

مقایسه رفتار صوتی - مکانیکی ماده مرکب پایه اپوکسی تقویت شده با الیاف

شیشه و پلی پروپیلن

جهان تقی‌زاده*

استادیار گروه مکانیک

دانشگاه صنعتی قم

taghizadeh@qut.ac.ir

رضا بابازاده تبلی

گروه مکترونیک، دپارتمان الکترونیک، کامپیوتر و فناوری

اطلاعات

دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین

r.babazadeh@qiau.ac.ir

عباس تلخایی

دانشجوی کارشناسی ارشد ساخت و تولید

دانشگاه صنعتی قم

talkahbi.a@qut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۳/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۶/۱۹

چکیده

در این تحقیق رفتار صوتی - مکانیکی کامپوزیت‌های پایه اپوکسی با توجه به مشخصات نوع الیاف مورد بررسی قرار گرفته که برای این منظور الیاف پلی پروپیلن از خانواده آلی و الیاف شیشه از خانواده غیر آلی در نظر گرفته شده است. به طوری که جهت تعیین رفتار مکانیکی نمونه، پارامترهای الیاف مانند جهت گیری، طول، شکل، درصد حجمی، چگالی، ماهیت سطح مشترک مطابق استاندارد بررسی و سپس رفتار صوتی نمونه، تحت بارگذاری کششی، مورد بررسی قرار گرفته است. بدین معنی که اثر سرعت بارگذاری و مقدار نیروی اعمالی کشش استاندارد بر پارامترهای رفتار صوتی نمونه همانند دامنه، فرکانس، انرژی صوتی به دست آمده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که الیاف پلی پروپیلن نسبت به شیشه در رزین اپوکسی، رفتار مکانیکی بهتری دارند. لیکن برای حصول نتیجه ایده‌آل‌تر، تلفیقی از الیاف پلی پروپیلن و شیشه به صورتی که شیشه در سطح خارجی و پلی پروپیلن در مرکز نمونه قرار گیرد، توصیه می‌شود.

واژگان کلیدی: شیشه، پلی پروپیلن، اپوکسی، بارگذاری کششی، رفتار کامپوزیت

۱. مقدمه

کامپوزیت و خواص لازم انتخاب می‌شود. مهمترین توقع از زمینه این است که بتواند به خوبی به ساختارهای دیگر بچسبد و آنها را کنار هم نگه دارد که در این صورت تنش از طریق

طبق نظر ماک نیل، زمینه در کامپوزیت‌ها محافظ ترکیب است و شکلی توده‌ای و پیوسته به نمونه می‌دهد که می‌تواند از فلزات، پلیمرها یا سرامیک‌ها باشد و با توجه به نوع

زمینه به الیاف منتقل و تقریباً تا زمانی که تنش وارده از استحکام الیاف کمتر باشد، کامپوزیت چقرمگی نشان می‌دهد. از طرفی براساس تعاریف لوین، زمینه را با پر کردن به واسطه الیاف^۲، می‌توان تقویت کرد. به‌طور عام الیاف به دو دسته آلی^۳ (مانند سلولز، پلی پروپیلن، پلی استر، پلی آمید و گرافیت) و غیر آلی^۴ (مانند شیشه، بورن، بریلوم) تقسیم می‌شوند و بالطبع هر گروه خواص ویژه‌ای دارند؛ به‌عنوان مثال الیاف آلی سبک بوده و انرژی را به‌خوبی جذب می‌کنند ولی الیاف غیرآلی سنگین بوده ولیکن استحکام، صلیبت و مقاومت حرارتی بالایی دارند [۱-۲].

در این تحقیق جهت مقایسه رفتار مکانیکی و صوتی از الیاف پلی پروپیلن جدیدی به نام پلی پروپیلن فوق سنگین وزن مولکولی^۵ متعلق به خانواده آلی و الیاف شیشه نوع E^۶ متعلق به خانواده غیر آلی در زمینه اپوکسی L160 استفاده شده است. الیاف شیشه، معروف‌ترین تقویت‌کننده در صنعت کامپوزیت است که انواع مختلف آن، به‌صورت تجاری وجود داشته و هر کدام برای کاربرد خاصی مناسب است. این الیاف استحکام و سختی مناسبی داشته و خواص مکانیکی خود را در دماهای بالا حفظ می‌کند. همچنین علاوه بر ارزان بودن؛ مقاومت در برابر خوردگی، رطوبت و سازگاری با زمینه اپوکسی از ویژگی‌های برجسته آن است. اما براساس نظر برین از دهه ۶۰ میلادی تاکنون الیاف پلی پروپیلن معمولی وجود داشته که مشخصه‌ی برجسته آن قطبیت ناهمسانش با رزین اپوکسی می‌باشد که چسبندگی ضعیفی در سطح مشترک ایجاد می‌کند، بنابراین وجود کامپوزیت پلی پروپیلن/ اپوکسی عملاً قابل توجیه نیست.

این مشکل در ماه می ۲۰۰۴ میلادی با انجام عملیات پر هزینه‌ی خاصی روی سطح الیاف به‌طور آزمایشگاهی مرتفع گردید [۳]. در حال حاضر الیاف پلی پروپیلنی از نوع UHMWPP چند سالی هست که وارد صنایع چند کشور پیشرفته شده، که این مسئله و همچنین ویژگی‌های ممتاز و

منحصر به‌فرد این الیاف، ضرورت شناخت رفتار مکانیکی این الیاف را ایجاب می‌نماید.

از آنجایی که شناخت رفتار حین بار^۷ نمونه فقط با تکنیک پخش آوایی مقدور است [۴]. بنابراین با استفاده از تلفیق بارگذاری مکانیکی و دستگاه پخش آوایی، می‌توان به اطلاعات مفیدی از جمله تطابق یا تضاد رفتار صوتی و رفتار مکانیکی کامپوزیت و یا ساختارهای تشکیل دهنده آن مستقیماً یا با تحلیل و تفسیر پی برد. در جدول ۱ خصوصیات رزین اپوکسی و الیاف به ترتیب طبق اسناد شرکت آلمانی هگزن^۸ و شرکت آمریکایی ان نگرتی^۹ ارائه شده است.

کارگر- کوکسیز و همکاران معتقدند که مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده رفتار کامپوزیت های الیافی جهت گیری الیاف، طول الیاف، شکل الیاف، منشا سازنده الیاف، خواص زمینه، الیاف و ماهیت اتصال آن دو می‌باشد. از طرفی عامل اصلی تعیین‌کننده استحکام کامپوزیت برای بیشینه تحمل، موقعیت و جهت الیاف می‌باشد، به‌طوری‌که در تقویت تک جهتی تقریباً تمامی الیاف در یک جهت معین قرار می‌گیرند و چون فضای بین الیاف به حداقل می‌رسد، میزان زمینه مصرف شده نیز حداقل خواهد شد و خواص کامپوزیت به الیاف مشابهت بیشتری خواهد داشت [۵].

