جلد ۱، شماره ۲، اسفند ۹۳، ص‌ص ۲۱- ۲۸

نشریه علوم و فناوری

کامپوزیـــت

http://jstc.iust.ac.ir

اثر هیبرید نمودن الیاف تقویت کننده بر خواص کششی کامپوزیت‌های زمینه اپوکسی

حسین ابراهیم‌نژاد خالجیری[۱]، رضا اسلامی فارسانی[۲*]، حمید خرسند[۲]، کوشا عباس بنایی[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

۲- استادیار، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

۳- دانشجوی دکتری، مهندسی نساجی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد یزد

* تهران، صندوق پستی ۴۳۳۴۴-۱۹۹۹۱، eslami@kntu.ac.ir

اطلاعات مقاله

دریافت: دی ۹۳

پذیرش: بهمن ۹۳

کلیدواژگان

الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده

اپوکسی

کامپوزیت هیبریدی

خواص کششی

چکیده

الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده از پایدارسازی حرارتی الیاف پلی‌اکریلونیتریل به دست می‌آید و به عنوان ماده ی اولیه برای تولید الیاف کربن استفاده می‌شود. در این تحقیق اثر افزودن این الیاف بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت شده با پارچه‌های سه نوع الیاف پیشرفته بررسی می‌شود. بدین منظور ۱۳ نوع کامپوزیت زمینه اپوکسی تقویت شده با یکی از انواع پارچه الیاف کربن، کولار و شیشه به‌همراه الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده به روش لایه گذاری دستی به‌صورت چهار لایه با چیدمان‌های متفاوت ساخته شدند. برای ساخت کامپوزیت‌ها از رزین اپوکسی بیسفنولF و هاردنر پلی‌آمینی استفاده شده و نسبت رزین به الیاف ۶۰ به ۴۰ درصد وزنی انتخاب شد. سپس خواص کششی و سطح مقطع شکست کامپوزیت‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش نسبت الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده به پارچه کربن، کولار و شیشه، استحکام کششی و مدول الاستیک کاهش یافته اما در نسبت‌های بالای ۵۰٪ وزنی میزان کرنش شکست افزایش می‌یابد. بررسی سطح مقطع شکست نشان داد که کامپوزیت‌های ساخته شده با یکی از پارچه‌های الیاف کربن، کولار و شیشه به‌همراه الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده، به‌ترتیب دارای نوع شکست عرضی، انفجاری و لایه لایه شدن لبه‌ای می‌باشند و با افزایش نسبت الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده به پارچه‌های کربن، کولار و شیشه، نوع شکست عرضی می‌شود.

Hybridization effect of fibers reinforcement on tensile properties of epoxy composites

Hossein Ebrahimnezhad Khaljiri[1], Reza Eslami Farsani[1*], Hamid khorsand[1], Kosha Abbas Banaie[2]

1- Department of Materials Science and Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.
2- Department of Textile Engineering, Islamic Azad University, Yazd Branch, Yazd, Iran.
* P.O.B. 1991-43344, Tehran, Iran, eslami@kntu.ac.ir

Keywords

Oxidized Polyacrylonitrile Fibers,
Epoxy,
Hybrid Composite,
Tensile Properties

Abstract

Oxidized Polyacrylonitrile fibers (OPF) are made by thermal stabilization of polyacrylonitrile (PAN) fibers and are used as precursors materials for production of carbon fibers. In this paper, effect of adding these fibers on tensile properties of polymer matrix composites was studied. So thirteen kind weights of epoxy matrix composite reinforced with one of the carbon, Kevlar and glass fabrics including OPF by hand lay up method as four layers with different layering were made. For making of composites epoxy Bisphenol F resin and polyamine hardener were used and the resin to fiber fraction was selected as 60 percent. Then tensile properties and failure cross section of them were studied. Results showed that by increasing OPF to carbon, Kevlar and glass fabric ratio; the tensile and modulus strength decreased but in more than 50 weight percent ratios failure strain increased. Study of the fail cross section showed that composites made with one of the carbon, Kevlar, glass fabrics including OPF have lateral, explosive and edge delamination failure modes respectively and with increasing the OPF to carbon, Kevlar and glass fabric transverse failure mode happens.

۱- مقدمه

الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده[۱] از پایدارسازی حرارتی پلی‌اکریلونیتریل[۲] به دست می‌آید [۲،۱]. نام تجاری این الیاف پنوکس[۳] می‌باشد که ابتدا توسط شرکت الیاف کربن[۴] انگلیس استفاده شد [۳]. پایدارسازی حرارتی در محیط هوا و در محدوده‌ی دمایی ۳۰۰-۱۸۰°C انجام می‌شود و در حین پایدارسازی

1. Oxidized Polyacrylonitrile Fibers (OPF)

2. Polyacrylonitrile (PAN)
3. PANOX
4. R. K. Carbon Fiber

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Please cite this article using:

Ebrahimnezhad Khaljiri, H. Eslami Farsani, R. khorsand, H. and Abbas Banaie, K., "Hybridization effect of fibers reinforcement on tensile properties of epoxy composites" Journal of Science and Technology of Composite, Vol. 1, No. 2, pp. 21-28, 2015.

Archive of SID

www.SID.ir

رنگ الیاف از سفید به قهوه‌ای و سپس سیاه تغییر می‌کند که به خاطر واکنش‌های حلقه‌ای شدن می‌باشد. پایدارسازی حرارتی شامل واکنش‌های دی‌هیدروژنه کردن، حلقه‌ای شدن و اکسیداسیون می‌باشد که حلقه‌ای شدن در دماهای پایین و اکسیداسیون در دماهای بالا رخ می‌دهد [۵،۴].

تحقیقات قبلی در مورد ترکیب شیمیایی الیاف پلی‌اکریلونیتریل نشان می‌دهد که این الیاف حاوی ۸۵٪ اکریلیک و ۱۵٪ کومونومرهایی[1] مانند ایتاکونیک اسید[2] و متیل اکریلات[3] می‌باشند. اضافه کردن متیل اکریلات باعث افزایش سرعت واکنش‌های پایدارسازی می‌شود [۵]. اضافه کردن کومونومرهای یونی و اسیدی نظیر سدیم متالیل سولفونات[4] و سدیم دو متیل دو اکریل آمینو پروپان سولفونات[5] سبب افزایش استحکام کششی این الیاف می‌شوند [۶].

