha) \left[ 1 - L_2 \sqrt{\frac{F}{2B_y(psc \times \pi a^2)}(1 + \sin\alpha)} \right] \quad (37)$$

برای محاسبه انرژی خمشی مجموع نخ های اتصال در ناحیه ضربه، انرژی خمشی هر نخ اتصال از رابطه (37) در تعداد آن ها در این ناحیه ( $N_p$ ) ضرب می شود و رابطه زیر را به عنوان مجموع انرژی خمشی نخ های اتصال در ناحیه ضربه نتیجه می دهد:

$$E_{by} = FL_0(1 - \sin\alpha) \left[ 1 - L_2 \sqrt{\frac{F}{2B_y(psc \times \pi a^2)}(1 + \sin\alpha)} \right] \quad (38)$$

در نهایت با جایگذاری مقدار  $B_y$  از رابطه (26) در رابطه (38)، انرژی خمشی نخ های اتصال برابر است با:

$$I_Y = \pi \frac{d^4}{64} \quad (25)$$

با جایگذاری  $E_Y$  و  $I_Y$  از روابط (24) و (25) در رابطه (21)، مقدار  $B_y$  برابر خواهد بود با:

$$B_y = (E_Y v_Y + E_r v_r) \times \pi \frac{d^4}{64} \quad (26)$$

حال با جایگذاری  $B_y$  از رابطه (26) در رابطه (22)، انرژی خمشی لایه ها به شکل رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$E_{bf} = \frac{64F^2L^3}{696(E_Y v_Y + E_r v_r) \times cpc \times wpc \times (\pi ad^2)^2} \quad (27)$$

### 2-3 محاسبه انرژی غشایی لایه ها ( $E_{mf}$ )

انرژی غشایی لایه ها با توجه به رابطه (28) به دست می آید [2]:

$$E_m = \frac{1}{4} K_m W_{max}^4 \quad (28)$$

سفتی غشایی ( $K_m$ ) نیز با توجه به شرایط مرزی حاکم بر دستگاه آزمون ضربه (گیره محکم و غیر متحرک) مطابق با جدول 1 برابر است با:

$$K_m = \frac{(335 - 191v_r)\pi E_r h}{648(1 - v_r)a^2} \quad (29)$$

که در آن،  $h$  ضخامت جسم هدف و  $a$  شعاع ناحیه تماس است. همچنین مدول الاستیسیته و  $v_r$  ضریب پواسن جسم هدف بوده و از روابط زیر به دست می آیند [2]:

$$E_r = \frac{E_x + E_y}{2} \quad (30)$$

$$v_r = \frac{v_x + v_y}{2} \quad (31)$$

که در آن زیرنویس های  $x$  و  $y$  بیانگر جهت اندازه گیری خواص الاستیسیته مورد نظر است. با جایگذاری مقادیر  $K_m$ ،  $E_r$  و  $v_r$  به ترتیب از روابط (29)، (30) و (31) در رابطه (29)، انرژی غشایی از رابطه زیر به دست می آید:

$$E_{mf} = \frac{(670 - 191\left(\frac{v_x+v_y}{2}\right))(E_x + E_y)\pi h}{5184\left(1 - \left(\frac{v_x+v_y}{2}\right)\right)a^2} W_{max}^4 \quad (32)$$

### 3-3 محاسبه انرژی خمشی نخ های میانی ( $E_{by}$ )

برای محاسبه انرژی خمشی نخ های میانی از تئوری ارائه شده برای خمش نخ های خاب استفاده می شود [19,18]. بر اساس این تئوری هندسه نخ های خاب در اثر اعمال نیروی  $P$  به صورت شکل 4 درمی آید:

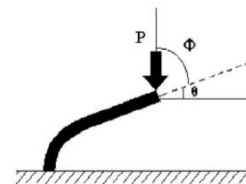


Fig. 4 Carpet pile geometry under bending [18]

شکل 4 هندسه نخ خاب تحت بار خمشی [18]

انرژی خمشی نخ در این حالت برابر است با:

<sup>1</sup>Pile Per Square Centimeter

$7\text{ cm}^{-1}$  و  $3.8\text{ cm}^{-1}$  است. پس از بافت، برای تولید کامپوزیت ها روش رزین زنی دستی مورد استفاده قرار گرفت تا بدین ترتیب ضخامت و ساختار سه بعدی نمونه ها حفظ شود. به این منظور رزین اپوکسی R126 و هاردنر H3895C با نسبت اختلاط 1:2 به کار گرفته شدند. ابتدا پارچه ها بر روی سطح صاف شیشه ای قرار داده شد و پس از آغشته سازی با قلم مو به مخلوط رزین و هاردنر، رزین اضافی توسط غلتک چاپ از ساختار خارج گردید و به مدت یک هفته در دمای محیط قرار داده شد. مشخصات کامپوزیت های تولید شده در جدول 3 نشان داده شده است. پس از آن کامپوزیت ها به ابعاد  $10\text{ mm} \times 25\text{ mm}$  توسط دستگاه اینسترون مدل 5566 در هر دو راستای رج و ردیف مورد آزمایش کشش قرار گرفت. هدف از آزمایش کشش نمونه ها دستیابی به مدول یانگ آن ها در ناحیه خطی اول (محدوده کرنش 1-2.5٪) بود لذا به محض عبور از این ناحیه، آزمایش متوقف شد. مدول الاستیسته در دو جهت رج ( $E_C$ ) و ردیف ( $E_W$ ) در جدول 4 ارائه شده است.

