



تاثیر میزان خمش بر افت استحکام در کامپوزیت‌های خالص و هیبرید تقویت شده با الیاف ترد و انعطاف پذیر

سهیلا احمدی ومکانی^{۱*}، هوشنگ نصرتی^۲ و مجید طهرانی دهکردی^۳

کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک)

دانشیار، دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک)

استادیار، دانشکده فرش، دانشگاه شهرکرد

مقاله مستقل؛ تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۹/۰۵؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۴/۰۳/۰۷؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۷/۱۹

چکیده

در این مقاله، تاثیر میزان خمش، بر آسیب ایجاد شده در نمونه کامپوزیت‌های خالص و هیبرید درون‌لایه‌ای تقویت شده با الیاف ترد (بازالت) و انعطاف‌پذیر (نایلون)، مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، نمونه‌هایی با درصد‌های مختلف بازالت (۰، ۵۰، ۶۶، ۷۵ و ۱۰۰ درصد)، به صورت شش لایه به روش لایه‌گذاری دستی تولید گردید. آنگاه نمونه‌های کامپوزیت، تحت آزمایش خمش سه نقطه‌ای با مقدار خیزهای مختلف (۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر)، قرار داده شدند. برای بررسی میزان آسیب ایجاد شده در اثر خمش در خیزهای مختلف، از روش استحکام کششی باقیمانده استفاده گردید. نتایج نشان می‌دهد، در نمونه‌هایی که درصد بالایی از الیاف بازالت دارند، افزایش مقدار خمش، آسیب‌های ایجاد شده در کامپوزیت را افزایش داده است. با افزایش مقدار الیاف انعطاف‌پذیر همچون نایلون، افزایش مقدار خمش بر میزان آسیب‌های ایجاد شده، تاثیر قابل توجهی نداشته است.

کلمات کلیدی: کامپوزیت؛ هیبرید درون‌لایه‌ای؛ آسیب خمشی؛ استحکام کششی باقیمانده.

Effect of Bending Deflection on Strength Degradation of Homogenous and Hybrid Composites Reinforced with Brittle and Ductile Fibers

S. Ahmadi^{1,*}, H. Nosrati², M. Tehrani³

¹ MSc Student, Textile Eng., Amirkabir Univ., Tehran, Iran.

² Assoc. Prof., Textile Eng., Amirkabir Univ., Tehran, Iran.

³ Assist. Prof., Carpet, Shahrekord Univ., Shahrekord, Iran.

Abstract

In this work, the homogenous and intra-ply hybrid composites of brittle/ductile fibers (basalt as brittle fiber, and nylon as ductile fiber) are produced in order to study the effects of bending deflection on the damages put to the composite structures. The composite samples used in this study are of different volume percentages of basalt fiber (0, 50, 66, 75, and 100%). All the samples including six layers are prepared by the hand lay-up method. The three-point bending test with different deflections (10 mm, 20 mm, 30 mm) are performed on the prepared samples. The residual tensile strength is employed to study the amount of bending damages put to the specimens. The results obtained indicate that in samples comprising a high content of basalt fiber, by increasing the deflection, the damage put to the composite structure increases. With increase in the ductile (nylon) fiber content, increasing the bending deflection does not have a significant effect on the damages.

Keywords: Composite; Intra-ply Hybrid; Bending Damage; Residual Tensile Strength.

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۳۱۱۵۶۸۳۴۱۰

آدرس پست الکترونیک: soheila.ahmadi7@gmail.com

۱- مقدمه

کامپوزیت یا ماده مرکب، ماده‌ای است که از دو یا چند ماده در مقیاس میکروسکوپی ایجاد می‌شود تا خواص مهندسی آن‌ها در مقایسه با اجزای تشکیل دهنده بهبود یابد [۱]. کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف، ممکن است، هنگام استفاده و قرار گرفتن در معرض انواع نیروها، دچار آسیب‌هایی از جمله شکستن ماتریس، جدا شدن پیوند بین ماتریس و الیاف، جدا شدن لایه‌ها و شکستن یا پارگی الیاف تقویت کننده شوند.