به‌طور عام می‌توان گفت در چیدمان ۹۰ درجه پس از شکست رزین، بیشترین مود آسیب جدایش الیاف از زمینه و در چیدمان صفر درجه پس از شکست رزین، بیشترین مود آسیب بسته به ماهیت الیاف پول اوت یا شکست فیبر خواهد بود و در حد فاصل مابین صفر و ۹۰ درجه تمامی مودهای آسیب ذکر شده با نرخ متفاوت وجود خواهد داشت. بنابراین بررسی تاثیرات زوایای چیدمان الیاف در هر مورد خاص ضروری است [۶].

جدول ۱. مشخصات فیزیکی و مکانیکی رزین اپوکسی و الیاف

شیشه و الیاف پلی پروپیلن [۶]

اپوکسی L160	مشخصات فیزیکی و مکانیکی	
۱/۱۸-۱/۲	چگالی (گرم بر سانتی متر مکعب)	
۳/۲-۳/۵	مدول یانگ (گیگا پاسکال)	
۵-۶/۵	نرخ افزایش طول قبل از شکست (%)	
۰/۱-۰/۲	جذب رطوبت در دمای محیط در یک شبانه روز	
۷۰-۸۰	استحکام کششی (مگا پاسکال)	
۸۰-۱۰۰	استحکام فشاری (مگا پاسکال)	
۱۱۰-۱۴۰	استحکام خمشی (مگا پاسکال)	
۴۰-۵۰	استحکام به ضربه (کیلو ژول بر متر مربع)	

الیاف پلی پروپیلن	الیاف شیشه	مشخصات فیزیکی و مکانیکی
۰/۶۷	۲/۵	چگالی (گرم بر سانتی - متر مکعب)
۱۷	۷۴	مدول یانگ (گیگا پاسکال)
۸	۱/۵	نرخ کرنش قبل از شکست (%)
۵۹۰	۲۱۵۰	استحکام کششی نهایی (مگا پاسکال)
۰/۰۴	۰/۰۱۳۵	قطر لیف (میلی متر)
۱۰۰	۴۰۰	تعداد لیف در دسته
۱۳۸۰	۲۱۰۰	مدول خمشی (مگا پاسکال)
۰/۴۷	۰/۲	ضریب پواسون
۲	۶/۲	ضریب دی الکتریک
۰/۶	۰/۰۳	چقرمگی ($\frac{g}{d}$)

برین مورین و همکاران بیان می کنند که با توجه به چگالی کم الیاف پلی پروپیلن که ناشی از آلی بودن آن است، کامپوزیت مربوطه سبک تر از سایر کامپوزیت ها با زمینه

مشابه بوده و همچنین به دلیل انعطاف پذیری این الیاف، انرژی به خوبی جذب خواهد شد [۱۴]. از طرفی الیاف شیشه به عنوان یک الیاف غیر آلی و مطابق جدول ۱ چگالی بالاتری داشته و کامپوزیت سنگین تری تولید خواهد کرد که در صنعت به عنوان یک نکته به شمار می رود. با توجه به این مطالب محاسبه مقادیر چگالی کامپوزیت های مورد نظر برای نتیجه گیری های تکمیلی ضروری به نظر می رسد.

۲. سهم الیاف و رزین در تحمل بار

دیگرام تجربی تنش و افزایش طول کامپوزیت های پلی پروپیلن / اپوکسی و شیشه / اپوکسی (شرکت سازه صنعت پژوهش پلیمر-تهران) به ترتیب در بخش الف و ب شکل ۱ مشاهده می شود. که در هر کدام ۲ الی ۳ مرحله قابل تشخیص است: در هر دو کامپوزیت مرحله ۱ مصداق عینی تعریف هم کرنش^{۱۰} می باشد. به این معنی که در مرحله ۱ کرنش برای الیاف و زمینه یکسان و در محدوده الاستیک قرار دارد.

مرحله ۲ در مورد دو کامپوزیت مورد نظر کاملا متفاوت است. به طوری که برای کامپوزیت شیشه / اپوکسی شکست نهایی در این مرحله ایجاد می شود ولیکن برای کامپوزیت پلی پروپیلن / اپوکسی، زمینه به تنش تسلیم رسیده در حالی که الیاف همچنان در منطقه الاستیک تغییر فرم می دهند و برای الیاف این مرحله تا پس از شکست زمینه ادامه می یابد. مرحله ۳ منحصر در کامپوزیت پلی پروپیلن / اپوکسی می تواند اتفاق بیافتد که در آن زمینه شکسته و سفتی اپوکسی به صفر خواهد رسید و عملا الیاف تمامی نیرو را دریافت و تنش در آنها افزایش پیدا می کند. با توجه به نوع زاویه چیدمان الیاف، الیاف شروع به تحمل بار کرده و مودهای مختلف خرابی در ارتباط با فصل مشترک الیاف- زمینه و نهایتا در خود الیاف می تواند اتفاق بیافتد. روابط مربوط به مراحل مختلف برای بعضی از پارامترهای رفتار مکانیکی در ادامه آورده شده است.

$$\sigma_c \cdot A_c = \sigma_m \cdot A_m + \sigma_f \cdot A_f, \quad (2)$$

$$A_c = A_m + A_f$$

$$\sigma_c = \sigma_c \cdot V_c = \sigma_m \cdot V_m + \sigma_f \cdot V_f \quad (3)$$

در ادامه با توجه به تساوی کرنش‌ها رابطه ۳ را می‌توان به صورت زیر نیز نوشت:

$$(4)$$

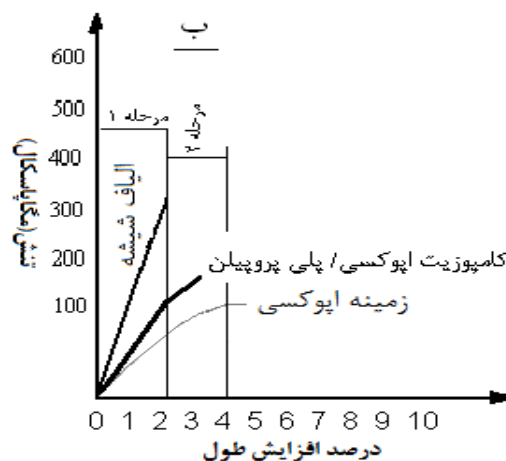
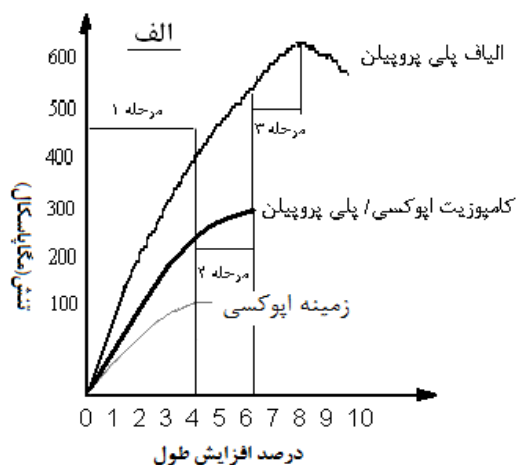
$$\begin{aligned} \frac{\sigma_c}{\varepsilon_c} &= \frac{\sigma_m}{\varepsilon_m} \cdot V_m + \frac{\sigma_f}{\varepsilon_f} \cdot V_f \Rightarrow E_c \\ &= E_m \cdot V_m + E_f \cdot V_f \end{aligned}$$

