

بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت کربن – کربن دو جهته بر پایه الیاف چوب درختان

محمد اسماعیلی*، علیرضا میرحبیبی

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه علم و صنعت ایران

(دریافت مقاله: ۱۳۹۰/۱۱/۲۳ – دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۲/۰۷/۰۳)

چکیده –

()

واژگان کلیدی :

Evaluating Mechanical Properties of Two Directional Carbon-Carbon Composites Based on Texture of Wood

M. Esmaeeli* and A.Mirhabibi

Iran University of Science and Technology, Department of Materials Engineering

Abstract: : An important parameter in composite materials is mechanical behavior and matrix-reinforcement interface interaction under applied stresses. In this investigation, bending strength of carbon-carbon composites synthesized from wood was analyzed as a measure of the composite mechanical properties. Also, densification efficiency of the products was determined by measuring the bulk density and open porosity percentage. Using scanning electron microscopy, optical microscopy, X-Ray diffraction, and Raman spectroscopy, the final product was examined to evaluate and interpret the morphology and internal texture and results of mechanical test. The results showed that we are able to use an ordinary material such as wood for production of a unique product with great properties called two-dimensional carbon-carbon composites.

Keywords: Carbon-Carbon Composite, Wood, Density, Bending strength, Mechanical properties

* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: mohammad.esmaeely.msc@gmail.com

مواد پیشرفته در مهندسی، سال ۳۳، شماره ۱، بهار ۱۳۹۳

۱- مقدمه

زمینه‌ی کربنی تقویت شده با الیاف کربن، که کامپوزیت کربن-کربن نیز خوانده می‌شود امروزه بسیار پرکاربرد گشته است. علت توسعه‌ی این نوع کامپوزیت‌ها مشخصات منحصر به فرد این محصولات است، نمونه‌ای از این مشخصات استحکام دمای بالا (قابل مقایسه با سوپر آلیاژها)، دانسیته پایین (کمتر از 2 gr/cm^3)، استحکام ویژه بالا، انبساط حرارتی کم، مقاومت به سایش خوب و قابلیت زیست سازگاری بالا (به‌ویژه در محیط‌های خنثی و خلا) است. به استناد همین خواص منحصر به فرد، کامپوزیت‌های کربن-کربن کاربرد فراوانی در تهیه مواد دیرگداز، ساخت لنت ترمزها (هواپیماها و اتومبیل‌های سریع و سنگین)، صنایع هوا و فضا، صنایع نظامی و پزشکی پیدا کرده‌اند [۱-۶].

اولین قدم در تولید کامپوزیت‌های کربن-کربن تهیه پیش ماده^۱ است. پیش ماده در واقع قطعه‌ی خامی است که از رزین نگه‌دارنده و الیاف بافته شده (از تک جهته تا n جهته) تشکیل شده است، و صرفاً تحت فشار مکانیکی قالب‌گیری شده، هیچ سیکل عملیات حرارتی را طی نکرده است. پس از اینکه پیش ماده تهیه شد، برای اولین بار کربونیزه می‌شود. با اتمام این مرحله به دلیل خروج مواد فرار رزین یا ضریب انبساط متفاوت الیاف و زمینه، خلل و فرج‌های زیادی در نمونه ایجاد می‌شود. برای پرکردن این فضاها و به تبع آن افزایش چگالی و بهبود خواص مکانیکی، نمونه‌ها با یکی از دو روش زیر متراکم می‌شوند:

الف) روش اول در فاز گازی صورت می‌پذیرد که عامل پرکننده‌ی پیش ماده‌ی متخلخل، ته‌نشین سازی بخارات شیمیایی^۲ است.

ب) در روش دوم که در فاز مایع صورت می‌پذیرد، پیش ماده‌ی تهیه شده در بستری از رزین که اغلب قیر است، اشباع می‌شود.

لازم به ذکر است که سیکل‌های اشباع سازی^۳ -کربونیزه

کردن چندین مرحله تکرار می‌شوند تا چگالی نمونه به یک مقدار ثابت برسد. تعداد این مراحل وابسته به دمای عملیات حرارتی و فشار اعمالی است، به طوری که هرچه دما و فشار بالاتر باشد در مدت زمان کم‌تری می‌توان به چگالی بیشینه دست پیدا کرده، تعداد سیکل‌های کاری کاهش چشم‌گیری پیدا می‌کنند (از ۲۰ الی ۳۰ سیکل به کمتر از ۱۰ سیکل برای اجسام نسبتاً متراکم می‌رسند [۷ و ۸]).

