

# SID



سرویس های ویژه



سرویس ترجمه تخصصی



کارگاه های آموزشی



بلاگ مرکز اطلاعات علمی



سامانه ویراستاری STES



فیلم های آموزشی

## کارگاه های آموزشی مرکز اطلاعات علمی



مقاله نویسی علوم انسانی



اصول تنظیم قراردادها



آموزش مهارت های کاربردی در تدوین و چاپ مقاله

# بررسی تأثیر افزایش نانولوله کربنی بر خواص مکانیکی پیش‌آغشته الیاف شیشه/رزین اپوکسی مورد مصرف در پرّه توربین بادی

ساینا رضانژاد، مهرنوش هور، حمزه جودت، حامد شعبانی

گروه پژوهشی مواد غیرفلزی

پژوهشگاه نیرو

تهران، ایران

## ۱. مقدمه

پیش‌آغشته‌ها ترکیبی از رزین و تقویت‌کننده‌اند که به صورت پارچه‌های بافته شده<sup>۱</sup>، پارچه‌های نمدی<sup>۲</sup>، دسته الیاف تنبیده<sup>۳</sup> و کاغذهای آغشته به رزین تولید می‌شوند. این مواد به صورت توپهای پارچه، نوار، ورقه یا صفحات و الیاف خردشده موجود هستند که توسط پیش‌آغشته‌سازی پارچه‌های بافته شده، انواع کاغذ، الیاف پیوسته و یا خرد با رزین در شرایط کنترل‌شده تهیه می‌شوند [۱].

در تولید پیش‌آغشته‌ها اغلب از رزینهای گرماسخت نظیر پلی‌استرها، وینیل‌استرها، اپوکسی و برخی رزینهای گرمانرم استفاده می‌گردد. رزین‌های اپوکسی، به دلیل مقاومت عالی شیمیایی، فیزیکی و مکانیکی و خستگی، از پرمصرف‌ترین رزینها در تولید پیش‌آغشته‌ها به خصوص پیش‌آغشته‌های مورد استفاده در ساخت پرّه‌های توربین بادی هستند [۲]. در فرآیند تولید پیش‌آغشته، ابتدا تقویت‌کننده به رزین آغشته شده و پس از گرفتن رزین اضافه، از یک خشک‌کن عبور داده می‌شود. در این قسمت حلال تبخیر شده و واکنش شبکه‌ای شدن رزین به طور جزئی پیشرفت می‌کند. به عبارت دیگر پیوندهای عرضی جزئی بین زنجیره‌های پلیمری به وجود آمده و جرم ملکولی پلیمر افزایش یافته و رزین در مرحله ب<sup>۴</sup> قرار می‌گیرد. فرآیند پیش‌آغشته‌سازی، رزینهای گرماسخت در مرحله الف به تقویت‌کننده اضافه می‌شوند و سپس در اثر گرما و ایجاد تعدادی

چکیده — در تحقیق حاضر، تأثیر افزودن نانولوله کربنی بر تقویت خواص مکانیکی پیش‌آغشته اپوکسی/الیاف شیشه بررسی گردیده است. با توجه به سهولت کاربری و نیز توجیه اقتصادی قابل قبول، استفاده از محصولات پیش‌آغشته در تولید قطعات کامپوزیتی در حال توسعه روزافزونی می‌باشد. بسته به نوع مصرف، پیش‌آغشته‌ها از ترکیب انواع الیاف و رزینهای پلیمری قابل تولید هستند.

