

# تأثیر پارامترهای مختلف بر خواص ضربه پاندولی کامپوزیت‌های شبه‌همسانگرد اپوکسی تقویت شده با الیاف بازالت و شیشه

مجید طهرانی دهکردی<sup>۱\*</sup>، سید هزیر بهرامی<sup>۲</sup>، رضا ناطقی جهرمی<sup>۲</sup>

۱- دانشکده فرش، دانشگاه شهرکرد

۲- دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۰۴/۲۴ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۲/۱۰/۱۸)

**چکیده** - در این پژوهش تأثیر پارامترهای مختلف بر خواص ضربه پاندولی کامپوزیت‌های خالص و هیبرید تقویت‌شده با فیلامنت‌های بازالت و شیشه مطالعه شده است. بدین منظور کامپوزیت‌هایی شامل بازالت خالص، شیشه خالص، دو نمونه هیبرید بین لایه‌ای و یک نمونه هیبرید درون لایه‌ای با آرایش شبه‌همسانگرد تولید شد. در این کامپوزیت‌ها از رزین اپوکسی به عنوان زمینه استفاده شد. آنگاه آزمایش ضربه پاندولی بر روی نمونه‌های کامپوزیت انجام و برای هر دسته از کامپوزیت‌ها میانگین انرژی جذب شده تعیین شد. نتایج نشان می‌دهند نمونه‌های بازالت خالص و شیشه خالص به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین انرژی جذب شده را از خود نشان داده‌اند. مقدار انرژی ضربه‌ای جذب شده برای نمونه‌های هیبرید، کم‌تر از نمونه بازالت خالص و بیش‌تر از نمونه شیشه خالص است. همچنین در بین کامپوزیت‌های هیبرید، نمونه هیبرید درون لایه‌ای نسبت به نمونه‌های هیبرید بین لایه‌ای مقاومت بهتری در برابر ضربه داشته است.

**واژگان کلیدی:** کامپوزیت - هیبرید بین لایه‌ای - هیبرید درون لایه‌ای - ضربه پاندولی - بازالت - شیشه

## Effect of Different Parameters on Charpy Impact Properties of Quasi-Isotropic Epoxy Composites Reinforced with Basalt and Glass Fibers

M. Tehrani Dehkordi<sup>1\*</sup>, S. H. Bahrami<sup>2</sup>, R. Nategi Jahromi<sup>2</sup>

1- Department of Carpet, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

2- Department of Textile Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

**Abstract:** In this study, the effects of different parameters on charpy impact properties of pure and hybrid composite laminates reinforced with basalt and glass filaments were investigated. For this purpose, five types of basalt and glass laminates with

\* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: mtehrani@lit.sku.ac.ir

*quasi-isotropic stacking sequence, namely, a pure basalt, a pure glass, two inter-ply hybrid and one intra-ply hybrid composites were produced. Epoxy resin was used as matrix material. After that, the impact test was performed and the average absorbed energy of each type of specimens was determined. The results indicated that the pure basalt and nylon laminates had the highest and least absorbed energy, respectively. The hybrid laminates had the absorbed energy somewhere between the pure basalt and glass ones. Also, between the hybrid composites, the intra-ply laminate had a better impact performance than the inter-ply ones.*

**Keywords:** Composite, Inter-ply Hybrid, Intra-ply Hybrid, Charpy impact, Basalt, Glass

## فهرست علائم

|            |                                                     |        |                          |
|------------|-----------------------------------------------------|--------|--------------------------|
| $w$        | میزان انرژی جذب شده (J)                             | $m$    | جرم پاندول ضربه زن (Kg)  |
| $g$        | شتاب جاذبه زمین ( $m/s^2$ )                         | $h$    | اختلاف ارتفاع پاندول (m) |
| $E_b$      | میزان انرژی جذب شده در واحد سطح ( $J/m^2$ )         | $b$    | عرض نمونه (m)            |
| $t$        | ضخامت نمونه (m)                                     | $n$    | تعداد لایه‌های کامپوزیت  |
| $\theta_i$ | زاویه الیاف لایه $i$ ام با راستای اعمال نیرو (درجه) | $\eta$ | ضریب کارایی الیاف        |

## ۱- مقدمه

کامپوزیت یا ماده مرکب، ماده‌ای است که از دو یا چند فاز مجزا تشکیل شده و خصوصیات ماده نهایی ترکیبی از خواص اجزاء تشکیل دهنده آن است. این دسته از مواد برای دستیابی به خصوصیات بهینه تولید می‌شود [۱]. با توجه به افزایش روزافزون استفاده کامپوزیت‌ها در صنایع مختلف، نیاز به طراحی آن‌ها به منظور تامین ویژگی‌های مورد انتظار احساس می‌شود. در بین ویژگی‌های مکانیکی، خواص ضربه پاندولی<sup>۱</sup> به دلیل کاربرد آن در صنایع مختلف از جمله صنعت دریایی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. نوع تقویت کننده<sup>۲</sup> و پارامترهای ساختمانی مختلف از جمله نحوه هیبرید کردن<sup>۳</sup> و نحوه آرایش لایه‌های الیاف<sup>۴</sup>، تاثیر قابل توجهی بر مقاومت در برابر ضربه کامپوزیت‌های پلیمری دارند [۲].

یکی از روش‌های بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها، هیبرید کردن آن‌هاست. کامپوزیت‌های هیبریدی به آن دسته از کامپوزیت‌ها اطلاق می‌شود که در آن‌ها بیش از یک نوع تقویت کننده یا زمینه<sup>۵</sup> به کار رفته باشد [۳]. کامپوزیت‌های هیبریدی که بیش از یک نوع تقویت کننده دارند بر اساس نحوه آرایش الیاف به سه دسته کلی تقسیم می‌شوند. دسته اول، هیبریدهای بین لایه‌ای<sup>۶</sup> اند. در این هیبریدها، لایه‌هایی با جنس مختلف در لمینیت‌ها<sup>۷</sup> بر روی هم قرار می‌گیرند. در دسته دوم،

هر لایه ترکیبی از نخ‌های مختلف با طرح مشخص است که به آن‌ها هیبرید درون لایه‌ای<sup>۸</sup> می‌گویند. دسته سوم هیبریدهای یکنواخت‌اند<sup>۹</sup>. در این دسته از هیبریدها، الیاف به صورت الیاف کوتاه به طور کاملاً تصادفی با هم مخلوط شده و لایه تقویت کننده را به وجود می‌آورند [۴]. خواص مکانیکی کامپوزیت‌های هیبرید بین لایه‌ای و یکنواخت توسط پژوهشگران زیادی بررسی شده است [۴-۱۰]، اما خواص مکانیکی کامپوزیت‌های هیبرید درون لایه‌ای، با توجه به این که تهیه تقویت کننده این دسته از هیبریدها با مشکلاتی همراه است به ندرت مورد بررسی قرار گرفته است [۴، ۱۱-۱۵].