مطالعات نشان می‌دهد که در حین پایدارسازی حرارتی استحکام کششی افزایش می‌یابد [۷]. بهبود جهت‌گیری کریستالی الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده باعث کاهش ساختار آمورف، کاهش حفرات و بهبود خواص استحکامی الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده می‌شود. کشش الیاف به صورت گسترده برای بهبود جهت‌گیری کریستالی استفاده می‌شود اما دارای محدودیت می‌باشد. مطالعات نشان می‌دهد که استفاده از میدان مغناطیسی قوی برای بهبود جهت‌گیری کریستالی روش مناسب‌تری می‌باشد [۸].

تحقیقات قبلی در مورد خواص مکانیکی الیاف پلی‌اکریلونیتریل نشان داد که با افزایش زمان پایدارسازی، استحکام کششی و درصد ازدیاد طول روندی کاهشی دارند اما مدول الاستیک در ابتدا روندی افزایشی و سپس کاهشی دارد. این کاهش در خواص مکانیکی به خاطر تبدیل شدن گروه‌های نیتریل به نیترو در حین پایدارسازی می‌باشد. دلیل دیگر در کاهش خواص مکانیکی به خاطر اکسیداسیون بیش از حد در محدوده‌ی دمایی پایدارسازی می‌باشد [۹]. همچنین با افزایش سرعت حرارت‌دهی تا سرعت ۲ °C/min افزایش استحکام به سرعت رخ می‌دهد اما در سرعت‌های حرارت‌دهی بالاتر با شیب ملایم‌تری رخ می‌دهد [۱۰].

مطالعات نشان می‌دهد که واکنش‌های حلقه‌ای شدن، دی‌هیدروژنه شدن، اتصالات عرضی و اکسیداسیون در اتمسفر حاوی اکسیژن رخ می‌دهد. اما در نیتروژن خالص فقط واکنش‌های حلقه‌ای شدن و دی‌هیدروژنه شدن وجود دارد. در اتمسفرهای حاوی اکسیژن و نیتروژن با افزایش غلظت اکسیژن تا ۲۰٪ حجمی افزایش استحکام دیده می‌شود اما در غلظت‌های بیشتر از ۲۰٪ حجمی با افزایش غلظت اکسیژن کاهش استحکام وجود دارد [۱۱].

مهم‌ترین ویژگی‌های الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده، مقاومت حرارتی بالا، انحلال ناپذیر بودن، نقطه ذوب بالا، مقاومت الکتریکی بالا، امن از نظر بیولوژیکی و قابلیت جذب رطوبت می‌باشد [۳-۱۲]. وجود چنین خواصی باعث شده است تا از آن در تولید پارچه‌های مقاوم به آتش، پوشش‌های سطحی، لایه‌های مقاوم به آتش برای باتری‌ها و تولید الیاف کربن استفاده شود [۱۳-۱۵].

به طور کلی هدف از هیبرید کردن دو الیاف در کامپوزیت بدست آوردن فواید دو الیاف و کم کردن معایب می‌باشد. با جایگزین کردن الیاف داکتیل به جای الیاف ترد در کامپوزیت زمینه پلیمری می‌توان کرنش شکست را بهبود بخشید. الیاف فلزی، سفتی بالا و کرنش شکست زیادی دارند. اما چگالی زیاد مانع استفاده از آنها می‌شود. از طرف دیگر الیاف پلیمری، چگالی کمی دارند و داکتیل نیز هستند، اما سفتی کم و مقاومت دمایی محدودی دارند [۱۶]. الیاف پلی اکریلونیتریل اکسید شده، نوعی الیافی پلیمری است که مقاوت دمایی بالا و کرنش شکست مناسبی دارد ولی خواص استحکامی آن کم است. با توجه به توضیحات فوق درخصوص استفاده از مزایای دو نوع الیاف در کنار هم، هدف این تحقیق امکان‌سنجی ساخت کامپوزیت زمینه پلیمری هیبریدی شامل الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده به همراه یکی از انواع الیاف کربن، کولار و شیشه و همچنین تاثیر هیبرید کردن بر خواص استحکام کششی، مدول الاستیک و کرنش شکست این کامپوزیت‌ها می‌باشد.

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد

نوع رزین استفاده شده در ساخت کامپوزیت‌ها، رزین اپوکسی بیسفنول F[6] (ML-506) و هاردنر پلی‌آمینی[7] نوع (HA-11) محصول شرکت مواد مهندسی مکرر می‌باشد. پارچه الیاف شیشه با چگالی سطحی ۲۰۰ g/cm² و بافت ساده (۹۰/۰) محصول شرکت کام‌الیاف[8] ترکیه، پارچه الیاف کربن با چگالی سطحی ۲۰۰ g/cm² و بافت مورب[9] ۲×۲ محصول جی.آنجلونی[10] ایتالیا، پارچه الیاف کولار با چگالی سطحی ۱۷۵ g/cm² و بافت مورب ۲×۲ محصول شرکت کولان[11] استرالیا و الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده با چگالی خطی ۱/۱۶ dtex دارای سطح مقطع گرد محصول شرکت کورتولز[12] کشور انگلستان در ساخت کامپوزیت‌ها استفاده شد. به دلیل عدم دسترسی به الیاف شیشه با چگالی ۲۰۰ g/cm² و بافت مورب ۲×۲ در زمان ساخت کامپوزیت‌ها، با توجه به منابع موجود از الیاف شیشه با بافت ساده با چینش و فشردگی[13] مناسب تار و پود که خواص استحکامی معادل بافت مورب ۲×۲ را دارد، استفاده شد [۱۷]. بدین ترتیب خواص استحکامی کامپوزیت‌های ساخته شده، مستقل از نوع بافت هستند.

