

## بررسی رفتار کششی و سرعت سوختن کامپوزیت هیبریدی الیاف شیشه-شبه کربن / اپوکسی

حسین ابراهیم نژاد خالنجیری

کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

رضا اسلامی فارسانی\*

دانشیار، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

### چکیده

در این تحقیق اثر هیبرید کردن الیاف شیشه با الیاف شبه کربن بر خواص کششی و سرعت سوختن کامپوزیت زمینه اپوکسی تقویت شده با این الیاف هیبریدی در مقایسه با کامپوزیت زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه بررسی شد. در این راستا، کامپوزیت های چهار لایه با لایه گذاری های متفاوت از پارچه الیاف شیشه و الیاف شبه کربن در زمینه رزین اپوکسی با روش لایه گذاری دستی ساخته شدند. هیبرید کردن الیاف شیشه با الیاف شبه کربن باعث کاهش استحکام کششی و مدول الاستیک کامپوزیت زمینه اپوکسی تقویت شده با این دو نوع الیاف در مقایسه با کامپوزیت تقویت شده با الیاف شیشه شد. اما کرنش شکست این کامپوزیت ها را بهبود داد. همچنین نتایج به دست آمده نشان داد که هر دو عامل کرنش شکست و استحکام کششی نقش مهمی در ارزی جذب شده در کامپوزیت دارند که میزان تاثیرگذاری این دو عامل متناسب با نسبت الیاف شبه کربن به الیاف شیشه است. نتایج سرعت و سطح مقطع سوختن نیز نشان داد که با افزایش نسبت الیاف شبه کربن به الیاف شیشه، مقاومت به سوختن کامپوزیت افزایش می یابد.

**واژه های کلیدی:** کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه، الیاف شبه کربن، سرعت سوختن، خواص کششی.

## Investigation of Tensile and Burning Rate Behavior of Hybrid Glass-Semicarbon Fibers/Epoxy Composite

H. Ebrahimnezhad-Khaljiri

Faculty of Materials Science and Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

R. Eslami-Farsani

Faculty of Materials Science and Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

### Abstract

In this research, the hybridization effect of Semicarbon fibers (SCFs) with glass fibers on tensile properties and burning rate of composites as compared to glass fibers reinforced epoxy matrix composite was investigated. In this regard, four plies composites with different arranging of SCFs and glass fibers were fabricated by hand lay-up method. The hybridization of SCFs with glass fibers was caused reducing tensile strength and elastic modulus of these composites as compared to glass fibers reinforced composite. But the failure strain of these composites was improved. Also, the obtained results showed that both failure strain and tensile strength have important role on energy absorption in composites that the effectiveness of these factors proportionate SCFs and glass fibers ratio. The results of rate and the cross section of burning showed that with increasing SCFs to glass fibers ratio, the flame retardancy of composite increases.

**Keywords:** Glass Fibers/Epoxy Composite; Semicarbon Fibers; Burning Rate; Tensile Properties.

امروزه برای بهبود خواص کامپوزیت های اپوکسی-الیاف شیشه، این الیاف را با الیاف پیشرفته ی دیگر مانند الیاف کربن، کولار و بازالت هیبرید می کنند [۱۰-۱۲]. اصطلاح هیبرید کردن در کامپوزیت های هیبریدی<sup>۲</sup>، وجود یک زمینه با حداقل دو نوع متفاوت الیاف تقویت کننده را توصیف می کند. این الیاف تقویت کننده در کامپوزیت های هیبریدی زمینه پلیمری به صورت های مختلف ترکیب می شوند (شکل ۱). حالت اول به صورت لایه لایه<sup>۳</sup> است که الیاف با دو جنس متفاوت به صورت لایه لایه، با حالت های مختلف روی هم قرار می گیرند که به علت سادگی، سریع ترین فرآیند ساخت کامپوزیت هیبریدی است (شکل ۱-الف). در حالت دوم، دو الیاف با یکدیگر می یابند<sup>۴</sup> به گونه ای که جنس تار و پود متفاوت است (شکل ۱-ب). در حالت سوم، دو نوع متفاوت لیف با یکدیگر ترکیب می شوند<sup>۵</sup> (شکل ۱-ج). همچنین، نوع

### ۱- مقدمه

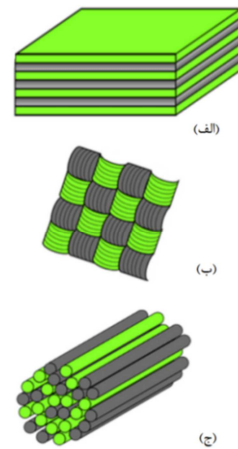
با توجه به خواص مکانیکی، پایداری گرمایی بالا و نسبت استحکام به وزن عالی، استفاده از کامپوزیت های اپوکسی تقویت شده با الیاف در کاربردهای مختلف هم چون صنایع هواپیماسازی و دیگر وسایل نقلیه روبه افزایش است [۱]. در میان انواع مختلف الیاف پیشرفته، الیاف شیشه به علت داشتن خواص مدول بالا و چگالی کم کاربرد وسیعی دارد [۲]. رزین اپوکسی که برای زمینه ی پلیمری انتخاب شده، خواص مکانیکی و شیمی فیزیک خوبی دارد [۳]. اما اشتعال پذیر است [۴]. برای بهتر کردن خاصیت مقاومت به سوختن<sup>۱</sup> از ترکیبات بور [۵]، فسفر [۶]، نیتروژن [۸]، سیلیسیم [۹] و گرافن [۱] در زمینه ی اپوکسی توسط محققان استفاده می شود.

2 Hybrid Composite  
3 Interlayer  
4 Intralayer  
5 Inrayarn

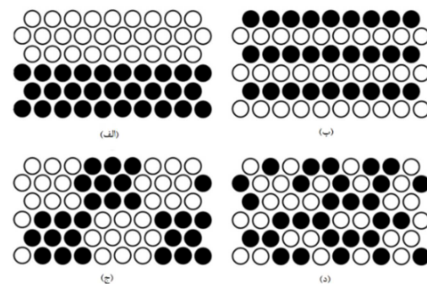
<sup>1</sup> Flame retardancy

دیگری از کامپوزیت‌های هیبریدی وجود دارد که از هیبرید فلز و الیاف به عنوان تقویت کننده تشکیل شده‌اند و به کامپوزیت‌های لایه‌ای الیاف-فلز<sup>۱</sup> مشهور هستند [۱۳-۱۵].