امروزه در ساخت کامپوزیت‌های پیشرفته، از الیافی استفاده می‌کنند که مدول<sup>۱۰</sup> و مقاومت مخصوص<sup>۱۱</sup> آن‌ها نسبت به الیاف دیگر بیش تر باشد. ولی در صنایع مربوط به کامپوزیت، الیافی مورد مصرف بیش تری دارند که علاوه بر خصوصیات مکانیکی مناسب، دارای توجیه اقتصادی بهتر باشند [۱]. از دیرباز الیاف شیشه و کربن به صورت گسترده‌ای در کامپوزیت‌های مهندسی استفاده می‌شوند. الیاف شیشه ارزان‌اند، اما مقاومت خوبی در برابر مواد شیمیایی به خصوص قلیاها ندارند. هم چنین مقاومت در برابر خوردگی<sup>۱۲</sup> آن‌ها نیز بسیار ضعیف است. الیاف کربن هر چند این نقص‌ها را ندارند، اما گران قیمت‌اند. در سال‌های اخیر، الیافی معدنی تحت عنوان بازالت به بازار عرضه شده‌اند.

این الیاف نقایص شیشه را ندارند و نسبت به کربن ارزانترند [۱۶ و ۱۷].

هر چند تکنولوژی تولید الیاف بازالت به صد سال پیش بر می‌گردد اما استفاده از این الیاف، به عنوان تقویت‌کننده در کامپوزیت‌های پلیمری در دهه اخیر مطرح شده است. الیاف بازالت به روش ذوب‌ریسی و به شکل الیاف پیوسته از سنگ بازالت که یک سنگ آتش‌فشانی شامل ۵۲-۴۵ درصد دی اکسید سیلیسیم<sup>۱۳</sup> است تولید می‌شوند [۱۷]. این الیاف دارای خواص مکانیکی، شیمیایی و فیزیکی مناسبی‌اند. الیاف بازالت مدول الاستیک (۷۸-۹۰ گیگاپاسکال)، چقرمگی<sup>۱۴</sup>، مقاومت فشاری و مقاومت در برابر ارتعاشات بسیار خوبی دارند [۱۷ و ۱۸]. علاوه بر خواص مکانیکی مناسب، این الیاف دارای خواص شیمیایی بسیار خوب [۱۶، ۱۹، ۲۰]، مقاومت حرارتی بالا [۱۶، ۱۸، ۲۰] و عایقی خوب در برابر صوت، الکتریسیته و حرارت‌اند [۱۷ و ۱۸]. خاصیت عایق حرارتی بازالت سه برابر آزیست است [۱۷]. مقاومت شیمیایی بازالت، به خصوص مقاومت آن‌ها در برابر قلیاها بسیار بهتر از شیشه است [۱۶، ۱۹، ۲۱]. مقدار جذب آب این الیاف بسیار کم است [۱۷]. بازالت در مقایسه با شیشه با طبیعت سازگارتر است [۱۷] و سرطان‌زایی ندارد [۱۸].

با توجه به مزایای اشاره شده، استفاده از الیاف بازالت به عنوان جایگزینی مناسب برای الیاف شیشه روز به روز در کامپوزیت‌های پلیمری در حال گسترش است. پژوهش‌های انجام شده بر روی کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف بازالت انگشت شمارند. در بین پژوهش‌های محدود در این زمینه، آرتمنکو [۱۶]، لیو [۱۷]، کارمیسکیانو [۲۲] و لوپرستو [۲۳] ادعا کرده‌اند کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف بازالت خواص مکانیکی بهتری از نمونه‌های تقویت شده با الیاف شیشه دارند. سازبو [۳، ۸]، سیگانی [۹] و آرتورک [۱۰] رفتار کششی، خمشی و ضربه‌ای کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کوتاه بازالت و دیگر الیاف را بررسی نموده‌اند. پاولوسکی و همکارانش [۲۴] مقاومت کششی کامپوزیت‌های ساخته شده از کربن، شیشه و بازالت را که به روش فیلامنت‌پیچی ساخته شده

بودند با هم مقایسه کردند. وانگ [۱۳] و طهرانی [۱۴] به ترتیب خصوصیات ضربه پاندولی و سطحی کامپوزیت‌های هیبرید تقویت شده با الیاف بازالت-کولار و بازالت-نایلون را بررسی نموده‌اند.

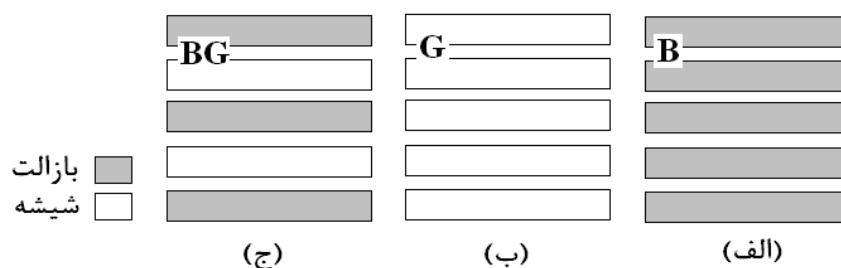
در پژوهش‌های اشاره شده در بالا، برخی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های تقویت شده با شکل‌های مختلف الیاف بازالت بررسی شده است، اما بررسی خاصی در زمینه تعیین رفتار ضربه پاندولی کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف فیلامنتی بازالت در حالت هیبریدی مشاهده نشد. در این پژوهش خواص ضربه پاندولی کامپوزیت‌های خالص<sup>۱۵</sup> و هیبریدهای درون لایه‌ای و بین لایه‌ای تقویت شده با فیلامنت‌های بازالت و شیشه مطالعه شده است. برای بررسی دقیق، تأثیر پارامترهای نوع تقویت‌کننده، نوع کامپوزیت (خالص و هیبرید)، نحوه آرایش الیاف (هیبرید بین لایه‌ای و درون‌لایه‌ای)، نحوه آرایش لایه‌ها و زاویه اعمال نیرو بر میزان جذب انرژی ضربه‌ای، مورد مقایسه قرار گرفته است.

## ۲- روش پژوهش

### ۲-۱- مواد و آماده‌سازی نمونه‌ها

لایه‌های تقویت کننده مشابه پارچه‌های تک جهت<sup>۱۶</sup> با تراکم پنج از نخ‌های فیلامنتی بازالت و شیشه تهیه شدند. این پارچه‌ها مطابق شکل (۱) به صورت بازالت خالص، شیشه خالص و ترکیب بازالت و شیشه آماده‌سازی شدند. در این شکل لایه‌های تقویت‌کننده با توجه به حرف اول جنس نخ‌های به کار برده شده در آن‌ها کدبندی شده‌اند. در شکل (۲) نحوه آماده‌سازی لایه‌های تقویت‌کننده نشان داده شده است.