جدول 2 اطلاعات نخ مورد استفاده در بافت پارچه های دو جداره حلقوی پودی

Tab2. Yarn properties using for fabricating spacers

ویژگی ها	نوع/مقدار
نوع نخ	شیشه E-Glass
قطر (mm)	0.4
نمره (Tex)	87
مدول الاستیسته (MPa)	2767
مدول خمشی ( $Nmm^2$ )	3.48

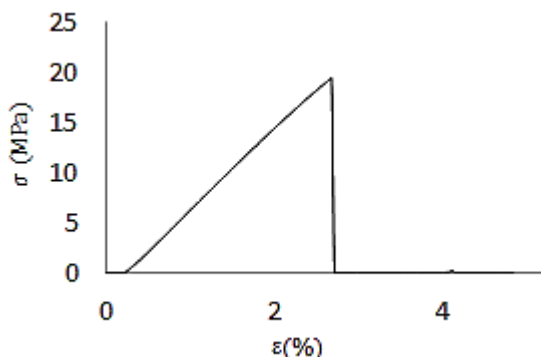


Fig. 7 Stress-Strain curve of yarns

شکل 7 نمودار تنش-کرنش نخها

پس از آزمون کشش، نمونه ها تحت آزمون ضربه با سرعت پایین قرار گرفتند. آزمون ضربه سرعت پایین با استفاده از دستگاه آزمون ضربه با روش پرتاب وزنه با وزنه ای به جرم 2.712 Kg، سطح مقطع دایره ای به قطر 13mm، ارتفاع پرتاب 36 cm و سرعت اولیه 2.66 m/s انجام شد. شکل 9 تصاویر کامپوزیت ها را پس از ضربه نشان می دهد. خروجی دستگاه، تغییرات شتاب نسبت به زمان در بازه ای به مدت 26 میلی ثانیه است. پس از حذف نقاط پراکنده از داده های به دست آمده، نمودار نرمال ضربه که اصطلاحاً به آن "زنگوله تماس" می گویند، به دست آمد و پس از دو مرحله انتگرال گیری، رابطه شتاب-زمان به جابجایی-زمان تبدیل شد و با توجه به اینکه مدل مورد استفاده بر مبنای انرژی است، با استفاده از اطلاعات به دست آمده، نمودار نیرو-جابجایی برای هر نمونه تحت ضربه به دست آمد.

$$E_{by} = FL_0(1 - \sin\alpha) \left[ 1 - L_2 \sqrt{\frac{32F}{(E_Y v_Y + E_r v_r)(\pi ad^2)^2 psc} (1 + \sin\alpha)} \right] \quad (39)$$

### 3-4 محاسبه انرژی ذخیره شده در کامپوزیت ( $E_C$ )

برای محاسبه انرژی ذخیره شده در کامپوزیت، از نمودار نیرو-جابجایی آن تحت ضربه که از آزمایشات به دست آمده است، استفاده می شود. شکل 6 نمونه ای از تغییرات نیرو نسبت به جابجایی را در کامپوزیت تحت ضربه نشان می دهد. بر این اساس کامپوزیت تا رسیدن به بیشینه نیرو ( $F_m$ ) در برابر تغییر شکل ها مقاومت کرده و از آن پس شروع به تغییر شکل می کند. انرژی ذخیره شده در کامپوزیت پیش از شروع تغییر شکل ها ( $E_C$  یا  $E_m$ ) برابر با مساحت زیر منحنی نیرو-جابجایی از جابجایی صفر تا جابجایی در نقطه بیشینه نیرو ( $F_m$ ) است (مساحت قسمت هاشور خورده).

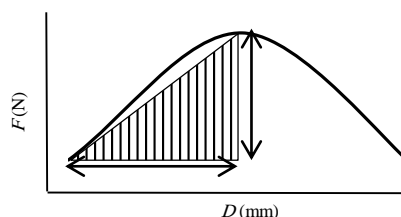


Fig. 6 Calculation of  $E_C$  by area under force-displacement curve

شکل 6 محاسبه  $E_C$  از سطح زیر نمودار نیرو ( $F$ ) - جابجایی ( $D$ ) به روش مثلثی