بر اساس مطالعات انجام شده، از مهم‌ترین عوامل در بهبود خواص کامپوزیت‌های هیبریدی، یکنواختی توزیع الیاف است. به گونه‌ای که با افزایش یکنواختی، خواص کامپوزیت‌های هیبریدی بهینه‌تر می‌شود. توزیع متفاوت الیاف در انواع کامپوزیت‌های هیبریدی در شکل ۲ نشان داده شده است. بر اساس شکل ۲، در کامپوزیت‌های هیبریدی با چیدمان تقویت کننده‌ها به صورت لایه لایه (حالت اول) کمترین یکنواختی دیده می‌شود. در حالی که در کامپوزیت‌های هیبریدی تقویت شده با دو نوع متفاوت لیف که با یکدیگر ترکیب شده‌اند، بیشترین یکنواختی دیده می‌شود [۱۴، ۱۵].



شکل ۱- حالت‌های متفاوت چیدمان الیاف در کامپوزیت‌های هیبریدی [۱۴، ۱۵]



شکل ۲- انواع توزیع الیاف در کامپوزیت‌های هیبریدی؛ الف: دولایه، ب: لایه‌گذاری متناوب، ج: دو الیاف بافته، د: توزیع کاملاً تصادفی [۱۴، ۱۵]

الیاف شبه کربن<sup>۲</sup> یا الیاف اکریلیک اکسید شده، از پایداری حرارتی الیاف پلی‌اکریلونیتریل<sup>۳</sup> (با نام تجاری اکریلیک) به دست می‌آید. نام دیگر این الیاف، پلی‌اکریلونیتریل اکسید شده<sup>۴</sup> است [۱۶، ۱۷].

این الیاف ساختار ماکرومولکول شبه کریستالی و آمورف دارد. ساختار شبه کریستال شامل ساختار اصلی کربن به همراه گروه‌های نیتریل است که به صورت مارپیچی نامنظم، شکل گرفته‌اند. در میان این مارپیچ، حجمی وجود دارد که به صورت آمورف است. وجود کومونومرها<sup>۵</sup> باعث افزایش ناحیه‌ی آمورف می‌شود که کمکی برای شروع واکنش‌های پایداری است [۱۸]. به همین دلیل الیاف اکریلیک دارای ترکیب شیمیایی ۸۵٪ اکریلیک و ۱۵٪ کومونومرهایی مانند ایتاکونیک اسید<sup>۶</sup> و متیل اکریلات<sup>۷</sup> هستند [۱۹] که ایتاکونیک اسید باعث می‌شود تا پایداری حرارتی این الیاف در دماهای پایین‌تر انجام شود [۲۰].

پایداری گرمایی در محیط هوا و در محدوده‌ی دمایی ۳۰۰-۱۸۰ °C انجام می‌شود. در حین پایداری الیاف به ترتیب واکنش‌های اکسیداسیون، حلقه‌ای شدن و دی‌هیدروژنه شدن رخ می‌دهند [۲۱]. اگر دمای پایداری خیلی بالا باشد این الیاف بیش از حد گرما دیده، ذوب و یا حتی بخار می‌شود [۱۷]. بررسی‌های انجام شده نشان داد که عامل خیلی مهم در حین پایداری، انقباض الیاف اکریلیک است که به علت رهاسازی تنش‌های داخلی و تاثیرات الاستیک ماکرومولکول‌های اکریلیک و واکنش‌های حلقه‌ای شدن است. [۲۲]

نتایج بررسی‌ها نشان داد که الیاف شبه کربن مقاومت گرمایی و شاخص حد اکسیژن بالایی<sup>۸</sup> دارد و این ویژگی‌ها باعث می‌شود که در برابر آتش مقاوم باشد [۱۶]. بر اساس تحقیقات انجام گرفته، تاکنون در زمینه‌ی استفاده‌ی الیاف شبه کربن در کامپوزیت‌های زمینه اپوکسی تقویت شده با پارچه الیاف شیشه تحقیقاتی صورت نگرفته است. بر این اساس، هدف این تحقیق بررسی اثر الیاف شبه کربن بر خواص کششی و سرعت سوختن کامپوزیت‌های زمینه اپوکسی تقویت شده با پارچه الیاف شیشه است.

## ۲- بخش تجربی

### ۲-۱- مواد

رزین استفاده شده در ساخت کامپوزیت‌ها، رزین اپوکسی بیسفنول F<sup>۹</sup>، با نام تجاری (ML 506) و هاردنر پلی‌آمینی<sup>۱۰</sup>، با نام تجاری (HA 11) محصول شرکت مواد مهندسی مکرر است. نسبت رزین به هاردنر، ۱۰۰ به ۱۵ واحد انتخاب شد. پارچه الیاف شیشه با چگالی سطحی ۲۰۰ g/cm<sup>2</sup> دارای بافت ساده (۹۰ و ۰) محصول شرکت کام-الیاف<sup>۱۱</sup> کشور ترکیه و الیاف شبه کربن با چگالی خطی ۱/۱۶ dtex دارای سطح مقطع گرد محصول شرکت کورتولز<sup>۱۲</sup> کشور انگلستان نیز در ساخت کامپوزیت‌ها استفاده شد.