نیروی خمشی، از جمله نیروهای احتمالی است که ممکن است، هنگام کاربرد بر کامپوزیت وارد شود. کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف ترد مانند، کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف شیشه یا بازالت، ممکن است در اثر خمش دچار آسیب‌هایی نظیر، پارگی الیاف تقویت کننده در اثر کشیده شدن، شکست در سطح خارجی کامپوزیت در اثر کشش یا فشار و یا برش بین لایه‌های شوند [۲-۴]. بررسی تحقیقات انجام شده توسط Ozturk [۵]، Wang [۳]، Tehrani [۴]، Pegoretti [۶]، Tjong [۷] و Kim [۸] نشان می‌دهد، یکی از روش‌های کاهش آسیب در کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف ترد، هیبرید کردن این دسته از کامپوزیت‌ها با الیاف انعطاف‌پذیر است. کامپوزیت‌های هیبرید، به آن دسته از کامپوزیت‌ها اطلاق می‌شود که در آن‌ها بیش از یک تقویت کننده، ماتریس و یا از هر دو به کار رفته باشد. در برخی موارد با استفاده از دو نوع رزین به عنوان ماتریس، کامپوزیت را هیبرید می‌کنند؛ اما در اکثر موارد، عمل هیبرید با استفاده از دو نوع تقویت کننده صورت می‌گیرد [۹].

کامپوزیت‌های هیبرید تقویت شده با پارچه، بر اساس آرایش الیاف، به دو دسته تقسیم می‌شوند. دسته اول، هیبریدهای بین لایه‌ای می‌باشند. در این هیبریدها، جنس لایه‌های مختلف در کامپوزیت گوناگون است. در دسته دوم، هر لایه ترکیبی از نخ‌ها با طرح مشخص است که به آن‌ها هیبرید درون لایه‌ای می‌گویند [۶، ۱۰]. خواص مکانیکی کامپوزیت‌های هیبرید درون لایه‌ای، در مقایسه با خواص مکانیکی کامپوزیت‌های هیبرید بین لایه‌ای، تنها توسط محققان انگشت شماری مورد بررسی قرار گرفته است [۶، ۱۱-۱۴]؛ در بین تحقیقات انجام شده در این زمینه، Zeng و همکارانش تمرکز تنش روی صفحات کامپوزیت هیبرید درون

لایه‌ای یک طرفه را بررسی کرده اند [۱۵]. Chamis، به بررسی خواص کششی، خمشی و ضربه پاندولی در کامپوزیت‌های هیبرید درون لایه‌ای یک طرفه گرافیت-شیشه و گرافیت-کولار با درصد‌های حجمی مختلف گرافیت پرداخته است [۱۶]. Bhatia استحکام کششی و نحوه گسترش ترک‌ها را در کامپوزیت‌های هیبرید درون لایه‌ای یک طرفه گرافیت-شیشه بررسی نموده است [۱۷]. Wang و همکارانش، رفتار کامپوزیت‌های هیبرید درون لایه‌ای تقویت شده با پارچه‌های سه بعدی مرکب بازالت-کولار را در برابر ضربه پاندولی، مورد بررسی قرار داده‌اند [۳]. اخباری و همکارانش، به بررسی رفتار کامپوزیت‌های هیبرید درون لایه‌ای یک طرفه شیشه-پلی‌استر در برابر ضربه‌های کم انرژی با استفاده از استحکام کم‌انرژی باقیمانده پرداخته‌اند [۲]. Pegoretti و همکارانش، خواص کششی و ضربه پاندولی نمونه‌های هیبرید شیشه-پلی‌وینیل الکل با چیدمان و ترکیب‌های مختلف تقویت کننده را بررسی کرده‌اند. هیبریدها، دارای دو ساختار درون لایه‌ای یک طرفه و بین لایه‌ای بوده‌اند [۶]. Jang و Park، به بررسی خواص خمشی، برش بین لایه‌ای و ضربه‌ای در کامپوزیت‌های هیبرید درون لایه‌ای یک طرفه و بین لایه‌ای کولار-پلی‌اتیلن پرداخته‌اند [۱۸]. طهرانی و همکارانش، خواص کششی، فشاری و ضربه روی سطح کامپوزیت‌های هیبرید درون لایه‌ای بازالت-نایلون با درصد‌های مختلف الیاف را مورد بررسی قرار داده‌اند [۴، ۱۹].

در این پژوهش، تاثیر پارامتر میزان خمش بر آسیب ایجاد شده در نمونه‌های کامپوزیت خالص و هیبرید درون لایه‌ای بازالت (الیاف ترد) و نایلون (الیاف انعطاف‌پذیر)، مورد بررسی قرار گرفته است. برای بررسی میزان آسیب ایجاد شده در اثر خمش، از روش استحکام کششی باقیمانده استفاده گردیده است.