در پژوهش حاضر از ابتکاری نوین برای تهیه‌ی پیش ماده استفاده شده، از ماده‌ای نام آشنا به نام چوب، که ماهیتاً دارای بافت الیافی است به عنوان پیش ماده‌ی کامپوزیت استفاده می‌شود و این کار باعث خواهد شد که اولین فاز تهیه کامپوزیت‌های کربن-کربن، یعنی تهیه پیش ماده، از مسیر تولید حذف شود و لذا گام بزرگی در سهولت تهیه این محصول و کاهش هزینه‌های تولید آن صورت گیرد. این پیش ماده پس از کربونیزه کردن اولیه طی سیکل‌های اشباع سازی-کربونیزه کردن تحت شرایط خاص، به چگالی بیشینه خود می‌رسد.

۲- مواد و روش تحقیق

ابتدا هشت نمونه چوبی از درخت گردو، گیلان، صنوبر، توت، زردآلو، چنار، بید و کبود تهیه شد. علت انتخاب این نمونه‌ها، پرکاربرد بودن آنها در صنایع مرتبط با چوب بود. در این صورت ضایعات این نوع چوب‌ها در صنایع مرتبط، مواد اولیه خوبی برای تهیه محصول مورد نظر تلقی خواهد شد. این نمونه‌ها منطبق با روش استاندارد ASTM D 3174، برای تعیین میزان خاکستر باقی‌مانده^۴ آماده سازی شده، مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج آزمون درصد خاکستر نمونه‌ها که در جدول (۱) ارائه شده است، نشان می‌داد که نمونه‌ی صنوبر کم‌ترین درصد خاکستر باقی‌مانده و نمونه‌ی گردو بیشترین درصد خاکستر باقی‌مانده را دارا بوده، به همین خاطر این دو نوع چوب جهت به عنوان مواد اولیه این پژوهش انتخاب شدند.

جدول ۱- درصد خاکستر باقی مانده نمونه های چوبی

نوع چوب	گردو	توت	چنار	کبود	گیلاس	بید	زردآلو	صنوبر
درصد خاکستر	۱/۹۹۴	۱/۸۱۱	۱/۱۵۴	۱/۱۰۹	۰/۷۰۲	۰/۶۱۲	۰/۵۵۸	۰/۳۵۰

این دو نوع چوب در ابعاد $10 \times 3 \times 3$ سانتی متر آماده، در یک قالب فلزی با ابعاد $20 \times 10 \times 10$ سانتی متر قرار داده شده، با استفاده از پودر ذغال (Mesh No.30) کاملاً دفن شدند. سپس درب قالب بسته شد تا جریان هوا به سطح پودر ذغال به حداقل برسد. با استفاده از یک کوره‌ی المنی نمونه‌ها با شرایط زیر برای اولین بار کربونیزه شدند: (۱) نرخ گرمایش ۱ درجه بر دقیقه، (۲) دمای نهایی ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد، (۳) تداوم گرمادهی به مدت ۲ ساعت در دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد و (۴) سرد شدن نمونه در کوره. نمونه‌های کربونیزه شده به مرحله اشباع سازی- کربونیزه کردن ارجاع داده شدند. برای اشباع سازی، نمونه‌ها از قیر قطران PA63X استفاده شد. برای این منظور نمونه‌ها با استفاده از اتوکلاو صنعتی در بستری از قیر قطران، تحت فشار ۲ مگاپاسکال (۲۰ بار)، دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد و مدت زمان ۴ ساعت توسط بخارهای ناشی از قیر و نفوذ به داخل جسم متخلخل نمونه‌ها، اشباع شدند. پس از هر بار اشباع سازی، نمونه‌ها دوباره کربونیزه می‌شدند، اما این بار برای جلوگیری از خروج قیر نفوذ کرده در نمونه، از نرخ گرمایش ۰/۵ درجه بر دقیقه و دمای نهایی ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد استفاده می‌شد. در این پژوهش پنج سیکل اشباع سازی- کربونیزه کردن انجام شد. پس از هر مرحله کربونیزه کردن برای تعیین مشخصات نمونه آزمون‌های زیر صورت پذیرفتند:

- ۱- با استفاده از روش استاندارد EN 993-1 چگالی حجمی نمونه و تخلخل‌های باز نمونه محاسبه شدند.
- ۲- پودرهای تهیه شده از نمونه برای آزمون‌های پراش اشعه ایکس (XRD)^۵ و رامان اسپکتروسکوپی^۶ استفاده شدند.
- ۳- برای بررسی خواص مکانیکی نمونه از آزمون خمش سه نقطه‌ای مطابق با روش استاندارد (ASTM D790) استفاده شد.