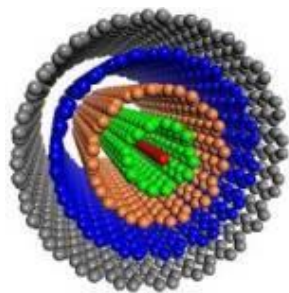
رزینهای اپوکسی به دلیل خواص مکانیکی و پایداری حرارتی و محیطی بالا، از مهمترین رزینهای مورد استفاده در ساخت پیش‌آغشته‌های پرّه توربین بادی هستند. لیکن خواص مکانیکی رزینهای پلیمری به تنهایی پاسخگوی مقاومت مورد نیاز پرّه‌های توربین بادی نمی‌باشد. تحقیقات انجام شده در چند دهه اخیر، نشان‌دهنده افزایش قابل توجهی در خواص مکانیکی به واسطه افزایش تقویت‌کننده‌های نانومتری می‌باشد. لذا در تحقیق حاضر، به امکان‌سنجی استفاده از افزودنی نانولوله کربنی جهت افزایش در خواص مکانیکی پیش‌آغشته پرّه توربین باد پرداخته شده است. نتایج بدست آمده از آزمونهای فیزیکی و مکانیکی انجام شده، نشان‌دهنده افزایش ۱۰٪ در خواص مکانیکی نمونه تولید شده با افزودنی نانولوله کربنی در مقایسه با نمونه ابتدایی (فاقد نانولوله) بوده است.

واژه‌های کلیدی — رزین اپوکسی، انیدرید، نانولوله کربنی، DSC

مقاومت کششی، مقاومت خمشی

- 1 . Woven Roving
- 2 . Mat
- 3 . Roving
- 4 . B-Stage

تولید ارزان‌تر می‌باشد) باعث شده که در دهه گذشته شاهد تحقیقات مهمی در کارایی و پرباری روش‌های رشد نانولوله‌ها باشد. کشف نانوله‌های چند دیواره (شکل (۱)) در سال ۱۹۹۱، موجب شده است که فعالیت‌های تحقیقاتی گسترده‌ای در علوم به بحث نانو ساختارهای کربنی و کاربردهای آنها اختصاص یابد. دلیل عمده این مسئله تکامل ساختاری مورد انتظار آنها، اندازه کوچک، چگالی کم، سختی بالا، استحکام بالا (استحکام کششی خارجی ترین جداره ی یک نانولوله کربنی چند دیواره تقریباً ۱۰۰ برابر بیشتر از آلومینیوم است) و خواص عالی الکتریکی آنهاست.



شکل (۱): نانولوله کربنی چند دیواره [۵]

با توجه به مطالب ذکر شده، در این مقاله، به بررسی تأثیر نانولوله کربنی بر مقاومت مکانیکی پیش‌آغشته پرداخته شده است.

پیوند عرضی به مرحله ب می‌رسند. با توجه به لزوم پراکنش مناسب تقویت‌کننده نانومتری در رزین، عموماً این دسته از افزودنی‌ها نیز در مرحله (الف) و پیش از آغشته‌سازی به رزین اضافه می‌شوند [۳]. در میان خواص مکانیکی برای پیش‌آغشته‌های مورد مصرف در پره توربین باد، مقاومت کششی و خمشی به عنوان معیاری اولیه که به سهولت قابل اندازه‌گیری بوده است، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۴]. خصوصیات یک پیش‌آغشته بستگی زیادی به نوع رزین و تقویت‌کننده دارد. مشخصات مکانیکی به نوع، میزان و جهت‌یابی تقویت‌کننده وابسته می‌باشد

در جدول (۱) ویژگی‌های چند پیش‌آغشته که در آنها از الیاف بهبودیافته<sup>۵</sup> استفاده شده، نشان داده شده است. داده‌های جدول مربوط به چندلایه‌ای<sup>۶</sup> به ضخامت  $0.317 \pm 0.025$  cm است.

همان‌گونه که از جدول برمی‌آید، تنها چندلایه‌ای رزین فنولیک دارای مقاومت کششی بالاتر از اپوکسی می‌باشد. این برتری خواص به اندازه ۱۳٪ در خواص کششی می‌باشد.

در جدول (۲) خواص مکانیکی چندلایه دارای رزین اپوکسی و الیاف مختلف با یکدیگر مقایسه گردیده است.

با توجه به این داده‌ها نیز، مقاومت کششی نمونه رزین با الیاف آرامید در مقایسه با الیاف شیشه تنها ۳٪ افزایش می‌یابد. این رقم برای الیاف کربنی و رزین اپوکسی تا ۱۳٪ افزایش یافته است.