الیاف بازالت و شیشه به ترتیب از شرکت‌های هنگ‌دیان شانگ‌های<sup>۱۷</sup> و سی‌پی‌آی‌سی<sup>۱۸</sup> کشور چین به شکل نخ‌های فیلامنتی تهیه شدند. به عنوان زمینه کامپوزیت‌ها نیز از رزین اپوکسی ۸۰۳۷ به همراه سخت کننده ۱۱۲۰ شرکت پلیمر گستر سهند ایران استفاده شد. مقدار سخت کننده به نحوی انتخاب شد که زمان مورد نیاز برای ساخت هر نمونه کامپوزیت، قبل از



شکل ۱- انواع لایه‌های تقویت کننده آماده سازی شده (الف) بازالت خالص، (ب) شیشه خالص و (ج) ترکیب بازالت و شیشه



شکل ۲- نحوه آماده سازی لایه‌های تقویت کننده

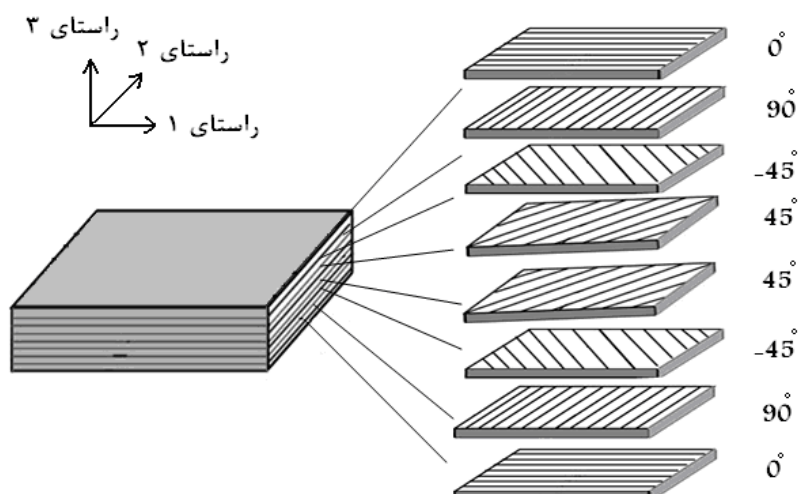
جدول ۱- مشخصات نخ‌های استفاده شده به عنوان تقویت کننده

| ویژگی نخ                           | بازالت | شیشه | اپوکسی |
|------------------------------------|--------|------|--------|
| نمره (تکس <sup>۱۹</sup> )          | ۷۵۰    | ۷۵۰  | ---    |
| دانسیته حجمی (کیلوگرم بر متر مکعب) | ۲۷۰۰   | ۲۶۰۰ | ۱۱۸۰   |
| استحکام فشاری (مگاپاسکال)          | ۳۷۹۲   | ۳۰۳۳ | ---    |
| استحکام کششی (مگاپاسکال)           | ۱۸۰۰   | ۱۷۰۰ | ۷۵     |
| مدول کششی نخ (گیگا پاسکال)         | ۸۵     | ۷۲   | ۲/۷۳   |
| ازدیاد طول تا حد پارگی (درصد)      | ۲      | ۲/۵  | ۲      |

مکانیکی بر اساس استاندارد ASTM-D.5035 اندازه‌گیری و محاسبه شده‌اند.

همه نمونه‌های کامپوزیت مورد نیاز به روش لایه گذاری دستی<sup>۲۰</sup> در دانشگاه صنعتی امیرکبیر ساخته شدند. برای تکمیل عملیات پخت کامپوزیت‌های ساخته شده، آن‌ها بعد از ساخت به مدت دو ساعت در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد، سپس به مدت دو

ژل شدن رزین فراهم شود. در این پژوهش با انتخاب ۱۰ درصد سخت کننده، زمان تقریبی یک ساعت برای ساخت کامپوزیت تامین شد. مشخصات مکانیکی و فیزیکی نخ‌ها و رزین استفاده شده در جدول (۱) آورده شده است. در این جدول نمره و چگالی حجمی به ترتیب بر اساس استانداردهای DIN.EN.12654 و ASTM-D.792 و سایر مشخصه‌های



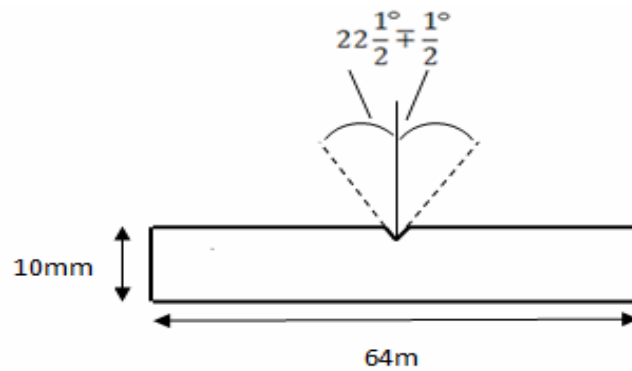
شکل ۳- نحوه لایه گذاری در کامپوزیت های ساخته شده

جدول ۲- مشخصات کامپوزیت های ساخته شده

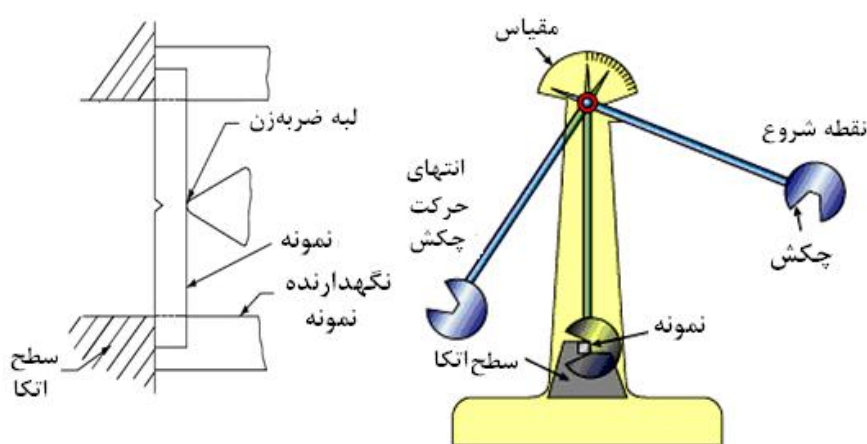
| کد نمونه | نوع کامپوزیت        | آرایش لایه ها     | ضخامت (میلی متر) | دانسیته (گرم بر سانتیمتر مکعب) | درصد حجمی الیاف (درصد) |
|----------|---------------------|-------------------|------------------|--------------------------------|------------------------|
| 8G       | همگن                | $[G/G/G/G]_s$     | ۳/۲              | ۱/۴۱                           | ۳۱/۲۱                  |
| 8B       | همگن                | $[B/B/B/B]_s$     | ۳/۳              | ۱/۴۲                           | ۳۰/۰۸                  |
| 4B4G     | هیبرید بین لایه ای  | $[B/G/B/G]_s$     | ۳/۴              | ۱/۴۱                           | ۳۰/۸۱                  |
| 4G4B     | هیبرید بین لایه ای  | $[G/B/G/B]_s$     | ۳/۳              | ۱/۴۱                           | ۳۰/۶۶                  |
| 8BG      | هیبرید درون لایه ای | $[BG/BG/BG/BG]_s$ | ۳/۲              | ۱/۴۱                           | ۳۰/۶۶                  |

هفته در دمای محیط (۳۰ درجه سانتی گراد) قرار داده شدند. نمونه های ساخته شده شامل کامپوزیت بازالت خالص، شیشه خالص، دو نمونه هیبرید بین لایه ای و یک نمونه هیبرید درون لایه ای هستند. کامپوزیت ها به صورت هشت لایه با آرایش شبه همسانگرد<sup>۲۱</sup> ( $[0/90/-45/45]_s$ ) ساخته شدند. شکل (۳) نحوه لایه گذاری کامپوزیت ها را به صورت نمادین نشان می دهد. مشخصات کامپوزیت های ساخته شده از جمله ضخامت، چگالی<sup>۲۲</sup> و درصد حجمی<sup>۲۳</sup> الیاف در جدول (۲) آورده شده است. در این جدول کامپوزیت ها بر اساس کد لایه های تقویت کننده، تعداد لایه ها و محل قرار گیری هر لایه کدبندی شده اند. به عنوان مثال کد 8BG نشان دهنده نمونه ای است که هر هشت لایه آن از تقویت کننده BG (شکل (۱-ج)) تشکیل شده است. کامپوزیت ها به صورت صفحه های مربع شکل به ابعاد ۲۵×۲۵