بار حمل شده توسط الیاف نسبت به زمینه و نسبت به کامپوزیت به ترتیب طبق رابطه ۵ و ۶ قابل محاسبه است. این دو رابطه نشان می‌دهد که برای استفاده موثر از الیاف داشتن یک نسبت بالای $\frac{E_f}{E_m}$ ضروری است.

$$\frac{P_f}{P_m} = \frac{E_f \cdot \varepsilon_f \cdot V_f}{E_m \cdot \varepsilon_m \cdot V_m} = \frac{E_f}{E_m} \left[\frac{V_f}{1 - V_f} \right] \quad (5)$$

$$\frac{P_f}{P_c} = \frac{E_f \cdot \varepsilon_f \cdot V_f}{E_c \cdot \varepsilon_c} = \frac{E_f}{E_m} \left[\frac{V_f}{1 - V_f + \frac{E_f}{E_m} \cdot V_f} \right] \quad (6)$$

مرحله ۲. در این مرحله زمینه به حالت پلاستیک رسیده است ولی الیاف پلی پروپیلن همچنان حالت الاستیک داشته و الیاف شیشه شکسته شده است. دو رابطه ۳ و ۴ هم که برای روابط تنش و کرنش با احتساب مقدار صفر برای الیاف شیشه و با احتساب مقدار تجربی الیاف پلی پروپیلن (E_f) و (V_f) که به سطح تماس رزین و الیاف بستگی دارد، معتبر هستند. تقریباً از ابتدای این مرحله تغییر شکل پلاستیک ماتریس آغاز شده و دیگر خطی نیست. در این حالت مدول



شکل ۱. منحنی تنش-افزایش طول در کامپوزیت های

(الف) پلی پروپیلن / اپوکسی، (ب) شیشه / اپوکسی [۱۷]

مرحله ۱. با توجه به اینکه در موضوع این تحقیق الیاف‌ها بلند و پیوسته در نظر گرفته شده‌اند و کاملاً به موازات هم قرار می‌گیرند، در چیدمان صفر درجه مادامی که ناپیوستگی در زمینه با فصل مشترک آن با ماتریس به وجود نیامده باشد، رفتار زمینه و الیاف هر دو به صورت الاستیک در نظر گرفته می‌شوند. بنابر این تغییر شکل الیاف و زمینه برابر است و خواهیم داشت.

$$\varepsilon_{\text{matrix}} = \varepsilon_{\text{fiber}} \Rightarrow \frac{\sigma_m}{E_m} = \frac{\sigma_f}{E_f} \quad (1)$$

از طرفی بار وارده به کامپوزیت برابر با مجموع بار وارده به رزین و الیاف طبق روابط زیر می‌باشد.

کامپوزیت از رابطه ۷ محاسبه خواهد شد که در آن شیب کامپوزیت $\left(\frac{d\sigma_m}{d\varepsilon_m}\right)_{\varepsilon_f}$ برای بسیاری از کامپوزیت‌ها معادل

$$\left(\frac{d\sigma_m}{d\varepsilon_m}\right)_{\varepsilon_f} \ll \frac{E_m}{100} \quad \text{بوده و به تبع آن رابطه ۸ حاصل}$$

خواهد شد و پیرو این رابطه مدول یانگ کامپوزیت پس از شکست نهایی رزین اپوکسی فقط تابعی از خواص مکانیکی سطح مشترک الیاف و رزین خواهد بود.

$$E_c = E_{f'} \cdot V_{f'} + \left[\frac{d\sigma_m}{d\varepsilon_m}\right]_{\varepsilon_f} \cdot V_m \quad (7)$$

$$E_c \cong E_{f'} \cdot V_{f'} \quad (8)$$

۳. تأثیر جهت چیدمان الیاف در مقاومت شکست

در کامپوزیت الیافی با زاویه ϕ مطابق شکل ۲ و تحت تنش کششی نسبت به امتداد الیاف، سه تنش اهمیت دارد که عبارتند از: تنش نرمال شکست در امتداد الیاف (σ_c)، تنش نرمال شکست عمود بر الیاف (σ_c) و تنش برشی شکست در زمینه (τ_c). جهت احراز تأثیر جهت چیدمان الیاف با در نظر گرفتن روابط مقاومت مصالح در امتدادهای عمود و موازی الیاف رابطه ۹ و با تفسیرهای ویژه مواد مرکب به روابط ۱۰ تا ۱۲ می‌توان دست پیدا کرد.

$$\sigma = -\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\phi + \tau_{xy} \sin 2\phi$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \sigma_x = \frac{\sigma}{2} + \frac{\sigma}{2} \cos 2\phi = \sigma \cos^2 \phi \\ \sigma_y = \frac{\sigma}{2} - \frac{\sigma}{2} \cos 2\phi = \sigma \sin^2 \phi \\ \tau_{xy} = \frac{\sigma}{2} \sin 2\phi \end{cases} \quad (9)$$

الف) اگر شکست در امتداد الیاف در کامپوزیت رخ دهد، σ_x باید به مقدار بحرانی تنش کامپوزیت σ_c برسد؛ پس:

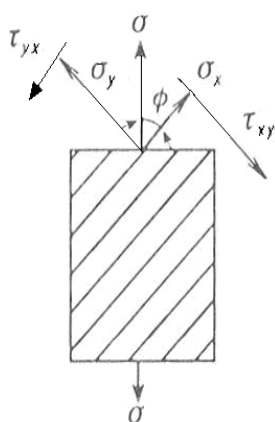
$$\sigma_x = \sigma_c = \sigma \cos^2 \phi \Rightarrow \sigma = \sigma_c \sec^2 \phi \quad (10)$$

ب) اگر شکست به صورت شکست زمینه در برش در امتداد الیاف رخ دهد، داریم $\tau_{xy} = \tau_c$ ؛ پس:

$$\tau_{xy} = \tau_c = \frac{\sigma}{2} \sin 2\phi \Rightarrow \sigma = 2\tau_c \operatorname{cosec} 2\phi \quad (11)$$

ج) اگر شکست عمود بر امتداد الیاف باشد ممکن است با جریان پلاستیک شدن و شکست زمینه $[\sigma_u = \sigma_m \cdot (1 - V_f)]$ یا با شکست حد فاصل^{۱۱} الیاف-زمینه تحت عنوان باز شدگی کششی^{۱۲} $[\sigma_u = \sigma_{\text{interface}} V_f]$ رخ دهد که در هر صورت خواهیم داشت.