با شروع تحقیقات در زمینه استفاده از افزودنی‌ها و تقویت‌کننده‌های نانومتری در ماتریسهای پلیمری در دهه‌های اخیر، قابلیت شگفت‌انگیز آنها در افزایش خواص فیزیکی و مکانیکی حتی در مقادیر اندک استفاده از نانوذره به خوبی مشاهده گردید.

لذا در سالهای اخیر، تمایل زیادی در اکثر فعالیتهای تحقیقاتی و حتی تجاری و صنعتی جهت استفاده از نانوذره جهت اصلاح خواص محصولات پلیمری پدیدار شده است.

در میان انواع مختلف نانوذرات مورد استفاده در نانوکمپوزیتهای پلیمری، نانولوله‌های کربنی همواره مورد توجه بوده‌اند. خواص ویژه و منحصر به فرد آن از جمله مدول پانگ بالا و استحکام کششی خوب از یک طرف و طبیعت کربنی بودن نانولوله‌ها (به خاطر این که کربن ماده‌ای است کم وزن، بسیار پایدار و ساده جهت انجام فرایندها که نسبت به فلزات برای

5 . Improved

6 . Hybrid

بررسی تأثیر افزایش نانولوله کربنی بر خواص مکانیکی پیش‌آغشته الیاف شیشه/رزین اپوکسی مورد مصرف در پره توربین بادی

دومین کفرانس تخصصی فناوری نانو در صنعت برق و انرژی - ۱۳۹۳ تهران، ایران

جدول (۱): مقایسه ویژگیهای چند پیش‌آغشته با الیاف بهبودیافته [۶]

روش قالبگیری	پای استر	پلی استر	اپوکسی	فشرده
	کیسه‌ای تحت خلأ	کیسه‌ای تحت خلأ	فشاری ۵۰ psi	فشاری ۱۰۰ psi
	پارچه الیاف شیشه (الف)	(ب) پخت ماورای بنفش پارچه الیاف شیشه	پارچه الیاف شیشه	پارچه الیاف شیشه
تقویت کننده میران رزین (%)	۳۶/۰	۳۴/۵	۳۰/۸	۲۲/۶
نتایج آزمون در دمای محیط	۹۶۰۰۰	۹۷۲۰۰	۱۱۴۰۰۰	N/R
استحکام خمشی (psi)	۳/۸	۳/۲	۴/۴	N/R
مدول خمشی $\times 10^6$ (psi)	۷۱۰۰۰	۶۴۰۰۰	۸۱۵۰۰	۹۲۴۰۰
استحکام کششی (psi)	۶۰۰۰۰	۶۷۲۰۰	۶۶۶۰۰	۶۱۰۰۰
استحکام فشاری لیمای (psi)				
نتایج آزمون پس از ۲ ساعت در آب جوش	۹۱۰۰۰	۹۴۷۰۰	۱۰۴۲۰۰	N/A
استحکام خمشی (psi)	۵۴۰۰۰	۶۵۵۰۰	N/R	N/A
استحکام کششی (psi)	۴۸۰۰۰	۶۲۰۰۰	N/R	N/A
استحکام فشاری لیمای (psi)	N/R	۳۲۰۰	—	N/A
برش پیوند بین لایه‌ای (psi)	N/R	N/R	۸۰۴۰	N/A
برش تیغه کوتاه (psi)				
نتایج آزمون پس از ۱/۲ hr غوطه‌وری در ۱۳۰°C	—	—	۴۱۰۰۰	—
استحکام خمشی (psi)	—	—	۲/۳۳	—
مدول خمشی (psi)	—	—	۵۱۶۰۰	—
استحکام کششی (psi)				
نتایج آزمون پس از ۱/۲ hr غوطه‌وری در ۴۲۰°C	N/A	N/A	N/A	۷۸۶۰۰
استحکام کششی (psi)	N/R	N/R	N/R	۲۱۶۰۰
استحکام فشاری لیمای (psi)				

(الف) - پارچه الیاف شیشه / DMS/96 / 90A1

جدول (۲): خواص مکانیکی کامپوزیت‌های دارای الیاف متفاوت [۷]