سانتی متر ساخته شدند. سپس برای آزمایش ضربه از هر نمونه، پنج قطعه کامپوزیت بر اساس استاندارد ASTM-D.256 [۲۵] با ابعاد ۶۴ × ۱۰ میلی متر آماده شد. بدین منظور صفحات کامپوزیتی ساخته شده به نحوی برش داده شدند که نمونه های لازم برای آزمایش ضربه در چهار زاویه ۰، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه قرار گیرند. با این نحوه برش می توان تأثیر راستای اعمال نیرو بر خواص ضربه ای نمونه های کامپوزیتی را بررسی نمود. زاویه های برش نسبت به راستای ۱ در شکل (۳) در نظر گرفته شده است. بعد از برش و صاف کردن لبه نمونه ها، شیارهای مثلثی شکل در وسط آن ها با استفاده از دستگاهی مخصوص ایجاد شد. هدف از این کار، ایجاد محل تمرکز تنش<sup>۲۴</sup> و مشخص نمودن مسیر انتشار شکست<sup>۲۵</sup> است [۲۵]. شکل (۴) ابعاد و طریقه آماده سازی نمونه های کامپوزیت برای آزمایش ضربه پاندولی را نشان می دهد.



شکل ۴- ابعاد قطعه آماده شده برای آزمایش ضربه پاندولی



شکل ۵- طرح شماتیک دستگاه ضربه پاندولی

ضربه پاندولی استفاده شده، طبق رابطه (۱) میزان انرژی جذب

شده را بر حسب ژول، بر روی صفحه‌ای مدرج نشان می‌دهد.

$$w = m \cdot g \cdot h \quad (1)$$

در این رابطه،  $w$  میزان انرژی جذب شده،  $m$  جرم پاندول،  $g$  شتاب جاذبه زمین و  $h$  اختلاف ارتفاع پاندول است.

برای حذف تاثیر ضخامت و مقایسه بهتر نمونه‌های مختلف، انرژی جذب شده با استفاده از رابطه (۲)، بر حسب کیلوژول بر متر مربع محاسبه شده است [۲۵].

$$E_b = w / (b \cdot t) \quad (2)$$

در این رابطه،  $w$  میزان انرژی جذب شده بر حسب کیلوژول و  $b$  و  $t$  به ترتیب عرض و ضخامت نمونه بر حسب متر در محل شیار است. لازم به ذکر است که مقاومت هوا بر روی سرعت پاندول تأثیر می‌گذارد و آن را کاهش می‌دهد. برای اندازه‌گیری مقاومت

## ۲-۲- آزمایش‌های تجربی

برای انجام آزمایش‌ها از دستگاه ضربه پاندولی ساخت شرکت آدیناه آیمپکس<sup>۲۶</sup> کشور هند، موجود در موسسه کامپوزیت ایران استفاده شد. در این دستگاه مطابق شکل (۵)، نمونه به صورت افقی بین دو تکیه‌گاه بسته می‌شود. آنگاه پاندول از ارتفاع مشخص رها می‌شود. مسیر حرکت پاندول در وسط دو تکیه‌گاه است. نمونه به گونه‌ای قرار داده شده است که پاندول دقیقاً به پشت شیار برخورد کند. مقداری از انرژی جنبشی پاندول در اثر اصابت به نمونه و شکستن آن کاسته می‌شود. به دلیل کاهش انرژی جنبشی، پاندول به ارتفاع اولیه خود بر نمی‌گردد. دستگاه با محاسبه این اختلاف ارتفاع و بر اساس رابطه (۱) نیروی لازم جهت شکستن قطعه کامپوزیت و به عبارتی میزان انرژی ضربه‌ای جذب شده توسط هر نمونه را محاسبه می‌نماید [۲۵]. دستگاه

جدول ۳- میانگین جذب انرژی ضربه‌ای نمونه‌های خالص و هیبریدی در زوایای مختلف اعمال نیرو

| زاویه اعمال نیرو (درجه) | ۰      | ۳۰     | ۶۰     | ۹۰     |
|-------------------------|--------|--------|--------|--------|
| 8G                      | ۱۳۲/۸۲ | ۱۲۵/۶۰ | ۱۲۴/۴۳ | ۱۳۰/۸۷ |
| 8B                      | ۱۷۵/۱۴ | ۱۶۶/۲۰ | ۱۶۵/۰۶ | ۱۶۹/۵۶ |
| 4B4G                    | ۱۵۶/۶۵ | ۱۴۹/۸۵ | ۱۴۹/۸۱ | ۱۵۱/۳۳ |
| 4G4B                    | ۱۴۸/۶۴ | ۱۴۰/۵۷ | ۱۴۱/۳۵ | ۱۴۶/۳۶ |
| 8BG                     | ۱۶۱/۳۹ | ۱۵۵/۸۴ | ۱۵۳/۹۴ | ۱۵۹/۵۹ |

### ۳-۱- بررسی نحوه شکست نمونه‌ها

هنگامی که یک نمونه کامپوزیت تحت آزمایش ضربه قرار می‌گیرد با توجه به جنس کامپوزیت و شدت ضربه اعمال شده، یکی از چهار حالت شکست کامل، شکست لولایی، شکست جزئی و عدم شکست رخ می‌دهد. در حالت شکست کامل، قطعه به صورت دو نیمه کاملاً جدا از هم شکسته می‌شود. در حالت شکست لولایی، تسلیم کامل قابل مشاهده است ولی قطعه دو تکه نمی‌شود. زمانی که رگه‌هایی از شکسته شدن در نمونه ایجاد می‌شود ولی نمونه ساختار کلی خود را حفظ می‌کند شکست جزئی اتفاق افتاده است و زمانی که هیچ نشانه‌ایی از شکست در نمونه مشاهده نشود عدم شکست رخ داده است [۲۵].

شکل (۶) سطح مقطع نمونه‌های مختلف پس از اعمال ضربه در راستای زاویه ۳۰ درجه را نشان می‌دهد. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود در همه نمونه‌ها شکست کامل و ترد<sup>۲۸</sup> رخ داده است. نوع شکست ایجاد شده به دلیل شدت ضربه بالا و ویژگی ترد بودن مواد به کار رفته در کامپوزیت‌های آزمایش شده است. الیاف بازالت و شیشه هر دو از دسته الیاف ترد و شکننده اند [۱۷]. هم‌چنین رزین اپوکسی از نوع پلیمرهای گرماسخت است که در اثر اعمال ضربه دچار شکست کامل از نوع ترد می‌شود [۱]. این خواص باعث می‌شوند کامپوزیت‌های اپوکسی تقویت شده با الیاف بازالت و شیشه، دارای ساختار ترد باشند و در اثر ضربه به صورت کامل شکسته شوند.