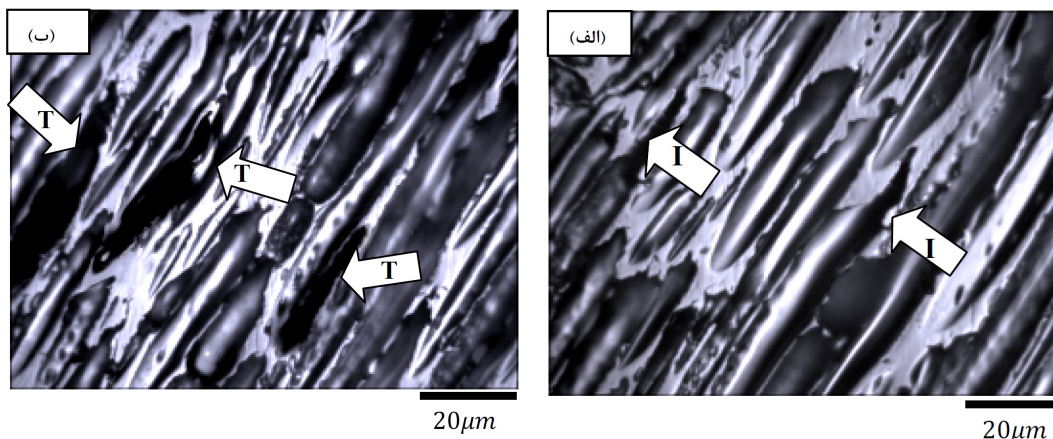
۴- برای بررسی مشخصات ریز ساختاری نمونه نیز از میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی^۷ استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

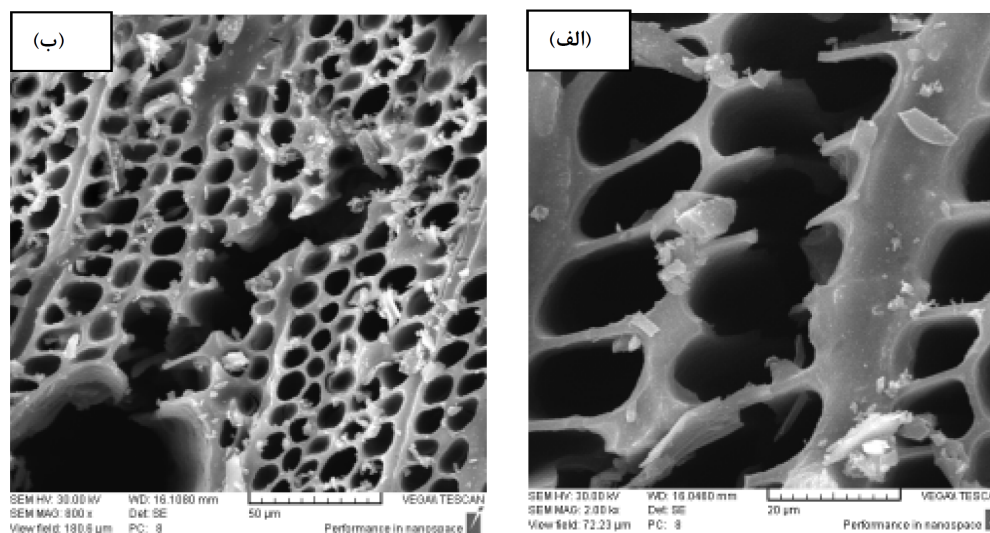
۳-۱- گسستگی‌ها و تخلخل‌ها

حضور ترک‌ها و تخلخل‌ها به دلیل بافت چوب و انقباض زمینه و هم‌چنین تجزیه گازهای فرار موجود در زمینه امری اجتناب ناپذیر است. تحلیل مقاطع مختلف مربوط به دو گروه کامپوزیت که از دو منبع یعنی چوب صنوبر و گردو تهیه شده بودند، با میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) بررسی شدند.