۲- تجربی

۲-۱- مواد و آماده‌سازی نمونه‌ها

در این تحقیق، ۵ نمونه پارچه خالص و ترکیبی با درصد‌های حجمی متفاوت از الیاف بازالت و نایلون روی ماشین بافندگی رپیری تولید گردید. در پارچه‌های تهیه شده، نسبت حجمی الیاف بازالت به کل حجم برابر ۱۰۰، ۷۵، ۶۶، ۵۰ و ۰ درصد

چگالی تئوری با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شده است. که در این رابطه ρ_f و ρ_m به ترتیب چگالی لایه پارچه تقویت کننده و چگالی رزین و w_f درصد وزنی الیاف است

$$\rho_{th} = \frac{1}{\frac{(1-w_f)}{\rho_m} + \frac{w_f}{\rho_f}} \quad (1)$$

۲-۲- آزمایشهای مکانیکی

نمونه‌های مورد نیاز برای آزمایش خمش بر اساس استاندارد ۰۳ - ASTM D.۷۹۰ آماده‌سازی شدند. ابعاد نمونه‌ها در این استاندارد، ۱۵۰ میلی‌متر در ۲۵ میلی‌متر پیشنهاد شده است. برای انجام آزمایش خمش از دستگاه H25KS ساخت کشور آمریکا، موجود در دانشکده مواد دانشگاه صنعتی اصفهان استفاده شد. در زمان آزمایش خمش سه نقطه‌ای، فاصله دو فک بر اساس استاندارد ۰۳ - ASTM D.۷۹۰، ۵۰ میلی‌متر تنظیم شد. در این استاندارد، فاصله دو فک با توجه به ابعاد نمونه تعیین شده است. نمونه‌های مختلف تحت سرعت ۱۰۰ میلی‌متر بر دقیقه تحت خمش ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی‌متری قرار داده شدند تا اثر میزان خمش روی آسیب ایجاد شده در نمونه‌ی کامپوزیتی، مورد بررسی قرار گیرد. شکل ۱- الف، نمایی از فرآیند خمش را نشان می‌دهد.

برای بررسی میزان آسیب ایجاد شده در اثر خمش، نمونه‌های کامپوزیت شاهد و نمونه‌های خمیده شده تحت آزمایش کشش قرار گرفتند. برای انجام آزمایش کشش از دستگاه H50KS ساخت کشور آمریکا موجود در دانشکده مواد دانشگاه صنعتی اصفهان استفاده گردید. فاصله‌ی دو فک، ۹۰ میلی‌متر و سرعت فک متحرک، ۵ میلی‌متر بر دقیقه تنظیم گردید. شکل ۱- ب، نمایی از فرآیند کشش را نشان می‌دهد.



شکل ۱- نمایی از الف) فرآیند خمش و ب) فرآیند کشش

در نظر گرفته شده است. پارچه‌ها در هر دو راستای تار و پود، دارای خواص و ساختار یکسان می‌باشند [۲۰].

پارچه‌های بافته شده بر اساس درصد هر یک از الیاف بازالت و نایلون و حروف ابتدایی آنها کدبندی شده‌اند. به عنوان مثال نمونه 66B34N، پارچه‌ای است که ۶۶ درصد آن بازالت و ۳۴ درصد آن نایلون است. نخ بازالت و نایلون مورد نیاز به ترتیب از شرکت‌های Hengdian Group Shanghai Russia & Gold Basalt Fiber و Junma Tyre Cord کشور چین به صورت روینگ تهیه شده است. جدول ۱، برخی مشخصات نخ‌های بازالت و نایلون به کار برده شده را نشان می‌دهد.

کامپوزیت‌های خالص و هیبرید بازالت - نایلون به صورت ۶ لایه با آرایش $[(0/90)]_6$ در مرکز تحقیقات بافندگی دانشکده نساجی دانشگاه صنعتی امیرکبیر با روش لایه گذاری دستی ساخته شدند. در هر نمونه کامپوزیت، نوع پارچه تقویت‌کننده در هر شش لایه یکسان است. در کامپوزیت‌های ساخته شده از اپوکسی ۵۰۶-ML به عنوان زمینه استفاده گردید. برخی ویژگی‌های کامپوزیت‌های ساخته شده در جدول ۲ آورده شده است. نام‌گذاری کامپوزیت‌ها بر اساس کد پارچه تقویت‌کننده، است.

جدول ۱- مشخصات نخهای بازالت و نایلون به کار برده شده

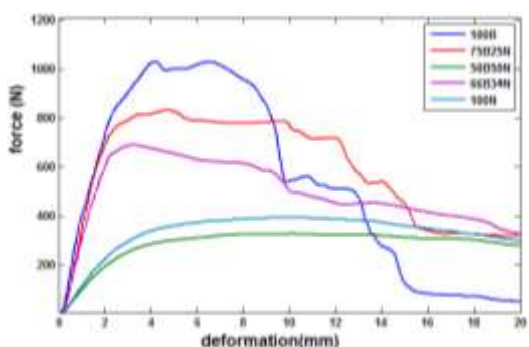
در بافت پارچه‌ها		
ویژگی نخ	بازالت	نایلون
نمره نخ (تکس)	۸۰۰	۳۷۲
تاب (تاب بر متر)	۳۲	۳۰
دانسیته حجمی (کیلوگرم بر متر مکعب)	۲۷۰۰	۱۲۵۰
مدول کششی نخ (گیگا پاسکال)	۷۶	۲/۴۵
استحکام کششی تا حد پارگی (مگاپاسکال)	۱۲۶۰	۱۰۰۶
ازدیاد طول تا حد پارگی (درصد)	۱/۹	۲۰/۵۱