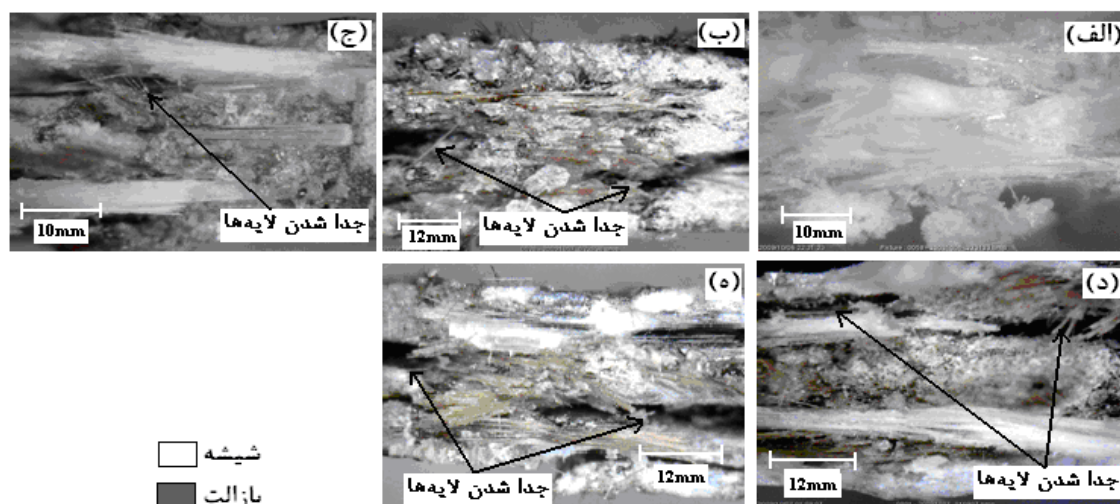
در شکل (۶)، نحوه شکست نمونه‌های مختلف کامپوزیت تحت بار ضربه‌ای نشان داده شده است. همان طور که در این

هوا، بدون قرار دادن نمونه در دستگاه، پاندول رها و میزان مقاومت هوا یادداشت می‌شود. عدد به دست آمده باید از نتایج آزمایش‌ها کسر شود که در این پژوهش به دلیل ناچیز بودن مقاومت هوا، از مقدار آن صرف نظر شد.

### ۳- نتایج و بحث

در جدول (۳) انرژی ضربه‌ای جذب شده بر حسب کیلوژول بر متر مربع برای کامپوزیت‌های خالص و هیبرید بازالت و شیشه در راستاهای اعمال نیروی مختلف آورده شده است.

هنگامی که نمونه کامپوزیت تحت ضربه قرار می‌گیرد نیروی حاصل از ضربه باعث ایجاد تنش‌ها و کرنش‌هایی بر روی نمونه (سمت اعمال ضربه) و پشت آن می‌شود. این تنش و کرنش‌ها بر روی نمونه از نوع کششی است و به تدریج در راستای عرض تبدیل به نوع فشاری می‌شود. از آن جایی که تنش‌های اعمال شده، توسط زمینه به تقویت‌کننده منتقل می‌شوند لذا نوع الیاف، محل قرارگیری هر دسته از الیاف، قدرت اتصال زمینه و الیاف و قدرت اتصال لایه‌های کامپوزیت با یکدیگر، عوامل موثری بر مقاومت در برابر ضربه کامپوزیت‌اند [۲۶]. در ادامه نحوه شکست نمونه‌ها و تاثیر پارامترهای مختلف بر میزان انرژی ضربه‌ای جذب شده توسط نمونه‌های خالص و هیبرید بازالت و شیشه بررسی شده است. نتایج و بحث‌های انجام شده، بر اساس تحلیل‌های آماری با نرم‌افزار اسپاس<sup>۲۷</sup> با ضریب اطمینان ۹۵ درصد است.



شکل ۶- سطح مقطع شکست نمونه‌های مختلف در راستای زاویه ۳۰ درجه (الف) 8G، (ب) 8B، (ج) 4B4G، (د) 4G4B و (ه) 8BG.

ضریب بستگی به زاویه بین الیاف و راستای اعمال نیرو خواهد داشت. اگر الیاف کاملاً در راستای اعمال نیرو قرار گیرند این ضریب از نظر نظری برابر یک می‌شود و اگر با راستای اعمال نیرو زاویه بسازند ضریب کارایی الیاف کاهش خواهد یافت [۲۸].

$$\eta = \frac{1}{n} \sum (\cos \theta_i)^4 \quad (3)$$

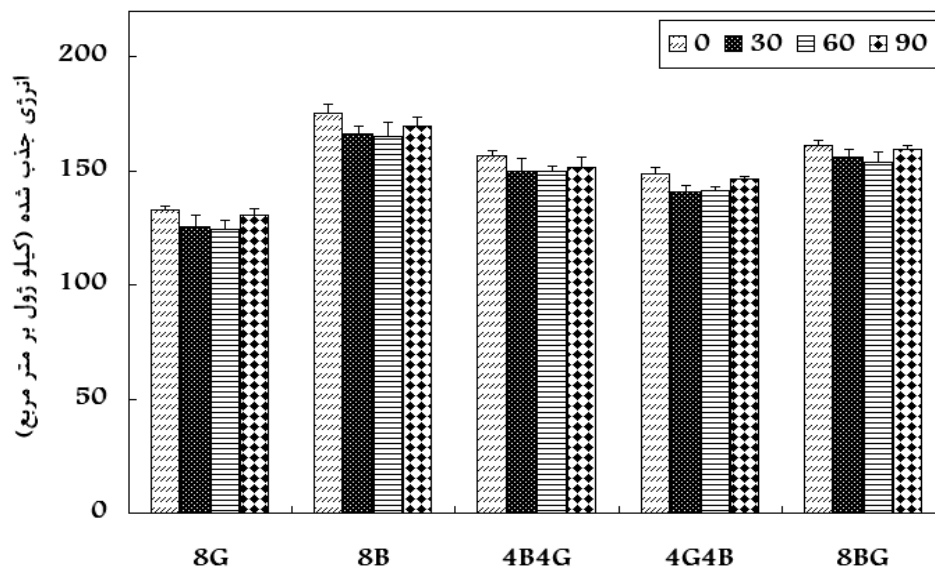
در این رابطه،  $\eta$  ضریب کارایی الیاف،  $\theta_i$  زاویه الیاف در لایه نام با راستای اعمال نیرو و  $n$  تعداد لایه‌های کامپوزیت است. محاسبه ضریب کارایی آرایش الیاف انتخاب شده (۰/۴۵/-۴۵/۹۰) نشان می‌دهد این ضریب برای زاویه‌های اعمال نیروی ۰، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه با هم یکسان و برابر ۰/۳۷۵ است. به عبارتی تغییر زاویه اعمال نیرو نباید تاثیری بر مقاومت ضربه‌ای کامپوزیت با آرایش شبه‌همسانگرد داشته باشد. در آزمایش‌های تجربی مقدار انرژی جذب شده برای زاویه‌های اعمال نیروی ۰ و ۹۰ درجه تقریباً ۵ درصد بیش‌تر از زاویه‌های ۳۰ و ۶۰ درجه است. این مساله می‌تواند به دلیل ممتد بودن و برش نخوردن الیاف برخی لایه‌ها در سراسر نمونه کامپوزیت باشد [۲]. به عنوان مثال در زاویه اعمال نیروی صفر درجه، الیاف در لایه‌های اول و هشتم بدون این که در آن‌ها هیچ برشی ایجاد شده باشد در سراسر نمونه امتداد دارند در حالی که در زاویه اعمال نیروی ۳۰ درجه این الیاف در مرحله آماده‌سازی نمونه‌ها، برش داده شده‌اند.

