



## توليد کامپوزيت کربن - اپوکسي بر پايه چوب و بررسي خواص سايشي آن به کمک روش طراحی آزمایشات تاگوچی

حسين وفايي نژاد<sup>۱</sup>، سيدمجتبي زبرجد<sup>۲</sup>، جليل وحدتي خاكي<sup>۳</sup>

### چکیده

مقرون به صرفه بودن از لحاظ اقتصادی، عدم نیاز به فرآیند های ثانویه شکل دهی و در دسترس بودن از مزایای قابل توجه مواد کامپوزیتی چوب می باشد. چوب درخت بلوط به عنوان ماده اولیه تحقیق انتخاب گردیده است. چوب خشک شده در دماهای مختلف در معرض حرارت قرار داده شده تا بدنه کربنی متخلخل تشکیل شده و در مرحله بعدی با استفاده از فرایند خوراندن، پلیمر اپوکسی به درون تخلخل های کربن تزریق شد. از میکروسکوپ الکترونیکی روبشی (SEM) برای مطالعه ریز ساختار کامپوزیت تولید شده استفاده گردید. از روش طراحی آزمایش تاگوچی برای بررسی نتایج آن بهره برده شده است.

**واژه های کلیدی:** کامپوزیت کربنی، کربونیزاسیون، سايش، طراحی آزمایش تاگوچی

### ۱. مقدمه

«امروزه همزمان با معرفی جایگزین های جدید برای چوب، استفاده های نوینی هم برای آن معرفی گردیده است» [۱]. کربن های تولید شده از چوب و کامپوزیت های آن به دلیل داشتن شکل پذیری و دانسیته پایین نسبت به فلزات و سرامیک ها، در بسیاری از کاربردهای نوین مهندسی مورد توجه قرار گرفته اند چوب کربونیزه شده را می توان در اشکال مختلف در کامپوزیت های پایه چوب به کاربرد و

۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مواد، دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد (hossein.vafa@gmail.com)

۲ دانشیار مهندسی مواد، دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

۳ استاد مهندسی مواد، دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد

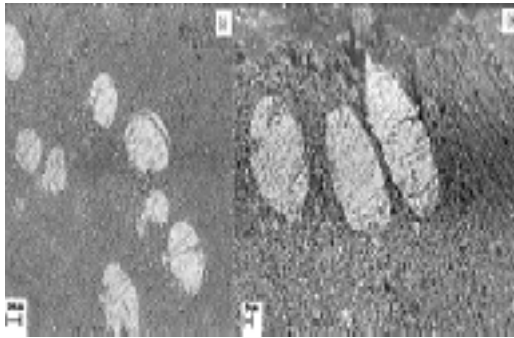
استفاده نمود با به کاربردن این روش ما قادر خواهیم بود تا تمامی خواص آناتومی چوب را در عین داشتن یک ترکیب شیمیایی کاملاً متفاوت حفظ کنیم [۲]. چوب از یک سری مواد آلی تشکیل شده است که با اتصال داخلی یک بدنه متخلخل تشکیل می دهند. ترکیب شیمیایی یک نمونه خشک شده شامل ۵۰ درصد وزن کربن ۴۴۰ درصد وزنی اکسیژن و ۶ درصد وزنی هیدروژن می باشد [۳]. سه ساختار پلیمری تشکیل دهنده بدنه اصلی چوب می باشند که عبارت اند از: سلولز، همی سلولز و لینگنین. جز اصلی در تمامی بدنه های چوبی سلولز است. سلولز همانند یک بدنه اصلی ماتریسی است که دو جز دیگر یعنی همی سلولز و لینگنین را در درون خود جای می دهد. انجام فرایند کربونیزاسیون در دماهای مختلف منجر به ایجاد بدنه کربنی می گردد که علت آن تغییرات مختلف در چیدمان مولکولی بدنه سلولی چوب است [۴]. در حین فرآیند حرارت دهی چوب با آهنگ حرارت دهی ۵ درجه سانتی گراد بر دقیقه، همی سلولز در دماهای بین ۱۷۰ تا ۲۴۰ درجه سانتی گراد، سلولز در دماهای ۲۴۰ تا ۳۱۰ درجه سانتی گراد و لینگنین در دماهای بین ۳۲۰ تا ۴۰۰ درجه سانتی گراد تجزیه می شوند. واکنش ها و انفعالات شیمیایی زیادی همچون ایجاد پیوند بین عناصر چوب و تبخیر برخی ترکیبات آن صورت می پذیرد تا نهایتاً زغال در پایان باقی بماند [۵]. تحقیقات گسترده ای در منابع مربوطه در مورد کربونیزاسیون چوب های مختلف و جنبه های گوناگون مکانیزم آن انجام پذیرفته است [۶-۱۱]. بدنه کربنی متخلخل تولید شده دارای خواص مناسب مهندسی بسیاری از قبیل پایداری ضریب اصطکاک، خواص الکترو مغناطیسی مناسب، ضریب انبساط حرارتی پایین، خواص ارتجاعی مناسب و خود روانسازی می باشد [۱۲-۱۳].