جدول ۲- برخی ویژگی‌های کامپوزیت‌های تولید شده

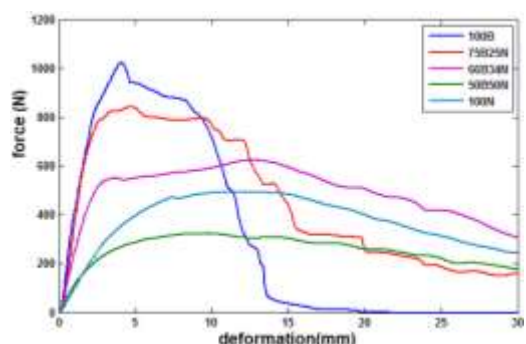
نوع کامپوزیت	ضخامت (mm)	درصد حجمی الیاف (%)	چگالی تئوری (Kg/m ³)	چگالی تجربی (Kg/m ³)	درصد حفره (%)
100B	۳/۹۰	۵۴	۱۸۵۸	۱۷۸۶	۳/۸۷
75B25N	۴/۳۹	۶۲	۱۷۷۶	۱۶۹۰	۴/۸۵
66B34N	۴/۴۳	۶۶	۱۷۴۴	۱۶۶۷	۴/۳۹
50B50N	۵/۳۵	۵۳	۱۴۷۶	۱۳۹۸	۵/۲۷
100N	۴/۶۷	۶۱	۱۲۳۴	۱۱۹۰	۳/۵۶

شکل‌های ۳ و ۴، تغییرات نیرو برحسب خمش نمونه‌های کامپوزیت خالص و هیبرید بازالت و نایلون را تحت خمش ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر، با سرعت ۱۰۰ میلی‌متر بر دقیقه نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، نیروی خمشی کامپوزیت بازالت خالص تقریباً پس از ۶ میلی‌متر خم شدن، روند نزولی در پیش گرفته است که نشان دهنده ایجاد شکست در این نمونه است. پس از این میزان خمش، سیر نزولی در نیروی خمشی ادامه می‌یابد؛ به صورتی که در محدوده تغییر شکل به اندازه ۲۰ میلی‌متر، تقریباً این نیرو به صفر نزدیک شده است.

این روند در نمودار نمونه‌های هیبرید نیز دیده می‌شود؛ اما در این کامپوزیت‌ها به دلیل وجود درصدی از الیاف نایلون، نیروی خمشی با شیب ملایم‌تری به سمت صفر میل یافته است. در بین نمونه‌های هیبرید، نمونه 50B50N رفتار بهتری در برابر خمش داشته است. در شکل‌های ۳ و ۴ مشاهده می‌شود، نیروی خمش در نمونه 50B50N و نمونه نایلون خالص با افزایش خمش کاهش کمی داشته است.



شکل ۳- نمودار نیرو - خمش کامپوزیت‌های مختلف تحت خمش ۲۰ میلی‌متر



شکل ۴- نمودار نیرو - خمش کامپوزیت‌های مختلف تحت خمش ۳۰ میلی‌متر

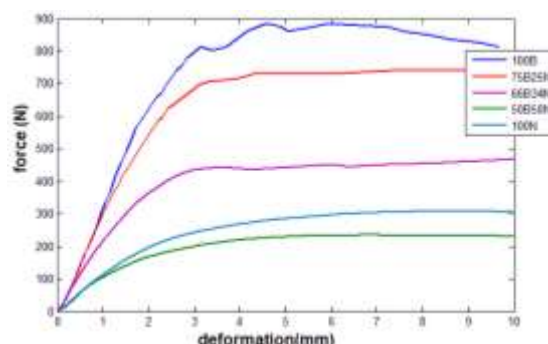
نتایج آزمایش‌های خمش و کشش به دست آمده با استفاده از نرم‌افزار SPSS و آزمون *one-way ANOVA* با در نظر گرفتن ضریب اطمینان ۹۵ درصد مقایسه شده‌اند.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- آزمایش خمش با خیزهای مختلف

