

مروری بر خواص مکانیکی کامپوزیتهای زمینه پلیمری هیبرید کف-شیشه/پلی استر



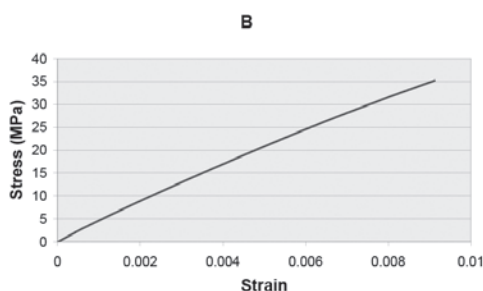
مهدی امامی قره‌حاجلو^۱، شهرام شاه‌بابائی^۲، فرزانه استوار^۳

۲-۵ نتایج آزمایش کشش

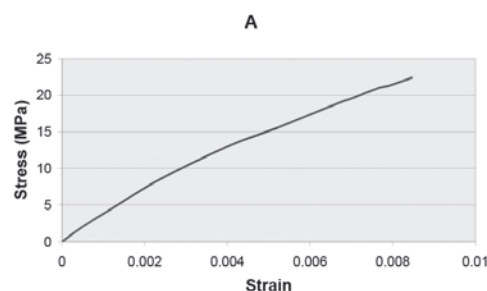
آزمایش کشش بر اساس استاندارد ASTM D3039 انجام گرفته و نتایج آن در این بخش ارائه شده است. همه نمونه‌ها در ابعاد ۲۵×۲ سانتی‌متر تهیه شده و تحت اعمال بار کشش قرار گرفتند. نمودار تنش-کرنش این نمونه‌ها در شکل ۵ نشان داده شده است. در جدول ۵ هر یک از خصوصیات مکانیکی نمونه‌های تولیدی آمده است.

۳-۵ مقایسه و تحلیل نتایج تست کشش

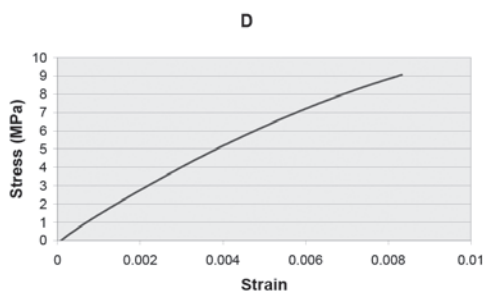
در شکل ۶ نمودار مقایسه‌ای تنش-کرنش نمونه‌های A و B ارائه شده است. با توجه به این شکل واضح است که مدول یانگ و استحکام کششی نمونه حاوی الیاف شیشه بیشتر از نمونه حاوی الیاف پلی استر است که این نتیجه با توجه به خصوصیات کششی برتر الیاف شیشه، منطقی است. لازم به ذکر است که با توجه به نوع مقاوم‌ساز که در این نمونه‌ها به صورت پارچه بافته شده است و از



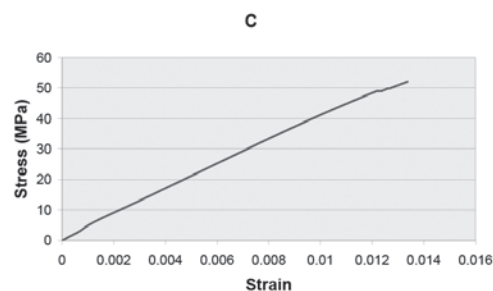
نمونه کف-شیشه (B)



نمونه کف-پلی استر (A)



نمونه تک‌جهته کف و پلی استر (D)



نمونه تک‌جهته کف و شیشه (C)

شکل ۵- نمودار تنش-کرنش نمونه‌های تولیدی

جدول ۵- خصوصیات مکانیکی نمونه‌های تولیدی

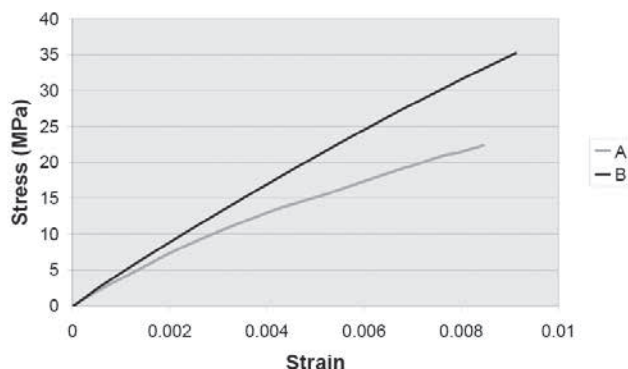
نمونه‌ها	مدول یانگ (MPa)	استحکام کششی (MPa)	افزایش طول شکست (mm)	کرنش شکست	انرژی جذب شده (J)	مدول ویژه	استحکام ویژه
A	۴۱۶۱	۲۲/۴	۰/۴۲۴	۰/۰۰۸۵	۰/۷۴	۴۰۷/۹	۲/۲
B	۴۴۹۹	۳۵/۳	۰/۴۵۷	۰/۰۰۹۱	۰/۸۸	۳۹۱/۲	۳/۱
C	۴۰۹۶	۵۲/۱	۰/۶۷	۰/۰۱۳۴	۳/۶۵	۳۳۳	۴/۲
D	۱۷۲۰	۹/۱	۰/۴۱۷	۰/۰۰۸۳	۰/۴	۱۶۰/۷	۰/۸۵



البته باید توجه داشت که خصوصیات مکانیکی کامپوزیت تا قبل از وقوع شکست، نسبت به خصوصیات مکانیکی بستر افزایش چشمگیری نشان می‌دهد. از این رو می‌توان دریافت که استفاده از مقاوم‌ساز در کامپوزیت‌های مورد بررسی، خصوصیات مکانیکی و استحکام کامپوزیت را افزایش می‌دهد اما تأثیر چندانی بر نوع شکست نمونه‌ها ندارد. در نمودارهای ستونی در شکل ۷ تفاوت‌های خصوصیات مکانیکی نمونه‌های A و B با جزئیات بیشتری قابل مشاهده است.