۲-۲- آماده سازی و ساخت کامپوزیت‌ها

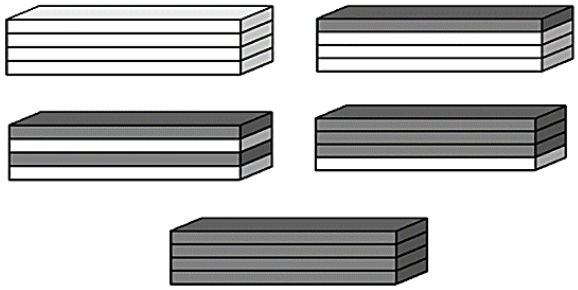
کامپوزیت‌ها به صورت ۴ لایه با چیدمان‌های متفاوت با ابعاد ۳۰×۲۵ cm² توسط روش لایه‌چینی دستی[14] ساخته شدند شکل ۱. نسبت رزین به هاردنر ۱۰۰ به ۱۵ واحد است. مدت زمان اختلاط رزین و هاردنر ۲ دقیقه می‌باشد. زمان پخت[15] برای این کامپوزیت‌ها ۲۴ ساعت در دمای محیط انتخاب شد. به دلیل جذب بالای رزین توسط الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده، نسبت رزین به الیاف ۶۰ به ۴۰ درصد وزنی انتخاب شد. برای ساخت کامپوزیت با این نسبت، ابتدا وزن الیاف با ابعاد مورد نظر توسط ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱ g اندازه گیری شده، سپس با توجه به وزن به دست آمده و نسبت ۶۰ به ۴۰ زمینه به تقویت کننده، وزن مخلوط رزین و هاردنر تعیین شد. همچنین برای حصول اطمینان از رعایت این نسبت، وزن کامپوزیت‌ها پس از فرآیند پخت اندازه گیری شد. دقت در این روش ۲٪ ± می‌باشد. برای کاهش حفرات در داخل کامپوزیت وزنه ۲۰ کیلوگرمی بر روی سطح قالب قرار داده

1. Comonomer
2. Itaconic Acid
3. Methyl Acrylate
4. Sodium Methallyl Sulfonate
5. Sodium 2-methyl-2-acrylamidopropane sulfonate

6. Resin epoxy Bisphenol F
7. Polyamine Hardener
8. Camelyaf
9. Twill weave
10. G. Angeloni
11. Colan
12. Courtaulds
13. Crimp
14. Hand Lay-Up
15. Cure

Archive of SID
www.SID.ir

شد. کد کامپوزیت‌های زمینه اپوکسی، همچنین تعداد لایه‌های پارچه استفاده شده در کامپوزیت و نسبت تقویت کننده‌ها در جدول ۱ آورده شده است.



شکل ۱ انواع چیدمان لایه‌ها- لایه روشن: پارچه الیاف کربن یا الیاف شیشه یا الیاف کولار، لایه تیره: الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده.

جدول ۱ مشخصات و کد کامپوزیت‌های ساخته شده

کد نمونه	تعداد لایه‌های پارچه تقویت کننده	نسبت الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده به کل تقویت کننده در کامپوزیت (٪)
0P-4C	۴	۰
1P-3C	۳	۴۸
2P-2C	۲	۷۶
3P-1C	۱	۸۹
0P-4K	۴	۰
1P-3K	۳	۵۳
2P-2K	۲	۷۵
3P-1K	۱	۸۶
0P-4G	۴	۰
1P-3G	۳	۵۱
2P-2G	۲	۷۴
3P-1G	۱	۸۹
4P	۰	۱۰۰

P = الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده، C = پارچه کربن، K = پارچه کولار، G = پارچه شیشه

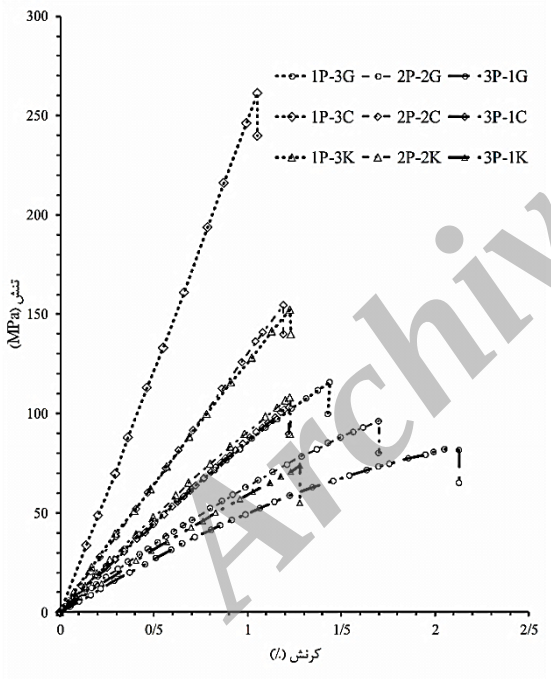
۲-۳- تجهیزات

آزمون کشش توسط دستگاه هانسفیلد[1] H25KS با نیروی ۲۵ KN و سرعت کشش ۲ mm/min انجام شد. برای هر آزمایش براساس استاندارد D ۳۰۳۹ انجمن آزمایش مواد آمریکا[2]، تعداد پنج نمونه‌ی کامپوزیتی آزمون کشش با ابعاد mm² ۲۵۰×۲۰×۲ (طول × عرض × ضخامت) بریده و سمباده زنی شدند. همچنین طول سنجه[3] نیز ۱۰۰mm انتخاب شد. از کاغذ سمباده به عنوان تب[4] استفاده شد شکل ۲. هدف از استفاده از تب پلیمری افزایش اصطکاک بین گیره و نمونه‌ی آزمایش و همچنین شکست در ناحیه طول سنجه در آزمون کشش می‌باشد. کاغذ سمباده باعث افزایش اصطکاک بین گیره و نمونه می‌شود. برای شکستن نمونه در طول سنجه کافی است دقت عرض نمونه را توسط سمباده زنی به زیر ۰/۳ mm رساند. همچنین در استاندارد در مورد استفاده از کاغذ سمباده به جای تب پلیمری اشاره شده است.

شکل ۲ نمونه‌های آزمون کشش با تب سمباده ای.