شکل ۲، نمودار نیرو - جابجایی نمونه‌های کامپوزیت خالص و هیبرید بازالت - نایلون را نشان می‌دهد که تحت سرعت ۱۰۰ میلی‌متر بر دقیقه به اندازه ۱۰ میلی‌متر خم شده‌اند. همانطور که از نمودارها مشخص است با افزایش خمش، نیرو در نمونه بازالت خالص از ابتدا تا نیمه مسیر به صورت کاملاً خطی افزایش یافته است. سپس به طور ناگهانی از شیب نمودار کاسته شده، آنگاه مقدار نیروی خمشی روندی کاهشی داشته است. از رفتار کامپوزیت بازالت خالص می‌توان دریافت، این نمونه حتی در خمش کمتر از ۱۰ میلی‌متر دچار شکست و آسیب خمشی شده است. این رفتار کامپوزیت بازالت خالص، به دلیل خاصیت ترد بودن الیاف بازالت، از یاد طول بسیار کم این الیاف و رفتار الاستیک آن است.

در نقطه مقابل الیاف بازالت، الیاف نایلون از یاد طول تا حد پارگی بالایی دارد (جدول ۱). این ویژگی، باعث رفتار پلاستیک‌گونه کامپوزیت نایلون خالص در شکل ۲ شده است. رفتار نمونه‌های هیبرید، ترکیبی از رفتار نمونه‌های بازالت و نایلون خالص است. همانطور که در نتایج شکل ۲ مشاهده می‌شود، هرچه درصد بازالت در نمونه‌های هیبرید بیشتر گردد، کامپوزیت رفتاری شبیه‌تر به کامپوزیت بازالت خالص از خود نشان می‌دهد و با کم شدن درصد الیاف بازالت، رفتار کامپوزیت هیبرید به نمونه نایلون خالص شباهت می‌یابد.



شکل ۲- نمودار نیرو - خمش کامپوزیت‌های مختلف تحت خمش ۱۰ میلی‌متر

استحکام کششی نمونه‌های تحت خمش قرار گرفته بر استحکام کششی کامپوزیت‌های شاهد (نمونه‌های کامپوزیتی که فقط تحت آزمایش کشش قرار داده شدند)، استحکام کششی باقیمانده تعیین گردید [۲۱]. نتایج استحکام کششی نمونه شاهد و نمونه‌های خمیده شده در خیزهای مختلف، در جدول ۵ آورده شده است.

شکل ۵، استحکام کششی باقیمانده نمونه‌های کامپوزیتی که به اندازه ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر تحت خمش قرار گرفته‌اند را به صورت درصد نشان می‌دهد.

همانطور که مشاهده می‌شود، استحکام باقیمانده در نمونه‌های مختلف به میزان خمش و درصد الیاف بازالت و نایلون موجود در آنها وابسته است. برای نمونه‌هایی با درصد یکسان بازالت و نایلون، با افزایش میزان خمش، استحکام کششی باقیمانده کاهش یافته است. با اعمال خمش روی نمونه کامپوزیت، آسیب‌هایی در آن ایجاد می‌شود. این مساله در آزمایش کشش، باعث تمرکز تنش در اطراف ناحیه آسیب دیده و در نهایت سبب کاهش استحکام کششی می‌شود. با افزایش میزان خمش، میزان آسیب‌های ایجاد شده افزایش یافته، در نتیجه استحکام کششی باقیمانده در نمونه کاهش خواهد یافت.

جدول ۳- بیشینه استحکام خمشی نمونه‌های مختلف در محدوده خیز ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر

کد نمونه	بیشینه استحکام خمشی (مگاپاسکال) در محدوده		
	۱۰ تا ۲۰ میلی‌متر	۲۰ تا ۳۰ میلی‌متر	۳۰ تا ۴۰ میلی‌متر
100B	۱۹۱/۱۴	۱۹۱/۱۴	۱۹۱/۱۴
75B25N	۱۳۵/۰۹	۱۴۲/۲۴	۱۴۲/۲۴
66B34N	۷۲/۵۹	۹۸/۸۵	۹۸/۸۵
50B50N	۲۴/۱۲	۳۵/۶۳	۳۵/۶۳
100N	۴۱/۴۳	۵۵/۵۷	۶۴/۴۵

جدول ۴- استحکام خمشی نمونه‌های مختلف در خیز ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر

کد نمونه	استحکام خمشی (مگاپاسکال) در نقطه خیز		
	۱۰ میلی‌متری	۲۰ میلی‌متری	۳۰ میلی‌متری
100B	۱۶۹/۴۱	۱۱/۲۴	۱/۸
75B25N	۱۰۷/۱۲	۵۴/۳۲	۳۳/۹۳
66B34N	۷۲/۵۹	۴۷/۹۶	۴۶/۶۹
50B50N	۲۳/۶۹	۳۰/۱۴	۱۹/۴۸
100N	۴۰/۸۴	۴۱/۸۳	۳۱/۶۳

در جدول ۳، بیشینه استحکام خمشی نمونه‌های مختلف در محدوده خیزهای ۰ تا ۱۰، ۰ تا ۲۰ و ۰ تا ۳۰ میلی‌متر آورده شده است. بیشینه استحکام خمشی نمونه‌های مختلف با استفاده از رابطه (۲) که در استاندارد ASTM D.۷۹۰ - ۰۳ آورده شده، محاسبه گردیده است.

$$\sigma_f = 3PL/2bd^2 \quad (2)$$

در این رابطه، σ_f بیشینه استحکام خمشی، P ماکزیمم نیروی خمشی، L فاصله دو فک پایینی خمش، b و d عرض و ضخامت نمونه آزمایش می‌باشند.

نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد، در همه محدوده‌های بررسی شده نمونه بازالت خالص بالاترین مقدار بیشینه استحکام خمشی و نمونه 50B50N و نایلون خالص، کمترین بیشینه استحکام خمشی را دارا هستند.

در جدول ۴، استحکام خمشی نمونه‌های مختلف در نقطه خیز ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر آورده شده است. نتایج تحلیل‌های آماری نشان می‌دهد، در نقطه خیز ۱۰ میلی‌متر، نمونه بازالت خالص و نمونه 75B25N، بهترین عملکرد را داشته‌اند. در این نقطه، نمونه 50B50N کمترین استحکام خمشی را داراست. در نقاط خیز ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر، در نمونه بازالت خالص شکست اتفاق افتاده است؛ بنابراین دیگر این نمونه در برابر نیروی خمشی مقاومتی نداشته است. در این خیزها نمونه‌های هیبرید، مشابه نمونه نایلون خالص عمل کرده‌اند و یا عملکرد بهتری در برابر خمش داشته‌اند.

طبق نتایج به دست آمده و تحلیل‌های آماری انجام شده می‌توان گفت: در تغییر شکل به مقدار (۱۰ میلی‌متر)، هیبرید کردن تاثیر چندانی بر بهبود مقاومت خمشی کامپوزیت نداشته است، اما هر چقدر مقدار خیز افزایش یابد، تاثیر هیبرید کردن الیاف در بهبود نیروی خمشی باقیمانده بیشتر شده است. در مقدار تغییر شکل ۳۰ میلی‌متر، نمونه 66B34N، بهترین عملکرد برای نیروی خمش باقیمانده را داشته‌است.

۳-۲- استحکام کششی باقیمانده

برای بررسی میزان آسیب ایجاد شده در اثر خمش در خیزهای مختلف، از روش استحکام کششی باقیمانده، استفاده گردید. بدین منظور، استحکام کششی نمونه‌های کامپوزیت شاهد و نمونه‌های خمیده شده تعیین گردید. سپس با تقسیم

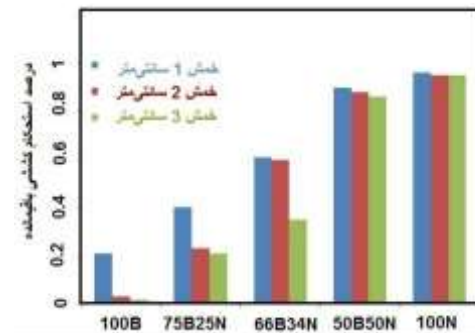
جدول ۵- استحکام کششی نمونه‌های مختلف در خیزهای ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر

100N	50B50N	66B34N	75B25N	100B	نوع نمونه
۱۵۴/۷۶	۶۵/۷۰	۱۲۸/۵۷	۱۵۵/۲۴	۲۲۰/۶۷	استحکام کششی نمونه شاهد (مگاپاسکال)
۱۴۸/۵۷	۵۹/۱۶	۷۸/۴۳	۶۳/۶۴	۴۶/۳۴	استحکام کششی پس از ۱۰ میلی‌متر خمش (مگاپاسکال)
۹۶	۹۰	۶۱	۴۱	۲۱	درصد استحکام باقیمانده پس از ۱۰ میلی‌متر خمش
۱۴۷/۰۳	۵۷/۸۱	۷۷/۱۴	۳۵/۷۰	۶/۶۲	استحکام کششی پس از ۲۰ میلی‌متر خمش (مگاپاسکال)
۹۵	۸۸	۶۰	۲۳	۳	درصد استحکام باقیمانده پس از ۲۰ میلی‌متر خمش
۱۴۷/۰۲	۵۶/۵۰	۴۴/۹۹	۳۲/۶۰	۳/۳۱	استحکام کششی پس از ۳۰ میلی‌متر خمش (مگاپاسکال)
۹۵	۸۶	۳۵	۲۱	۱	درصد استحکام باقیمانده پس از ۳۰ میلی‌متر خمش