در نهایت انرژی های محاسبه شده برای پیش بینی رفتار کامپوزیت های تقویت شده با پارچه های دو جداره حلقوی پودی تحت بارگذاری ضربه سرعت پایین به صورت دستگاه معادلاتی (40) ارائه شده است:

$$\left\{ \begin{aligned} E_{by} &= FL_0(1 - \sin\alpha) \left[ 1 - L_2 \sqrt{\frac{32F}{(E_Y v_Y + E_r v_r)(\pi ad^2)^2 psc} (1 + \sin\alpha)} \right] \\ E_{bf} &= \frac{64F^2 L^3}{696(E_Y v_Y + E_r v_r) \times cpc \times wpc \times (\pi ad^2)^2} \\ E_{mf} &= \frac{(670 - 191 \left(\frac{v_x + v_y}{2}\right))(E_x + E_y)\pi h}{5184 \left(1 - \left(\frac{v_x + v_y}{2}\right)\right)a^2} W_{max}^4 \\ E_C &= \int_0^{d_{max}} F d(d) \end{aligned} \right. \quad (40)$$

مدل نهایی برابر با مجموع انرژی های محاسبه شده در رابطه (41) به عنوان انرژی کلی جذب شده ( $E_T$ ) ارائه می گردد.

$$E_T = E_{bf} + E_{mf} + E_{by} + E_C \quad (41)$$

### 4- مواد، روش ها و تجربیات

اطلاعات نخ مورد استفاده در بافت نمونه ها در جدول 2 نشان داده شده است. برای محاسبه مدول الاستیسته نخ ها، نمونه هایی به طول 25 cm از آن تا حد گسیختگی مورد آزمایش کشش قرار گرفت و نمودار تنش-کرنش آن در شکل 7 مشاهده می شود.

پارچه ها با بافت پایه یکسان و پنج آرایش متفاوت در نحوه اتصال نخ های میانی بر روی ماشین تخت باف الکترونیکی مدل CMS 330 TC با گیج 7 بافته شدند. نمایش سوزنی و شماتیک پارچه ها در شکل 8 نشان داده شده است. تراکم رج و ردیف در هر سانتی متر از نمونه ها به ترتیب برابر با

شده با استفاده از محاسبه سطح زیر منحنی ضروری است. نمودار نیرو-جابجایی نمونه ها نیز در شکل 10 نشان داده شده است.

جدول 4 مدول الاستیسیته نمونه های کامپوزیتی

Tab4. Young Modulus of composites

E <sub>c</sub> (MPa)	E <sub>w</sub> (MPa)	کد نمونه
131	421	A1D1
359	451	A1D2
340	498	A2D1
57	251	A2D2
213	611	A3D1

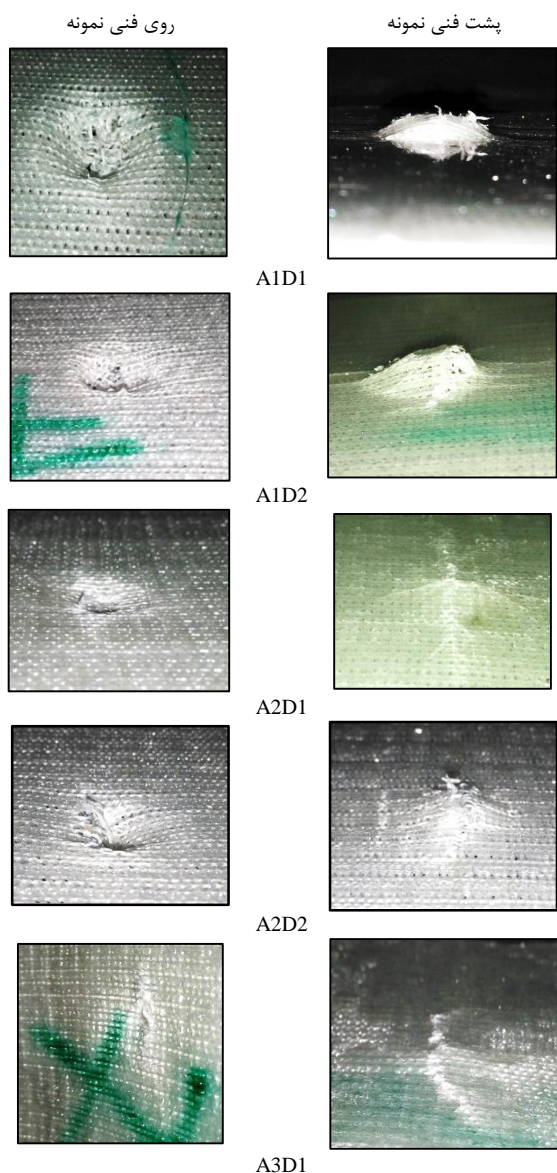


Fig. 9 Schematic of samples after impact

شکل 9 شکل نمونه ها پس از ضربه

### 5- نتایج و بحث

شکل 11 مقدار انرژی جذب شده در حالت تئوری را به تفکیک انرژی های ارائه شده در مدل نشان می دهد. همانگونه که در این شکل دیده می شود، بجز در