۳- نتایج و بحث

شکل ۳، نمودار تنش- کرنش کامپوزیت‌های هیبریدی تقویت شده با پارچه الیاف کربن، کولار و شیشه به همراه الیاف پلی اکریلونیتریل اکسید شده را نشان می‌دهد. این نمودار از نمودارهای نیرو-جابجایی آزمون کشش براساس استاندارد D ۳۰۳۹ به دست آمده است.



شکل ۳ نمودار تنش- کرنش کامپوزیت‌های هیبریدی.

۳-۱- خواص کششی کامپوزیت حاوی الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده و پارچه کربن

در جدول ۲ نتایج مربوط به داده‌های به دست آمده در آزمون کشش شکل ۳، کامپوزیت‌های ساخته شده از الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده به همراه پارچه کربن با لایه گذاری‌های متفاوت آمده است. با توجه به نتایج به دست آمده، کامپوزیت با چیدمان چهار لایه پارچه الیاف کربن با استحکام کششی ۵۶۶/۴۰±۱۵/۸۰ MPa، بیشترین و کامپوزیت با چیدمان چهار لایه الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده با استحکام کششی ۶۱/۰۷±۶/۷۳ MPa، کمترین استحکام را دارا می‌باشند. خواص استحکامی الیاف پلی‌اکریلونیتریل

1. Hounsfield
2. ASTM D3039
3. Gauge Length
4. Tab

Archive of SID

www.SID.ir

اکسید شده در طی مراحل پایدارسازی به دلیل تشکیل اتصالات عرضی ضعیف در ساختار این الیاف کاهش می‌یابد [۱۸]. به همین دلیل کامپوزیت با چیدمان چهار لایه الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده کمترین استحکام کششی را دارد. بنابراین برای بهبود خواص استحکامی این کامپوزیت تقویت کننده‌های پارچه الیاف کربن و الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده به صورت لایه لایه در کامپوزیت هیبرید شده‌اند. با افزایش نسبت درصد وزنی پارچه کربن به الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده به خاطر خواص استحکامی پارچه الیاف کربن، استحکام کششی کامپوزیت‌ها بیشتر می‌شود.

با توجه به جدول ۲، کامپوزیت با چیدمان چهار لایه پارچه کربن کرنش شکست ۱/۳٪ را نشان می‌دهد. با افزایش نسبت درصد وزنی پارچه کربن به الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده تا درصد وزنی ۴۸٪، کرنش شکست روندی کاهشی و بعد از آن روندی افزایشی را از خود نشان می‌دهد. بیشترین کرنش شکست را کامپوزیت با چیدمان چهار لایه الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده با کرنش شکست ۱/۶۸٪ دارد. در حین پایدارسازی در داخل الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده ساختار پلیمری نردبانی تشکیل می‌شود که این ساختار باعث افزایش درصد ازیاد طول الیاف به مقدار زیاد می‌شود. به همین دلیل کامپوزیت تقویت شده با چهار لایه الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده بیشترین کرنش شکست را دارد. کاهش اولیه کرنش شکست در کامپوزیت‌ها تا ۴۸٪ وزنی حاوی الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده عدم تطابق بین پارچه الیاف کربن و الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده می‌باشد. نتایج این کامپوزیت‌ها نشان می‌دهد که حضور الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده کرنش شکست را در کامپوزیت‌های تقویت شده با پارچه الیاف کربن را افزایش می‌دهد. با توجه به این نتایج می‌توان نتیجه گرفت که هیبرید کردن الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده با پارچه الیاف کربن تردی کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کربن را کاهش و داکتیلیتی را افزایش می‌دهد.

جدول ۲ نتایج آزمون کشش کامپوزیت با چیدمان‌های متفاوت الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده و پارچه کربن

کد نمونه	استحکام کششی (MPa)	مدول الاستیک (GPa)	کرنش شکست (٪)
0P-4C	۵۶۶/۴۰±۱۵/۸۰	۴۲/۴۵±۰/۴۸	۱/۳۰±۰/۰۳
1P-3C	۲۶۱/۳۸±۱۲/۳۰	۲۵/۰۰±۰/۶۰	۱/۰۵±۰/۰۱
2P-2C	۱۵۴/۵۴±۸/۰۹	۱۲/۶۹±۰/۴۰	۱/۱۹±۰/۰۴
3P-1C	۱۰۳/۱۱±۲/۷۰	۸/۸۶±۰/۲۰	۱/۲۲±۰/۰۵
4P	۶۱/۰۷±۶/۷۳	۴/۸۷±۰/۰۶	۱/۶۸±۰/۰۴

مدول الاستیک کامپوزیت با چیدمان چهار لایه پارچه الیاف کربن، ۴۲/۴۵±۰/۴۸ GPa و کامپوزیت با چیدمان چهار لایه الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده، ۴/۸۷±۰/۰۶ GPa است که به ترتیب، بیشترین و کمترین مدول نسبت به دیگر لایه گذاری‌ها دارند. مدول الاستیک الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده رفتاری مشابه استحکام کششی این الیاف دارد [۱۸]. به همین دلیل با افزایش نسبت درصد وزنی پارچه کربن به الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده در کامپوزیت، مدول الاستیک روندی افزایشی دارد.

۳-۲- خواص کششی کامپوزیت حاوی الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده و پارچه کولار

جدول ۳ نتایج مربوط به آزمون کشش شکل ۳، کامپوزیت‌های چهار لایه تقویت شده با پارچه الیاف کولار و الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده با چیدمان‌های متفاوت را نشان می‌دهد. داده‌های مربوط به استحکام کششی و مدول الاستیک رفتاری مشابه کامپوزیت‌های چهار لایه با چیدمان‌های پارچه کربن و الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده از خود نشان می‌دهند.

براساس این داده‌ها کامپوزیت با چیدمان چهار لایه پارچه کولار با استحکام کششی ۳۲۲/۴۴±۱۰/۰۱ MPa و کامپوزیت با چیدمان چهار لایه الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده با استحکام کششی ۶۱/۰۷±۶/۷۳ MPa، به ترتیب بیشترین و کمترین استحکام کششی را دارند. با افزایش نسبت درصد وزنی پارچه کولار به الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده در دیگر چیدمان‌ها، استحکام کششی روندی افزایشی دارد.