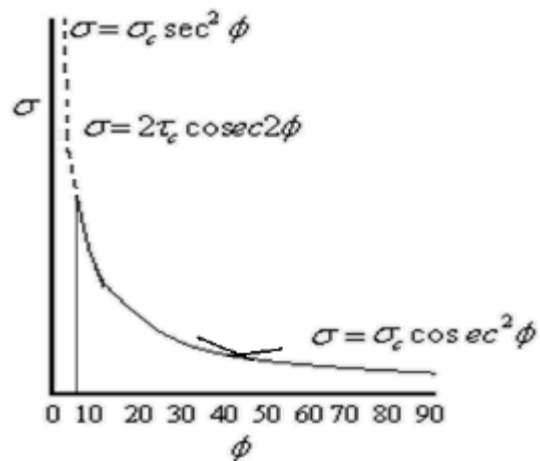
$$\sigma_y \sigma_x \sin^2 \phi \Rightarrow \sigma = \sigma_u \operatorname{csc} \phi \quad (12)$$



شکل ۲. تصویر تنش اعمال شده ϕ ، در امتدادهای عمود و موازی الیاف

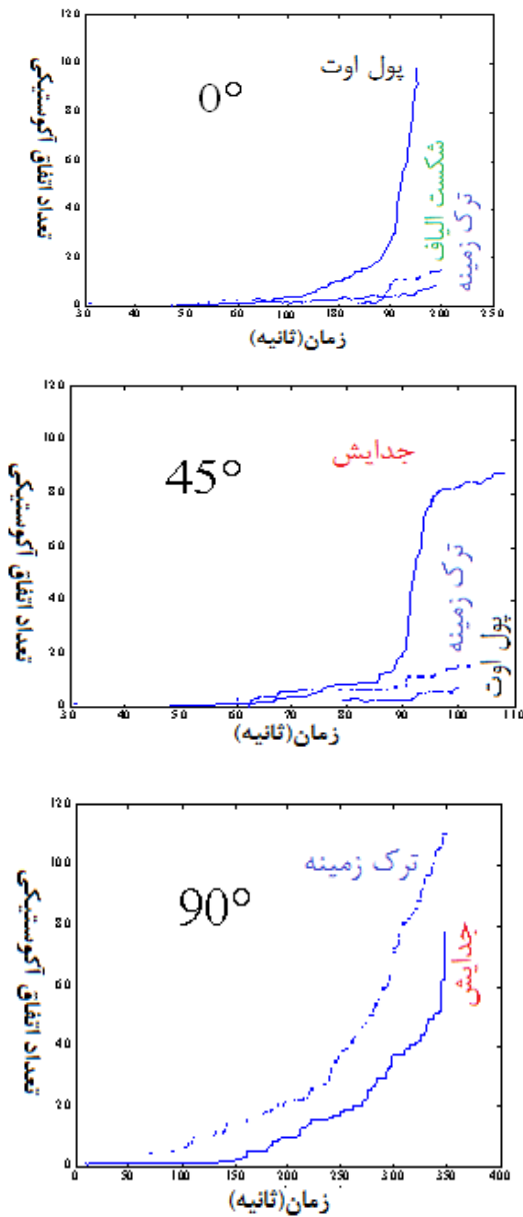
مطابق شکل ۳ کاهش عمده مقاومت کامپوزیت با افزایش زاویه جهت الیاف مشهود است و این موضوع قابل پیش‌بینی بود چراکه اعضای تحمل‌کننده با افزایش زاویه ϕ کاهش می‌یابد. بنابراین به صورت تئوریک بیشترین مقاومت کششی در چیدمان صفر درجه و ضعیف‌ترین آن در چیدمان ۹۰

درجه اتفاق خواهد افتاد و مقادیر بار لازم توسط گسیختگی نمونه در جهت الیاف، عمود بر الیاف و گسیختگی برشی به ترتیب از طریق روابط ۱۲-۱۰ به راحتی قابل محاسبه است. در اینجا نکته‌ای که از لحاظ تجربی قابل رصد بود [۱۷] و باید به آن اشاره کرد این هست که: زاویه ۰ تا ۷ درجه از فرمول‌ها به خوبی تبعیت نمی‌کند و مقدار استحکام تجربی کامپوزیت با استحکام تئوریک کمی متفاوت است و در محل ۴۵ درجه به طور کامل بر هم متقارن نیستند [۶].



شکل ۳. تغییرات تنش شکست بر حسب زاویه الیاف

در کامپوزیت پلی پروپیلن/ اپوکسی با توجه به سه نوع چیدمان الیاف (۰، ۴۵ و ۹۰) نرخ اتفاقات پخش آوایی با گذشت زمان مطابق شکل ۴ ترسیم گردید. قابل مشاهده است که مودهای مختلف آسیب از جمله جدایش^{۱۳}، ترک زمينه، شکست الیاف و کنده شدن الیاف از زمينه یا پول اوت^{۱۴} در زمان‌های مختلف آزمایش ایجاد شد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که زاویه چیدمان الیاف روی نوع و اندازه مود خرابی مؤثر است [۱۵].



شکل ۴. تأثیر زاویه ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه چیدمان الیاف روی نرخ اتفاقات AE با گذشت زمان آزمایش

۴. محاسبه حداقل درصد حجمی الیاف

مطابق رابطه ۳ هر چه درصد حجمی الیاف در کامپوزیت بیشتر باشد، استحکام نیز بیشتر خواهد بود و می‌توان موقع طراحی درصد حجمی حداقل و درصد حجمی بحرانی را به راحتی محاسبه کرد. مطابق منابع متعدد و از جمله [۱۶] حداقل حجم الیاف و مقدار حجم بحرانی به ترتیب از رابطه ۱۳ و ۱۴ برای کامپوزیت‌های $\epsilon_{\text{matrix}} < \epsilon_{\text{fiber}}$ مانند کامپوزیت شیشه / اپوکسی قابل محاسبه است که در این روابط σ_m^* و σ_f^* به ترتیب حد انقطاعی و یا استحکام شکست زمینه و الیاف و σ_m' تنش زمینه در لحظه شکست الیاف می‌باشد.