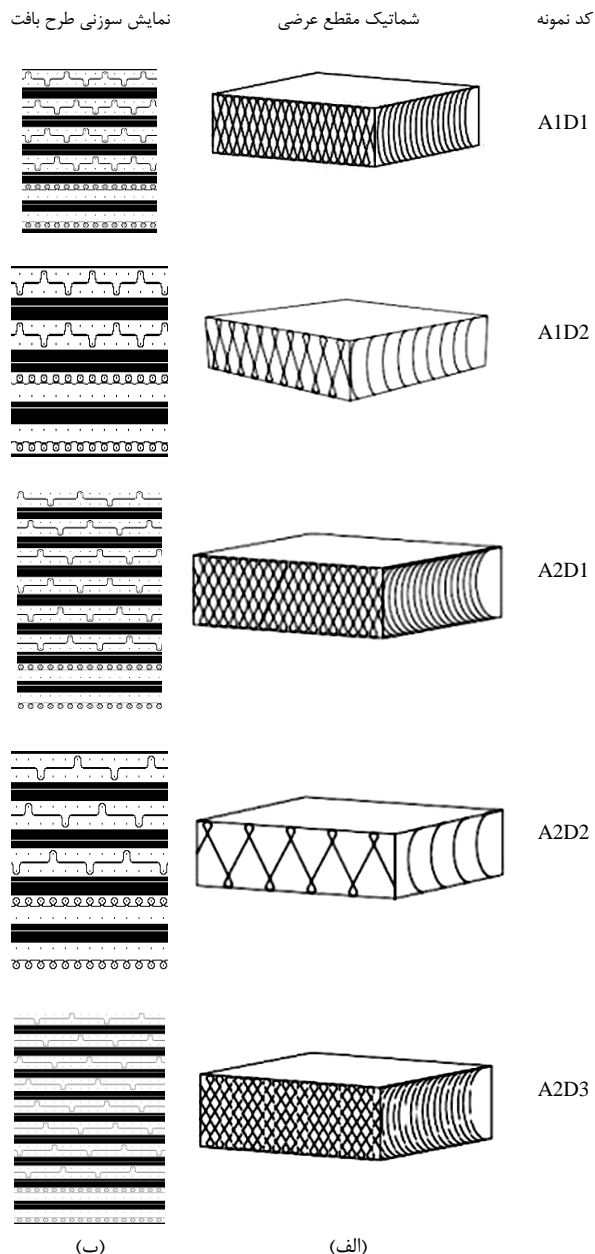


Fig. 8 Schematic of side-view and needle pattern of fabrics

شکل 8 طرحواره پارچه ها (الف) نمایش سوزنی، (ب) شماتیک مقطع عرضی

جدول 3 مشخصات کامپوزیت ها

Tab3. Composites properties

نام نمونه	A3D1	A2D2	A2D1	A1D2	A1D1
ضخامت (mm)	2.7	3.0	3.2	3.5	4
کسر حجمی الیاف	66%	73%	66%	60%	70%
تراکم نخ های اتصال (cm <sup>-1</sup> )	64	32	64	32	64

مقدار نیرو با استفاده از رابطه  $F=ma$  با در نظر گرفتن جرم سمبه (m) و مقادیر شتاب که از نمودار شتاب-زمان به دست آمد، قابل محاسبه است. دستیابی به نمودار نیرو-جابجایی برای به دست آوردن مقادیر انرژی جذب

این موضوع نقش نخ های اتصال و به عبارتی نقش ساختار پارچه های دوجداره حلقوی پودی را در رفتار ضربه پذیری کامپوزیت های تقویت شده با آنها نشان می دهد. همچنین، می توان مشاهده کرد که کمترین سهم انرژی، مربوط به انرژی غشایی است (کمتر از 2٪ از کل انرژی). به عبارتی چشم پوشی از اثرات غشایی در این چهار نمونه با خطای زیادی همراه نیست و می توان از آن صرف نظر کرد. به طور کلی، نقش نخ های اتصال در تحمل بار ضربه ای در کامپوزیت های دو جداره حلقوی پودی بسیار بیشتر از دو لایه بالا و پایین بافت زمینه ریب است و این امر اهمیت طراحی ساختمان بافت را با تمرکز بر آرایش نخ های اتصال بیان می کند.