شکل (۱)، تصاویر میکروسکوپ نوری را نشان می‌دهد. تصویر (الف) مربوط به کامپوزیت تشکیل شده از چوب گردو و تصویر (ب) مربوط به کامپوزیت کربن-کربن تشکیل شده از چوب صنوبر است که هر کدام پس از فراوری با قیر قطران، تحت عملیات حرارتی کربونیزه کردن قرار گرفته است. در شکل (۱-الف)، گسستگی میان الیاف توخالی سلولزی با حرف I، نشان داده شده است که می‌توان آن را در شکل (۱-ب)، برای کامپوزیت کربن-کربن حاصل از صنوبر، با حرف T مشاهده نمود. ترک‌های I و T در حین فرایند ساخت ماده پیش ساخته ایجاد می‌شوند و ناشی از ماهیت چوب و تنش‌های کششی‌اند که در حین کربونیزه کردن و به دلیل انقباض چوب حاصل می‌شوند. در شکل (۲) تصاویر مربوط به میکروسکوپ SEM نشان داده شده است. در این‌جا به دلیل شباهت نوع ترک‌ها، تصاویر مربوط به نمونه چوب گردو مد نظر قرار گرفته است، از طرفی همان‌طور که در بخش‌های بعد نیز ذکر خواهد شد، چوب درخت



شکل ۱- (الف) تصویر ریزساختار کامپوزیت تهیه شده از چوب گردو (ب) تصویر ریزساختار کامپوزیت تهیه شده از چوب صنوبر

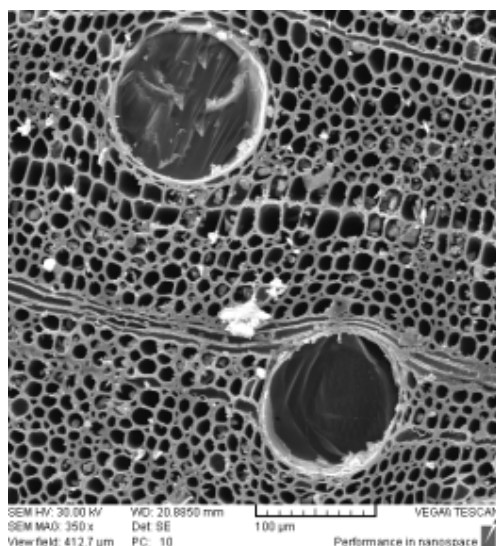


شکل ۲- تصاویر SEM تهیه شده از گسیختگی الیاف سلولزی نمونه چوب گردو

می‌کند که این گسیختگی‌ها ناشی از کششی‌اند که ممکن است به دلیل نفوذ قیر به درون آوندهای چوبی باشد. در شکل (۲-ب) کامپوزیت مربوطه پس از کربونیزه کردن در دمای ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد برای مدت زمان ۳۰ دقیقه تا دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد گرما داده شده است. همان‌طور که در تصاویر نیز کاملاً مشهود است با افزایش دمای عملیات حرارتی عرض ابعاد گسیختگی‌ها بیش‌تر می‌شود.

صنوبر فاقد کیفیت مطلوب برای دست‌یابی به کامپوزیتی با خواص مناسب است، لذا غالب تصاویر و محاسبات مربوط به چوب درخت گردوست.

همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، گسیختگی‌هایی که در مقطع طولی با میکروسکوپ نوری نشان داده شده بود، در این‌جا در مقطع عرضی قابل مشاهده هستند. در شکل (۲-الف) این گسیختگی در بزرگ‌نمایی بالا نشان داده شده است. شکل اتصال این نوع ترک‌ها این ذهنیت را تداعی



شکل ۳- تصاویر SEM تهیه شده از تخلخل های اشباع شده

$$y_v = (y_w \cdot y_\lambda \cdot \rho_p) / \rho_c \quad (2)$$

که y_w نقطه تسلیم قیر اشباع کننده بعد از کربونیزه کردن، y_λ بازده اشباع سازی قیر، ρ_p دانسیته قیر اشباع کننده و ρ_c دانسیته قیر کربونیزه شده است. مطابق با معادله (۲)، در این پژوهش خاص که برای چوب گردو انجام شده است، بیشینه بازده متراکم سازی زمانی به دست می آید که $y_\lambda = 1$ (بازده اشباع سازی ۱۰۰ درصد)، ρ_p برابر با $\frac{1}{29} \frac{gr}{cm^3}$ ، ρ_c برابر با $\frac{2}{6} \frac{gr}{cm^3}$ و $y_w = 0/6$ باشد که در این صورت بیشینه بازده متراکم سازی $y_v \approx 0/388$ خواهد شد.