Composites						
Type	Volume fraction $V_f$	Orientation $\theta$	Stiffness $E_c$ GPa	Tensile strength $\sigma_c$ MPa	Density $\rho_c$ g/cm <sup>3</sup>	Merit $E_c^{1/3}/\rho_c$
Glass-E	0.5	0°	38	1800	1.87	3.3
	0.3	Random	9.3	420	1.60	1.9
Carbon	0.5	0°	176	2050	1.49	8.9
	0.3	Random	37	470	1.37	4.4
Aramid	0.5	0°	61	1850	1.33	5.9
	0.3	Random	14.1	430	1.27	2.9
Polyethylene	0.5	0°	60	1350	1.09	7.1
	0.3	Random	13.8	330	1.13	3.3
Cellulose	0.5	0°	41	550	1.35	4.7
	0.3	Random	10.1	170	1.29	2.5

- رزین اپوکسی ۸۲۸ Epikote محصول شرکت Shell (Momentive) با وزن هم‌ارز اپوکسی ۱۹۲-۱۸۵.

- عامل پخت انیدریدی HA-23 محصول شرکت مهندسی مکرر

- شتاب‌دهنده آمینی نوع سوم AX-10 محصول شرکت مهندسی مکرر

## ۲. فعالیت‌های تجربی

### ۱.۲. مواد مورد استفاده

در این تحقیق از مواد به شرح ذیل جهت تولید نمونه‌ها استفاده گردیده است:

بررسی تأثیر افزایش نانولوله کربنی بر خواص مکانیکی پیش‌آغشته الیاف شیشه/رزین اپوکسی مورد مصرف در پرّه توربین بادی

دومین کنفرانس تخصصی فناوری نانو در صنعت برق و انرژی - ۱۳۹۳ تهران، ایران

شایان ذکر است پس از تهیه مخلوط رزین و عامل پخت، این مخلوط تحت آنالیز DSC قرار داده شده و دمای پخت از طریق تحلیل قله به دست آمده در نمودار این آزمون محاسبه می‌گردد.

پس از اندازه‌گیری دمای پخت، آمیزه در قالبهای سیلیکونی مخصوص ریخته‌گری شده و ضمن قرار دادن درون آون، در دمای معین، به مدت معینی پخت گردید. قطعات بدست آمده از این مرحله سپس تحت آزمون مقاومت کششی و خمشی قرار داده شدند.

پس از اندازه‌گیری مقاومت کششی نمونه‌های رزین خالص، نمونه‌هایی از پیش‌آغشته الیاف شیشه/اپوکسی و نیز الیاف شیشه/اپوکسی/نانولوله کربنی به روش آغشته‌سازی دستی و قالبگیری در خلاء و دمای بدست آمده از آزمون DSC، تهیه شده و قطعات کامپوزیتی حاصل، پس از پخت کامل، تحت آزمونهای کشش و خمش قرار داده شدند.

### ۳. نتایج و بحث

#### ۱.۳. بررسی رفتار حرارتی (پخت)

در این بخش، ضمن انجام آزمون تحلیل حرارتی بر روی آمیزه تهیه شده، رفتار پخت آن بررسی گردیده و نتایج به شرح شکل (۲) و جدول (۴) بدست آمد.

با بررسی نمودار فوق، نقاط شروع و اوج قله در منحنی به شرح جدول (۳) اندازه‌گیری گردید.

جدول (۳): نتایج بدست آمده از آزمون DSC

نقطه شروع قله (°C)	نقطه اوج قله (°C)	کد نمونه
۱۱۱	۱۳۲	Anhydride

بنابر اطلاعات بدست آمده از نتایج این آزمون، دمای پخت نمونه پخت شده با انیدرید برابر ۱۱۰ درجه سانتیگراد انتخاب گردید.