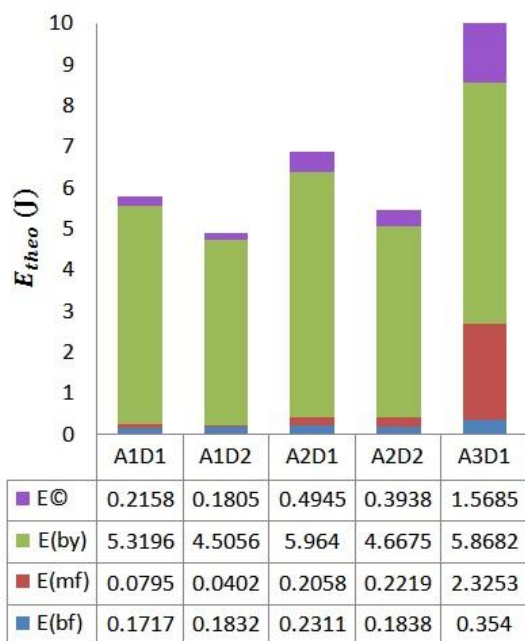


Fig. 11 Typical Absorbed energy of theoretical model

شکل 11 انرژی جذب شده در حالت تئوری به تفکیک انرژی های ارائه شده در مدل

شکل 12 انرژی جذب شده توسط نمونه ها را بر حسب طول نخ اتصال که متأثر از آرایش آنها بین دو لایه است، نشان می دهد. با توجه به ساختار بافت، نمونه هایی که تراکم نخ های اتصال در آنها یکسان و زاویه قرارگیری نخ ها متفاوت است، با یکدیگر قابل مقایسه هستند. بر این اساس نمونه های A1D1، A2D1 و A3D1 که تراکم نخ های اتصال در آنها یکسان و زاویه قرارگیری متفاوت است با یکدیگر مقایسه می شوند. به همین ترتیب، نمونه های A1D2 و A2D2 نیز که دارای تراکم یکسان و زوایای مختلف نخ های اتصال هستند، باهم مقایسه می شوند. همانطور که شکل 12 نشان می دهد، در بین سه نمونه A1D1، A2D1 و A3D1، انرژی جذب شده توسط نمونه A3D1 که دارای کمترین زاویه نخ اتصال با افق و بیشترین طول است، برابر با 10.11 ژول است که بیشتر از دو نمونه دیگر است و پس از آن به ترتیب نمونه A2D1 و A1D1 با انرژی های 8.07 ژول و 6.3 ژول قرار دارند که زوایای نخ های اتصال با افق در آنها به همان ترتیب افزایش و طول نخ اتصال کاهش یافته است. روند مشابهی در مقایسه جفت نمونه A1D2 و A2D2 وجود دارد. به عبارتی می توان نتیجه گرفت با ثابت ماندن تراکم نخ های اتصال، هرچه زاویه نخ های اتصال با افق کمتر باشد، انرژی جذب شده بیشتر است. این اثر در مدل ارائه شده نیز مشاهده می شود؛ به این ترتیب که طول حلقه  $(L_0)$  در محاسبه انرژی خمشی نخ های اتصال  $(E_{by})$  به عنوان یکی

مورد نمونه A3D1، بیش از 80 درصد انرژی کل مربوط به انرژی ناشی از خمش نخ های اتصال است.

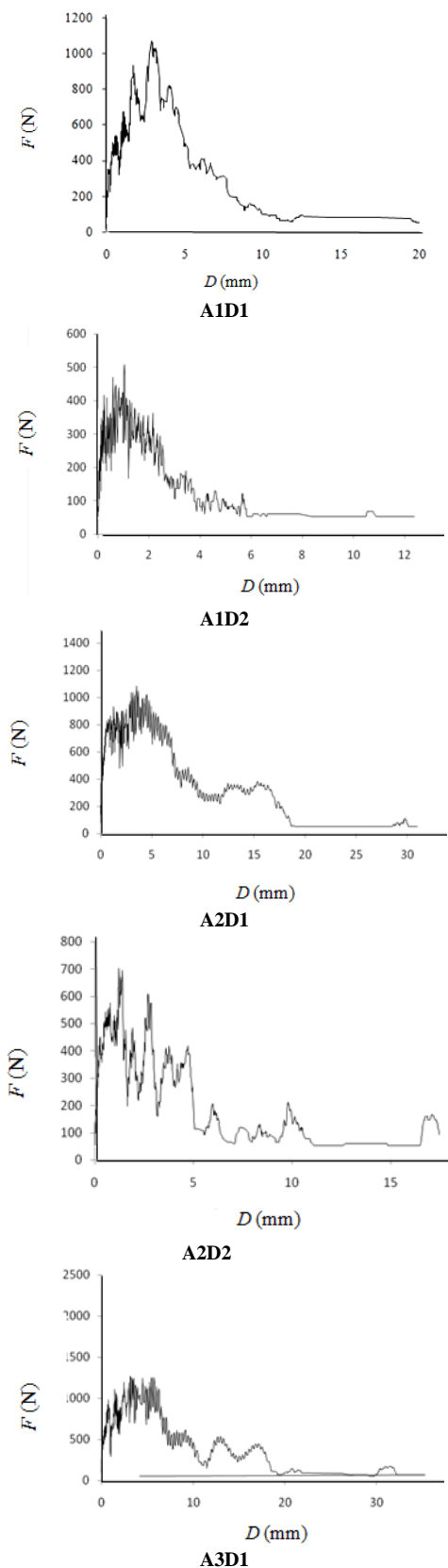


Fig. 10 Force-Displacement curve of composites

شکل 10 منحنی نیرو جابجایی کامپوزیت ها



جذب شده در کامپوزیت بر اثر اعمال بار ضربه ای را با لحاظ کردن پارامترهای ساختمانی پارچه دوجداره حلقوی پودی را دارد.