نمونه بازالت خالص در مقدار خمش ۲۰ میلی‌متر کاملاً شکسته شده بنابراین استحکام کششی باقیمانده آن در ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر خمش نزدیک به صفر گردیده است. این نتایج نشان می‌دهد، در نمونه بازالت خالص هنگام خمش آسیب زیادی ایجاد گردیده است. زمانی که نمونه 75B25N تحت خمش ۱۰ و ۲۰ میلی‌متری قرار گرفته، استحکام کششی آن به ترتیب به اندازه ۶۰ و ۸۰ درصد کاهش یافته است. در این نمونه پس از خمش ۲۰ میلی‌متر، کاهش جزئی در میزان استحکام کششی باقیمانده دیده می‌شود. در نمونه 66B34N، مقدار استحکام کششی باقیمانده در مقدار خمش‌های ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر با هم یکسان و برابر ۶۰ درصد گردیده است. در این نمونه با افزایش میزان خمش از ۲۰ به ۳۰ میلی‌متر، استحکام خمشی باقیمانده به ۴۰ درصد رسیده است. رفتار نمونه‌های ۵۰B۵۰N و نایلون خالص تقریباً مشابه هم می‌باشند. در این نمونه‌ها، خمش ۱۰ میلی‌متری به ترتیب استحکام کششی را ۱۸ و ۵ درصد کاهش داده است. در این نمونه‌ها، افزایش میزان خمش تاثیر قابل توجهی بر استحکام خمشی باقیمانده و مقدار آسیب نداشته است.

نتایج شکل ۵ نشان می‌دهد، درصد الیاف بازالت و نایلون موجود در کامپوزیت‌ها بر مقدار آسیب ایجاد شده در آن‌ها تاثیر قابل توجهی داشته است. نتایج نشان می‌دهد، کمترین استحکام کششی باقیمانده در بین کامپوزیت‌ها یا به عبارت دیگر بیشترین آسیب وارد شده به نمونه‌های کامپوزیتی تحت خمش قرار گرفته، مربوط به کامپوزیت بازالت خالص است در نقطه مقابل، بیشترین استحکام کششی باقیمانده در بین کامپوزیت‌های تحت خمش قرار گرفته مربوط به کامپوزیت نایلون خالص است. این نتیجه، مربوط به خاصیت انعطاف‌پذیری الیاف نایلون است. این الیاف در زمان فرآیند خمش، خمیده شده و شکستی در آن‌ها ایجاد نمی‌شود. رفتار نمونه-

نتایج شکل ۵ نشان می‌دهد، میزان کاهش استحکام کششی باقیمانده در برخی نمونه‌ها قابل توجه بوده، اما در برخی دیگر مقداری جزئی بوده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، زمانی که نمونه بازالت خالص به اندازه ۱۰ میلی‌متر خمیده شده، استحکام کششی باقیمانده در آن به اندازه ۷۹ درصد کاهش یافته است. این کاهش به دلیل شکست‌های ایجاد شده در الیاف بازالت و ماتریس است (شکل ۶).



شکل ۵- استحکام کششی باقیمانده نمونه‌های کامپوزیت خالص و هیبرید بازالت و نایلون در خیزهای مختلف



شکل ۶- شکست‌های ایجاد شده در نمونه بازالت خالص

- woven basalt/aramid hybrid composites. *Compos Sci Technol* 68: 444-450.
- [4] Tehrani Dehkordi M, Nosraty H, Shokrieh MM, Minak G, Ghelli D (2013) The influence of hybridization on impact damage behavior and residual compression strength of intraply basalt/nylon hybrid composites. *Mater Design* 43: 283-290.
- [5] Ozturk, Sultan (2005) The effect of fibre content on the mechanical properties of hemp and basalt fibre reinforced phenol formaldehyde composites. *J Mater Sci* 40: 4585-4592.
- [6] Pegoretti A, Fabbri E, Migliaresi C, Pilati F (2004) Intraply and interply hybrid composites based on E-glass and polyvinyl alcohol woven fabrics: tensile and impact properties. *Polym Int* 53: 1290-1297.
- [7] Tjong SC, Xu SA, Li RK, Mai YW (2002) Mechanical behavior and fracture toughness evaluation of maleic anhydride compatibilized short glass fiber/SEBS/polypropylene hybrid composites. *Compos Sci Technol* 62(6): 831-840.
- [8] Kim JK, Sham ML, Sohn MS, Hamada H (2001) Effect of hybrid layers with different silane coupling agents on impact response of glass fabric reinforced vinylester matrix composites. *Polymer* 42: 7455-7460.
- [9] Szabo JS, Kocsis Z, Czigany T (2004) Mechanical properties of basalt fibre reinforced PP/PA blends. *Period Polytech Mech Eng* 48: 119-132.
- [10] Ross JR (1996) Characterization of hybrid composites: offshore applications. Ph.d thesis, Texas A&M University.
- [11] Imielinska K, Castaings M, Wojtyra R, Haras J, Le Clezio E, Hosten B (2004) Air-coupled ultrasonic C-scan technique in impact response testing of carbon fiber and hybrid: glass, carbon and kevlar/epoxy composites. *J Mater Process Technol* 158: 513-22.
- [12] Naik NK, Ramasimha RR, Arya H, Prabhu SV, Shamarao N (2001) Impact response and damage tolerance characteristics of glass-carbon/epoxy hybrid composite plates. *Composites* 32: 565-74.
- [13] Liu Q, Giffard HS, Shaw MT, McDonnell AM, Parnas RS. Preliminary investigation of basalt fiber composite properties for applications in transportation. *The Official Newsletter of the International Institute for FRP in Construction* 2005; 2. p. 6-8.
- [14] Hosur MV, Abdullah M, Jeelani S (2004) Studies on the low velocity impact response of woven hybrid composites. *Compos Struct* 67: 253-62.
- [15] Zeng Q, Huang X, Lin X (2001) Study on stress concentrations in an intraply hybrid composite sheet. *Appl Math Mech-Engl* 22: 154-159.