5 Comonomer  
6 Itaconic acid  
7 Methyl acrylate  
8 Limited oxygen index  
9 Resin epoxy bisphenol F  
10 Polyamine hardener  
11 Camelyaf  
12 Courtaulds

1 Fiber metal laminate  
2 Semi carbon fibers  
3 Polyacrylonitrile  
4 Oxidized polyacrylonitrile

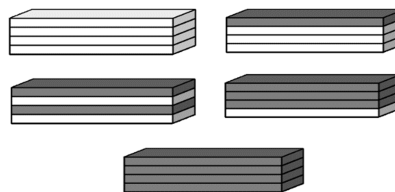
## ۲-۲- آماده سازی و ساخت کامپوزیت‌ها

کامپوزیت‌ها به صورت ۴ لایه با چیدمان‌های متفاوت (شکل ۳) با ابعاد  $25 \times 30 \text{ cm}^2$  توسط روش لایه‌گذاری دستی با زمان پخت ۲۴ ساعت در دمای محیط ساخته شدند. با توجه به مطالعات انجام شده، به منظور انتخاب چیدمان مناسب در گام نخست، دو نوع کامپوزیت با ۴ لایه الیاف شیشه و شبه کربن برای مقایسه کلی با کامپوزیت‌های هیبریدی ساخته شدند. سپس، پایین‌ترین لایه تقویت کننده از جنس الیاف شیشه و بالاترین لایه الیاف شبه کربن انتخاب شد و دو لایه میانی به منظور بررسی اثر هیبرید کردن به حالت‌های مختلف، لایه‌گذاری شدند [۲۳، ۲۴].

با توجه به مطالعات انجام شده، خواص نهایی کامپوزیت با فرض یکنواخت بودن الیاف و زمینه براساس قانون اختلاط چامیس<sup>۱</sup> در کامپوزیت‌ها به صورت رابطه (۱) است

$$E_c = E_f V_f + E_m (1 - V_f) \quad (1)$$

که در این رابطه  $E$  مدول الاستیک و  $V$  کسر حجمی یا وزنی است. همچنین  $c$ ،  $f$  و  $m$  به ترتیب معرف کامپوزیت، الیاف و زمینه هستند. با توجه به رابطه (۱) هرچه درصد الیاف تقویت کننده به دلیل داشتن خواص مکانیکی بالاتر از زمینه بیشتر باشد، خواص مکانیکی کامپوزیت نیز بیشتر می‌شود. اما اگر درصد الیاف نسبت به زمینه خیلی بالا باشد میزان جذب انرژی کامپوزیت به دلیل جدایش بین لایه‌ها<sup>۲</sup> کاهش می‌یابد. انتخاب نسبت بهینه رزین و الیاف وابسته به جنس الیاف و میزان چسبندگی آن با رزین است. بر این اساس، به دلیل جذب بالای رزین توسط الیاف شبه کربن، نسبت رزین به الیاف ۶۰ به ۴۰ درصد وزنی انتخاب شد [۲۵].



شکل ۳- انواع چیدمان لایه‌ها - لایه روشن: پارچه الیاف شیشه، لایه تیره: الیاف شبه کربن

جدول ۱- مشخصات و کد کامپوزیت‌های ساخته شده

کد نمونه*	تعداد لایه‌های پارچه الیاف شیشه	نسبت الیاف شبه کربن به کل تقویت کننده کامپوزیت (% وزنی)
0S-4G	۴	۰
1S-3G	۳	۵۱
2S-2G	۲	۷۴
3S-1G	۱	۸۹
4S-0G	۰	۱۰۰

(\* S=الیاف شبه کربن، G=پارچه الیاف شیشه،

اعداد قبل از S و G=تعداد لایه‌های S و G در کامپوزیت.

## ۳-۲- تجهیزات

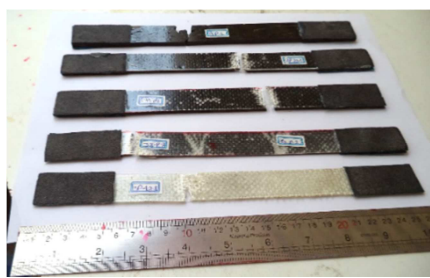
### ۳-۲-۱- آزمون کشش

آزمون کشش توسط دستگاه Hounsfield H25KS (شکل ۴) با نیروی ۲۵ kN و سرعت کشش ۲ mm/min انجام شد. نمونه‌ها با ابعاد  $250 \times 20 \text{ mm}^2$  براساس استاندارد ASTM D3039 بریده و سمباده زنی شدند. از کاغذ سمباده P80 به عنوان تب<sup>۳</sup> استفاده شد (شکل ۵). طول سنجه<sup>۴</sup> نیز ۱۰۰ mm انتخاب شد. به منظور دقت بیشتر در داده‌ها و توصیه استاندارد ذکر شده، برای هر نمونه کامپوزیتی، آزمون به تعداد ۵ مرتبه انجام شده و میانگین داده‌ها با  $\pm$  درصد انحراف معیار گزارش شد.

هدف از استفاده از تب سمباده‌ای افزایش اصطکاک بین گیره و نمونه‌های آزمایش و همچنین شکست در ناحیه طول سنجه است. برای شکستن نمونه در طول سنجه کافی است دقت عرض نمونه را توسط سمباده‌زنی به زیر ۰/۳ mm رساند.



شکل ۴- دستگاه آزمون کشش



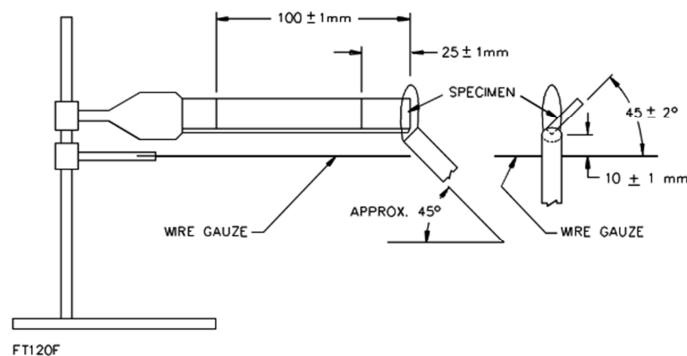
شکل ۵- نمونه‌های آزمون کشش با تب سمباده‌ای