جدول 5 مقادیر مختلف انرژی جذب شده

Tab 5. Different terms of absorbed energy

$E_{theo}$	$E_c$	$E_{by}$	$E_{mf}$	$E_{bf}$	انرژی (J) کدمونه
5.786	0.2158	5.3196	0.0795	0.1717	A1D1
4.909	0.1805	4.5056	0.0403	0.1832	A1D2
6.895	0.4945	5.9640	0.2058	0.2311	A2D1
5.467	0.3938	4.6675	0.2219	0.1838	A2D2
10.11	1.5685	5.8682	2.3253	0.3540	A3D1

همچنین برای ارزیابی کارایی مدل، انرژی جذب شده در حالت تجربی با محاسبه مساحت سطح زیر منحنی نیرو-جابجایی نیز محاسبه شده و به عنوان انرژی کل جذب شده در حالت تجربی ( $E_{exp}$ ) گزارش شده است. برای محاسبه سطح زیر منحنی، روش مثلثی به کار گرفته شد. به این منظور مساحت مثلثی به ارتفاع بیشینه نیرو و قاعده بیشینه جابجایی (تا رسیدن به میرایی) مطابق شکل 13 محاسبه شد. مقادیر بیشینه نیرو ( $F_{max}$ )، جابجایی پس از میرایی نمودار ( $d_{cons}$ ) و انرژی محاسبه شده در حالت تجربی ( $E_{exp}$ ) در جدول 6 نشان داده شده است.

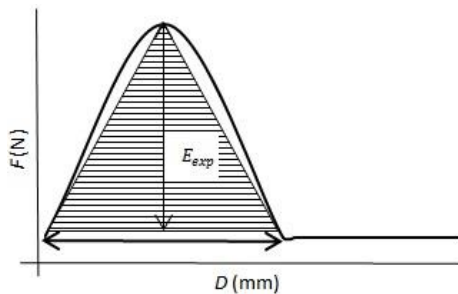


Fig. 13 Experimental Energy calculation from area under force-displacement curve with triangular method

شکل 13 محاسبه انرژی تجربی از سطح زیر منحنی نیرو-جابجایی به روش مثلثی

جدول 6 مقادیر نیروی بیشینه و جابجایی و انرژی تجربی

Tab6. Maximum force and displacement and experimental energy

$E_{exp}$ (J)	$d_{cons}$ (mm)	$F_{max}$ (N)	کد نمونه
6.3	12	1050	A1D1
4.95	11	900	A1D2
8.07	17	950	A2D1
5.85	15	780	A2D2
10.11	20	1000	A3D1

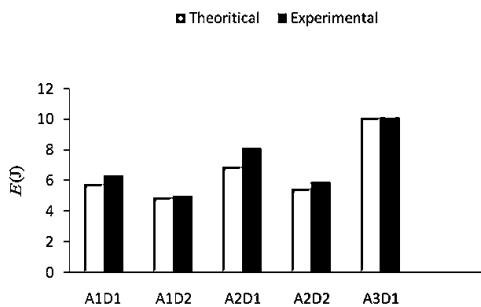


Fig. 14 Comparison between theoretical and experimental absorbed energy of impact

شکل 14 مقایسه انرژی ضربه جذب شده در حالت تئوری و تجربی

از پارامترهایی که با مقدار  $E_{by}$  ارتباط مستقیم دارد دیده می شود. بنابراین، هرچه زاویه ای که نخ های اتصال با افق می سازند، کمتر باشد، مقدار  $L_0$  بیشتر و در نتیجه  $E_{by}$  نیز بیشتر خواهد بود. در حالی که نتایج تحقیقات پیشین [20] که بر روی پارچه های دوجداره حلقوی تار انجام شده است، نشان می دهد که جذب انرژی پارچه تحت بار ضربه ای با افزایش زاویه ای نخ های اتصال با افق، میزان جذب انرژی افزایش می یابد. این موضوع بیانگر تغییر رفتار پارچه قبل و بعد از استفاده به عنوان تقویت کننده کامپوزیت است.