در شکل ۸ نمودار مقایسه‌ای تنش- کرنش برای نمونه‌های C و D نشان داده شده است. همان‌گونه که پیشتر مورد اشاره قرار گرفت، در این نمونه‌ها فاز مقاوم‌ساز به صورت لایه‌ای تک‌جهته و با درصد حجمی ۲۵٪ درون بستر قرار گرفته است. همان‌گونه که در این نمودار مشاهده می‌شود، میزان جابجایی تا نقطه زوال در نمونه لایه‌ای C بسیار بیشتر از نمونه D است این امر شکنندگی بیشتر نمونه D را تایید می‌کند. با توجه به قرارگیری الیاف مقاوم‌ساز به صورت لایه‌ای در بستر پلیمری، می‌توان گفت که نتایج در نمونه‌های C و D کمتر از نمونه‌های A و B تحت تأثیر الیاف کف قرار می‌گیرند.

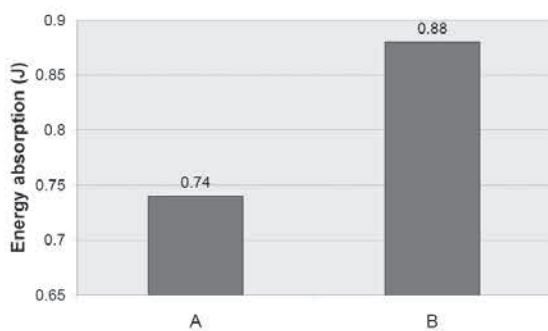
بنابراین نقش خصوصیات مکانیکی الیاف کف و شیشه در این نمونه‌ها بارزتر خواهد بود و به همین علت است که خصوصیات مکانیکی در این دو نمونه نسبت به مقایسه انجام گرفته در نمونه‌های A و B تفاوت بیشتری دارد. این تفاوت مخصوصاً در استحکام نهایی کشش نمونه‌ها بارزتر است که علت آن خواص کششی برتر الیاف شیشه نسبت به الیاف پلی‌استر است. (که در این نمونه‌ها بدون درگیری با الیاف



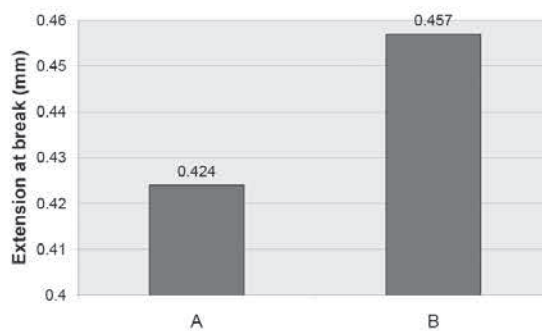
شکل ۶- مودار مقایسه‌ای تنش- کرنش نمونه‌های A و B

آنجا که بخشی از تنش اعمالی به نمونه به الیاف کف وارد می‌شود، سهم هریک از الیاف شیشه و پلی‌استر در تحمل تنش نسبت به حالتی که تنش تنها به این الیاف وارد شود، کمتر است. به همین علت تفاوت در خصوصیات کششی نمونه‌های A و B نسبت به تفاوت میان خصوصیات کششی الیاف شیشه و پلی‌استر، کمتر است.

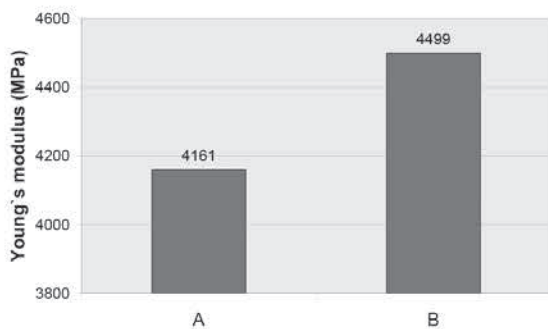
نکته دیگری که می‌توان با توجه به نمودارهای تنش-کرنش نمونه‌های A و B دریافت، وقوع شکست در هر دو نمونه است. از آنجا که در کامپوزیت‌های پلیمری، رفتار شکست ماده بیشتر تحت تأثیر بستر قرار دارد و با توجه به آن که در این نمونه‌ها رزین مورد استفاده خصوصیت شکنندگی دارد، وقوع شکست در این نمونه‌ها طبیعی است.