### ۳-۲-۲- آزمون سوختن افقی<sup>۵</sup>

شکل ۶ نحوه‌ی انجام آزمایش سوختن افقی براساس استاندارد UL-94 را نشان می‌دهد. در این آزمون نمونه‌ها به ابعاد  $125 \times 12.5 \text{ mm}^2$  بریده شدند. بر روی نمونه‌ها در فاصله‌های ۲۵ mm و

3 Tab  
4 Gauge length  
5- Horizontal burning

1 Chamis  
2 Delamination

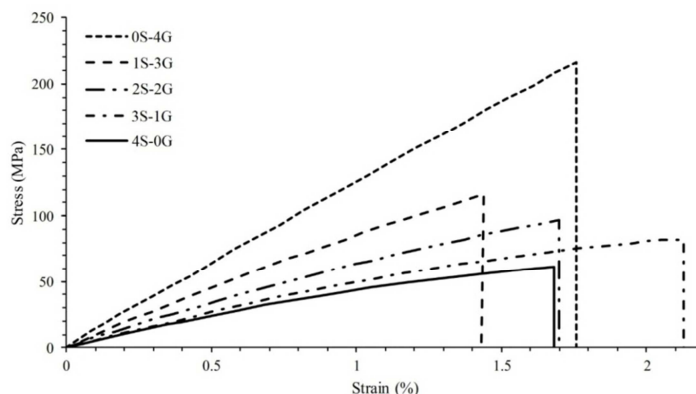


شکل ۶- طرحواره آزمون سوختن افقی

جدول ۲ آورده شده است. براساس این داده‌ها، شکل‌های ۸ تا ۱۱، به ترتیب نمودارهای استحکام کششی، مدول الاستیک، انرژی جذب شده و کرنش شکست نسبت به درصد الیاف شبه کربن به کل تقویت کننده در کامپوزیت‌ها را نشان می‌دهند.

براساس داده‌های جدول ۲ و نمودار استحکام کششی برحسب درصد الیاف شبه کربن در کامپوزیت (شکل ۸)، کامپوزیت OS-4G و کامپوزیت 4S-0G، به ترتیب با استحکام کششی ۲۱۵/۹۱ MPa و ۶۱/۰۷ MPa، بیشترین و کمترین استحکام کششی را در میان کامپوزیت‌های هیبریدی تقویت شده با الیاف شبه کربن و الیاف شیشه دارند. با افزایش درصد الیاف شبه کربن نسبت به الیاف شیشه استحکام کششی کامپوزیت‌های هیبریدی روندی کاهشی دارند به طوری که در کامپوزیت هیبریدی 3S-1G با استحکام کششی ۸۱/۷۵ MPa نسبت به کامپوزیت 1S-3G با استحکام کششی ۱۲۰/۹۰ MPa، استحکام کششی ۳۳ درصد کاهش پیدا کرده است.

علت این نوع رفتار در این نوع کامپوزیت‌های هیبریدی، استحکام پایین الیاف شبه کربن است. الیاف شبه کربن دارای ساختار پلیمری زنجیره‌ای هستند که توسط اتصالات عرضی به یکدیگر متصل شده‌اند. این اتصالات عرضی دارای نیروی پیوند بسیار کمی هستند و اگر در معرض تنش کششی قرار گیرند، پیوند میان زنجیره‌های پلیمری می‌شکند [۱۷]. این بدین معنی است که الیاف شبه کربن به دلیل وجود اتصالات عرضی ضعیف دارای خواص استحکامی پایینی هستند که باعث کاهش استحکام کششی در کامپوزیت‌های هیبریدی ساخته شده می‌شود.



شکل ۷- نمودار تنش-کرنش کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف شبه کربن-الیاف شیشه

۱۰۰ mm از ابتدای نمونه توسط مازیک علامت‌گذاری شد. سپس شعله به مدت ۳۰ s با زاویه ۴۵° تا رسیدن به علامت ۲۵ mm بر روی نمونه‌ها قرار داده شد و بعد از گذشت ۳۰ s شعله از روی نمونه برداشته و زمان سوختن ثبت شد. اگر نمونه‌ای زودتر از ۳۰ s تا خط ۲۵ mm سوخت، زمان سوختن از همان لحظه ثبت شد. زمان و طول سوختن همه‌ی کامپوزیت‌ها، اندازه‌گیری و سرعت سوختن براساس رابطه‌ی (۲) محاسبه شد:

$$V = \frac{60L}{T} \quad (2)$$

که در این رابطه،  $V$  سرعت برحسب  $\text{mm/min}$  زمان برحسب  $s$  و  $L$  طول سوختن برحسب  $\text{mm}$  هستند. اگر نمونه تا علامت  $100 \text{ mm}$  سوخت، زمان سوختن تا علامت  $100 \text{ mm}$  ثابت و طول  $L$  را برابر  $75 \text{ mm}$  در نظر گرفته می‌شود. به منظور دقت بیشتر در داده‌ها، براساس استاندارد UL-94، آزمون‌ها برای هر نمونه کامپوزیت ۳ مرتبه انجام شده و میانگین داده‌ها با  $\pm 2$  درصد انحراف معیار گزارش شد.

### ۳- نتایج و بحث

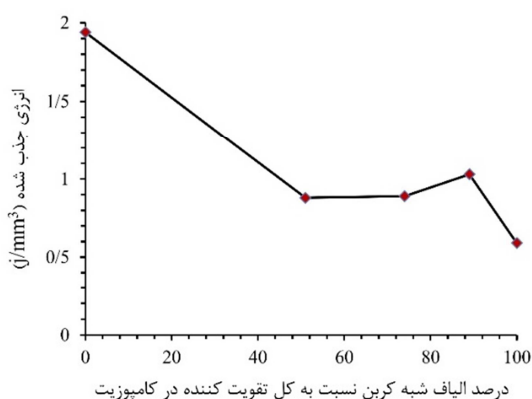
#### ۳-۱- خواص کششی کامپوزیت‌ها

شکل ۷ نمودار تنش-کرنش مربوط به کامپوزیت‌های ۴ لایه ساخته شده با الیاف شبه کربن و الیاف شیشه با چیدمان‌های متفاوت را نشان می‌دهد که براساس استاندارد ASTM D3039 به دست آمده است. داده‌های مربوط به این نمودار شامل استحکام کششی، مدول الاستیک، کرنش شکست و انرژی جذب شده به صورت خلاصه در