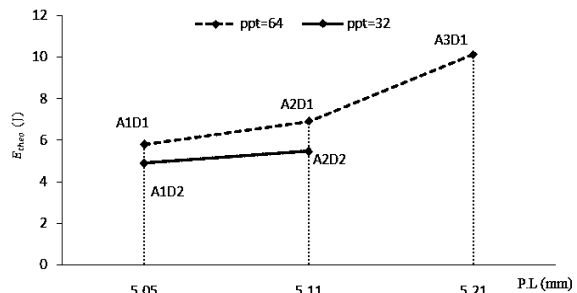


Fig. 12 Effect of pile length (P.L.) on the theoretical absorbed energy

شکل 12 تاثیر طول نخهای اتصال (P.L.) بر روی میزان انرژی جذب شده

از طرفی می توان نمونه هایی را که دارای طول نخ اتصال یکسان، اما تراکم های متفاوتی هستند با یکدیگر مقایسه کرد. بر این اساس، نمونه های A1D1 و A1D2 و همچنین A2D1 و A2D2 با یکدیگر مقایسه می شوند. همانطور که در شکل 12 مشاهده می شود، بین دو نمونه A1D1 و A1D2 و A2D1 و A2D2 مشاهده می شود. نمونه A1D1 که تراکم نخ های اتصال در آن بیشتر است، با جذب 6.3 ژول انرژی بیشتری جذب کرده است. روندی مشابه در مورد جفت نمونه A2D1 و A2D2 مشاهده می شود. به گونه ای که نمونه A2D1 با جذب 8.07 ژول انرژی در مقایسه با نمونه A2D2 که 5.85 ژول انرژی جذب کرده، انرژی بیشتری در جریان تحمل بار ضربه ای جذب نموده است. در نتیجه می توان گفت با افزایش تراکم نخ های اتصال انرژی جذب شده بیشتر است. اثر این پارامتر در مدل ارائه شده نیز دیده شده است؛ به گونه ای که تراکم نخ های اتصال ( $p_{sc}$ ) به عنوان پارامتری موثر در محاسبه انرژی خمشی نخ های اتصال ( $E_{by}$ ) ظاهر شده و با آن ارتباط مستقیم دارد، لذا با افزایش تراکم نخ های اتصال،  $E_{by}$  نیز افزایش می یابد. به طور کلی، می توان گفت که مشابه آنچه که برای پارچه های حلقوی تار دوجداره نتیجه شده است [21] با افزایش تراکم و طول نخ های اتصال، میزان جذب انرژی آن ها در برابر ضربه بیشتر است. مدل ارائه شده علاوه بر پیش بینی چنین رفتاری از کامپوزیت، قادر است به کمک پارامترهای ساختمانی پارچه میزان انرژی جذب شده توسط کامپوزیت تهیه شده از آنها را تحت بار ضربه ای با سرعت پایین تعیین کند.

مقادیر انرژی مربوط به هر بخش با استفاده از جایگذاری داده های به دست آمده از نتایج تجربی در روابط مدل ارائه شده، محاسبه شد و به تفکیک در جدول 5 ارائه شده است و انرژی کل جذب شده که حاصل مجموع مقادیر انرژی در حالت تئوری است به عنوان ( $E_{theo}$ ) در این جدول مشاهده می شود. به منظور بررسی کارایی مدل، انرژی جذب شده توسط کامپوزیت ها در دو حالت تئوری و تجربی مقایسه و در شکل 14 نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل مشاهده می شود، بجز نمونه A2D1 در سایر نمونه ها تطابق بسیار خوبی بین داده های تجربی و نتایج حاصل از مدل ارائه شده وجود دارد. به عبارت دیگر، مدل پیشنهادی قابلیت پیش بینی انرژی

## 6- نتیجه گیری

در این پژوهش به مطالعه رفتار ضربه با سرعت پایین کامپوزیت‌های تقویت شده با پارچه‌های دو جداره حلقوی پودی پرداخته شده است. برای این منظور، مدل تعادل انرژی به کار گرفته شد. با در نظر گرفتن متغیرهای ساختمانی پارچه‌های حلقوی پودی دو جداره، مانند بافت پایه و آرایش نخ‌های اتصال، رفتار این نوع کامپوزیت در برابر بار ضربه با سرعت پایین، بررسی شد. براساس مطالعات انجام شده، می‌توان گفت ساختمان جزء تقویت کننده تأثیر بسزایی بر روی رفتار ضربه پذیری کامپوزیت دارد. به گونه‌ای که نمونه A3D1 که دارای بلندترین طول و بیشترین تراکم نخ اتصال است، مقدار 10,11 ژول انرژی تحت بار ضربه جذب کرده است که بیشترین انرژی در مقایسه با سایر نمونه‌هاست. با افزایش طول و تراکم نخ‌های اتصال در ساختمان پارچه‌های دو جداره، میزان انرژی جذب شده توسط کامپوزیت افزایش می‌یابد. همچنین، انرژی خمشی نخ‌های اتصال بیش از 80 درصد کل انرژی جذب شده است که بیشترین سهم را در مقایسه با انرژی‌های مختلف در نظر گرفته شده در مقدار انرژی کل جذب شده دارد. به عبارت دیگر، نخ‌های اتصال بیشترین تأثیر را در رفتار ضربه پذیری کامپوزیت‌های تقویت شده با پارچه‌های دو جداره حلقوی پودی دارند. با مقایسه نتایج تجربی و مدل نیمه تجربی ارائه شده، مشاهده شد که بیشترین خطا در پیش‌بینی میزان انرژی جذب شده تحت بار ضربه که مربوط به نمونه A2D1 است، حدود 14 درصد است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که تطابق خوبی بین داده‌های تجربی و خروجی‌های مدل ارائه شده وجود دارد. از اینرو، می‌توان گفت که مدل ارائه شده در حد مطلوبی قابلیت پیش‌بینی رفتار تحت بار ضربه با سرعت پایین این نوع کامپوزیت را دارد.