کامپوزیت با چیدمان چهار لایه پارچه الیاف کولار با مدول الاستیک ۱۹/۶۰±۰/۹۰ GPa و کامپوزیت با چیدمان چهار لایه الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده با مدول الاستیک ۴/۸۷±۰/۰۶ GPa، به ترتیب بیشترین و کمترین مدول الاستیک را دارند. با افزایش نسبت درصد وزنی پارچه الیاف کولار به الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده مدول الاستیک روندی افزایشی دارد که به علت حضور پارچه کولار و تاثیر آن بر مدول الاستیک کامپوزیت می‌باشد. نتایج نشان داد که حضور الیاف کولار در کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده خواص مکانیکی این کامپوزیت‌ها را بهبود می‌دهد.

با توجه به داده‌های جدول ۳ کامپوزیت با چیدمان چهار لایه پارچه کولار بیشترین کرنش شکست را دارد. با افزایش نسبت وزنی پارچه کولار به الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده تا درصد وزنی ۵۳٪، کرنش شکست روندی کاهشی دارد، اما در درصدهای بالاتر از ۵۳٪، کرنش شکست از روندی افزایشی برخوردار است. کاهش اولیه کرنش شکست به دلیل عدم تطابق بین پارچه الیاف کولار و الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده می‌باشد. اما با افزایش نسبت الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده به الیاف کولار کرنش شکست بهینه می‌شود.

جدول ۳ نتایج آزمون کشش کامپوزیت با چیدمان‌های متفاوت الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده و پارچه کولار

کد نمونه	استحکام کششی (MPa)	مدول الاستیک (GPa)	کرنش شکست (٪)
0P-4K	۳۲۲/۴۴±۱۰/۰۱	۱۹/۶۰±۰/۹۰	۱/۷۵±۰/۰۶
1P-3K	۱۵۲/۳۷±۸/۵۱	۱۱/۸۶±۰/۵۶	۱/۲۲±۰/۰۳
2P-2K	۱۰۸/۰۳±۸/۳۲	۸/۷۴±۰/۳۶	۱/۲۳±۰/۰۶
3P-1K	۷۳/۶۹±۳/۶۳	۶/۴۱±۰/۲۷	۱/۲۸±۰/۰۳
4P	۶۱/۰۷±۶/۷۳	۴/۸۷±۰/۰۶	۱/۶۸±۰/۰۴

۳-۳- خواص کششی کامپوزیت حاوی الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده و پارچه شیشه

جدول ۴ نتایج مربوط به آزمون کشش کامپوزیت‌های چهار لایه تقویت شده با الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده و پارچه شیشه با چیدمان‌های متفاوت را نشان می‌دهد. پارچه شیشه نیز مانند پارچه کولار و کربن باعث بهبود استحکام کششی و مدول الاستیک کامپوزیت‌های چهار لایه با چیدمان‌های متفاوت الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده و پارچه شیشه می‌شود. در این حالت، کامپوزیت با چیدمان چهار لایه پارچه شیشه با استحکام کششی ۲۱۵/۹۱±۹/۶۵ MPa و کامپوزیت با چیدمان چهار لایه الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده با استحکام کششی ۶۱/۰۷±۶/۷۳ MPa، به

Archive of SID
www.SID.ir

ترتیب بیشترین و کمترین استحکام کششی را دارا می‌باشند. با افزایش نسبت درصد وزنی پارچه شیشه به الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده استحکام کششی روندی افزایشی دارد.

کامپوزیت با چیدمان ۴ لایه پارچه شیشه با مدول الاستیک ۱۲/۸۰ GPa و کامپوزیت با چیدمان ۴ لایه الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده با مدول الاستیک ۴/۸۷ GPa، به ترتیب بیشترین و کمترین مدول الاستیک را دارند. با افزایش نسبت درصد وزنی پارچه شیشه به الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده، مدول الاستیک روندی افزایشی دارد.

با توجه به داده‌های به دست آمده، میزان کرنش شکست کامپوزیت با چیدمان چهار لایه پارچه شیشه بیشتر از کامپوزیت با چیدمان چهار لایه الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش نسبت درصد وزنی الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده به پارچه شیشه تا نسبت ۵۱٪، کرنش شکست روندی کاهشی دارد و بعد از نسبت وزنی ۵۱٪ روندی افزایشی دارد که این کاهش کرنش به خاطر تفاوت در نوع بافت پارچه و الیاف و عدم یکنواختی کامپوزیت می‌باشد. در چیدمان‌های دیگر این عدم یکنواختی کمتر شده و باعث افزایش میزان کرنش شده است. بیشترین میزان کرنش شکست در نسبت وزنی ۸۹٪ به دست آمده است. با توجه به نتایج کرنش شکست می‌توان نتیجه گرفت هیبرید کردن الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده با پارچه الیاف شیشه، داکتیلیتی کامپوزیت را افزایش می‌دهد.

جدول ۴ نتایج آزمون کشش کامپوزیت با چیدمان‌های متفاوت الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده و پارچه شیشه

کد نمونه	استحکام کششی (MPa)	مدول الاستیک (GPa)	کرنش شکست (٪)
0P-4G	۲۱۵/۹۱±۹/۶۵	۱۲/۸۰±۰/۳۰	۱/۷۶±۰/۰۴
1P-3G	۱۲۰/۹۰±۱۰/۷۳	۷/۹۶±۰/۵۰	۱/۳۴±۰/۰۵
2P-2G	۹۶/۳۶±۱۲/۶۲	۶/۷۰±۰/۲۵	۱/۷۰±۰/۰۲
3P-1G	۸۱/۷۵±۷/۶۵	۵/۳۰±۰/۱۵	۲/۱۳±۰/۰۷
4P	۶۱/۰۷±۶/۷۳	۴/۸۷±۰/۰۶	۱/۶۸±۰/۰۴