- حلال متیل اتیل کتون (MEK) محصول شرکت Prolabo.
- نانولوله کربنی تهیه شده از شرکت Neutrino
- الیاف شیشه تک‌جهته با وزن سطحی ۸۰۰ گرم بر مترمربع

### ۲.۲. دستگاههای آماده‌سازی و آزمون

دستگاههای مورد استفاده جهت تولید و تعیین مشخصه نمونه‌ها به شرح ذیل هستند:

- همزن برقی تولید داخل جهت اختلاط رزین و عامل پخت.
- دستگاه اولتراسونیک جهت پراکنش ذرات نانولوله در حلال
- دستگاه آنالیز DSC محصول شرکت ZUFA جهت اندازه‌گیری دمای پخت نمونه، در این آزمون نمونه‌ها از دمای محیط تا دمای ۳۰۰ درجه سانتیگراد با سرعت ۵ درجه سانتیگراد بر دقیقه گرم شدند.
- دستگاه آزمون کشش و خمش SANTAM جهت اندازه‌گیری مقاومت کششی و خمشی مطابق استانداردهای ملی ۶۶۲۱ و ۳۵۷ مورد استفاده قرار داده شد.

### ۳.۲. روش ساخت

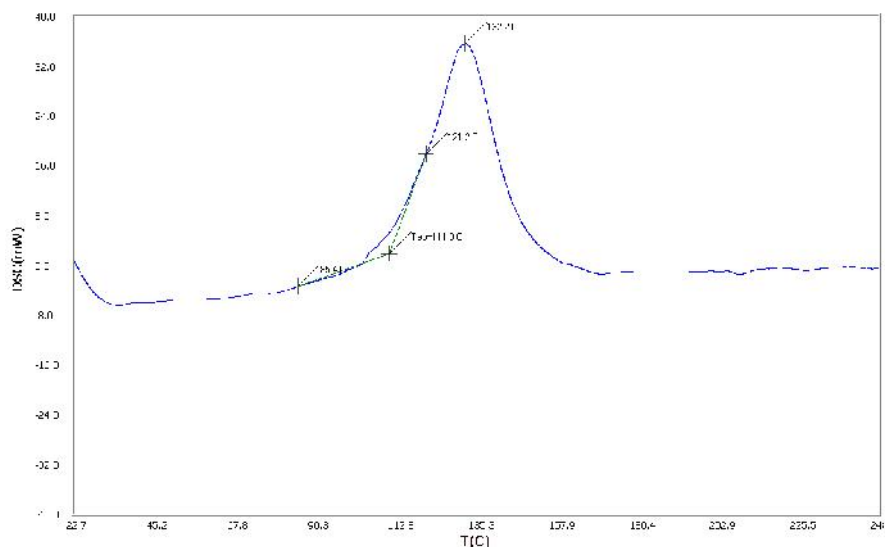
در ابتدا ذرات نانولوله به میزان ۰/۵ phr پس از تورین به حلال اضافه شده و به مدت ۳۰ دقیقه در دستگاه اولتراسونیک قرار داده شدند. پس از پراکنش ذرات در حلال، مخلوط حاصل به رزین به رزین اضافه شده و توسط همزن به مدت ۳۰ دقیقه با دور ۵۰۰ rpm همزده شدند.

در مرحله بعد، عامل پخت HA-23 به میزان ۸۵/۵ phr به محلول اضافه و همزده شد. پس از انحلال کامل مواد، شتاب‌دهنده آمینی Ax-10 به میزان ۰/۵ phr به مخلوط اضافه شده و همزده می‌شود. شایان ذکر است در مراحل تولید نمونه رزین خالص و نیز پیش‌آغشته فاقد نانولوله، حلال به تنهایی (بدون افزایش نانولوله) به رزین افزوده می‌شود.

با توجه به مایع بودن انیدرید، اختلاط آن با رزین پیچیده نبوده و با دستگاه همزن ساده امکانپذیر است.

بررسی تأثیر افزایش نانولوله کربنی بر خواص مکانیکی پیش‌آغشته الیاف شیشه/رزین اپوکسی مورد مصرف در پرّه توربین بادی

دومین کفرانس تخصصی فناوری نانو در صنعت برق و انرژی - ۱۳۹۳ تهران، ایران



شکل (۲): منحنی بدست آمده از آزمون DSC



شکل (۳): نمایی از نحوه تولید کامپوزیت توسط آغشته‌سازی درجا

### ۲.۳ ساخت نمونه‌های کامپوزیتی

پس از اندازه‌گیری دمای پخت آمیزه مذکور، نمونه‌های آزمون کشش و خمش ضمن ریخته‌گری رزین در قالبهای سیلیکونی مربوطه و سپس پخت در آون در دمای اندازه‌گیری شده تهیه گردیدند. جهت تهیه نمونه‌های کامپوزیتی، ابتدا الیاف تک‌جهته در ابعاد  $30 \times 30$  سانتی متر مربع (قالب مربوطه) برش داده شده و درون قالب قرار داده شدند سپس مخلوط رزین بر روی الیاف اضافه شده و توسط غلتک دستی، عملیات آغشته‌سازی پیش برده شد.