## 7- منابع و مراجع

- [12] Kiani, Y. Sadighi, Jedari Salami, M. and M. R. Eslami., "Low Velocity Impact Response of Thick FGM Beams with General Boundary Conditions in Thermal Field" *Composite Structures*, Vol. 104, pp. 293-303, 2013.
- [13] ZareiMahmoudabadi, M. and Sadighi, M., "A Theoretical and Experimental Study on Metal Hexagonal Honeycomb Crushing under Quasi-Static and Low Velocity Impact Loading" *Materials Science and Engineering*, Vol. 528, pp. 4958-4966, 2011.
- [14] Sadighi, M. and Pouriayevali, H., "Quasi-Static and Low-Velocity Impact Response of Fully Backed or Simply Supported Sandwich Beams" *Journal of sandwich structures and materials*, Vol. 10, 2008.
- [15] Sadighi, M. Parnanen, T. Alderliesten, R. C. Sayeafabi, M. and Benedictus, R., "Experimental and Numerical Investigation of Metal Type and Thickness Effects on the Impact Resistance of Fiber Metal Laminates" *Applied Composite Materials*, Vol. 19, pp. 545-559, 2012.
- [16] Ghane, M. and Zarezadeh Lari, V., "Estimating the Deflection of Weft Yarn in Plain Woven Fabric Using Yarn Pull Out Test" *Indian Journal of Fiber & Textile Research*, Vol. 39, pp. 394-400, 2014.
- [17] Varshney, R. K. Kothari, V. K. and Dhamija, S., "Influence of Polyester Fiber Shape and Size on the Hairiness and Some Mechanical Properties of Yarns" *Indian Journal of Fiber & Textile Research*, Vol. 39, pp. 24-32, 2014.
- [18] Dayari, M. Shaikhzadeh Najar, S. and Shamsi, M., "A New Theoretical Approach to Cut-Pile Carpet Compression Based on Elastic-Stored Bending Energy" *The Journal of The Textile Institute*, pp. 688-694, 2009.
- [19] Dayari, M., "Study on Compressional Energy Contribution Into Total Energy of Pile Deformation in Cut-Pile Carpet," *The Journal of The Textile Institute*, pp. 1315-1321, 2014.
- [20] Liu, Y. Hu, H. Long, H. and Zhao, L., "Impact Compressive Behavior of Warp-Knitted Spacer Fabrics for Protective Applications", *Textile Research Journal*, 82(8) 773-788, 2012.
- [21] Guo, X. Long, H. and Zhao, L., "Investigation on the Impact and Compression-After-Impact Properties of Warp-Knitted Spacer Fabrics", *Textile Research Journal*, 83(9) 904-916, 2013.
- [1] Omodi, M. J. and Shokrieh, M. M., "Investigation on the Impact Resistance of Polymeric Fibers Reinforced Composites" *Journal of Science and Technology of Composites*, No. 4, pp. 255-277, 2011. (In Persian)
- [2] Abrate, S., "Impact on Composite Structures" Cambridge: Cambridge university press, 1998.
- [3] Sjoblom, P. Hartness, J. and T. Cordell, "On Low-Velocity Impact Testing of Composite Materials" *Journal of composites material*, Vol. 22, pp. 30-52, 1988.
- [4] Shivakumar, K. Elber, W. and Illg, W., "Prediction of Low-Velocity Impact Damage in Thin Circular Laminates" *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 52, pp. 674-680, 1985.
- [5] Cantwell, W. and Morton, J., "The Impact Resistance of Composite Materials-a Review" *Composites*, Vol. 22, pp. 347-362, 1991.
- [6] Liu, D. and Malvern, L., "Matrix Cracking in Impacted Glass/Epoxy Plates," *Journal of composites*, Vol. 21, pp. 594-609, 1987.
- [7] Joshi, S. and Sun, C., "Impact-Induced Fracture Initiation and Detailed Dynamic Stress Field in the Vicinity of Impact," in *American Society of Composites 2nd Tech.conf*, 1987.
- [8] Hesami, R. Hassani, H. Ajeli, S. and Zadhooosh, A., "Investigation Into the Energy Absorption Capacity of Reinforced Composite by 3D weft-knitted Fabrics" *Journal of Textile Science and Technology*, No. 2, pp. 65-70, 2012. (In Persian)
- [9] Wang, X. Hu, B. Feng, Y. Liang, F. J. Mo, Xiong, J. and Y. Qiu., "Low Velocity Impact Properties of 3D Woven Basalt/Aramid Hybrid Composites" *Composites science and technology*, Vol. 68, pp. 444-450, 2008.
- [10] Zhao, N. Rodel, H. Herzberg, C. Gao, S. L. and Krzywinski, S., "Stitched Glass/PP Composite. Part I: Tensile and Impact Properties," *Composites*, pp. 635-643, 2009.
- [11] Sadighi, Alderliesten, R.C. and Benedictus, R., "Impact Resistance of Fiber-Metal Laminates: A Review" *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 49, pp. 77-90, 2012.