جدول ۲- خواص کششی کامپوزیت‌های اپوکسی تقویت با پارچه الیاف شیشه به همراه الیاف شبه کربن

کد نمونه	استحکام کششی (MPa)	مدول الاستیک (GPa)	کرنش شکست (%)	انرژی جذب شده ( $\text{j/mm}^3$ )
0S-4G	۲۱۵/۹۱	۱۲/۸۰	۱/۷۶	۱/۹۴
1S-3G	۱۲۰/۹۰	۷/۹۶	۱/۳۴	۰/۸۸
2S-2G	۹۶/۳۶	۶/۷۰	۱/۷۰	۰/۸۹
3S-1G	۸۱/۷۵	۵/۳۰	۲/۱۳	۱/۰۳
4S-0G	۶۱/۰۷	۴/۸۷	۱/۶۸	۰/۵۹

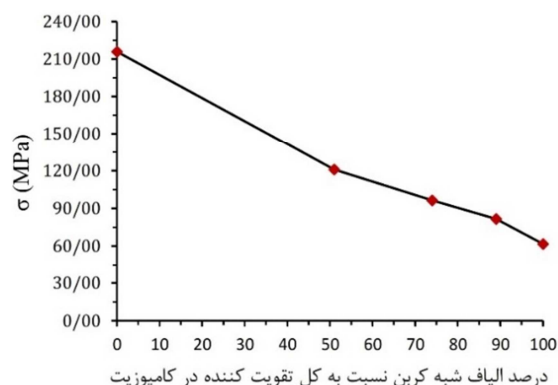
شکست نقش بسیار مهمی در مورد انرژی جذب شده توسط کامپوزیت‌های هیبریدی دارند. با توجه به نتایج به دست آمده از نمودار تنش-کرنش و شکل ۱۰، کامپوزیت 0S-4G و کامپوزیت 4S-0G با انرژی جذب شده  $1/94 \text{ j/mm}^3$  و  $0/59 \text{ j/mm}^3$  به ترتیب بیشترین و کمترین انرژی جذب شده را نسبت به دیگر کامپوزیت‌ها دارند.



شکل ۱۰- تغییرات انرژی جذب شده برحسب درصد الیاف شبه کربن به کل الیاف تقویت کننده در کامپوزیت

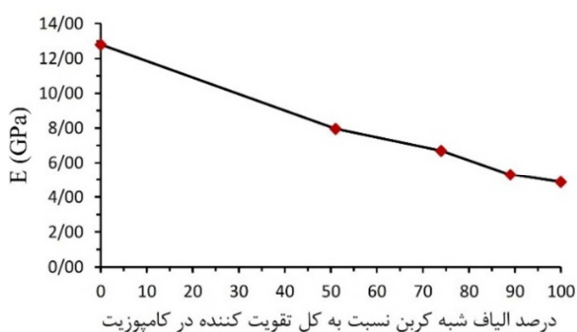
بر اساس پیش بینی‌ها باید کامپوزیت 0S-4G و کامپوزیت 4S-0G به ترتیب بیشترین و کمترین کرنش شکست را داشته باشند. اما برهم کنش بین کرنش شکست در الیاف شبه کربن و الیاف شیشه باعث شده است که کامپوزیت 3S-1G و کامپوزیت 1S-3G با کرنش شکست  $2/13$  و  $1/34$  درصد به ترتیب بیشترین و کمترین کرنش را داشته باشند. علت داشتن کمترین کرنش شکست در کامپوزیت 1S-3G وجود عدم یکنواختی بسیار زیاد بین الیاف شبه کربن و الیاف شیشه است. این عدم یکنواختی در کامپوزیت‌های هیبریدی باعث کاهش کرنش شکست می‌شود که این رفتار در کامپوزیت‌های هیبریدی با عدم یکنواختی زیاد مشاهده می‌شود [۱۵]. بر این اساس، این گونه استنباط می‌شود که کامپوزیتی با بیشترین یکنواختی، بهترین خواص را دارد. این بدین معنی است که کامپوزیت 2S-2G به دلیل داشتن بیشترین یکنواختی باید بیشترین کرنش شکست را داشته باشد. اما نتایج بدین گونه نیست.

در کامپوزیت‌های هیبریدی همیشه داشتن بیشترین یکنواختی به معنی داشتن بهترین خواص نیست. این بدان معنی است که عامل دیگری نیز در کرنش شکست تاثیرگذار است. احتمالاً تاثیر کرنش‌های شکست الیاف شبه کربن و الیاف شیشه بر روی یکدیگر باعث ایجاد



شکل ۸- تغییرات استحکام کششی برحسب درصد الیاف شبه کربن به کل الیاف تقویت کننده در کامپوزیت

بر اساس داده‌های نمودار تنش-کرنش و شکل ۹، کامپوزیت 0S-4G و کامپوزیت 4S-0G به ترتیب با مدول الاستیک  $12/80 \text{ GPa}$  و  $4/87 \text{ GPa}$  بیشترین و کمترین مدول الاستیک را در میان کامپوزیت‌های ساخته شده دارند. مدول الاستیک در این نوع کامپوزیت‌ها رفتاری مشابه استحکام کششی دارد و با افزایش درصد الیاف شبه کربن به الیاف شیشه، مدول الاستیک روندی کاهشی دارد، به طوری که مدول الاستیک در کامپوزیت هیبریدی 3S-1G با مدول الاستیک  $7/96 \text{ GPa}$  نسبت به کامپوزیت 1S-3G با مدول الاستیک  $5/30 \text{ GPa}$ ،  $33/4$  درصد کاهش پیدا کرده است.