$$V_{\min} = \frac{\sigma_m^* - \sigma_m'}{\sigma_f^* \sigma_m^* \sigma_m'} \quad (13)$$

$$V_{\min} = \frac{\sigma_m^* - \sigma_m'}{\sigma_f^* + \sigma_m^*} \quad (14)$$

در مورد کامپوزیت پلی پروپیلن / اپوکسی مقدار σ_m' برابر صفر خواهد بود چراکه در لحظه شکست الیاف پلی پروپیلن، زمینه اپوکسی هیچ مقاومتی ندارد و قبل از آن شکسته شده است. بنابراین روابط مربوط به حداقل حجم الیاف و مقدار حجم بحرانی در مورد کامپوزیت پلی پروپیلن / اپوکسی باهم برابر و به صورت رابطه ۱۵ ظاهر خواهد شد. همچنین مقدار حجم الیاف از رابطه ۱۶ به دست خواهد آمد.

$$V_{\min} = V_{\text{cr}} = \frac{\sigma_m^*}{\sigma_f^* + \sigma_m^*} \quad (15)$$

$$V_f = \frac{M_f \rho_m}{M_f \rho_m + (1 - M_f) \rho_f} \quad (16)$$

با توجه به غیر متعارف بودن کامپوزیت پلی پروپیلن / اپوکسی مدول الاستیک طولی و عرضی مطابق با انتشار خرابی در صفحه ناشی از محور X و Y خواهد بود که مدول الاستیک طولی (E_1) از قانون مخلوطها و مدول الاستیک عرضی

(E_2) از طریق معادلات مربوط به هالپین - تسای^{۱۵} که در آن $\xi=0.2$ به دست خواهد آمد [۷].

$$E_2(\omega) = \frac{E_m(\omega)\xi(1 + \xi\eta V_f)}{1 - \eta V_f} \quad (17)$$

$$\eta = \frac{E_f - E_m(\omega)}{E_f + \xi E_m(\omega)}$$

در صورتی که تنش به حد نهایی اپوکسی برسد، در آن ترک ایجاد شده و سپس ترک به فصل مشترک اپوکسی و پلی پروپیلن انتشار خواهد یافت که به خاطر ایجاد ترک و انتشار در فصل مشترک، مدول برشی و حد نهایی مدول الاستیک اپوکسی مطابق معادله زیر کاهش خواهد یافت که در این رابطه v ضریب پواسون، G_m مدول برشی و β ضریب کاهش و α ضریب تنظیم خوانده شده و عموماً برای اپوکسی ۳۰۰۰ در نظر گرفته می‌شود.

$$E_m(\omega) = 2(1 + v)G_m\beta \quad (18)$$

$$\beta = \text{Exp}(-\alpha\epsilon_{xy}) \quad (19)$$

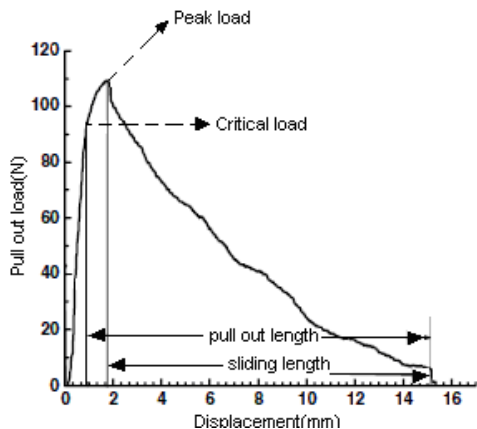
در نهایت تنش اعمالی به کامپوزیت از طریق الیاف پلی پروپیلن پس از شکستن اپوکسی، از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$\sigma_c = V_f E_f \epsilon_f + \sigma_m \quad (20)$$

۵. قاعده شکست فصل مشترک الیاف و زمینه

با توجه به کرنش بالای الیاف نسبت به زمینه در کامپوزیت پلی پروپیلن / اپوکسی، شکست کامپوزیت‌ها بیشتر به راندمان اتصال حد فاصل‌ها و مرزهای بین اجزا و نیز رفتار تک تک آنها بستگی دارد. سطح شکست کامپوزیت‌های مورد نظر به ندرت صاف و ساده‌اند و دارای ریزه‌های الیاف هستند که از زمینه بیرون زده‌اند و الیاف ضرورتاً در صفحه اصلی شکست، نمی‌شکنند [۸].

به جای تنش اصطکاک استاتیکی جایگزین شده و لغزش اتفاق می‌افتد که طبیعتاً رابطه بار-جابه‌جایی در این مرحله نزولی و برای کامپوزیت مورد نظر به‌طور تجربی مطابق شکل ۵ ترسیم شده است.



شکل ۵- نمودار بار- جابجایی بیرون کشیدگی الیاف از رزین

همچنین مقدار کار لازم برای بیرون کشیدگی الیاف از رزین طبق رابطه ۲۱ تعریف شده است که در آن l_p طول الیاف در داخل منطقه پول اوت و به ترتیب d_f قطر، σ_f استحکام و E_f مدول یانگ الیاف می‌باشد.

$$W_p = \frac{\pi d_f^2 \sigma_f^2 l_p}{24 E_f} \quad (21)$$

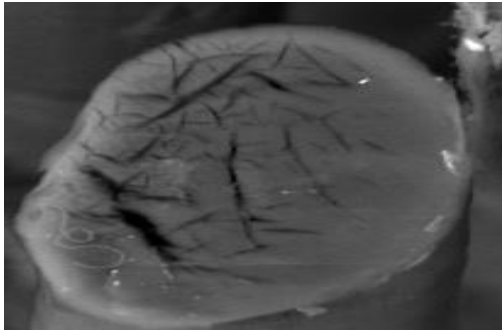
در کامپوزیت شیشه/ اپوکسی با توجه به $\epsilon_{\text{fiber}} < \epsilon_{\text{matrix}}$ لیف قبل از آنکه ترک در زمینه دور آن را بگیرد، می‌شکند و وقتی لبه ترک اصلی به الیاف شکسته می‌رسد، ترک یا به سمت بالا یا پایین حول الیاف می‌رود تا از صفحه شکست الیاف عبور کند. با این کار به مصرف انرژی نیاز دارد، جدایی حد فاصل اتفاق می‌افتد [۱۱].

۶. چگالی

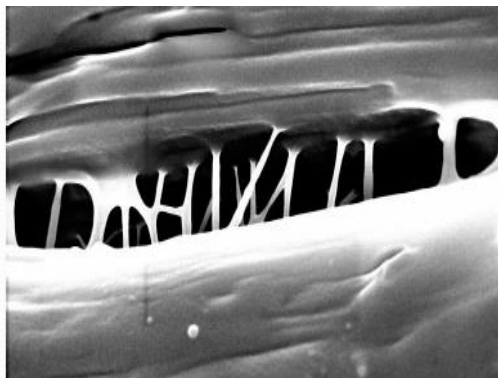
الیاف پلی پروپیلن دارای سطحی همانند خیزران^{۱۹} است و براساس شکل ۶ (میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل XL30 فیلیپس) چگالی کم الیاف پلی پروپیلن به دلیل حفره‌های هوایی^{۲۰} است که در سطح مقطع الیاف وجود دارد.