در پژوهش حاضر، درصد تخلخل های باز، چگالی ظاهری و چگالی حجمی نمونه ی گردو قبل و بعد از هر سیکل متراکم سازی با استفاده از روش استاندارد EN 993-1 محاسبه شدند. نمونه ی صنوبر با همین روش مورد بررسی قرار گرفت، ولی به دلیل درصد بالای تخلخل های باز (۶۰ درصد)، چگالی حجمی کم (۰/۹۷ درصد)، استحکام خمشی پایین، از جریان تست های مکانیکی و بررسی بازده متراکم سازی کنار گذاشته شد. نتایج اندازه گیری مربوط به نمونه ی

چوب گردو

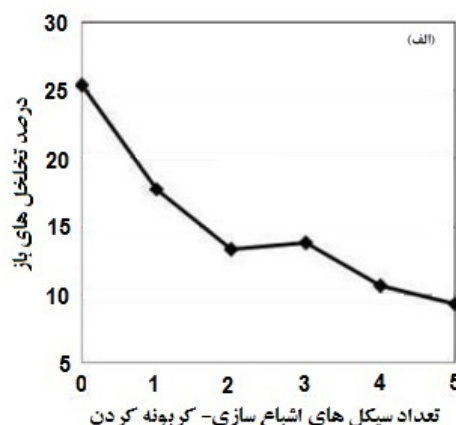
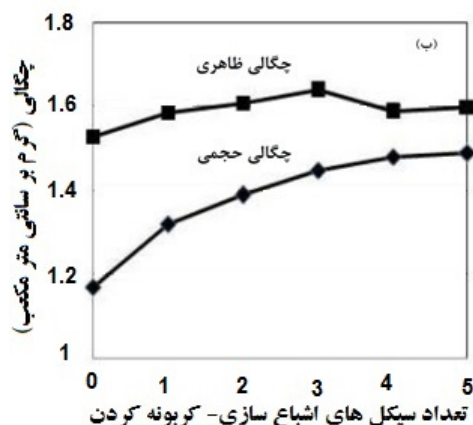
علاوه بر ترک، حضور تخلخل نیز در کامپوزیت کربن- کربن امری بدیهی و اجتناب ناپذیر است. این تخلخل ها، در واقع آوندهای انتقال دهنده ی مواد مغذی به اجزای مختلف درختان محسوب می شوند که در شکل (۳) با قیر اشباع شده، منجر به افزایش چگالی محصول گشته اند. [۹ و ۱۰]

۳-۲- بازده متراکم سازی

تاکنون معادلات زیادی در ارتباط با محاسبه ی بازده متراکم سازی مطرح شده است. یکی از این معادلات که مبتنی بر حجم سنجی و متناسب به رلیک می باشد در زیر نشان داده شده است:

$$y_v = \Delta v / \theta_0 \quad (1)$$

y_v بازده متراکم سازی حجمی و عبارت از نسبت حجم کربن تولید شده (Δv) در زمینه در حین سیکل های متراکم سازی به حجم تخلخل های موجود در ساختار متراکم شده (θ_0) است. معادله ی (۱) را می توان به صورت زیر نشان داد:



شکل ۴- الف) تغییر درصد تخلخل های باز با افزایش سیکل های اشباع سازی و (ب) تغییر چگالی ظاهری و حجمی با افزایش تعداد سیکل های اشباع سازی

گردو، در شکل (۴) نشان داده شده اند. همان طور که مشاهده می شود با افزایش تعداد سیکل های متراکم سازی، درصد تخلخل های باز کاهش یافته (شکل ۴- الف)) و چگالی حجمی افزایش می یابد (شکل ۴- ب)). مشاهده می شود که پس از عبور از مرحله سوم متراکم سازی، چگالی ظاهری کاهش قابل توجهی پیدا کرده، روند نزولی می یابد. گراند و همکارانش [۱۱] این موضوع را این گونه توجیه کرده اند که با کاهش تخلخل های باز در آخرین مراحل متراکم سازی، کربن باقی مانده بیش تر نمی شود، اما بسیاری از تخلخل های باز، بسته می شوند و همین امر دلیلی بر کاهش چگالی ظاهری در آخرین مراحل متراکم سازی به حساب می آید.