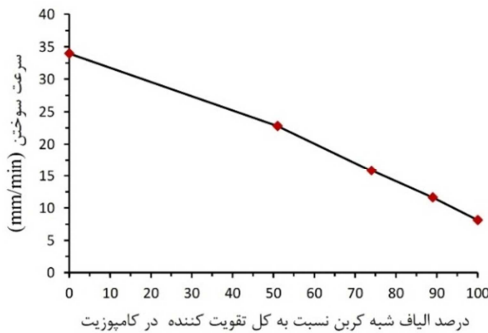


شکل ۹- تغییرات مدول الاستیک برحسب درصد الیاف شبه کربن به کل الیاف تقویت کننده در کامپوزیت

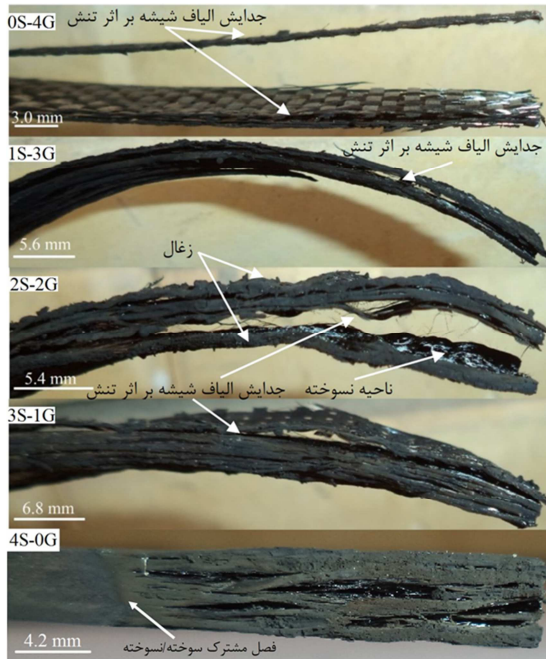
شکل ۱۰ نمودار انرژی جذب شده توسط کامپوزیت‌های هیبریدی را نشان می‌دهد. انرژی جذب شده از مساحت زیر منحنی در آزمون تنش-کرنش به دست می‌آید. دو عامل استحکام کششی و کرنش

می‌شود و نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که ۴۰ درصد ساختار الیاف اکسید شده است [۱۷، ۲۶]. این باعث می‌شود تا الیاف شبه کربن دیگر تمایلی به واکنش با اکسیژن نداشته باشند. به همین دلیل افزایش درصد الیاف شبه کربن نسبت به الیاف شیشه در کامپوزیت، خاصیت مقاومت به سوختن در این نوع کامپوزیت‌های هیبریدی را افزایش می‌دهد.

شکل ۱۳ سطح مقطع سوختن کامپوزیت‌های هیبریدی تقویت شده با الیاف شیشه و شبه کربن را نشان می‌دهد که در این شکل مرز بین ناحیه سوخته-نسوخته، لایه لایه شدن کامپوزیت‌ها، زغال ناشی از سوختن و لایه‌های کامپوزیت‌ها مشخص شده است. تاثیر دیرسوزی الیاف شبه کربن را می‌توان به صورت واضح در کامپوزیت 2S-2G مشاهده کرد. با توجه به شکل می‌توان نتیجه گرفت که شعله فقط سطح الیاف شبه کربن را سوزانده است و قسمت‌های داخلی الیاف شبه کربن نسوخته است. این عامل باعث دیرسوز شدن کل کامپوزیت می‌شود. زیرا الیاف شبه کربن از انتشار شعله جلوگیری می‌کند.



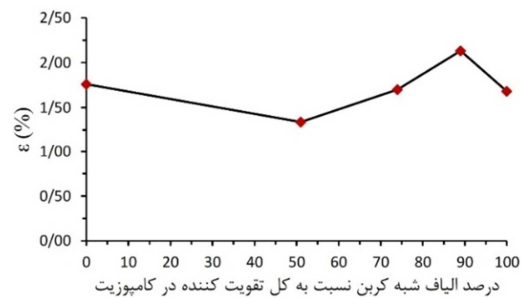
شکل ۱۲- تغییرات سرعت سوختن برحسب درصد الیاف شبه کربن به کل الیاف تقویت کننده در کامپوزیت



شکل ۱۳- سطح مقطع کامپوزیت‌های هیبریدی الیاف شیشه- شبه کربن بعد از آزمون سوختن افقی

کرنش شکست ظاهری در این نوع کامپوزیت‌ها می‌شود که متأثر از نسبت دو الیاف در کامپوزیت هیبریدی است. این نسبت در کامپوزیت 3S-1G به گونه‌ای است که باعث ایجاد بیشترین کرنش شکست ظاهری می‌شود. برای بررسی این رفتار در این نوع کامپوزیت‌های هیبریدی نیاز به بررسی بیشتر به خصوص تحقیقاتی در مورد ساختار میکروسکوپی در حین آزمون کشش با سرعت‌های کشش متفاوت و تاثیر نیروها در این نوع کامپوزیت‌ها احساس می‌شود.

در کامپوزیت‌ها به صورت کلی استحکام کششی تاثیر بیشتری نسبت به کرنش در انرژی جذب شده دارد. زیرا کامپوزیت‌ها دارای کرنش شکست کم و ساختار ترد هستند. نتایج در دو کامپوزیت 0S-4G و 4S-0G نشان می‌دهد که استحکام کششی نقش بسیار مهم-تری نسبت به کرنش شکست دارد. بررسی نتایج به دست آمده نشان داد که انرژی شکست کامپوزیت‌های هیبریدی 1S-3G، 2S-2G و 3S-1G به ترتیب  $0.188$ ،  $0.189$  و  $0.103$  می‌باشد. همچنین این کامپوزیت‌ها به ترتیب دارای کرنش شکست  $0.134$ ،  $0.170$  و  $0.213$  درصد هستند. با مقایسه این سه کامپوزیت می‌توان فهمید که کرنش شکست و انرژی جذب شده رفتاری مشابه هم دارند. این بدین معنی است که با افزایش درصد الیاف شبه کربن تا ۸۹٪ وزنی انرژی جذب شده روندی افزایشی دارد. این موضوع نشان دهنده آن است که در این سه نوع کامپوزیت، کرنش شکست نقش بسیار مهم‌تری نسبت به استحکام کششی دارد که به علت وجود کرنش ظاهری است.