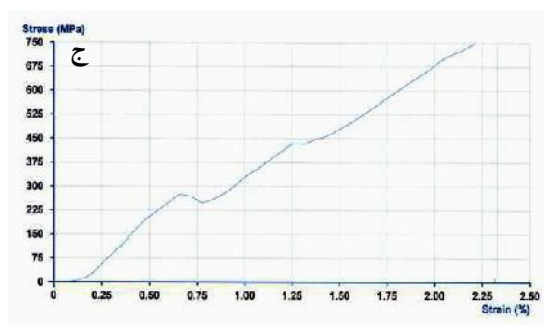
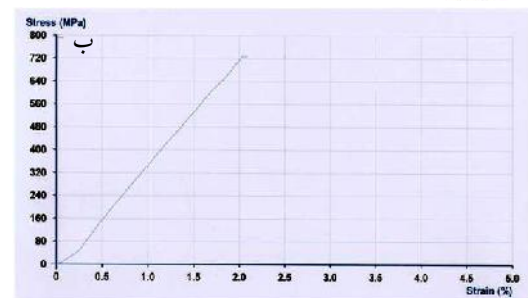
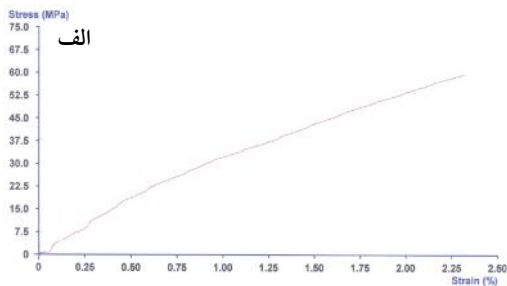
در نهایت با اعمال خلاء بر نمونه بدت آمده، حبابهای هوای محبوس در بین لایه‌های مختلف حذف گردیده و عملیات آغشته‌سازی تکمیل گردید. با اعمال حرارت به نمونه درون قالب به میزان  $120^\circ\text{C}$  درجه سانتیگراد به مدت ۶۰ دقیقه نمونه‌های کامپوزیتی تولید و تحت آزمون مکانیکی قرار داده شد. پس از پخت کامل، نمونه‌های نواری شکل با استفاده از دستگاه برش مجهز به مته الماس از آن برش داده شد. ابعاد نمونه نواری مطابق استاندارد ASTM D3039،  $250 \times 15$  میلی متر بوده و ضخامت آن به اندازه ضخامت صفحه تهیه شده می باشد.

شکل (۳) نمایی از نحوه تولید کامپوزیت را نمایش می‌دهد.

### ۳.۳ ارزیابی مقاومت‌های کششی و خمشی

با توجه به نیروی بالای لازم برای شکست الیاف، نیروی فشاری زیادی برای نگه‌داری قطعه در فک‌ها مورد نیاز است که به دلیل پایین بودن مقاومت فشاری در نمونه‌های کامپوزیتی تک‌جهته خرد شدگی را در محل اتصال با فک‌ها به ارمغان خواهد داشت. لذا در اکثر استانداردهای آزمون کشش، استفاده از فک‌گیرهای آلومینومی جهت قرار دادن در فصل مشترک نمونه و فک دستگاه توصیه گردیده است.

از دیداد طول در نقطه پارگی برای نمونه‌ها به شرح جدول (۴) اندازه‌گیری گردید.