متراکم سازی و p_c چگالی قیر کربونیزه شده است. بررسی بازده محاسبه شده بر حسب تعداد سیکل های متراکم سازی در شکل (۵) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود با افزایش سیکل های متراکم سازی، بازده کاهش پیدا می کند [۱۱، ۱۲].

۳-۳- تاثیر فرایند متراکم سازی روی خواص مکانیکی

شکل (۶)، تاثیر فرایند متراکم سازی روی استحکام خمشی کامپوزیت کربن- کربن را نشان می دهد. به طور کلی با افزایش تعداد سیکل های متراکم سازی، استحکام خمشی افزایش می یابد. با توجه به اینکه چوب صنوبر، همان طور که در بالا اشاره شد، دارای درصد تخلخل بالایی است، (به طور تقریبی ۶۰٪)، لذا در مرحله ی بررسی تخلخل، چگالی این چوب پس از مرحله اشباع سازی همزمان با چوب گردو به مقدار بالاتر از ۹۷/۰ نرسید، لذا چوب گردو برای دست یابی به کامپوزیتی با چگالی بالا و خواص مکانیکی مناسب انتخاب شده، در این پژوهش خواص مکانیکی کامپوزیت حاصل از

در پژوهش حاضر، بازده متراکم سازی که با y_v مشخص شده طبق معادله ی (۳)، بر حسب مقدار چگالی حجمی و تخلخل های باز محاسبه شده است.

$$y_v(n) = (p_b(n) - p_b(n-1)) / (\theta(n-1) \cdot p_c) \quad (3)$$

که y_v چگالی متراکم سازی، n تعداد سیکل های فرایند متراکم سازی (سیکل n ام فرایند)، $p_b(n)$ چگالی حجمی بعد از سیکل n ام متراکم سازی، $\theta(n)$ مقدار تخلخل های باز بعد از سیکل n ام

۳-۴- رامان اسپکتروسکوپی

در این قسمت چوب‌ها برای تعیین میزان درصد گرافیت‌زائی و کربن آمورف، مورد بررسی قرار گرفتند. زمانی که سطح ساییده می‌شود پدیده‌ی جالبی رخ داده که آن تغییر فرم کریستالوگرافی ذرات ساییده شده موجود در سطح است. از نسبت شدت پیک‌های G:D، برای تعیین تغییرات موجود در کیفیت نمونه استفاده شد، زیرا این روش به نسبت جواب گوی شناسایی کربن گرافیتی از کربن معیوب و بی شکل بود. در نتایج به دست آمده از آزمون رامان اسپکتروسکوپی، پیکی که در نسبت G:D، ۱/۵۸ قرار دارد پیک مربوط به ساختار کریستاله‌ی منظم (گرافیت) بوده که ناشی از فعال شدن مواد کربنی در سطح و پیکی که در نسبت G:D، ۱/۲۱ مشاهده می‌شود پیک مربوط به ساختار بی‌نظم (کربن آمورف) ^۸ است.

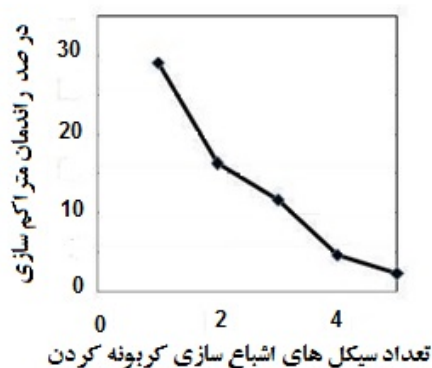
تحلیل ذرات کربنی باقی‌مانده از سایش بر روی سطح نمونه‌های چوبی با استفاده از روش رامان اسپکتروسکوپی نشان می‌دهد که هر دو نمونه در انرژی‌های پایین و بالا تمایل مشابهی برای جذب انرژی دارند. ابعاد گرافیت کریستالی از روی نسبت پیک‌های G:D همان‌طور که در مقاله‌ها و نوشته‌ها مطرح شده، محاسبه می‌شود (شکل (۷)).