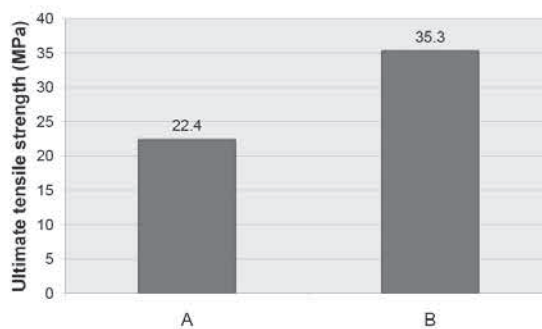
ب) انرژی جذب شده



الف) جابجایی تا قبل از شکست



ت) مدول یانگ

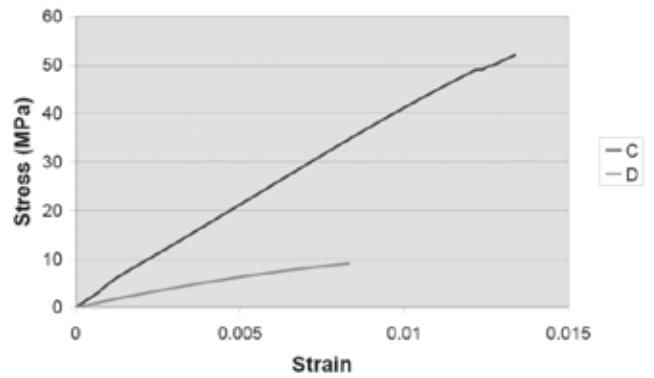


پ) استحکام نهایی کششی

شکل ۷- نمودارهای ستونی مقایسه‌ای خصوصیات مکانیکی نمونه‌های A و B

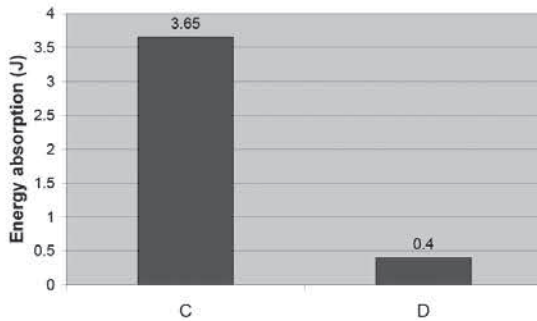


در الیاف شیشه، احتمال وقوع فرایند لغزش را افزایش داده و منجر به افزایش میزان کرنش نمونه حاوی این الیاف نسبت به نمونه حاوی الیاف پلی استر گردیده است. برای درک بهتر تفاوت خصوصیات مکانیکی، در شکل ۹ نمودارهای ستونی این دو نمونه ارائه شده است. در شکل ۱۰ نمودار مقایسه‌ای تنش-کرنش تمامی نمونه‌ها نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌شود، میزان جابجایی تا قبل از زوال در نمونه حاوی الیاف شیشه به صورت لایه‌ای تک جهته (نمونه C)، از سایر نمونه‌ها بیشتر است و پس از این نمونه، به ترتیب نمونه‌های A، B و D قرار می‌گیرند. همین ترتیب در مورد سایر خصوصیات مکانیکی از قبیل استحکام کششی، مدول یانگ و میزان انرژی جذب شده نیز صادق است. خواص برتر نمونه C به وضوح به علت وجود الیاف شیشه به عنوان فاز مقاوم‌ساز و همچنین نحوه قرارگیری این الیاف به صورت لایه‌ای تک جهته است. در صورت فرو رفتن الیاف در هم به صورت بافت پارچه، الگوی اعمال تنش به الیاف

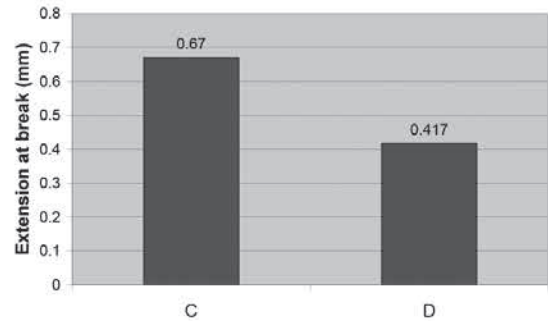


شکل ۸- نمودار مقایسه‌ای تنش-کرنش نمونه‌های C و D

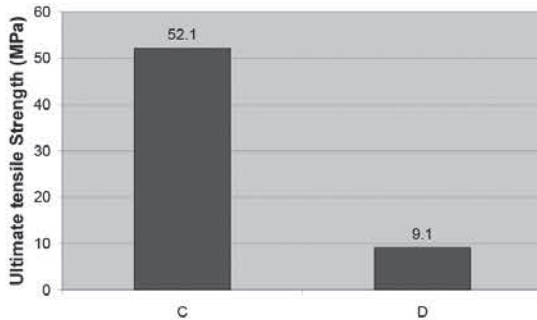
کف تحت اعمال نیرو قرار می‌گیرند). در بستر کرنش شکست نیز مجدداً توجه به این نکته ضروری است که وجود ساختار نیمه بلوری



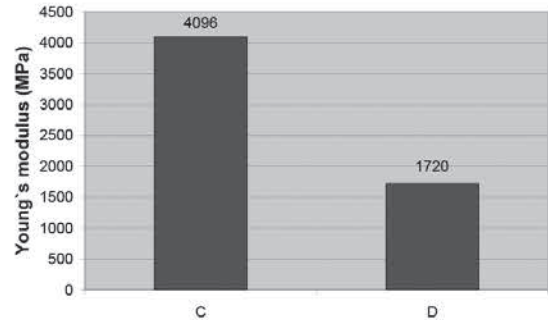
(ب) میزان انرژی جذب شده



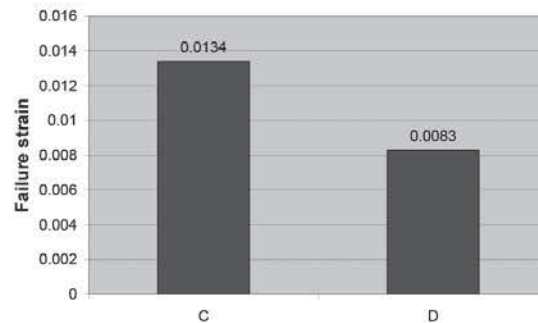
(الف) جابجایی تا قبل از شکست



(ت) استحکام نهایی کششی



(پ) مدول یانگ



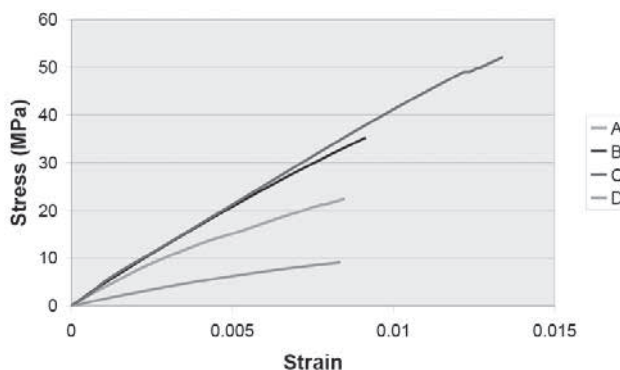
(ث) کرنش شکست

شکل ۹- نمودارهای ستونی مقایسه‌ای خصوصیات مکانیکی نمونه‌های C و D



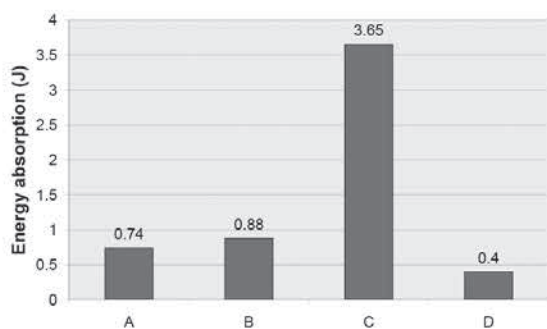
تار و پود پارچه می‌گردد. این امر در پارچه بافته شده با الیاف کنف و الیاف شیشه، باعث انتقال بخشی از نیرو به الیاف کنف می‌گردد و بدین ترتیب باعث افت مقاومت کششی کامپوزیت می‌شوند.