نمودار (۵): نتایج آزمون کشش برای نمونه پخت‌شده با الف-رزین خالص ، ب-الیاف شیشه/رزین و ج-الیاف شیشه/رزین/نانولوله کربنی

جدول (۴): استحکام و مدول کششی و خمشی و نیز ازدیاد طول در هنگام پارگی برای نمونه پخت‌شده با الف-رزین خالص ، ب-الیاف شیشه/رزین و ج-الیاف شیشه/رزین/نانولوله کربنی

کد نمونه	استحکام کششی (Mpa)	مدول کششی (Gpa)	مدول خمشی (Mpa)	ازدیاد طول در هنگام پارگی (%)
الف	۵۹/۵	۳/۶	۱۲/۹	۲/۲۲
ب	۷۲۳	۳۶	۱۷/۴	۲/۵۷
ج	۷۷۴	۴۵	۱۹/۲	۳/۲

با توجه به اینکه نمونه کامپوزیتی مجهز به فک گیرهای آلومینومی در هنگام کشش، از محل اتصال با گیره ها دچار تمرکز تنش شدید می گردد که این پدیده شکست زودرس در نمونه در محل اتصال با فک (محل زوال نامناسب) را به دنبال دارد، زاویه دار کردن این فک گیره ها مورد توجه قرار گرفته است [۸]. در تحقیق حاضر از دو دسته فک گیرهای آلومینومی زاویه دار شده با دستگاه فرز به ترتیب با زوایای ۱۰ و ۱۵ درجه و به ابعاد ۷۵×۱۵ میلیمتر مربع و ۶۵×۱۵ میلی متر مربع تهیه گردیده و توسط چسب سیانیدی بر روی نمونه محکم شد.

شکل (۴) نمایی از این فک گیرها و نحوه قرار گیری آنها بر روی نمونه را نمایش می دهد.



شکل (۴): نمایی از فک گیرها و نحوه قرار گیری آنها بر روی نمونه

سرعت انجام آزمون این نمونه ها طبق استاندارد ASTM D3039 ، ۵ mm/min بوده و نتایج بدست آمده در ادامه برای نمونه تهیه شده نمایش داده شد.

نحوه آماده سازی نمونه های خمش نیز کاملا مشابه با نمونه های کشش است. تنها تفاوت در ابعاد نمونه ها است. ابعاد این نمونه ها ۸×۱۰ میلی متر مربع بوده و ضخامت آنها به اندازه ضخامت صفحه کامپوزیتی است.

سرعت انجام آزمون در این نمونه ها ۵ mm/min بوده و نتایج بدست آمده در ادامه برای نمونه های تهیه شده نمایش داده شد.

منحنی تنش - کرنش بدست آمده از آزمون مقاومت کششی و خمشی برای نمونه های الف، ب و ج (رزین خالص، الیاف شیشه/رزین و الیاف شیشه/رزین/نانولوله) به ترتیب در نمودارهای (۵) و (۶) نمایش داده شده است. با بررسی این نمودارها، استحکام و مدول کششی و خمشی، به همراه

بررسی تأثیر افزایش نانولوله کربنی بر خواص مکانیکی پیش‌آغشته الیاف شیشه/رزین اپوکسی مورد مصرف در پرده توربین بادی

دومین کفرانس تخصصی فناوری نانو در صنعت برق و انرژی - ۱۳۹۳ تهران، ایران

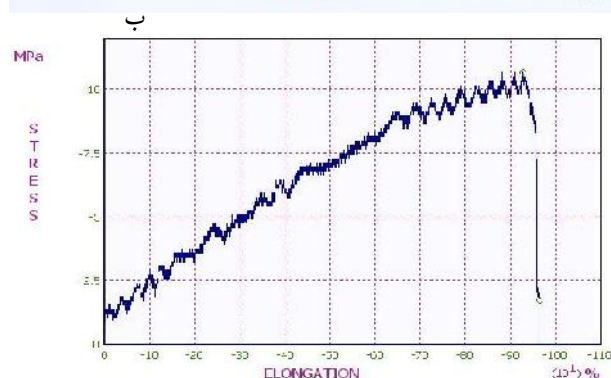
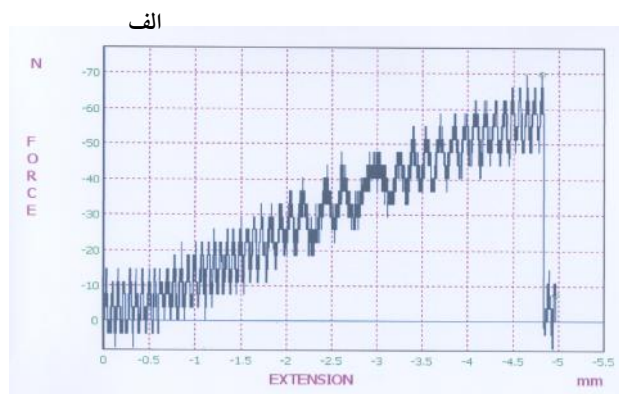
## ۴. نتیجه گیری