هدف عمده استفاده از تقویت کننده در مواد کامپوزیتی را می توان در دو مورد خلاصه نمود: بهبود خواص مکانیکی، حرارتی و سطحی کامپوزیت و نیز کاهش هزینه های مواد اولیه و تولید [۱۴]. برای بررسی خواص سطحی و سایشی پارامترهای تولید مانند دمای کربونیزاسیون و پارامترهای آزمایش مانند مساحت سایش و بار اعمالی مورد توجه قرار گرفته است. طراحی آزمایش یک روش آماری برای ارزیابی اثرات عمل های مختلف بر روی یک متغیر خروجی است. روش طراحی آزمایش تاگوچی یک روش مؤثر مؤثر در بررسی اثرات عوامل مختلف روی پارامتر خروجی است که این جانرخ سایش است [15].

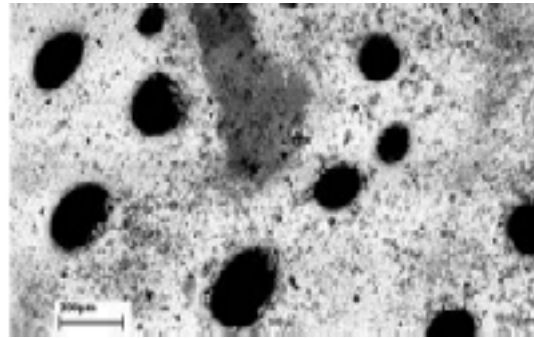
## ۲. مواد و روش تحقیق

نمونه ها به صورت مکعب مستطیل و در ابعاد  $20 \times 20 \times 10$  میلی متر تهیه شدند. برای تهیه زرین پلیمری به عنوان جزء تقویت کننده، اپوکسی با هاردنر متناسبش با یک نسبت معین ترکیب شدند. چوب به عنوان ماده خام تولید کامپوزیت کربن - اپوکسی تا چندین دمای مختلف حرارت داده شد تا در اول

کار یک بدنه متخلخل آلی در اختیار داشته باشیم (شکل ۱) فرآیند کربونیزاسیون چوب در دماهای مختلف بین ۴۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی گراد انجام پذیرفت. در تحقیق حاضر از کربن های تولید شده در دماهای ۴۰۰°C، ۴۵۰°C و ۵۰۰°C برای بررسی خواص سایشی استفاده شده است. از یک دستگاه مکانیکی خلاء برای ایجاد موضعی خلاً درون بدنه کربنی متخلخل استفاده شد تا از بازگشت پلیمر به سطح کامپوزیت جلوگیری شود. (شکل ۲)