علاوه بر آن، تجزیه نیروی اعمال شده در جهت تار و پود بافت، باعث می‌شود تا بخشی از نیرو در جهت عرضی به الیاف شیشه اعمال شود. به علت ضعف الیاف شیشه در برابر نیروهای اعمالی عرضی، مقاومت کلی در برابر تنش افت خواهد کرد. این مطلب را با مقایسه نتایج حاصل از تست کشش نمونه‌های B و C (که هر دو حاوی الیاف شیشه بوده اما در نمونه B الیاف شیشه با الیاف کنف درگیر هستند) می‌توان به وضوح دریافت. با این وجود، با توجه به برتری چشمگیر خواص کششی الیاف شیشه در مقایسه با الیاف پلی‌استر، خصوصیات مکانیکی نمونه مقاوم شده با پارچه هیبریدی کنف-شیشه نسبت به نمونه‌های حاوی الیاف پلی‌استر همچنان بالاتر است.

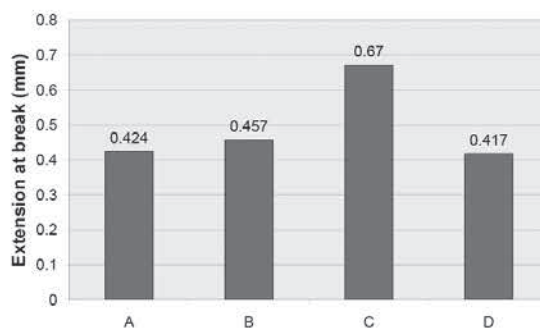


شکل ۱۰- نمودار مقایسه‌ای تنش- کرنش تمامی نمونه‌ها

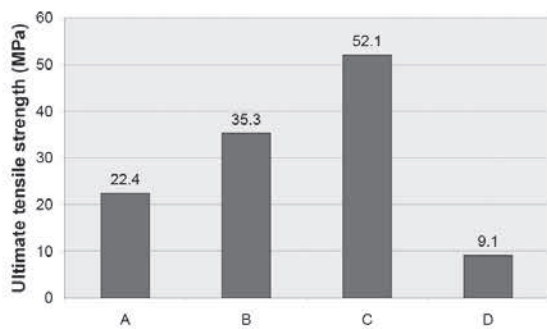
تا حدی دستخوش تغییر می‌شود. به این ترتیب که اتصال و درگیری الیاف با هم باعث تجزیه المان‌های نیرو و اعمال آن در جهت الیاف



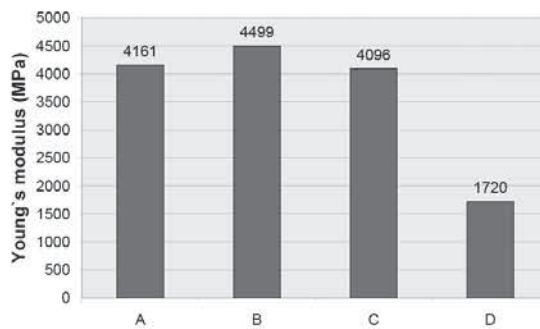
ب) انرژی جذب شده



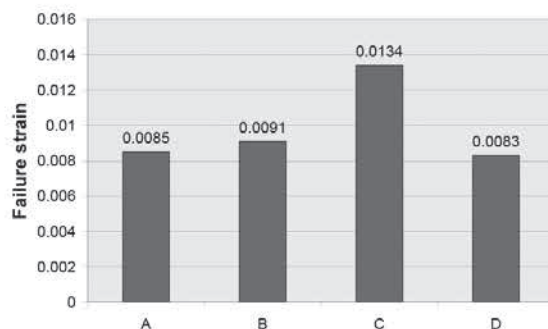
الف) جابجایی تا قبل از شکست



ت) استحکام نهایی کششی



پ) مدول یانگ



ث) کرنش شکست

شکل ۱۱- نمودارهای مقایسه‌ای ستونی خواص کششی نمونه‌های تست کشش



در این نمونه، فاز مقاوم‌ساز به صورت بافت پارچه هیبریدی با تار کنف و پود الیاف پلی‌استر در بستر رزین قرار گرفته‌است. نمودار تنش-کرنش خمشی این نمونه‌ها در شکل ۱۲ نشان داده شده است. در جدول ۶ هر یک از خصوصیات خمشی نمونه‌های تولیدی آمده است.

۵-۵- مقایسه و تحلیل نتایج آزمایش خمش

در این بخش ابتدا نتایج مربوط به نمونه‌های مقاوم شده با پارچه هیبریدی با هم و همچنین نتایج نمونه‌های مقاوم شده با الیاف به صورت لایه‌ای نیز با هم مورد مقایسه قرار گرفته‌اند و سپس تمامی نمونه‌ها به صورت مقایسه‌ای مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

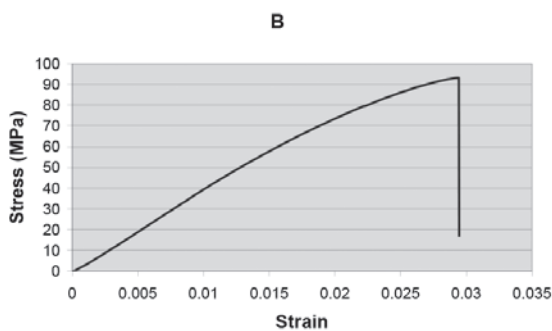
شکل ۱۳ نمودار تنش-کرنش خمشی مقایسه‌ای نمونه‌های A و B را نشان می‌دهد. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌شود، نمونه مقاوم شده با پارچه هیبریدی کنف-شیشه به وضوح خواص مکانیکی برتری نسبت به نمونه مقاوم شده با پارچه هیبریدی کنف-پلی‌استر از خود نشان می‌دهد که این امر با توجه به خصوصیات برتر الیاف شیشه نسبت به الیاف پلی‌استر، منطقی به نظر می‌رسد.