شکل ۱۱- تغییرات کرنش شکست برحسب درصد الیاف شبه کربن به کل الیاف تقویت کننده در کامپوزیت

### ۳-۳- سرعت سوختن کامپوزیت‌ها

شکل ۱۲ نمودار سرعت سوختن کامپوزیت‌ها را نشان می‌دهد. براساس این داده‌ها، کامپوزیت با چیدمان ۴ لایه پارچه شیشه با سرعت سوختن  $33/93$  mm/min و کامپوزیت با چیدمان ۴ لایه الیاف شبه کربن با سرعت سوختن  $8/13$  mm/min به ترتیب بیشترین و کمترین سرعت سوختن را دارند. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش درصد الیاف شبه کربن در کامپوزیت‌های هیبریدی سرعت سوختن کاهش می‌یابد به طوری که در کامپوزیت هیبریدی 1S-3G با سرعت سوختن  $22/79$  mm/min نسبت به کامپوزیت 3S-1G با سرعت سوختن  $11/62$  mm/min، سرعت سوختن ۴۹ درصد کاهش پیدا کرده است. این بدین معنی است که کامپوزیت در برابر سوختن مقاوم‌تر شده است. این کاهش در سرعت سوختن به خاطر خاصیت مقاومت به آتش الیاف شبه کربن است. زیرا ساختار مولکولی الیاف شبه کربن در حین عملیات پایدارسازی حرارتی الیاف پلی‌اکریلونیتریل اکسید

## ۵- مراجع

- [1] Wanga X., Song L., Pornwannchai W., Hu Y., and Kandola B., The effect of graphene presence in flame retarded epoxy resin matrix on the mechanical and flammability properties of glass fiber-reinforced composites, *Compos Part A*, Vol. 53, pp. 88-96, 2013.
- [2] Hao Y., Liu F., Shi H., Han E., and Wang Z., The influence of ultra-fine glass fibers on the mechanical and anticorrosion properties of epoxy coatings, *Prog Org Coat*, Vol. 71, No. 2, pp.188-197, 2011.
- [3] Biswas B., and Kandola B. K., The effect of chemically reactive type flame retardant additives on flammability of PES toughened epoxy resin and carbon fiberreinforced composites, *Polym Adv Technol*, Vol. 22, No. 7, pp.1192-1204, 2011.
- [4] Wypych G., *Handbook of polymers*, Chem Tec Publishing, Toronto, 2012.
- [5] Martin C., Ronda J. C., and Cadiz V., Novel flame-retardant thermosets: diglycidyl ether of bisphenol A as a curing agent of boron-containing phenolic resins, *J Polym Sci Part A*, Vol. 44, No. 5, pp. 1701-1710, 2006.
- [6] Perret B., Schartel B., Stoss K., Ciesielski M., Diederichs J., Doring M., et al. Novel DOPO-based flame retardants in high-performance carbon fibre epoxy composites for aviation, *Eur Polym J*, Vol. 47, No. 5, pp. 1081-1089, 2011.
- [7] Qian L. J., Ye L. J., Xu G. Z., Liu J., and Guo J. Q., The non-halogen flame retardant epoxy resin based on a novel compound with phosphaphenanthrene and cyclotriphosphazene double functional groups, *Polym Degrad Stab*, Vol. 96, No. 6, pp.1118-1124, 2011.
- [8] Zhang X. H., Liu F., Chen S., and Qi G. R., Novel flame retardant thermosets from nitrogen-containing and phosphorus-containing epoxy resins cured with dicyandiamide, *J App Polym Sci*, Vol. 106, No. 4, pp. 2391-2397, 2007.
- [9] Mercado L. A., Galia M., and Reina J. A., Silicon-containing flame retardant epoxy resins: synthesis, characterization and properties, *Polym Degrad Stab*, Vol. 91, No. 11, pp. 2588-2594, 2006.
- [10] Talib A. R. A., Ali A., Badie M. A., Lah N. A. C., and Golestaneh A. F., Developing a hybrid, carbon/ glass fiber-reinforced, epoxy composite automotive drive shaft, *Mater Design*, Vol. 31, No. 1, pp. 514-521, 2010.
- [11] Fiore V., Bella G. D., and Valenza A., Glass-basalt/ epoxy hybrid composites for marine applications, *Mater Design*, Vol. 32, No. 4, pp. 2091-2099, 2011.
- [12] Valença S. L., Griza S., Oliveira V. G. D., Sussuchi E. M., and Cunha F. G. C. D., Evaluation of the mechanical behavior of epoxy composite reinforced with Kevlar plain fabric and glass/Kevlar hybrid fabric, *Compos Part B*, Vol. 70, pp.1-8, 2015.
- [13] Pegoretti A., Fabbri E., Migliaresi C., and Pilati F., Intraply and interply hybrid composites based on E-glass and poly (vinyl alcohol) woven fabrics: tensile and impact properties, *Polym Int*, Vol. 53, No. 9, pp. 1290-1297, 2004.
- [14] Swolfs Y., Crauwels L., Breda E. V., Gorbatikh L., Hine P., Ward I., et al., Tensile behaviour of intralayer hybrid composites of carbon fibre and self-reinforced polypropylene, *Compos Part A*, Vol. 59, pp.78-84, 2014.
- [15] Swolfs Y., Gorbatikh L., and Verpoest I., Fibre hybridisation in polymer composites: A review, *Compos Part A*, Vol. 67, pp. 181-200, 2014.
- [16] Hearle J. W. S., *High-performance fibres*, Woodhead Publishing Ltd, Florida, 2001.
- [17] Rahaman M. S. A., Ismail A. F., and Mustafa A., A review of heat treatment on polyacrylonitrile fiber, *Polym Degrad Stab*, Vol. 92, No. 8, pp. 1421-1432, 2007.
- [18] Morgan P., *Carbon fibers and their composites*, Taylor & Francis Group, London, 2005.
- [19] Xue Y., Liu J., and Liang J., Correlative study of critical reactions in polyacrylonitrile based carbon fiber precursors during thermal-oxidative stabilization, *Polym Degrad Stab*, Vol. 98, No. 1, pp. 219-229, 2013.
- [20] Sedghi A., Eslami Farsani R., and Shokuhfar A., The effect of commercial polyacrylonitrile fibers characterizations on