شکل ۲. ریزساختار کامپوزیت کربن-اپوکسی مشتق شده از چوب بلوط



شکل ۱. بدنه متخلخل کربنی ناشی از فرآیند کربونیزاسیون

در دمای اتاق و بدون حضور ماده روانساز آزمون سایشی لغزشی روی کامپوزیت کربن-اپوکسی انجام شده. آزمون سایش بر اساس استراتژی زیر انجام گرفت: چهار مسافت لغزش با مقادیر ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ و ۱۲۵ متر. چهار بار عمودی با مقادیر ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ نیوتن. از کامپوزیت هایی استفاده شد که ماتریس کربنی آن ها در دماهای ۴۰۰°C، ۴۵۰°C، ۵۰۰°C و ۵۵۰°C تولید شده بود. آهنگ سایشی مخصوص به صورت کاهش حجم نمونه بر واحد مسافت بر واحد بار عمودی گزارش می شود (میلی متر مکعب بر متر بر نیوتن). طراحی آزمایش ابزاری است برای تحلیل تأثیرات عوامل مؤثر مختلف بر خروجی مورد نظر. انتخاب فاکتور کنترل کننده یکی از مهمترین مراحل در طراحی آزمایشات است. با استفاده از آرایه ارتوگونان L16 روش تاگوچی انجام ۱۶ تست برای تحلیل نتایج کفایت می کند (جدول ۱). در ادامه با اعمال استراتژی «هر چیز بهتر، کمتر» بر اساس معادله ۱ کمترین میزان آهنگ سایشی مخصوص تعیین می گردد

(۱)

$$\frac{S}{N} = -10 \log \frac{1}{n} \left( \sum y^2 \right)$$

در معادله بالا، n تعداد آزمایشات انجام شده و y مقادیر خروجی هر آزمایش می باشد [۱۵]. جدول

۲ جزئیات طراحی آزمایش و نسبت  $\frac{S}{N}$  را برای هر خروجی نشان می دهد.

جدول ۱. پارمترها و عوامل دخیل در آزمون سایش

واحد	سطح ۴	سطح ۳	سطح ۲	سطح ۱	فاکتورهای کنترلی
درجه سانتیگراد	۵۵۰	۵۰۰	۴۵۰	۴۰۰	دمای کربونیزاسیون
نیوتن	۲۰	۱۵	۱۰	۵	باراعمالی
متر	۱۲۵	۱۰۰	۷۵	۵۰	مسافت ساییده شده

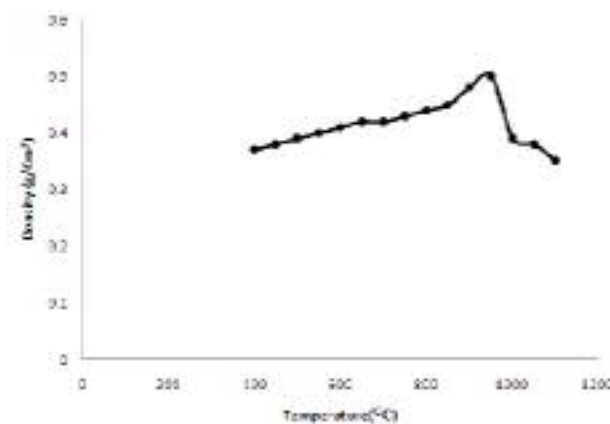
جدول ۲. جدول طراحی و تحلیل تاگوجی برای آزمون سایش

شماره آزمایش	دمای کربونیزاسیون	باراعمالی	مسافت	نسبت سیگنال به نویز
۱	۴۰۰	۵	۵۰	۴۴/۲۶۵۱
۲	۴۰۰	۱۰	۷۵	۴۳/۹۹۹۴
۳	۴۰۰	۱۵	۱۰۰	۴۲/۹۵۰۴
۴	۴۰۰	۲۰	۱۲۵	۴۱/۸۱۰۳
۵	۴۵۰	۵	۵۰	۴۵/۸۱۴۶
۶	۴۵۰	۱۰	۷۵	۴۵/۱۱۴۱
۷	۴۵۰	۱۵	۱۰۰	۴۴/۲۶۵
۸	۴۵۰	۲۰	۱۲۵	۴۲/۸۰۵۲
۹	۵۰۰	۵	۵۰	۴۴/۱۹۴۳
۱۰	۵۰۰	۱۰	۷۵	۴۳/۸۳۵۸
۱۱	۵۰۰	۱۵	۱۰۰	۴۵/۷۳۰۲
۱۲	۵۰۰	۲۰	۱۲۵	۴۶/۹۵۵۱
۱۳	۵۵۰	۵	۵۰	۴۴/۴۲۲۵
۱۴	۵۵۰	۱۰	۷۵	۴۴/۰۲۷
۱۵	۵۵۰	۱۵	۱۰۰	۴۵/۷۳۰۲
۱۶	۵۵۰	۲۰	۱۲۵	۴۷/۹۱۵۵