نتایج بدست آمده از این تحقیق به شرح ذیل خلاصه می‌گردد:

- ۱- افزایش نانولوله کربنی به مقدار ۰/۵ phr، منجر به افزایش ۲۵٪ مدول کششی، ۱۰٪ مدول خمشی و ۷٪ مقاومت کششی نسبت به نمونه فاقد نانولوله کربنی شده است.
- ۲- افزایش مقاومت کششی نمونه‌های کامپوزیتی تهیه شده با نانولوله کربنی می‌تواند با تأثیر تغییر نوع رزین و همچنین تقویت‌کننده بر خواص قابل مقایسه باشد.
- ۳- تأثیر نانولوله کربنی بکار رفته بر میزان ازدیاد طول در نقطه پارگی نمونه ناچیز بوده است.

## منابع

- [1] Laminate & Prepreg Manufacturing, <http://www.ica-inc.com/images/Tutorial Understanding The PCB Laminate and Prepreg Process.pdf>, 2012/10/16.
- [2] Selection of Wind Turbine Blade Materials for Fatigue Resistance, John Mandell, The American Ceramics Society, Materials Challenges in Alternative and Renewable Energy 2010, Cocoa Beach, FL, February 24, 2010.
- [3] پلاستیکهای تقویت‌شده (کامپوزیتها)، محمدحسین بهشتی، امیرمسعود رضادوست، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، ۱۳۸۴.
- [4] [www.advanced-composites.co.uk/SM1010](http://www.advanced-composites.co.uk/SM1010), "An Introduction to Advanced Composites and Prepreg Technology", 2012.
- [5] Valentin N. Popov, "Carbon Nanotubes, Properties and Application", Materials Science and Engineering R. 43, pp. 61-102, 2004.
- [6] علوم و تکنولوژی پیش‌آغشته‌ها، محمدحسین بهشتی، علیرضا حیدری، دوماهنامه انجمن پلیمر ایران، شماره ۱، ۱۳۷۰، صفحه ۳۴-۴۷.
- [7] [www.slideserve.com/lola/blade-materials](http://www.slideserve.com/lola/blade-materials), "Blade Materials", Prof. Mike Kessler, 2012.
- [8] Tabbing Guide For Composites Test Speciment, National Technical Information Service (NTIS) October 2002, Springfield, Virginia 22161. Office of Aviation Research Washington, D.C. 20591.



نمودار (۶): نتایج آزمون مقاومت خمشی برای نمونه پخت شده با الف-رزین خالص، ب-الیاف شیشه/رزین و ج-الیاف شیشه/رزین/نانولوله کربنی

با توجه به داده‌های جدول و منحنی‌ها، حضور نانوذرات مدول کششی را ۲۵٪، مدول خمشی و مقاومت کششی را به ترتیب ۱۰٪ و ۷٪ نسبت به نمونه خالص افزایش داده است. با این نتایج می‌توان به تأثیر مثبت نانوذره در تقویت فصل مشترک الیاف-زمینه و افزایش انتقال تنش از رزین به زمینه اشاره نمود.



# SID



سرویس های ویژه



سرویس ترجمه تخصصی



کارگاه های آموزشی



بلاگ مرکز اطلاعات علمی



سامانه ویراستاری STES



فیلم های آموزشی

## کارگاه های آموزشی مرکز اطلاعات علمی



مقاله نویسی علوم انسانی



اصول تنظیم قراردادها



آموزش مهارت های کاربردی در تدوین و چاپ مقاله