شکل مشاهده می‌شود نحوه شکست کامپوزیت‌های مختلف تقریباً مشابه هم اند. در همه نمونه‌ها، شکست‌هایی از نوع پاره شدن الیاف همراه با خروج آن‌ها از زمینه<sup>۲۹</sup> و جدا شدن لایه‌های کامپوزیت<sup>۲۹</sup> اتفاق افتاده است. بررسی دقیق سطح مقطع نمونه‌ها نشان می‌دهد الیاف بازالت به صورت جزئی و الیاف شیشه با طول‌های بلند از زمینه خارج شده‌اند. این مساله می‌تواند به دلیل پوشش‌دهنده نامناسب سطحی الیاف شیشه و در نتیجه ایجاد اتصال ضعیف بین الیاف شیشه و رزین اپوکسی باشد [۲۷].

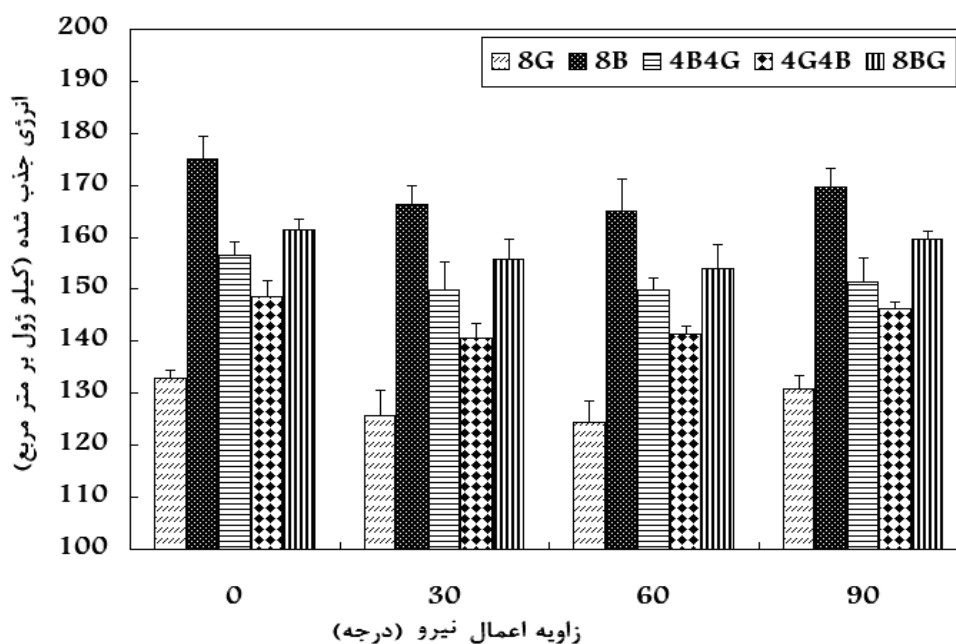
### ۳-۲- تأثیر زاویه اعمال نیرو بر میزان مقاومت ضربه‌ای

در شکل (۷) انرژی جذب شده برای کامپوزیت‌های خالص و هیبرید بازالت و شیشه در راستای اعمال نیروی مختلف آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تغییر زاویه اعمال نیرو تاثیر کمی بر مقاومت در برابر ضربه کامپوزیت‌های آزمایش شده داشته است. به گونه‌ای که در همه نمونه‌ها، حداکثر اختلاف انرژی جذب شده با تغییر زاویه اعمال ضربه ۵ درصد است. نتایج نشان می‌دهند نمونه‌های مختلف در زاویه‌های اعمال نیروی ۰ و ۹۰ درجه، بیش‌ترین و در زاویه‌های اعمال نیروی ۳۰ و ۶۰ درجه، کم‌ترین انرژی جذب شده را دارند.

الیاف با آرایش مختلف دارای ضریب کارایی متفاوتی بر مقاومت در برابر ضربه کامپوزیت‌ها هستند. بر طبق رابطه (۳)، این



شکل ۷- انرژی جذب شده برای کامپوزیت‌های خالص و هیبرید بازالت و شیشه در راستاهای اعمال ضربه مختلف



شکل ۸- میانگین انرژی جذب شده توسط کامپوزیت‌های مختلف

نیرو تقریباً ۳۰ درصد بیش‌تر از کامپوزیت تقویت شده با الیاف شیشه است. بالاتر بودن مقاومت ضربه‌ای بازالت خالص نسبت به شیشه خالص می‌تواند به دلیل مدول اولیه و استحکام کششی بالاتر الیاف بازالت نسبت به الیاف شیشه باشد (جدول (۱)). یکی دیگر از عواملی که می‌تواند بر نتیجه به دست آمده موثر باشد قدرت اتصال الیاف بازالت و شیشه استفاده شده با رزین اپوکسی است.

### ۳-۳- تأثیر نوع تقویت کننده بر خصوصیات ضربه‌ای کامپوزیت‌ها

در شکل (۸) مقدار انرژی جذب شده توسط نمونه‌های بازالت خالص و شیشه خالص در زاویه‌های مختلف اعمال نیرو نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقاومت ضربه‌ای کامپوزیت تقویت شده با الیاف بازالت در تمامی زاویه‌های اعمال

همان‌طور که در بخش نحوه شکست نمونه‌ها اشاره شد، الیاف بازالت نسبت به الیاف شیشه استفاده شده، اتصال بهتری با رزین اپوکسی دارند. این امر باعث انتقال بهتر تنش از رزین به الیاف و در نهایت جذب انرژی بالاتر توسط الیاف شده است [۲۹].

### ۳-۴- تأثیر هیبرید کردن بر میزان مقاومت ضربه‌ای

شکل (۸) مقدار انرژی جذب شده توسط نمونه‌های خالص (8G, 8B) و هیبرید (4B4G, 4G4B, 8BG) را نشان می‌دهد. همان‌طور که از نمودار مشخص است در همه زوایای اعمال نیرو، نمونه‌های بازالت خالص و شیشه خالص به ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین انرژی جذب شده را از خود نشان داده‌اند. مقدار انرژی ضربه‌ای جذب شده برای نمونه‌های هیبرید، کم‌تر از نمونه بازالت خالص و بیش‌تر از نمونه شیشه خالص است. میزان جذب انرژی نمونه‌های هیبرید ۱۰ تا ۲۵ درصد بیش‌تر از نمونه شیشه خالص و ۷ تا ۱۹ درصد کم‌تر از نمونه بازالت خالص است. این نتیجه به دلیل برتر بودن خواص مکانیکی الیاف بازالت نسبت به الیاف شیشه و بالاتر بودن قدرت اتصال الیاف بازالت با رزین اپوکسی نسبت به الیاف شیشه است (جدول (۱)). با توجه به این دلایل هیبرید کردن و افزایش درصد حجمی الیاف بازالت، قابلیت نمونه برای جذب انرژی ضربه‌ای را افزایش داده است.