### ۳. بحث و نتایج

به طور کلی، تغییرات تخلخل و دانسیته در یک چوب حین حرارت دادن در یک محیط با اتمسفر کنترل شده با دو عامل کنترل می شود: (۱) کاهش وزن ناشی از تخریب برخی اجزای چوب و نیز تبخیر برخی مواد فرار حین افزایش دما، این پدیده ها باعث کاهش دانسیته کربن می شوند. (۲) انبساط حرارتی دیواره های تخلخل های چوب در اثر انبساط بدنه کربن که باعث کاهش قطر تخلخل ها و افزایش دانسیته بدنه کربنی می شود تقریباً از دمای  $400^{\circ}\text{C}$  تا  $1000^{\circ}\text{C}$  مانیزم دوم نقش اصلی را بازی می کند و در

دماهای بالای  $1000^{\circ}\text{C}$  مکانیزم اول غالب است. روند تغییرات دانسیته با تغییرات دما در شکل ۳ نشان داده شده است. در این آزمون از کربن های تولید شده در دماهای بین  $400^{\circ}\text{C}$  تا  $1000^{\circ}\text{C}$  مکانیزم دوم نقش اصلی را بازی می کند و در دماهای بالای  $1000^{\circ}\text{C}$  مکانیزم اول غالب است. روند تغییرات دانسیته با تغییرات دما در شکل ۳ نشان داده شده است. در این آزمون از کربن های تولید شده در دماهای بین  $400^{\circ}\text{C}$  تا  $500^{\circ}\text{C}$  استفاده شده است که در این بازه ما شاهد افزایش دانسیته با افزایش دما هستیم در عمل با افزایش دما در محدوده ذکر شده ما شاهد بالارفتن استحکام فشاری کربن هم خواهیم بود و این به دلیل فشرده تر شدن ساختار کربن در اثر افزایش دانسیته می باشد. برای اثبات این مسأله تست فشار چند استاندارد انجام شد. نتایج این تست ها در جدول ۳ آمده است.



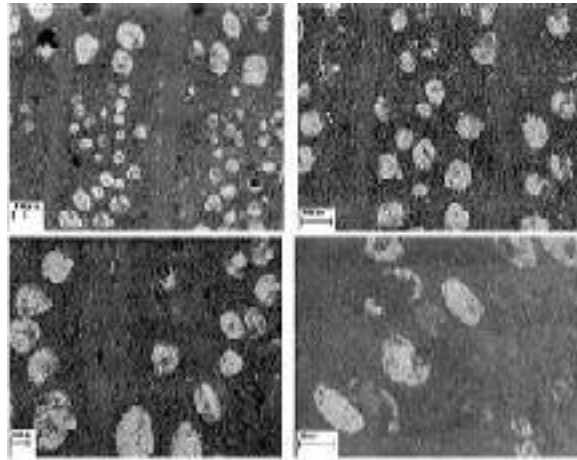
شکل ۳. روند تغییرات دانسیته کربن با دمای کربونیزاسیون

جدول ۳. استحکام فشاری کربن تولیدی در دماهای آزمایش

استحکام فشاری (مگاپاسکال)	دمای کربونیزاسیون ( $^{\circ}\text{C}$ )
۲۹/۳	۴۰۰
۳۲	۴۵۰
۳۶/۴	۵۰۰
۴۰/۱	۵۵۰