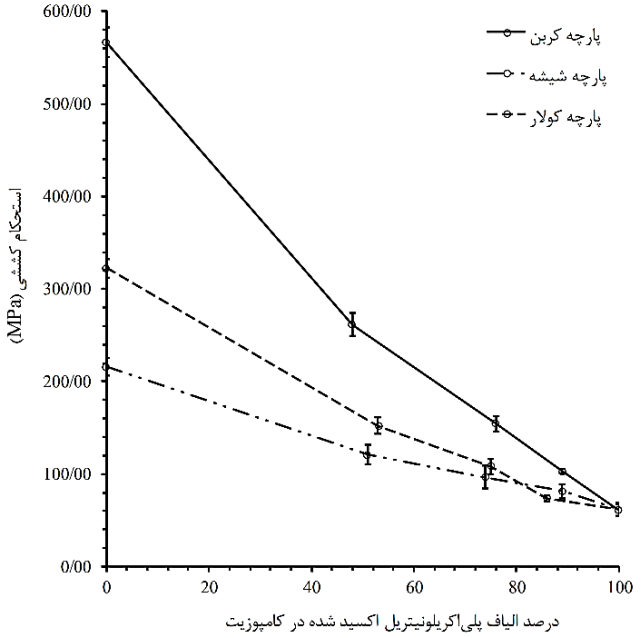
۳-۴- مقایسه خواص کششی کامپوزیت‌ها

نتایج نشان می‌دهند که در سه دسته کامپوزیت‌های با چیدمان و درصد وزنی یکسان، کامپوزیت‌های حاوی الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده و پارچه کربن بیشترین استحکام کششی و مدول الاستیک را دارند. همچنین کامپوزیت‌های شامل الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده و پارچه شیشه به جز در درصدهای وزنی بالای ۸۰٪ که نتایج مشابهی با کامپوزیت‌های ساخته شده با الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده و پارچه کولار دارند؛ کمترین استحکام کششی و مدول الاستیک را ارائه می دهند (شکل‌های ۴-۵).

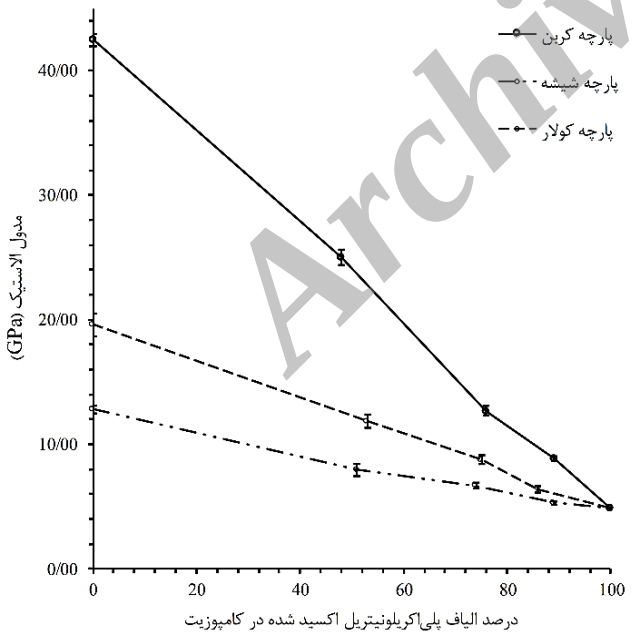
مطابق با نتایج ارائه شده در شکل ۶، کامپوزیت‌های ساخته شده از الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده و پارچه شیشه و کامپوزیت‌های ساخته شده از الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده و پارچه کربن دارای بیشترین و کمترین کرنش شکست می‌باشند.

۳-۵- نوع شکست کامپوزیت‌ها

در آزمون کشش، حالت شکست به نوع شکست[1]، ناحیه شکست[2] و منطقه شکست[3] وابسته می‌باشد. حالت‌های مختلف نوع شکست، ناحیه شکست و منطقه شکست در جدول ۵ آمده است [۱۹-۲۰]. براساس جدول ۵، نتایج حالت شکست برای کامپوزیت‌های ساخته شده از پارچه‌های کربن، کولار و شیشه به همراه الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده به صورت خلاصه و به ترتیب در جداول ۶ تا ۸ آورده شده است.



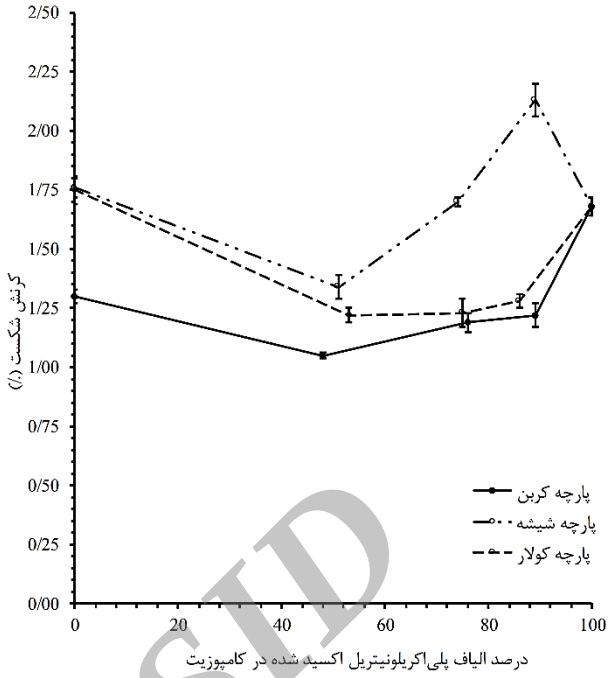
شکل ۴ تغییرات استحکام کششی برحسب درصد الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده به کل الیاف تقویت کننده در کامپوزیت.



شکل ۵ تغییرات مدول الاستیک برحسب درصد الیاف پلی اکریلونیتریل اکسید شده به کل الیاف تقویت کننده در کامپوزیت.

1. Failure Mode
2. Failure Type
3. Failure Area

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۶ تغییرات کرنش شکست برحسب درصد الیاف پلی اکریلونیتریل اکسید شده به کل الیاف تقویت کننده در کامپوزیت.