نتیجه به دست آمده در این بخش با نتایج پژوهش‌های پارک و جانگ [۱۲] و پگورتی [۴] هم‌خوانی ندارد. پارک و جانگ گزارش دادند که میزان جذب انرژی نمونه‌های آرامید خالص و پلی‌پروپیلن خالص نسبت به نمونه‌های هیبرید آن‌ها بیش‌تر است. در نقطه مقابل پگورتی به این نتیجه رسید که نمونه‌های هیبرید شیشه و پلی‌وینیل‌الکل مقاومت ضربه‌ای بهتری نسبت به نمونه‌های خالص آن‌ها دارند. علت تفاوت نتایج مطالعات اشاره شده با پژوهش حاضر می‌تواند به دلیل متفاوت بودن الیاف تقویت کننده و ساختار کامپوزیت‌های بررسی شده باشد.

### ۳-۵- تأثیر آرایش لایه‌های تقویت‌کننده بر میزان مقاومت

#### ضربه‌ای

لایه‌های بیرونی در کامپوزیت‌های چند لایه مستعدترین

نقاط برای آغاز شکست و گسترش آن در هنگام اعمال ضربه‌اند. با قرار دادن الیاف دارای مدول الاستیسیته بالاتر در لایه‌های خارجی کامپوزیت، می‌توان میزان انرژی جذب شده توسط آن‌ها را افزایش داد [۲].

در شکل (۸) میزان انرژی جذب شده توسط نمونه‌های 4B4G و 4G4B با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد با توجه به این‌که آرایش لایه‌ها در نمونه‌های 4B4G و 4G4B تفاوت کمی در حد تغییر جنس لایه‌های خارجی را دارند مقدار انرژی جذب شده آن‌ها نیز به مقدار جزئی (۳ تا ۶ درصد) اختلاف دارند. شکل (۸) نشان می‌دهد که نمونه 4B4G، مقدار جذب انرژی ضربه‌ای بیش‌تری نسبت به نمونه 4G4B دارد. در نمونه 4B4G جنس لایه خارجی از نوع الیاف بازالت است، در حالی که در نمونه 4G4B، لایه بیرونی با الیاف شیشه تقویت شده است. از آنجایی که در فرایند ضربه لایه‌های بیرونی تحت بیش‌ترین تنش و کرنش‌های کششی و فشاری قرار می‌گیرند و الیاف بازالت خواص کششی و فشاری بهتری نسبت به الیاف شیشه دارند (جدول (۱))، بنابراین قرار دادن الیاف بازالت در لایه‌های بیرونی باعث افزایش میزان انرژی جذب شده و بهبود خواص ضربه پاندولی شده است.

### ۳-۶- تأثیر نوع هیبرید بر میزان مقاومت ضربه‌ای

در شکل (۸) مقدار انرژی جذب شده توسط کامپوزیت‌های هیبرید درون لایه‌ای و بین لایه‌ای با هم مقایسه شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود نحوه هیبرید کردن و توزیع الیاف بر میزان انرژی جذب شده توسط کامپوزیت‌ها موثر بوده است. نتایج نشان می‌دهد که نمونه هیبرید درون لایه‌ای 8BG نسبت به نمونه‌های هیبرید بین لایه‌ای 4B4G و 4G4B به ترتیب ۵ و ۱۰ درصد جذب انرژی ضربه‌ای بیش‌تری دارد. این نتیجه با نتایج به دست آمده توسط پگورتی و همکارانش [۴] هم‌خوانی دارد. آن‌ها دریافتند نمونه‌های هیبرید درون لایه‌ای شیشه و پلی‌وینیل‌الکل نسبت به نمونه‌های هیبرید بین لایه‌ای مشابه، مقاومت در برابر ضربه پاندولی بهتری دارند.

#### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش تأثیر پارامترهای نوع تقویت کننده، نوع کامپوزیت، نحوه توزیع الیاف، نحوه آرایش لایه ها و زاویه اعمال نیرو بر میزان جذب انرژی ضربه ای کامپوزیت های خالص و هیبرید تقویت شده با نخ های فیلامنتی بازالت و شیشه بررسی شده است. نتایج نشان می دهند:

- شکست ایجاد شده در اثر ضربه در همه نمونه های کامپوزیت از نوع کامل و ترد است.
- در سطح مقطع همه نمونه های آزمایش شده، پاره شدن الیاف همراه با خروج آن ها از زمینه و جدا شدن لایه های کامپوزیت اتفاق افتاده است.
- در کامپوزیت هایی با آرایش شبه همسانگرد، تغییر زاویه اعمال نیرو تأثیر جزئی بر مقاومت در برابر ضربه داشته است.
- در همه زاویه های اعمال نیرو، نمونه های بازالت خالص و شیشه خالص به ترتیب بیشترین و کمترین انرژی جذب شده را از خود نشان داده اند.
- میزان جذب انرژی ضربه ای نمونه های هیبرید ۱۰ تا ۲۵ درصد بیش تر از نمونه شیشه خالص و ۷ تا ۱۹ درصد کم تر از نمونه بازالت خالص است.
- در نمونه های هیبرید بین لایه ای، قرار دادن الیاف با مدول الاستیسیته بالاتر در لایه های بیرونی باعث بهبود مقاومت در برابر ضربه پاندولی شده است.
- کامپوزیت های هیبرید درون لایه ای نسبت به نمونه های هیبرید بین لایه ای، عملکرد بهتری در برابر ضربه پاندولی دارند.

نتایج به دست آمده در این بخش می تواند به دلیل اختلاف در قدرت اتصال لایه های کامپوزیت و نحوه شکست در نمونه های هیبرید درون لایه ای و بین لایه ای باشد. در کامپوزیت های هیبرید بین لایه ای به دلیل تنش های پسماند حاصل از اختلاف ضریب حرارتی الیاف بازالت و شیشه و به دلیل اتصال نامناسب لایه های بازالت و شیشه، ناحیه اتصال بین لایه ها به عنوان قسمت ضعیف در برابر نیروهای ضربه ای عمل می کند. بنابراین در این دسته از کامپوزیت ها قبل از اینکه نمونه انرژی ضربه ای زیادی جذب نماید، شکست از قسمت بین لایه های کامپوزیت آغاز و به قسمت های دیگر گسترش می یابد. در هیبرید درون لایه ای به دلیل عدم ایجاد تنش های پسماند و به علت وجود اتصالات بازالت-بازالت و شیشه-شیشه در راستای ضخامت، اتصال بین لایه های کامپوزیت محکم تر است و این ناحیه به عنوان نقطه آغاز شکست عمل نمی کند. بنابراین این دسته از نمونه ها می توانند قبل از شکست مقدار انرژی ضربه ای بالاتری را جذب نمایند [۱۲ و ۱۳]. یکی دیگر از عوامل موثر بر متفاوت بودن میزان جذب انرژی نمونه های هیبرید درون لایه ای و بین لایه ای، اختلاف در نحوه شکست این کامپوزیت ها است. در نمونه های هیبرید بین لایه ای به دلیل مدول کششی متفاوت الیاف شیشه و بازالت، نیروی وارد شده به لایه های تقویت شده با شیشه و بازالت متفاوت است. بنابراین برخی لایه ها زودتر شکسته شده و بلافاصله لایه های بعدی متلاشی می شوند. در نمونه های هیبرید درون لایه ای به دلیل وجود همزمان الیاف شیشه و بازالت در همه لایه ها، پخش نیرو به صورت یکنواخت تر بین لایه های تقویت کننده صورت پذیرفته است. بنابراین در این حالت همه لایه ها تا شکست نهایی در برابر نیرو مقاومت می کنند [۴ و ۱۳].