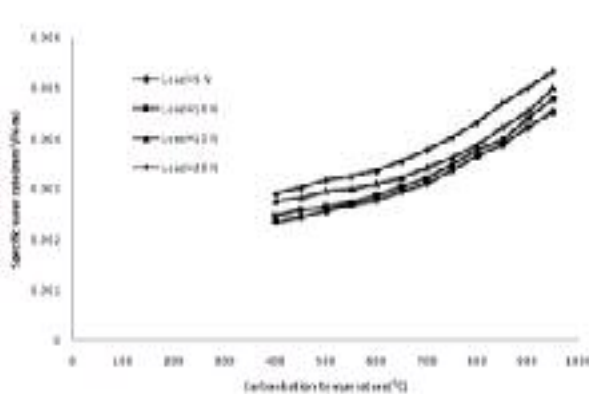
در دور های اولیه چرخش دیسک فولادی تست سایش، تکه های کوچک کربنی از سطح کامپوزیت کنده می شود و در اثر حرکت های بعدی دیست روی سطح کامپوزیت پخش می شوند. وجود این تکه ها و ذرات پراکنده شده کربنی که دارای خاصیت خود روانکاری هستند، نرخ سایش مخصوص کامپوزیت را کاهش می دهد [۱۳]. کربن های تولید شده در دمای بالاتر دارای استحکام بالاتری هستند و دیرتر به وسیله دیسک فولادی از سطح ماده کنده می شوند بنابراین در لغتش خود روان کار خود دیرتر وارد عمل می شوند. به همین دلیل کامپوزیت هایی که ماتریس کربنی آن ها در دماهای بالاتری تولید

شده، خواص مقاومت به سایشی ضعیف تری دارند. تصاویر میکروسکوپ الکترونی رویشی پدیده های روی داده را که حین تست سایشی رخ می دهد را نشان می دهد (شکل ۴).

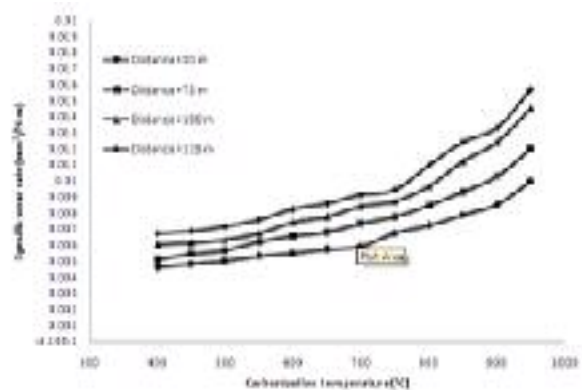


شکل ۴. ریزساختار کامپوزیت سایشیده شده بعد آزمون سایش

با خارج شدن زرين پلیمری از درون تخلخل های ماتریس، آلگومره شدن پلیمرها رخ می دهد. این ذرات پلیمری آلگومره شده به سطح تماس دیسک فولادی می چسبند و سطح مؤثر تماس بین دیسک و پلیمر را کاهش می دهند و در نتیجه نرخ سایشی مخصوص هم کاهش می یابد. در شرایط تماس بین پلیمر و فلز، وقتی که زیری سطحی فلز بالای ۰/۰۵ میکرومتر باشد مکانیزم سایشی خراشی مهم ترین عامل است [۱۶] بنابراین بدلیل زیری سطحی بالاتر در تنظیمات آزمایشات، خراشیده شدن عامل کننده شدن ذرات پلیمری و چسبیدن آن ها به دیسک است. نمودار تأثیرات دمای کربونیزاسیون بر روی نرخ سایش مخصوص کامپوزیت کربن اپوکسی در مسافت ها و بارهای مختلف در شکل ۵ و ۶ نشان داده شده است و نیز شکل ۷ تأثیر مسافت سایشی را روی نرخ سایشی مخصوص در بارهای مختلف نشان می دهد.