بررسی شکل ۷ و سطح مقطع شکست کامپوزیت‌های تقویت شده با یکی از الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده، کربن، کولار و شیشه نشان می‌دهد که این کامپوزیت‌ها به ترتیب دارای نوع شکست زاویه‌ای[1]، عرضی[2]، انفجاری[3] و چند لایه شدن[4] می‌باشند. با توجه به تحقیقات انجام شده کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کربن دارای نوع شکست عرضی هستند که نشان می‌دهد که دارای شکست ترد می‌باشند. با افزایش نسبت پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده به پارچه الیاف کربن نوع شکست از حالت عرضی به زاویه‌ای تغییر می‌کند (شکل ۷). این بدین معنی است که الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده داکتیلیتی کامپوزیت را بهتر می‌کند که نتایج کرنش شکست این را ثابت می‌کند. کامپوزیت تقویت شده با پارچه الیاف کولار دارای نوع شکست انفجاری می‌باشد (شکل ۷). با افزایش نسبت الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده به پارچه الیاف کولار نوع شکست از حالت انفجاری به زاویه‌ای تغییر می‌کند. تغییرات نوع شکست با تغییرات کرنش شکست مطابقت دارد. کامپوزیت تقویت شده با چیدمان چهار لایه پارچه الیاف شیشه نوع شکست انفجاری دارد. با اضافه شدن الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده نوع شکست چند لایه شدن غالب می‌شود. با افزایش نسبت این الیاف به پارچه شیشه نوع شکست چندگانه شامل شکست‌های لایه لایه شدن و عرضی غالب می‌شود و در نهایت در کامپوزیت چهار لایه الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده نوع شکست عرضی می‌شود. این نتایج، به طور دقیق مشابه رفتار کرنش شکست کامپوزیت‌های هیبرید شده با الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده و پارچه الیاف شیشه در شکل ۶ می‌باشد.

جدول ۵ حالت شکست در آزمون کشش

نوع شکست	ناحیه شکست	منطقه شکست
زاویه ای	داخل گیره/ تب	پایین
چند لایه شدن	در گیره/ تب	بالا
گیره/ تب	در نزدیکی گیره/ تب	چپ
عرضی	طول سنجه	راست
حالت چندگانه	چند ناحیه ای	وسط
شکاف بلند	مختلف	مختلف
انفجاری	نامعلوم	نامعلوم
سایر		

جدول ۶ حالت شکست در آزمون کشش کامپوزیت‌های حاوی الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده و پارچه کربن

کد نمونه	نوع شکست	ناحیه شکست	منطقه شکست
0P-4C	عرضی	چند ناحیه‌ای	مختلف
1P-3C	عرضی	طول سنجه	بالا
2P-2C	چندگانه	طول سنجه	وسط
3P-1C	زاویه‌ای	طول سنجه	وسط
4P	زاویه‌ای	چند ناحیه‌ای	مختلف

جدول ۷ حالت شکست در آزمون کشش کامپوزیت‌های حاوی الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده و پارچه کولار

کد نمونه	نوع شکست	ناحیه شکست	منطقه شکست
0P-4K	انفجاری	طول سنجه	بالا
1P-3K	انفجاری	طول سنجه	وسط
2P-2K	انفجاری	طول سنجه	وسط
3P-1K	زاویه‌ای	طول سنجه	وسط
4P	زاویه‌ای	چند ناحیه‌ای	مختلف

جدول ۸ حالت شکست در آزمون کشش کامپوزیت‌های حاوی الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده و پارچه شیشه

کد نمونه	نوع شکست	ناحیه شکست	منطقه شکست
0P-4G	انفجاری	طول سنجه	بالا
1P-3G	چند لایه شدن	طول سنجه	مختلف
2P-2G	چند لایه شدن	طول سنجه	وسط
3P-1G	چندگانه	طول سنجه	وسط
4P	زاویه‌ای	چند ناحیه‌ای	مختلف

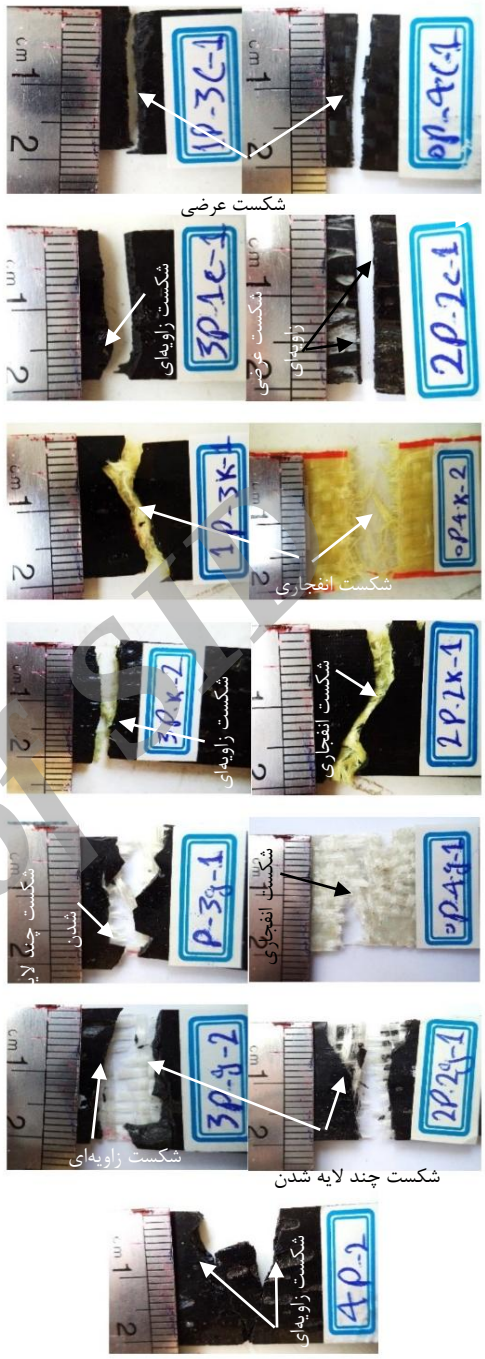
۴- نتیجه‌گیری

نتایج آزمایشات نشان داد که حضور پارچه‌های الیاف کربن، کولار و شیشه باعث افزایش و بهبود تنش شکست و مدول الاستیک کامپوزیت زمینه اپوکسی حاوی الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده می‌شود. بیشترین تنش شکست و مدول الاستیک را کامپوزیت‌های تقویت شده با پارچه الیاف کربن و پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده داشتند.