در کامپوزیت‌های پلی پروپیلن/ اپوکسی ترتیب ماجراهای گسترش و انتشار ترک عمود بر الیاف بدین صورت است که: چون کرنش الیاف از زمینه بیشتر است یک ترک ماتریس به یک لیف نزدیک می‌شود و دور آن را می‌گیرد. اگر اتصال حد فاصل بین الیاف و زمینه خراب نشده باشد، لغزش نسبی باید بین لایه‌های زمینه در مجاورت با الیاف به‌وجود آید. این لغزش باید کار پلاستیک را که در چقرمگی مشارکت می‌کند جذب نماید. علاوه بر آن، برای کشیدگی نسبی بین الیاف و زمینه حدی وجود دارد که در نهایت مطابق شکل ۴ یک جدایی اتصال به شکل لغزشی^{۱۶} روی بخشی از طول الیاف ایجاد می‌شود [۱۰]. انرژی کرنشی در الیاف کشیده شده، کار این بخش را تأمین می‌کند. ناگهان الیاف شکسته و انرژی کرنشی الیاف آزاد می‌شود که به دنبال آن دو اتفاق رخ خواهد داد: الف- الیاف به اطراف سوراخ جدا شده^{۱۷} ساییده می‌شوند و کار اصطکاکی انجام می‌شود. ب- جریان کار پلاستیک معکوس شده و در حد فاصل‌های مناطق جدا شده اتفاق می‌افتد.

با انتشار ترک، زمینه الیاف شکسته شده‌ای را که پشت لبه اصلی و جلوی ترک باقی مانده‌اند را بیرون می‌کشد که به نام بیرون کشیدگی^{۱۸} معروف است. بنابراین سطح شکست کامپوزیت به‌صورت ریش-ریش با انتهاهایی از الیاف بیرون کشیده شده از سطح ظاهر خواهد شد [۹]. مدل‌سازی کشش الیاف از داخل رزین براساس بار- جابه‌جایی امکان‌پذیر است چرا که در کشش الیاف از داخل رزین سه مرحله به این صورت وجود دارد [۱۰]: در مرحله اول فرض بر این است که چسبندگی به اپوکسی بسیار خوب و کامل است. در مرحله دوم که جدایش اتفاق می‌افتد، تنش برشی سطح تماس به تنش برشی حد نهایی می‌رسد و بدیهی است این تنش برشی بیش از تنش برشی منطقه جدایش است و به‌وسیله تنش اصطکاکی ناشی از تابع خطی فشار تماسی الیاف و رزین قابل محاسبه است. در مرحله سوم تنش اصطکاک دینامیکی



شکل ۶. حفره‌های هوایی موجود در سطح مقطع الیاف پلی پروپیلن [۳]



شکل ۷. پل‌های ریز الیافی در داخل حفره هوایی در

طول الیاف پلی پروپیلن [۳]

جدول ۲. چگالی انواع کامپوزیت پایه اپوکسی تقویت شده با

چیدمان‌های مختلف الیاف شیشه و پلی پروپیلن

چگالی کامپوزیت با زمینه اپوکسی gr/m ³	
8-PP	۱
6/2-PP/G	۱/۲
4/4-PP/G	۱/۴
8-G	۱/۹

در ضمن طبق شکل ۷ در حد فاصل حفره هوایی داخل لیف، پل‌های ریز الیافی^{۲۱} ایجاد شده است که سبب افزایش چقرمگی الیاف خواهد بود [۱۲]. به علاوه سطوح این الیاف دارای روزنه‌های شیاری خاصی نیز هست که این روزنه‌ها سبب خروج رطوبت از الیاف و همچنین باعث چسبندگی بهتر الیاف به رزین می‌شود. درحالی‌که الیاف خانواده آلی از جمله شیشه از تمامی مزایای فوق محرومند.

برای انجام آزمایش‌های مختلف، نمونه‌های مواد مرکب با زمینه اپوکسی L160، الیاف شیشه و پلی پروپیلن به ترتیب با ترکیب حجمی ۴۵ و ۵۰ درصد به روش دستی ساخته شدند. در این نمونه‌ها همیشه الیاف شیشه در سطوح خارجی و الیاف پلی پروپیلن در مرکز زمینه اپوکسی بودند و مواد مرکب حاصل به چهار خانواده به شرح زیر تقسیم شدند.

الف) تمامی هشت لایه، الیاف پلی پروپیلن (8-PP)،

ب) شش لایه الیاف پلی پروپیلن در مرکز و دو لایه الیاف شیشه در سطوح خارجی (6/2-PP/G)،

ج) چهار لایه الیاف پلی پروپیلن در مرکز و چهار لایه الیاف شیشه در سطح خارجی (4/4-PP/G)،

د) تمامی هشت لایه، الیاف شیشه (8-G).

جهت ارزیابی و محاسبه چگالی کامپوزیت‌ها براساس استاندارد ASTM-D7۹۷ عملیات انجام گرفت و نتایج در جدول ۲ ارائه شده است. بیشینه مقدار چگالی مربوط به کامپوزیت 8-G و برابر با ۱/۹ گرم بر سانتی‌مترمکعب و کمینه مقدار مربوط به کامپوزیت 8-PP بوده و مقدار آن تقریباً برابر ۱ گرم بر سانتی‌مترمکعب می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در حجم ثابت، وزن کامپوزیت پلی پروپیلن / اپوکسی تقریباً نصف کامپوزیت شیشه / اپوکسی است. بنابراین استفاده از الیاف پلی پروپیلن مضاف بر مزایای فیزیکی و مکانیکی، کاهش وزن سازه و صرفه اقتصادی را نیز به دنبال خواهد داشت.