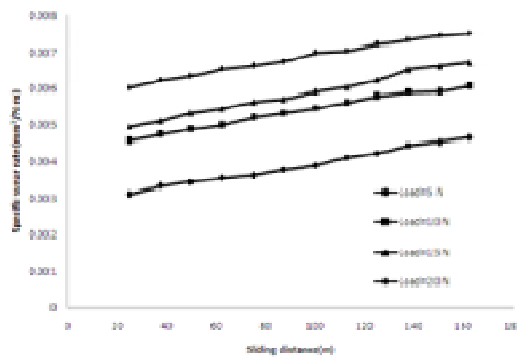


شکل ۶. تأثیر دمای کربونیزاسیون بر روی نرخ سایش در بارهای مختلف



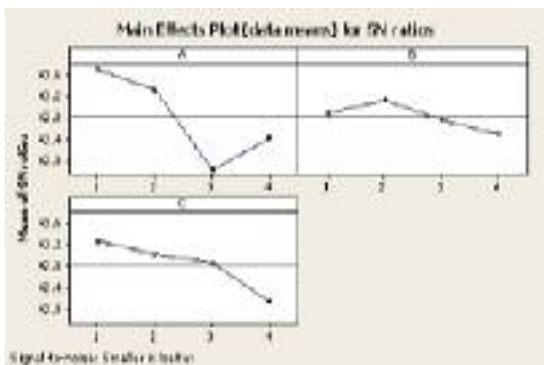
شکل ۵. تأثیر دمای کربونیزاسیون بر روی نرخ سایش در مسافت های مختلف





شکل ۷. تاثیر دمای مسافت سایش روی نرخ سایش در بارهای مختلف

بر اساس طراحی معین شده برای آزمایش و مقادیر بدست آمده برای نرخ سایش های مخصوص ۱۶ آزمایش، نسبت سیگنال به نویز برای هر آزمایش بدست آمده و در جدول ۳ آمده است. جدول پاسخ برای استراتژی سیگنال به نویز حالت هر چه کمتر، بهتر هم در جدول ۴ بیان شده است. با استفاده از قابلیت پیش بینی روش تاگوچی، نسبت سیگنال به نویز متوسط ۴۳/۸۵۱۳ برای این آزمایشات بدست آمد و نیز نشان داده شده است که دمای کربونیزاسیون مهم ترین عامل دخیل در سایش کامپوزیت است. مسافت ساییده شده و بار اعمالی به ترتیب دومین و سومین عوامل از نظر درجه اهمیت خواهند بود. تأثیر هر یک از عوامل کنترلی روی نتیجه آزمون ها در شکل ۸ آمده است. جداول سیگنال به نویز تاگوچی نشان می دهد که چیدمان C1, B2, A1 در آزمایش سایشی منجر به حصول حداقل نرخ سایشی مخصوص می شود.



شکل ۸. نمایش تاثیر پارامترهای کنترلی در نرخ سایش

جدول ۴. جدول پاسخ و تاثیر فاکتورهای معین تاگوچی

سطح	دما	بار	مسافت
۱	۴۳/۷۱	۴۲/۹	۴۳/۲۸
۲	۴۳/۳۳	۴۳/۱۴	۴۳/۰۲
۳	۴۱/۸۵	۴۲/۷۷	۴۲/۸۶
۴	۴۲/۴۳	۵۱/۴۲	۴۲/۱۵
رتبه اهمیت	۱	۳	۲

#### ۴. نتیجه گیری

چوب با حفظ تمامی خواص آناتومی خود طی حرارت به یک بدنه متخلخل کربنی تبدیل شد.



بدليل اين خاصيت ذاتی خارق العاده و پایداری شکلی تخلخل های موجود، خوراندن زرین اپوکسی به درون این حفرات امکان پذیر می باشد. پلیمر به درون حفرات بی شمار استوانه‌ای شکل کربن نفوذ می کند و ماده مرکب جدیدی بر پایه چوب شکل می گیرد. تست فشار روی کربن و سایشی روی کامپوزیت انجام پذیرفت نشان داده شد که افزایش دمای کربونیزاسیون، نرخ سایشی مخصوص کامپوزیت را افزایش می دهد و نیز افزایش مسافت ساییدن و بار هم باعث افزایش نرخ سایشی مخصوص می شود