#### واژه نامه

1. Charpy impact
2. reinforcement
3. hybridization
4. stacking sequence
5. matrix
6. inter-ply

7. laminates
8. intra-ply
9. intimately
10. specific modulus
11. specific strength
12. corrosion

13. SiO<sub>2</sub>
14. toughness
15. pure
16. unidirectional
17. Hengdian Group Shanghai
18. CPIC

- |                     |                           |                     |
|---------------------|---------------------------|---------------------|
| 19. Tex             | 23. volume fraction       | 27. SPSS            |
| 20. hand-lay-up     | 24. stress centralization | 28. brittle failure |
| 21. quasi-isotropic | 25. fracture propagation  | 29. debonding       |
| 22. density         | 26. Adinath impex         | 30. delamination    |

## مراجع

- Herakovich, C. T., *Mechanics of Fibrous Composite*, Wiley, New York, 1998.
- Hufenbach, W., Marques Ibrahim, F., Langkamp, A., Bohm, R. and Hornig, A., "Charpy Impact Tests on Composite Structures— an Experimental and Numerical Investigation", *Composite Science and Technology*, Vol. 68, pp. 2391–2400, 2008.
- Szabo, J. S., Kocsis, Z. and Czigany, T., "Mechanical Properties of Basalt Fibre Reinforced PP/PA Blends", *Peridica Polytechnic. Mechanical Engineering*, Vol. 48, pp. 119-132, 2004.
- Pegoretti, A., Fabbri, E., Migliaresi, C. and Pilati, F., "Intraply and Interply Hybrid Composites based on E-glass and Polyvinyl Alcohol Woven Fabrics: Tensile and Impact Properties", *Polymer International*, Vol. 53, pp. 1290–1297, 2004.
- Ghasemnejad, H., Furquan, A.S.M. and Mason, P.J., "Charpy Impact Damage Behaviour of Single and multi-delaminated Hybrid Composite Beam Structures", *Materials and Design*, Vol. 31, pp. 3653–3660, 2010.
- Larsson, F. and Svensson, L., "Carbon, Polyethylene and PBO Hybrid Fibre Composites for Structural Lightweight Armour", *Composites*, Vol. 33, pp. 221-231, 2002.
- Naik, N.K., Ramasimha, R.R., Arya, H., Prabhu, S.V. and Shamarao, N., "Impact Response and Damage Tolerance Characteristics of Glass-Carbon/Epoxy Hybrid Composite Plates", *Composites*, Vol. 32, pp. 565-574, 2001.
- Szabo, J. S. and Czigany, T., "Static Fracture and Failure Behavior of aligned Discontinuous Mineral Fiber Reinforced Polypropylene Composites", *Polymer Testing*, Vol. 22, pp. 711–719, 2003.
- Czigany, T., Vad, J. and Poloskel, K., "Basalt Fiber as a Reinforcement of Polymer Composites", *Peridica Polytechnica Mechanical Engineering*, Vol. 49, pp. 3–14, 2005.
- Ozturk, S., "The Effect of Fibre Content on the Mechanical Properties of Hemp and Basalt Fibre Reinforced Phenol Formaldehyde Composites", *Journal of Material Science*, Vol. 40, pp. 4585-4592, 2005.
- Bhatia, N. M. H., "Strength and Fracture Characteristics of Graphite-Glass Intraply Hybrid Composites", *Composite Materials, Test and Design*, Vol. 22, pp. 183-199, 1982.
- Park, R. and Jang, J., "The Effect of Hybridization on the Mechanical Performance of Aramid/Polyethylene Intraply Fabric Composites", *Composite Science and Technology*, Vol. 58, pp. 1621-1628, 1998.
- Wang, X., Hu, B., Feng, Y., Liang, F., Mo, J., Xiong, J. and Qiu, Y., "Low Velocity Impact Properties of 3D Woven Basalt/Aramid Hybrid Composites", *Composite Science and Technology*, Vol. 68, pp. 444-450, 2008.
- Tehrani Dehkordi, M., Nosraty, H., Shokrieh, M.M., Minak, G. and Ghelli, D., "Low Velocity Impact Properties of Intraply Hybrid Composites based on Basalt and Nylon Woven Fabrics", *Material and Design*, Vol. 31, pp. 3835–3844, 2010.
- Akhbari, M., Shokrieh, M.M. and Nosraty, H., "A Study on Buckling Behavior of Composite Sheet Reinforced by Hybrid Woven Fabrics", *Transactions Canadian Society for Mechanical Engineering*, Vol. 32, pp. 81–89, 2008.
- Artemenko, S.E., "Polymer Composites Materials Made from Carbon, Basalt and Glass Fibers, Structures and Properties", *Fiber chemistry*, Vol. 35, pp. 226-229, 2003.
- Liu, Q., "Basalt Fiber Reinforced Polymer Composite Processing and Properties", Ph.D. Thesis, University of Connecticut, 2006.
- Ziv, M., The Main Principles and Device for Continuous Fibers Production, *Basalt-Technology*, 1998.
- Militky, J.V., Kovacic, V. and Rubnerova, J., "Influence of Thermal Treatment on Tensile Failure of Basalt Fibers", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 69, pp. 1025-1033, 2002.
- Gurev, V.V., Neproshin, E.I. and Mostovoi, G.E., "The Effect of Basalt Fiber Production Technology on Mechanical Properties of Fiber", *Glass and Ceramic*, Vol. 58, pp. 62-65, 2001.
- Callister, W.D., *Materials Science and Engineering*, 3rd ed., John Wiley, New York, 1994.
- Carmisciano, S., Rosa, I.M.D., Sarasini, F., Tamburrano, A. and Valente, M., "Basalt Woven Fiber Reinforced Vinyl Ester Composites: Flexural and Electrical Properties", *Material and Design*, Vol. 32, pp. 337-342.
- Lopresto, V., Leone, C. and De Iorio, I., "Mechanical Characterization of Basalt Fibre Reinforced Plastic", *Composites: Part B*, Vol. 42, pp. 717–723, 2011.

24. Pavlovski, D., Mislavsky, B. and Antonov, A., "CNG Cylinder Manufacturers Test Basalt Fibre", *Reinforced plastics*, pp. 37-39, 2007.
25. ASTM Standard D.256, Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics, 1995.
26. Joseph, S., Sreekala, M.S., Oommen, Z., Koshy, P. and Thomas, S., "A Comparison of the Mechanical Properties of Phenol Formaldehyde Composites Reinforced with Banana Fibres and Glass Fibres", *Composite Science and Technology*, Vol. 62, pp.1857-1868, 2002.
27. Sreekalaa, M.S., Georgeb, J., Kumaranc, M.G. and Thomas, S., "The Mechanical Performance of Hybrid Phenol-Formaldehyde-based Composites Reinforced with Glass and Oil Palm Fibres", *Composites Science and Technology*, Vol. 62, pp. 339-353, 2002.
28. Rudd, C.D., "Mechanical Properties of Weft-knit Glass Fiber/Polyester Laminates", *Composites Science and Technology*, Vol. 45, pp. 261-277, 1992.
29. Sain, M., Suhara, P., Law, S. and Bouilloux, A., "Interface Modification and Mechanical Properties of Natural Fiber-Polyolefin Composite Products", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 24(2), pp. 121-130, 2005.