هیبرید کردن الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده در کامپوزیت‌های تقویت شده با پارچه کربن و شیشه و کولار باعث افزایش و بهبود کرنش شکست شده است. بیشترین کرنش شکست را کامپوزیت‌های ساخته شده از الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده و پارچه شیشه داشتند.

1. Angled
2. Lateral
3. Explosive
4. Delamination

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۷ سطح مقطع شکست کامپوزیت.

سطح مقطع شکست کامپوزیت ساخته شده از پارچه کربن، کولار، شیشه و الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده به ترتیب به صورت شکست عرضی، انفجاری، چند لایه شدن و زاویه‌ای می‌باشد. بررسی سطح مقطع شکست نشان داد که رفتاری مشابه نتایج کرنش شکست دارد. با ترکیب الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده و پارچه‌های کربن، کولار و شیشه می توان کامپوزیت با خواص تنش شکست و مدول الاستیک و کرنش شکست بهینه ساخت.

۵- مراجع

[1] Schwartz, M., "Encyclopedia of Materials, Parts, and Finishes," Secend Edittion, Boca Raton, Florida, pp. 8-10, 2002.

[2] Rahaman, M.S.A. Ismail, A.F. and Mustafa A., "A Review of Heat Treatment on Polyacrylonitrile Fiber," Polymer Degradation and Stability,Vol. 92, No. 8, pp. 1421-1432, 2007.

[3] Johnson, H.D., "Synthesis-Characterization-Processing and Physical Behavior of Melt-Processible Acrylonitrile Co- and Terpolymers for Carbon Fibers: Effect of Synthetic Variables on Copolymer Structure," MSc Thesis, Virginia University, USA, 2006.

[4] Arbab, S. and Zeinolebadi, A., "A Procedure For Precise Determination of Thermal Stabilization Reactions in Carbon Fiber Precursors," Polymer Degradation and Stability, Vol. 98, No. 12, pp. 2537-2545, 2013.

[5] Xue, Y. Liu, J. and Liang, J., "Correlative Study of Critical Reactions in Polyacrylonitrile Based Carbon Fiber Precursors During Thermal-Oxidative Stabilization," Polymer Degradation and Stability, Vol. 98, No. 1, PP. 219-229, 2013.

[6] Sedghi, A. Eslami Farsani, R. and Shokuhfar, A., "The Effect of Commercial Polyacrylonitrile Fibers Characterizations on the Produced Carbon Fibers Properties," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 198, No. 1-3, pp. 60-67, 2008.

[7] Badrnezhad, R. and Eslami Farsani, R., "Modeling and Differential Evolution Optimization of PAN Carbon Fiber Production Process," Fibers and Polymers, Vol. 15, No. 6, pp. 1182-1189, 2014.

[8] Xiaomeng, R. Yuansheng, W. Te, H. and Zhengcai, X., "Analysis and Characterization of Orientation Structure of Pre-oxidized PAN Fibers in High Magnetic Fields," Jounal of Wuhan University of Technology Mater. Sci. Ed, Vol. 29, No. 2, pp. 224-228, 2014.

[9] Karacan, I. and Erdog˘an, G., "The Role of Thermal Stabilization on the Structure and Mechanical Properties of Polyacrylonitrile Precursor Fibers," Fibers and Polymers, Vol. 13, No. 7, pp. 855-863, 2012.

[10] Hou, Y., Sun, T., Wang, H. and Wu, D., "Effect of Heating Rate on the Chemical Reaction during Stabilization of Polyacrylonitrile Fibers," Textile Research Journal, Vol. 78, No. 9, pp. 806–811, 2008.

[11] SUN, T., Hou, Y. and Wang, H., "Effect of Atmospheres on Stabilization of Polyacrylonitrile Fibers," Journal of Macromolecular ScienceR, Part A: Pure and Applied Chemistry, Vol. 46, No. 8, pp. 807–815, 2009.

[12] Horrocks, A. R. and Anand, S. C., "Handbook of Technical Textiles, First Edittion, Woodhead Publishing, Cambridge, pp. 25-31, 2000.

[13] Smith, W. N., "Flame Retarding Fusion Bonded Non-Woven Fabrics," US Pat. 4, 970, 111, 1990.

[14] McCarthy, T., "Surface Veil of Oxidized Pan Fiber," US Pat. 2007/0072504A1, 2007.

[15] Ogle, S. E. and et al, "Bi-layer Nonwoven Fire Resistant Batt and an Associated Method for Manufacturing the Same," US Pat. 2005/0233668A1, 2005.

[16] Swolfs, Y. Gorbatikh, L. and Verpoest I., "Fibre hybridisation in polymer composites: A review,"Composite Part A, Vol. 67, No. 1, pp. 181-200, 2014.

[17] Gasser, A. Boisse, P. and Hanklar, S., "Mechanical behaviour of dry fabric reinforcements.3D simulations versus biaxial tests", Computational Materials Science, Vol. 17, No. 1, pp. 7-20, 2000.

[18] Kalfon-Cohen, E. Harel, H., Saadon-Yechezkia, M. Timna, K. Zhidkov, T. Weinberg, A. and Marom, G., "Thermal-crosslinked polyacrylonitrile fiber compacts, " Polymers for Advanced Technologies, Vol. 21, No. 12, pp. 904–910, 2010.

[19] Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, Annual Book of ASTM Standard, 08. 01, D3039/D3039M-00, 2002.

[20] Paiva, J. M. F., Mayer, S. and Rezende, M. C., "Comparison of Tensile Strength of Different CarbonFabric Reinforced Epoxy Composites," Materials Research, Vol. 9, No. 1, pp. 83-89, 2006.

Archive of SID

www.SID.ir