۷. ثابت دی الکتریک

نسبت توان الکتریکی بین دو صفحه فلزی که فضای بین آنها با یک عایق پر شده، در برابر توان الکتریکی همان صفحات که بینشان خلاء پر شده، به عنوان ثابت دی الکتریک تعریف می‌شود. به عبارت دیگر ثابت دی الکتریک اندازه‌گیری نشت یک عایق در مورد توان الکتریکی می‌باشد. این کمیت بدون واحد بوده و برای خلاء یک و برای تمامی مواد عایق دیگر غیر از خلاء بزرگتر از یک می‌باشد. این ثابت حداکثر تا عدد ۳ برای نمونه‌های مهندسی از لحاظ فیزیکی مطلوب می‌باشد [۳،۱۴]. ثابت دی الکتریک تحت تأثیر عواملی از قبیل دما، رطوبت، ولتاژ و فرکانس بوده و استاندارد ASTM D150 (IEC 93) طرز عمل تجهیزات آزمایش و استاندارد IPC TM-650 برای اندازه‌گیری دی الکتریک کامپوزیت‌ها کاربرد دارد. ضریب دی الکتریک پارامتر مهمی در عدم جذب امواج بوده و نقش به‌سزایی در عدم ردیابی ماهواره‌های نظامی و مخابراتی داشته و مقدار آن هرچقدر کوچک‌تر و به صفر نزدیک‌تر شود جهت عدم جذب امواج مناسب‌تر است. مطابق جدول ۳ ضریب دی الکتریک کامپوزیت 8-PP معادل ۲/۷ اما کامپوزیت 8-G برابر ۴/۷ به دست آمد. همچنین قابل ملاحظه است که هر چقدر از لایه شیشه کم و به تعداد لایه پلی پروپیلن افزوده شود، ضریب دی الکتریک کاهش یافته و مناسب‌تر است.

جدول ۳. مقایسه ثابت دی الکتریک کامپوزیت اپوکسی با انواع

چیدمان الیاف شیشه و پلی پروپیلن

مواد مرکب				الیاف	
8-PP	6/2-PP/G	4/4-PP/G	8-G	پلی پروپیلن	شیشه
۲/۷	۲/۹	۳/۳	۴/۷	۱/۲	۲/۶

۸. مدول خمشی و استحکام خمشی

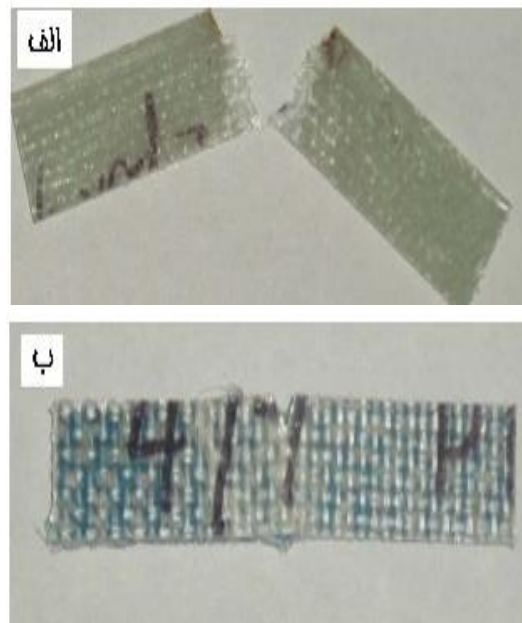
تغییرات مدول و استحکام خمشی کامپوزیت‌ها منحصر بر اساس مشخصات الیاف و رزین و طبق یک قاعده ساده ریاضی نیست. بلکه اساسا در ارتباط با موقعیت مکانی الیاف است که به این طریق و با استفاده از الیاف چگالی پایین همانند پلی پروپیلن می‌توان با حفظ ابعاد و سفتی کامپوزیت، وزن کامپوزیت را به‌طور چشمگیری کاهش داد. مقادیر مدول خمشی و استحکام خمشی انواع کامپوزیت پایه اپوکسی تقویت شده با چیدمان‌های مختلف الیاف شیشه و پلی پروپیلن بر اساس استاندارد ASTM ۲۳۴۴ مطابق جدول ۴ محاسبه شد. مشهود است که کمینه مقدار مدول خمشی و استحکام خمشی برای کامپوزیت با ۸ لایه الیاف پروپیلن (8-PP) و بیشینه مقدار برای کامپوزیت با ۸ لایه الیاف شیشه (8-G) اندازه‌گیری شده است.

جدول ۴. مقایسه مدول خمشی (نسبت تنش به کرنش در یک تغییر شکل الاستیک خمشی) و استحکام خمشی کامپوزیت اپوکسی با انواع چیدمان الیاف شیشه و پلی پروپیلن

کامپوزیت	مدول خمشی ^{۲۲} (گیگاپاسکال)	استحکام خمشی (مگاپاسکال)
8-PP	۵	۸۰
6/2-PP/G	۱۲	۱۳۰
4/4-PP/G	۱۶/۵	۱۸۰
8-G	۱۶/۵	۱۸۵

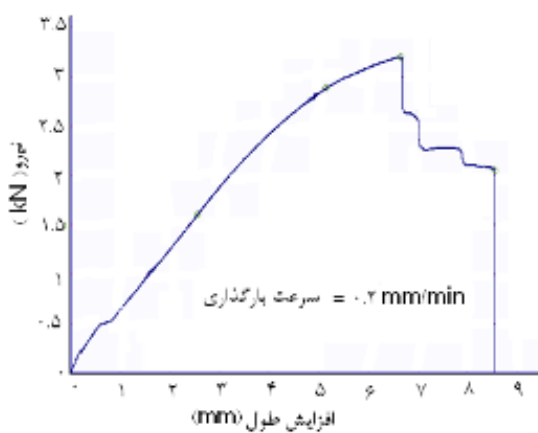
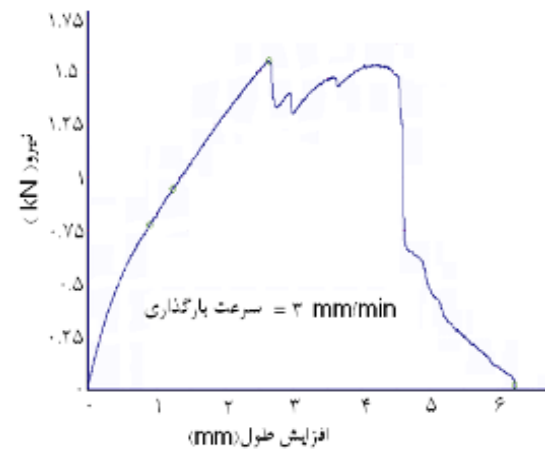
۹. مقاومت به ضربه

مقاومت به ضربه کامپوزیت‌ها براساس استاندارد ASTM D256 و طبق معیار ایزود^{۳۳} اندازه‌گیری شد. طبق شکل ۸ برای کامپوزیت (8-G) با جذب انرژی به مقدار $19/7 \text{ ft.lb/in}$ به‌طور واضح شکست رخ داد. در صورتی که برای کامپوزیت با چهار لایه خارجی شیشه و چهار لایه داخلی پلی پروپیلن (4/4-PP/G) با $20/5 \text{ ft.lb/in}$ انرژی جذب شده تمامی الیاف شکسته ولیکن الیاف پلی پروپیلن در مغز دست نخورده باقی ماندند.