نکته‌ای که در این زمینه باید مورد توجه قرار گیرد، نحوه اعمال تنش به الیاف شیشه و الیاف پلی‌استر موجود در پارچه در حین اعمال با خمشی است. با توجه به جهت‌گیری این الیاف نسبت به راستای اعمال نیرو، نیروی خمشی اعمالی به نمونه به صورت نیروی کششی بر این الیاف اعمال می‌شود. در این میان با توجه به خواص کششی

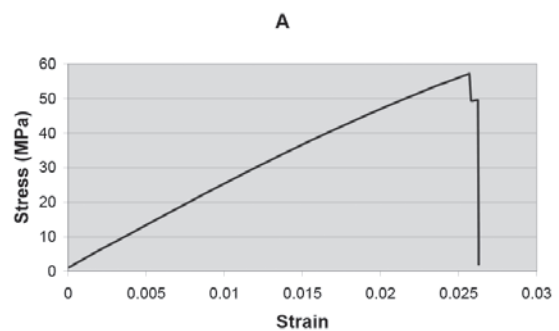
در میان نمونه‌های مورد بررسی، ضعیف‌ترین خصوصیات را نمونه مقاوم‌شده با لایه‌های پلی‌استر (نمونه D) نشان داده است که بیانگر تأثیر مثبت ترکیب الیاف پلی‌استر و کنف به صورت بافت در نمونه A، بر خواص مکانیکی کامپوزیت است. این نتیجه بیانگر این نکته است که در مورد الیاف ضعیف پلی‌استر، ترکیب با الیاف کنف (که خصوصیات بهتری نسبت به الیاف پلی‌استر دارند) و به تبع آن تغییر الگوی توزیع تنش در الیاف و کاهش نقش الیاف پلی‌استر در مقاومت در برابر تنش، منجر به بهبود خواص کششی می‌شود حال آن‌که در مورد الیاف قوی شیشه، این موضوع برعکس بوده و تغییر الگوی توزیع تنش، نقش الیاف قوی‌تر شیشه را در مقاومت ماده کم‌رنگ می‌کند و منجر به افت خصوصیات مکانیکی کامپوزیت حاصل در مقایسه با کامپوزیت تقویت شده با الیاف شیشه لایه‌ای و تک‌جهته می‌شود. برای درک بهتر تفاوت خصوصیات مکانیکی نمونه‌ها، در شکل ۱۱ خصوصیات اندازه‌گیری شده به صورت نمودارهای ستونی مقایسه‌ای ارائه شده‌اند.

۵-۴- آزمایش خمش و نتایج آن

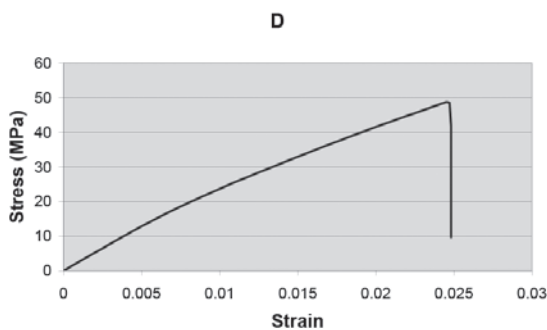
انجام آزمایش خمش سه نقطه‌ای بر اساس استاندارد ASTM D790 انجام گرفته است که بر اساس آن نمونه‌ها باید با ابعاد 25×2 سانتی‌متر تهیه شوند. خروجی دستگاه تست در این آزمایش نیز به صورت نمودار نیرو-جابجایی است که با برخی محاسبات، به نمودار تنش-کرنش تبدیل شده و داده‌های مربوط به تست خمش از آن استخراج می‌شود.



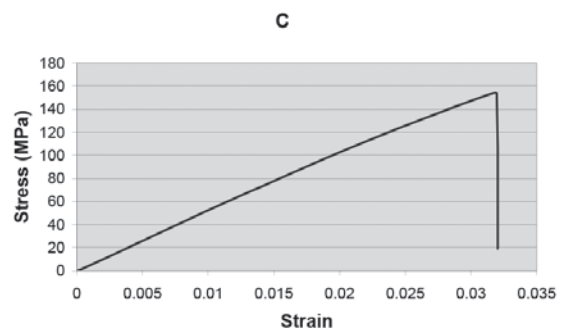
پارچه هیبریدی کنف و شیشه (نمونه B)



پارچه هیبریدی کنف و پلی‌استر (نمونه A)



پارچه لایه‌ای کنف و پلی‌استر (نمونه D)



پارچه لایه‌ای کنف و شیشه (نمونه C)