به طور کلی مشاهده می‌شود که درصد گرافیت‌زائی مربوط به چوب گردو بسیار بالاتر است. از طرفی برای تایید نتایج حاصل از رامان، شکل (۸) نتایج مربوط به پراش اشعه‌ی ایکس را نشان می‌دهد.

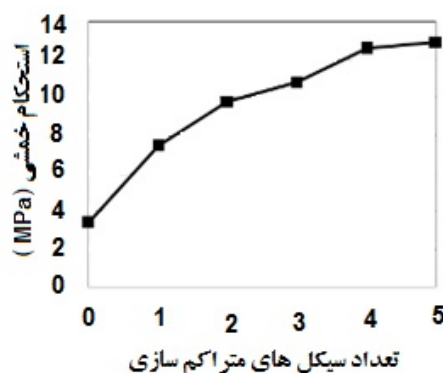
همان‌طور که در شکل نیز مشخص است، پیک مربوط به گردو کاملاً تیز (شارپ) بوده، نشان دهنده وجود تبلور در این کامپوزیت است، در حالی که پیک مربوط به صنوبر به صورت گنبدی شکل بوده، بیان‌گر آمورف بودن کربن موجود است [۱۴].

۴- نتیجه‌گیری

۱. استفاده از چوب در تهیه کامپوزیت کربن- کربن فرایند تولید را ساده نموده است، به‌ویژه آن که نیازی به تهیه

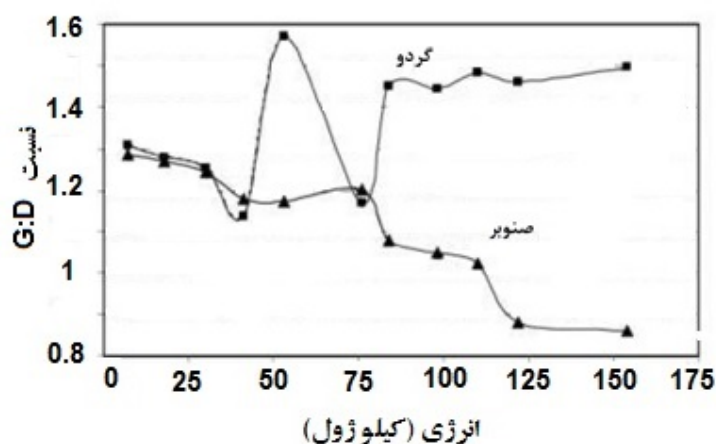


شکل ۵- تغییر بازده متراکم سازی با افزایش تعداد سیکل‌های اشباع سازی- کربونیزه کردن

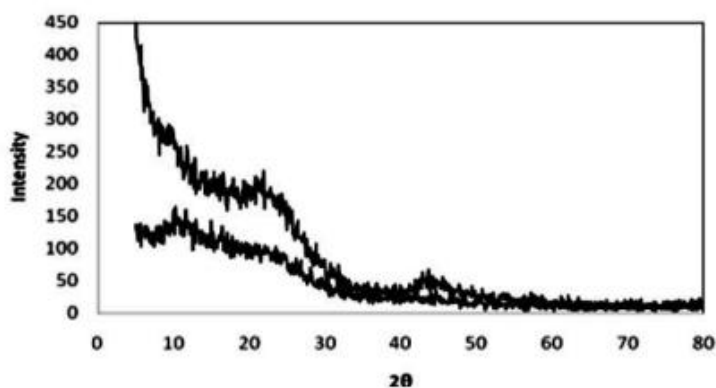


شکل ۶- تغییرات استحکام خمشی با افزایش تعداد سیکل‌های متراکم سازی کامپوزیت بر پایه چوب گردو

چوب گردو بررسی گردید. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بعد از سیکل اول، استحکام خمشی بهبود پیدا نکرده است، زیرا امکان دارد که کاهش تخلخل‌ها پس از اولین سیکل متراکم‌سازی به قدری نبوده که بتواند منجر به بهبود استحکام خمشی نمونه شود. هم‌چنین مشاهده می‌شود که افزایش استحکام خمشی از سیکل ۲ تا ۳، روند کندتری پیدا کرده است. این پدیده می‌تواند مربوط به پیدایش همان تخلخل‌های بسته‌ای باشد که قبلاً بحث شد، زیرا این تخلخل‌ها منجر به کاهش چگالی ظاهری می‌شوند [۱۱ و ۱۳].