با توجه به سطح مقطع کامپوزیت‌های سوخته، رفتار لایه لایه شدن را می‌توان مشاهده کرد. هرچه ساختار کامپوزیت یکنواخت‌تر باشد، لایه لایه شدن کمتر مشاهده می‌شود. دلیل این رفتار وجود تنش‌های پسماند است که در حین ساختن کامپوزیت ایجاد شده و در کامپوزیت باقی مانده است. عامل ایجاد تنش پسماند در کامپوزیت متفاوت بودن ضریب انبساط طولی، عدم یکنواختی در فصل مشترک لایه‌های کامپوزیت و تنش پسماند شیمیایی ناشی از پخت کامپوزیت است [۲۷]. ایجاد ساختار لایه لایه ممکن است بر رفتار سوختن کامپوزیت تاثیر بگذارد که باید بررسی شود. زیرا لایه لایه شدن در حین سوختن، باعث ایجاد سطح مقطع بیشتر و افزایش سرعت سوختن می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که دیرسوزی کامپوزیت‌ها به دو عامل ماده‌ی دیرسوز الیاف شبه کربن و تنش پسماند در کامپوزیت‌ها، وابسته است.

## ۴- نتیجه گیری

در این تحقیق کامپوزیت‌های هیبریدی زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه و الیاف شبه کربن با لایه‌گذاری‌های متفاوت ساخته شدند و خواص کششی و سرعت سوختن این کامپوزیت‌ها بررسی شد. نتایج به دست آمده به صورت خلاصه در زیر آورده شده است:

- ۱- کامپوزیت‌های تقویت شده با ۴ لایه الیاف شیشه و ۴ لایه الیاف شبه کربن با استحکام کششی  $215/91$  MPa و  $61/07$ ، به ترتیب بیشترین و کمترین استحکام کششی را داشتند. با افزایش درصد الیاف شبه کربن نسبت به الیاف شیشه در کامپوزیت‌های هیبریدی، استحکام کششی ۳۳ درصد کاهش یافت.
- ۲- مدول الاستیک رفتاری مشابه استحکام کششی داشت و کامپوزیت‌های تقویت شده با ۴ لایه الیاف شیشه و ۴ لایه الیاف شبه کربن با مدول الاستیک  $12/80$  GPa و  $4/87$ ، به ترتیب بیشترین و کمترین مدول الاستیک را داشتند. همچنین با افزایش درصد الیاف شبه کربن نسبت به الیاف شیشه در کامپوزیت‌های هیبریدی، استحکام کششی  $33/4$  درصد کاهش یافت.
- ۳- کامپوزیت‌های تقویت شده با ۳ لایه الیاف شیشه و ۳ لایه الیاف شبه کربن با کرنش شکست  $1/34$  و  $2/13$  درصد به ترتیب کمترین و بیشترین کرنش شکست را داشتند.
- ۴- کامپوزیت‌های تقویت شده با ۴ لایه الیاف شیشه و ۴ لایه الیاف شبه کربن با انرژی جذب شده  $1/94$  J/mm<sup>3</sup> و  $0/59$ ، به ترتیب بیشترین و کمترین انرژی جذب را داشتند. در دیگر کامپوزیت‌ها کرنش نقش مهم‌تری نسبت به استحکام کششی در انرژی جذب شده داشت.
- ۵- کامپوزیت‌های تقویت شده با ۴ لایه الیاف شیشه و ۴ لایه الیاف شبه کربن با سرعت سوختن  $33/93$  mm/min و  $8/13$  به ترتیب کمترین و بیشترین مقاومت به سوختن را داشتند. با افزایش درصد الیاف شبه کربن نسبت به الیاف شیشه مقاومت به سوختن افزایش یافت.
- ۶- دو عامل ماده‌ی دیرسوز الیاف شبه کربن و انرژی پسماند نقش مهمی در دیرسوزی کامپوزیت‌های هیبریدی الیاف شیشه- شبه کربن داشتند.

- the produced carbon fibers properties, *J mater process technol*, Vol. 198, No. 1-3, pp. 60-67, 2008.
- [21] Arbab S., and Zeinolebadi A., A procedure for precise determination of thermal stabilization reactions in carbon fiber precursors, *Polym Degrad Stab*, Vol. 98, No. 12, pp. 2537-2545, 2013.
- [22] Kalashnik A.T., Panichkina O. N., Rudinskaya G.Y., and Serkov A.T., Shrinkage mechanism in thermo oxidative stabilization of acrylic fibers, *Fiber chem*, Vol. 33, No. 2, pp. 132-139, 2001.
- [23] Agrawal G., Patnaik A., Sharma R K., Agrawal J., Effect of stacking sequence on physical, mechanical and tribological properties of glass-carbon hybrid composites, *Friction*, Vol. 2, No. 4, pp. 354-364, 2014.
- [24] Ary Subagia I. D. G., Kim Y., Tijing L. D., Kim C. S., Shon H. K., Effect of stacking sequence on the flexural properties of hybrid composites reinforced with carbon and basalt fibers, *Compos Part B*, Vol. 58, pp. 251-258, 2014.
- [25] Fu Y., Zhang P., Yang F., Interlaminar stress distribution of composite laminated plates with functionally graded fiber volume fraction, *Mater Design*, Vol. 31, No. 6, pp. 2904-2915, 2010.
- [26] Frank E., Hermanutz F., and Buchmeiser M. R., Carbon fibers: precursors, manufacturing, and properties, *Macromol Mater Eng*, Vol. 297, No. 6, pp. 493-501, 2012.
- [27] Shokrieh M. M., *Residual stresses in composite materials*, Woodhead Publishing, Cambridge, 2014.