شکل ۱۲- نمودار تنش-کرنش خمشی نمونه‌های تولیدی

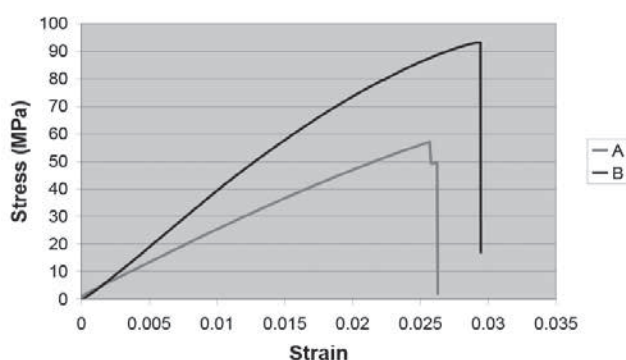


جدول ۶- خصوصیات مکانیکی نمونه‌های تولیدی

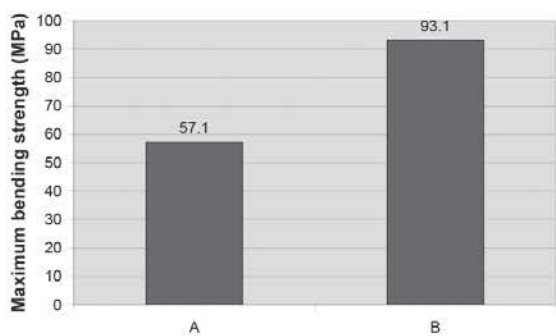
نمونه‌ها	تنش تسلیم خمشی (MPa)	بیشینه استحکام خمشی (MPa)	کرنش حداکثر در نقطه شکست	سفتی خمشی (MPa)	بیشینه استحکام خمشی ویژه	سفتی خمشی ویژه
A	۳۰/۵	۵۷/۱	۰/۰۲۶	۳۴۱۰	۵/۶	۲۳۶/۲
B	۴۳/۳	۹۳/۱	۰/۰۲۹	۳۹۸۳	۸/۱	۳۴۶/۳
C	۶۸/۸	۱۵۳/۹	۰/۰۳۲	۵۲۵۹	۱۲/۵	۴۳۰/۵
D	۱۲/۱	۴۸/۵	۰/۰۲۵	۲۰۹۴	۴/۵	۱۹۵/۷

برتر الیاف شیشه نسبت به الیاف پلی‌استر، بدیهی است که نمونه حاوی الیاف شیشه مقاومت بیشتری از خود نشان دهد. همچنین میزان کرنش حداکثر تا قبل از شکست نیز در نمونه حاوی الیاف شیشه بیشتر است. بنابراین به نظر می‌رسد خصوصیات نمونه A است که این پدیده نیز با توجه به خصوصیات الیاف شیشه و همچنین راستای مؤلفه نیروی اعمالی به آن، قابل توجیه است. برای درک بهتر تفاوت‌های این دو نمونه، در شکل ۱۴ نمودارهای ستونی مقایسه‌ای خصوصیات این دو نوع الیاف ارائه شده است. شکل ۱۵ نمودار تنش-کرنش مقایسه‌ای نمونه‌های C و D را نشان می‌دهد. این شکل بیانگر تفاوت چشمگیر خصوصیات مکانیکی نمونه مقاوم‌شده با الیاف شیشه لایه‌ای با نمونه حاوی الیاف پلی‌استر لایه‌ای است که با توجه به مطالب ارائه شده در مورد نمونه‌های تست کشش، کاملاً منطقی به نظر می‌رسد.

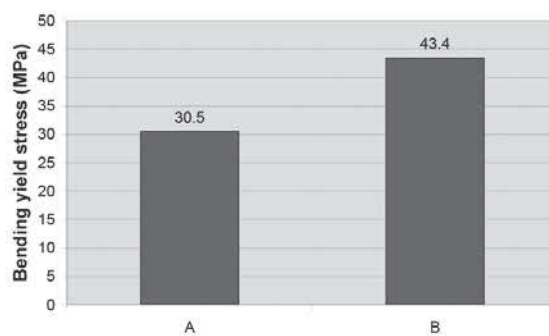
برتر الیاف شیشه نسبت به الیاف پلی‌استر، بدیهی است که نمونه حاوی الیاف شیشه مقاومت بیشتری از خود نشان دهد. همچنین میزان کرنش حداکثر تا قبل از شکست نیز در نمونه حاوی الیاف شیشه بیشتر است. بنابراین به نظر می‌رسد خصوصیات نمونه



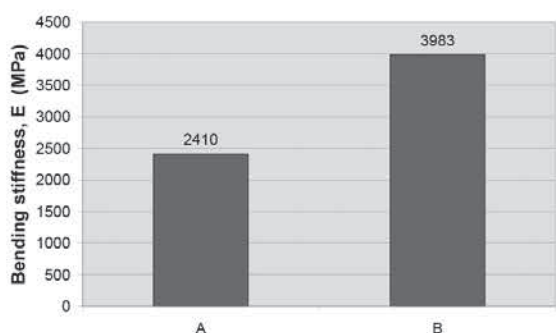
شکل ۱۳- نمودار تنش-کرنش خمشی مقایسه‌ای نمونه‌های A و B



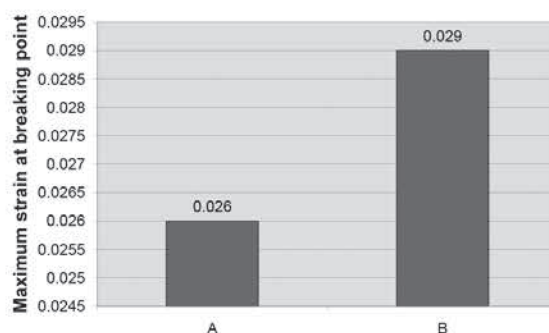
ب) استحکام خمشی حداکثر



الف) استحکام تسلیم خمشی



ت) سفتی خمشی



پ) کرنش حداکثر در نقطه شکست

شکل ۱۴- نمودارهای مقایسه‌ای خواص خمشی نمونه‌های A و B



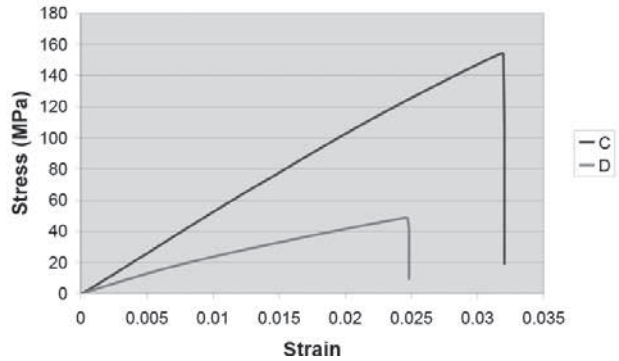
که با توجه به آن می‌توان دریافت که مطابق انتظار خواص خمشی نمونه C (نمونه تقویت شده با استفاده از لایه‌های یک در میان الیاف تک‌جهته کف و شیشه)، از سایر نمونه‌ها برتر است.