## منابع

- 1-N.C. Brown, Forest products, their manufacture and use, J. Wiley, 1919.
- 2-C.E. Byrne, D.C. Nagle, " Cellulose derived composites – A new method for materials processing", Materials Research Innovations, 1 ,1997, 137-144.
- ۳-C.E. Byrne, D.C. Nagle, " Carbonization of wood for advanced materials applications", Carbon, 35 ,1997, 259-266.
- 4-C.E. Byrne, D.C. Nagle, " Carbonized wood monoliths—Characterization", Carbon, 35 ,1997, 267-273.
- 5-S.-M. Kwon, N.-H. Kim, D.-S. Cha, " An investigation on the transition characteristics of the wood cell walls during carbonization", Wood Science and Technology, 43 ,2009, 487-498.
- 6-D. Özçimen, A. Ersoy-Meriçboyu, "A study on the carbonization of grapeseed and chestnut shell", Fuel Processing Technology, 89 ,2008, 1041-1046.
- 7-P. Gao, M. Wu, B. Li, Y. Liu, " Structure characterization and oxidation mechanism study of porous biomorphic carbon template derived from basswood", Materials Research Bulletin, 44 ,2009, 644-648.
- 8-O. Paris, C. Zollfrank, G.A. Zickler, " Decomposition and carbonisation of wood biopolymers-a microstructural study of softwood pyrolysis", Carbon, 43 2005, 53-66. .
- 9-Y.-R. Rhim, D. Zhang, M. Rooney, D.C. Nagle, D.H. Fairbrother, C. Herman, D.G. Drewry Iii, "Changes in the thermophysical properties of microcrystalline cellulose as function of carbonization temperature", Carbon, 48,2010, 31-40.
- 10-C.S.M. Turney, D. Wheeler, A.R. Chivas, " Carbon isotope fractionation in wood during carbonization", Geochimica et Cosmochimica Acta, 70 ,2006, 960-964.
- 11-K. Ishimaru, T. Hata, P. Bronsveld, Y. Imamura, "Microstructural study of carbonized wood after cell wall sectioning", Journal of Materials Science, 42 ,2007, 2662-2668.
- 12-T.-C. Wang, T.-X. Fan, D. Zhang, G.-D. Zhang, " The fabrication and wear properties of C/Al and (C + SiC)/Al composites based on wood template", Materials Letters, 60 ,2006, 2695-2699.
- 13-T.-C. Wang, T.-X. Fan, D. Zhang, G.-D. Zhang, "Fabrication and the wear behaviors of the carbon/aluminum composites based on wood templates", Carbon, 44 ,2006, 900-906.
- 14- G. Kranthi, A. Satapathy, " Evaluation and prediction of wear response of pine wood dust filled epoxy composites using neural computation", Computational Materials Science, 49,2010, 609-614.
- 15-D.H. Wu, M.S. Chang, "Use of Taguchi method to develop a robust design for the magnesium alloy die casting process", Materials Science and Engineering: A, 379 ,2004, 366-371.
- 16-J. Aurrekoetxea, M. Sarrionandia, X. Gómez, " Effects of microstructure on wear behaviour of wood reinforced polypropylene composite", Wear, 265 ,2008, 606-611.

## **Fabrication and wear resistance investigation of C/Epoxy composite based on wood using taguchi method**

**Hossein Vafaenezhad\*, Seyyed Mojtaba Zebarjad, Jalil Vahdati Khaki**

*\* Department of Materials Engineering, Engineering faculty, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.*

*(hossein.vafa@gmail.com)*

### **Abstract**

Since wood is the main component of the applied raw materials, it can be used as matrix in carbon composites, also it can be taken into consideration as a cost effective advanced application and have this potential to suppress many expensive fabrication and finishing procedures. Wood samples from Oak tree (*Quercus suber*) were heated at different temperatures to produce porous carbon templates. Subsequently, the Carbonized wood was infiltrated with an epoxy in order to fabricate the final carbon/epoxy composite. Scanning electron microscopy was used to elucidate parameters affecting on microstructure and wear properties of products. In this context, design of experiments method (DOE) was implemented to analyze the wear performance of a new class of cellulose based composites. This work indicates that epoxy shows good reinforcement characteristics as it improves the sliding wear resistance of the carbon matrix and that factors like carbonization temperature, sliding distance and normal load are the important factors affecting the wear behaviors.

**Keywords:** Carbon composites, Carbonization, Wear, Taguchi method