شکل ۷- نتایج آزمون رامان اسپکتروسکوپی



شکل ۸- نتایج آزمون پراش اشعه‌ی ایکس

۴. نمونه‌های متخلخل که در فشار نسبتاً بالا اشباع می‌شوند بعد از طی چند سیکل به سبب بسته شدن تخلخل‌های باز، قابلیت متراکم شدن خود را از دست می‌دهند.

۵. کامپوزیت تهیه شده از چوب گردو نسبت به کامپوزیت تهیه شده از چوب صنوبر خواص مکانیکی بهتری از خود نشان داده، به‌ویژه آنکه می‌تواند در دامنه‌ای به نسبت متوسط، مشخصات کریستاله (گرافیت) شدن را از خود بروز دهد.

پیش ماده نخواهد بود، لذا صرفه‌ی اقتصادی زیادی به همراه خواهد داشت.

۲. هرچه درصد خاکستر باقی‌مانده نمونه‌های چوبی کم‌تر باشد، مواد فرار بیش‌تری در نمونه حضور داشته، که به تبع آن تخلخل‌های بیش‌تری در حین متراکم‌سازی در نمونه ایجاد می‌شود.

۳. تخلخل بیش از حد چوب درختان (مثلاً صنوبر) مانع از آن خواهد شد که در سیکل‌های اشباع‌سازی-کربونیزه کردن بتوان چگالی مطلوب را ایجاد نمود.

- | | | |
|--------------------------------------|-----------------------|---------------------------------|
| 1. precursor | 4. ash content | 7. scanning electron microscopy |
| 2. CVD or Chemical Vapour Deposition | 5. X Ray diffraction | 8. disorder-induced |
| 3. impregnation | 6. Raman spectroscopy | |

مراجع

- Morgan, P., Carbon Fibers and Their Composites, pp. 1-29, CRC Press LLC, 2005.
- Savage, G., Carbon-Carbon Composites, pp. 1-16 Chapman and Hall, 1993.
- Pierson, H., O., Handbook of Carbon, Graphite, Diamond and Fullerenes (Properties, Processing and Application), pp. 44-45, pp. 272 -361 Noyes, 1993
- مجله کامپوزیت، شماره سی و سوم، بهار (۱۳۸۸)
- Buckley, J. D., Dan, D.E., Carbon-Carbon Materials and Composites, pp. 5-12, pp. 268-275 Noyes, 1993
- Thomas, J. D., Essentials of Carbon-Carbon Composites, P30, Royal Society of Chemistry, 1993.
- Mancocha, J. D., "High Performance Carbon-Carbon Composites", *Sadhana*, Vol. 28, Parts 1 & 2, pp. 349-358, 2003.
- Devi, G. R., Rao, K. R., "Carbon-Carbon Composites -An Overview", *Defense Science Journal*, Vol. 43, No. 4, pp. 369-383, 1993.
- Gao, F., Patrick, J. W., Walker, A., "The Characterization of Cracks and Voids in Two-Dimensional Carbon-Carbon Composite", *Carbon*, Vol. 31, pp. 103-108, 1993.
- Purslow, D., "An Optical Assessment of the Void Content in Composite Materials", *Composites*, Vol. 5, No.3, 1984.
- Granda, M., Patrick, J. W., Walker, A., Casal, E., Bermijo J., and Menéndez, R., "Densification of Unidirectional C/C Composites by Melted Pitch Impregnation", *Carbon*, Vol. 36, No. 7-8, pp. 943-952, 1998.
- M. Kluakova, "Efficiency of Densification Process in Preparation of Carbon-Carbon Composites" *International Journal of Physical Sciences*, Vol. 1 (3) pp. 121-125, 2006.
- Davies, I. J., Rawlings, R. D., "Mechanical Properties in Compression of CVI-Densified Porous Carbon/Carbon Composite", *Composites Science and Technology*, Vol. 59, pp. 97-104, 1999.
- Abdo, J., Shamseldin, E.A., "Comparative Study of Friction and Wear of Two Generation of CVI C-C Composites", *Emirates Journal for Engineering Research*, Vol. 12 (3), pp. 57-67, 2007.