در تحلیلی مشابه با آنچه در مورد نمونه‌های تست کشش ارائه شد، می‌توان علت این برتری را در نقش مستقیم الیاف شیشه در نمونه C در تحمل تنش خمشی اعمالی دانست. چرا که در این نمونه الیاف قوی شیشه اولاً بدون درگیری با سایر الیاف و خطر تغییر الگوی تنش اعمالی و ثانیاً از جهت طولی تحت بار اعمالی قرار می‌گیرند و بدین ترتیب حداکثر میزان کارایی خود در نقش تقویت‌کنندگی را ارائه خواهند داد. علاوه بر آن، همانگونه که انتظار می‌رود در زمینه اعمال تنش خمشی نیز استحکام بالای الیاف شیشه به عنوان عامل غالب، رفتار خمشی نمونه را تحت کنترل دارد. بدین ترتیب به نظر می‌رسد برتری نسبی نمونه تقویت شده با پارچه هیبریدی کف-شیشه بر نمونه تقویت شده با لایه‌های یک در میان الیاف کف و پلی‌استر، منطقی باشد که نتایج نیز بر این موضوع صحت می‌گذارد.

در نهایت برای تسهیل امکان مقایسه داده‌های مربوط به نمونه‌های مختلف، در شکل ۱۸ نمودارهای ستونی مقایسه‌ای خصوصیات خمشی تمامی نمونه‌ها ارائه شده است.

۶- نتیجه‌گیری

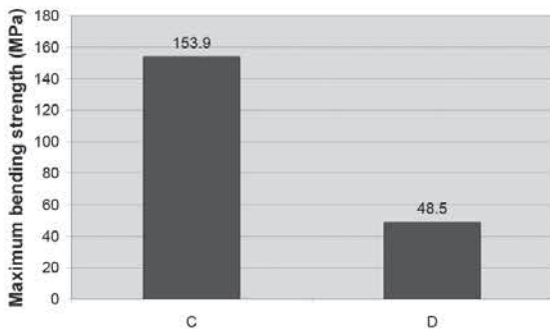
همانگونه که در بخش‌های گذشته بیان شد، نمونه کامپوزیت‌های پلیمری، از دیدگاه مقاومت کششی و خمشی مورد بررسی قرار گرفتند.



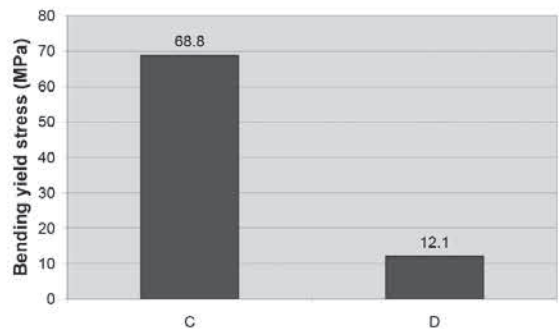
شکل ۱۵- نمودار تنش- کرنش خمشی مقایسه‌ای نمونه‌های C و D

همانطور که انتظار می‌رود، نمونه حاوی الیاف شیشه به صورت لایه‌ای مقدار سختی خمشی به مراتب بیشتری نسبت به نمونه حاوی الیاف لایه‌ای پلی‌استر دارد که مسلماً در نتیجه استحکام کششی بالاتر الیاف شیشه است. مجدداً بر این نکته تأکید می‌شود که با توجه به جهت الیاف شیشه در این نمونه نسبت به جهت اعمال نیروی خمشی، الیاف شیشه تحت تنش کششی قرار خواهند گرفت که این امر باعث می‌شود انرژی بیشتری برای گسیختگی آن‌ها نیاز باشد و به تبع آن سختی خمشی نمونه افزایش یابد.

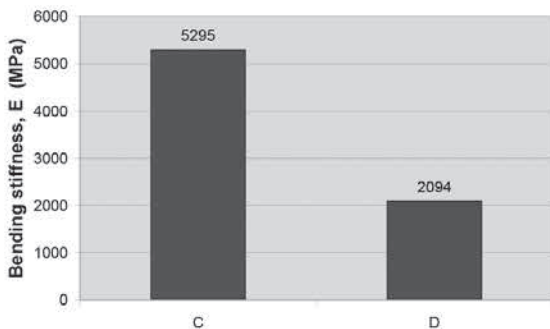
برای درک بهتر تفاوت خصوصیات خمشی این دو نمونه، نمودارهای ستونی مقایسه‌ای مربوط به داده‌های حاصل از نمودار تنش-کرنش این نمونه‌ها در شکل ۱۶ ارائه شده است. در شکل ۱۷ یک نمودار تنش-کرنش خمشی مقایسه‌ای برای تمامی نمونه‌ها نشان داده شده است



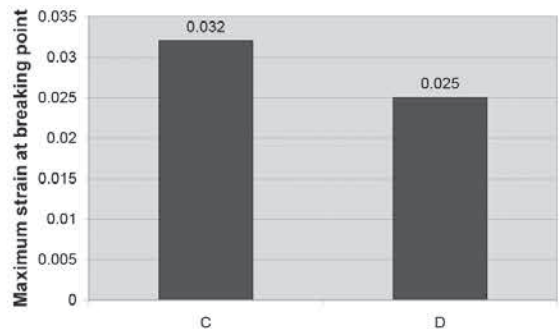
(ب) حداکثر استحکام خمشی



(الف) استحکام تسلیم خمشی



(ت) سختی خمشی



(ب) حداکثر کرنش در نقطه شکست

شکل ۱۶- نمودارهای مقایسه‌ای خواص خمشی نمونه‌های C و D



در ارتقا خواص مکانیکی کششی و خمشی به مراتب پر رنگ‌تر از نقش الیاف پلی‌استر است.