های هیبرید در بین نمونه‌های خالص است. در این نمونه‌ها با افزایش مقدار الیاف نایلون، استحکام کششی باقیمانده افزایش یافته و به عبارتی مقدار آسیب‌های ایجاد شده مقدار کمتری بوده است.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، تاثیر پارامتر میزان خمش بر آسیب ایجاد شده در نمونه‌های کامپوزیت خالص و هیبرید درون‌لایه‌ای بازالت و نایلون با استفاده از روش استحکام کششی باقیمانده، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد:

- در مقدار خیزهای کم (۱۰ میلی‌متر)، هیبرید کردن تاثیر جزئی بر بهبود استحکام خمشی باقیمانده کامپوزیت داشته است؛ اما هر چقدر مقدار خیز افزایش یابد، تاثیر هیبرید کردن الیاف، در بهبود نیروی خمشی باقیمانده بیشتر شده است.
- مقدار آسیب ایجاد شده در نمونه‌های مختلف به میزان خمش و درصد الیاف بازالت و نایلون موجود در آن‌ها وابسته است.
- با افزایش مقدار الیاف نایلون، استحکام کششی باقیمانده افزایش یافته و به عبارتی، مقدار آسیب‌های ایجاد شده کمتر گردیده است.
- در نمونه‌هایی که درصد بالایی از الیاف بازالت دارند، افزایش مقدار خمش، آسیب‌های ایجاد شده در کامپوزیت را افزایش داده است.
- با افزایش مقدار خمش، نمونه‌های کامپوزیتی که درصد بالایی از الیاف نایلون دارند، آسیب کمتری را متحمل شده اند.

۵- مراجع

- [۱] محمد طاها ابدی، رفتار مکانیکی مواد مرکب، انتشارات پژوهشگاه هوافضا ۱۳۸۸.
- [2] Akhbari M, Shokrieh MM, Nosraty H (2008) A study on buckling behavior of composite sheet reinforced by hybrid woven fabrics. *Trans Can Soc Mech Eng* 32: 81-89.
- [3] Wang X, Hu B, Feng Y, Liang F, Mo J, Xiong J, Qiu Y (2008) Low velocity impact properties of 3D

- and nylon woven fabrics: tensile and compressive properties. Iran J Mater Sci Eng 12(1): 1-11.
- [۲۰] مجید طهرانی دهکردی، هوشنگ نصرتی، محمود مهرداد شکریه، بررسی تاثیر ترکیب نخ‌های بازالت و نایلون بر خواص کششی پارچه‌های بافته شده از آنها، مجله علوم و فن‌آوری نساجی، سال ۱، شماره ۲، ۱۳۹۰، ۹۶-۹۱.
- [21] Wang SX, Wu LZ, Ma L (2010) Low-velocity impact and residual tensile strength analysis to carbon fiber composite laminates. Mater Design 31(1):118-125.
- [16] Chamis CC, Lark RF, Sinclair JH (2003) Mechanical property characterization of intraply hybrid composites. Pentagon reports. Report number A665103.
- [17] Bhatia NMH (1982) Strength and fracture characteristics of graphite-glass intraply hybrid composites. Compos Mater Test Des 22:183-99.
- [18] Park R, Jang J (1998) The effect of hybridization on the mechanical performance of aramid/polyethylene intraply fabric composites. Compos Sci Technol 58:1621-8.
- [19] Tehrani Dehkordi M, Nosraty H, Shokrieh MM (2015) Intraply hybrid composites based on basalt