۳- هرچند در ظاهر به نظر می‌رسد که بافت الیاف به صورت پارچه می‌تواند منجر به بهبود عملکرد کامپوزیت تولید شده با الیاف کنف گردد، اما نتایج نشان می‌دهد که این حالت تنها در مواردی که از الیاف ضعیف‌تر از کنف در کنار آن استفاده می‌شود، صحیح است و در مورد الیاف با خصوصیات بالاتر از کنف، بافت الیاف به صورت پارچه منجر به افت خواص نسبت به حالتی که الیاف به صورت تک‌جهته و لایه‌ای استفاده می‌شوند، می‌گردد که علت آن نیز تغییر الگوی اعمال تنش در الیاف با خصوصیات بالاتر است.

۴- استحکام الیاف بیش از نحوه قرارگیری آنها بر خواص نهایی کامپوزیت تاثیر می‌گذارد. بدان معنا که هرچند الیاف بافته شده نسبت به الیاف تک‌جهته با جنس یکسان استحکام کششی و خمشی پایین‌تری دارند، اما در مقایسه با الیاف تک‌جهته از جنس ضعیف‌تر، نقش پررنگ‌تری در تعیین خواص نهایی کامپوزیت خواهند داشت.

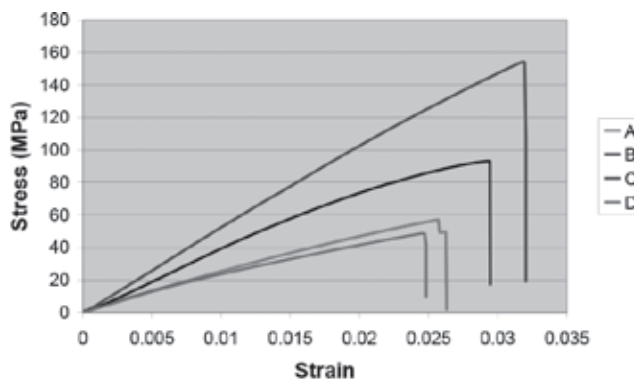
۷- پی‌نوشت

۱- دانشجوی دکتری مهندسی نساجی، دانشکده نساجی، دانشگاه یزد
emami406msc@gmail.com

۲- عضو هیئت مدیره جامعه متخصصین نساجی ایران

۳- کارشناس ارشد طراحی پارچه و لباس، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قائم‌شهر، قائم‌شهر، ایران

۸- منابع در دفتر مجله موجود است.

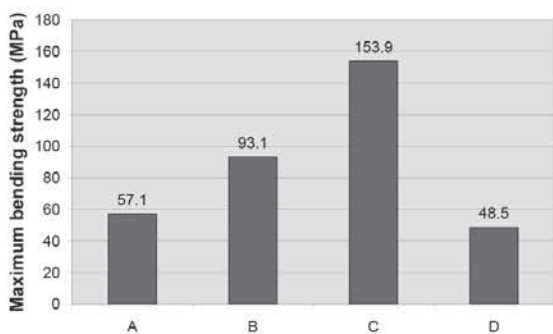


شکل ۱۷- نمودار تنش- کرنش خمشی مقایسه‌ای میان تمام نمونه‌های تست خمشی

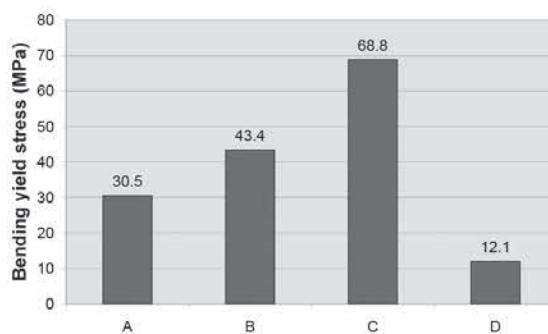
تفاوت نمونه‌ها علاوه بر نوع الیاف مورد استفاده، در نحوه قرارگیری الیاف در بستر پلیمری می‌باشد. بدین ترتیب که در ساخت کامپوزیت‌ها از الیاف در قالب دو نوع پارچه و همچنین لایه‌های یک در میان استفاده شده است. با توجه به نتایج بدست آمده و تحلیل آن‌ها و همچنین با مقایسه نتایج این تحقیق با سایر منابع موجود، موارد زیر را می‌توان به عنوان نتایج این تحقیق بیان کرد:

۱- در نمونه‌های کامپوزیتی تقویت شده با الیاف پارچه، نمونه‌هایی که در بافت پارچه آن‌ها از الیاف شیشه استفاده شده است نسبت به نمونه‌های حاوی الیاف پلی‌استر، خواص کششی و خمشی برتری دارند.

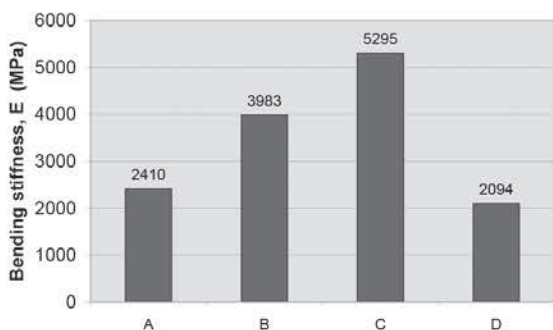
۲- در مورد نمونه‌های تقویت شده با الیاف لایه‌ای، نقش الیاف شیشه



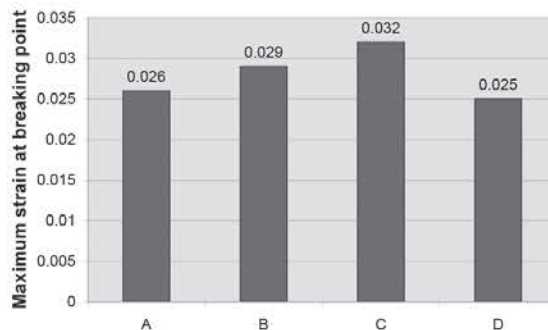
(ب) حداکثر استحکام خمشی



(الف) استحکام تسلیم خمشی



(ت) سفتی خمشی



(پ) حداکثر کرنش در نقطه شکست

شکل ۱۸- نمودارهای ستونی مقایسه‌ای تست خمشی خصوصیات تمامی نمونه‌ها