شکل ۸. نتایج آزمایش مقاومت به ضربه طبق معیار ایزود (الف) کامپوزیت 8-G (ب) کامپوزیت 4/4-PP/G، [۵]

نیروهای $3/2 \text{ kN}$ در سرعت $0/2 \text{ mm/min}$ و $1/5 \text{ kN}$ در سرعت 3 mm/min افزایش طول نمونه به ترتیب به $6/7$ و $2/7$ میلی‌متر رسیده است. به‌عبارت دیگر توأم با افزایش مقدار نیرو، کرنش نمونه نیز زیاد می‌شود. به‌عبارت واضح‌تر، کاهش سرعت بارگذاری، افزایش تنش و کرنش را در پی خواهد داشت. اما برخلاف کامپوزیت، الیاف و رزین به تنهایی در سرعت‌های کم با نیروی کم و در سرعت‌های زیاد با نیروی بیشتر شکسته می‌شود. حرف آخر اینکه؛ در الیاف و رزین، سرعت بارگذاری با نیرو و افزایش طول رابطه مستقیم، ولی در کامپوزیت سرعت بارگذاری با نیرو و افزایش طول رابطه عکس خواهد داشت.



شکل ۹. نمودار نیرو-جاب‌جایی کامپوزیت با الیاف ۴۵ درجه در سرعت $0/2$ و 3 میلی‌متر بر دقیقه

۱۰. تأثیر سرعت بارگذاری بر نیرو و افزایش طول

شکست

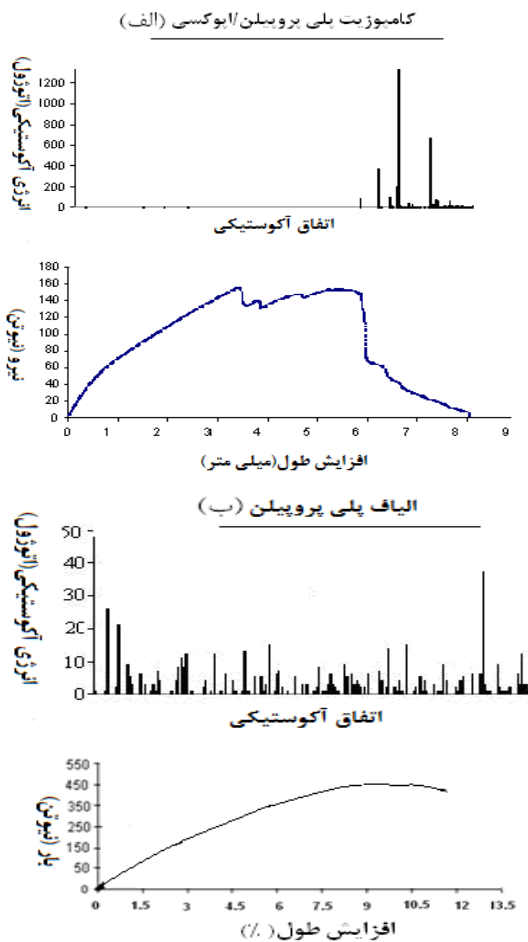
در شکل ۹ نمودار بار-جاب‌جایی کامپوزیت پلی پروپیلن/اپوکسی با الیاف ۴۵ درجه در سرعت‌های $0/2 \text{ mm/min}$ (سمت پایین) و 3 mm/min (سمت بالا) نشان داده شده است. این کامپوزیت مطابق شکل و به‌طور نسبی در سرعت کم با نیروی زیاد ($3/2 \text{ kN}$) و در سرعت زیاد با نیروی کم ($1/5 \text{ kN}$) شکسته شدند. همچنین در این کامپوزیت پیرو

۱۱. تأثیر نیروی بارگذاری بر انرژی صوتی

انرژی صوتی حاصل عملیات ریاضی است که دستگاه پخش آوایی روی سطح زیر منحنی سیگنال شکست انجام می‌دهد [۱۳]. به همین دلیل به نظر می‌رسد که رابطه مشخصی بین نیروی بارگذاری و انرژی صوتی سیگنال خروجی پیدا شود. لیکن ممکن است دستگاه دارای تأخیر زمانی بوده و یا تنظیمات آن مشتمل بر دقت کافی نباشد و به همین دلیل نتیجه انرژی صوتی قطعاً دارای خطا نیز خواهد بود. آنچه که از نمودار سمت چپ شکل ۱۰ دیده می‌شود با افزایش نیروی بارگذاری، انرژی صوتی حاصل از شکست الیاف افزایش پیدا می‌کند، زیرا با افزایش نیروی مکانیکی تعداد لیف‌های بیشتری تحت کشش قرار گرفته و واضح است که خرابی‌های الیاف تحت کشش بیشتر شده و به تبع خرابی‌ها، سیگنال‌های آزاد شده بیشتر و نهایتاً انرژی صوتی افزایش می‌یابد. این مسئله در مورد رزین هم صادق است. عموماً برای اندازه‌گیری انرژی صوتی از دستگاه صداسنج می‌توان استفاده کرد. براساس کار این دستگاه تبدیل انرژی صوتی به انرژی الکتریکی قابل قرائت بوده و شامل میکروفون، مدارهای تطبیقی، شبکه‌های باردهی، شبکه نمونه‌برداری و صفحه قرائت است. صداسنج ساده میزان تراز فشار صوت (SPL) را نشان می‌دهد و با آنالیزور می‌توان تراز فشار صوت در فرکانس‌های مختلف را تعیین نمود.

اما برعکس مطالب فوق در کامپوزیت‌ها با افزایش نیروی بارگذاری، انرژی صوتی افزایش پیدا نمی‌کند چراکه رزین و الیاف داخل کامپوزیت طی کشش و پس از گذر از مرحله الاستیک به پلاستیک و نسبت به هم با یک تأخیر زمانی و تأخیر مکانی شروع به شکست می‌کنند و این امر تا شکست نهایی کامپوزیت ادامه دارد و چون تقریباً به‌طور یکسان عمل شکست و نتایج صوتی آن از لحظه شروع تا خاتمه آزمایش وجود دارد بنابراین تغییر چندانی در انرژی سیگنال‌ها دیده

نمی‌شود. این بحث در مورد کامپوزیت پلی پروپیلن / اپوکسی و شیشه / اپوکسی کما بیش مشابه هم می‌باشد.



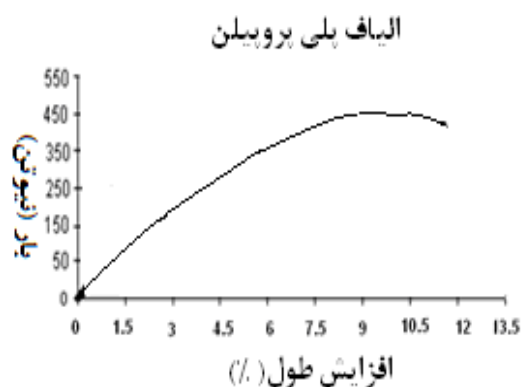
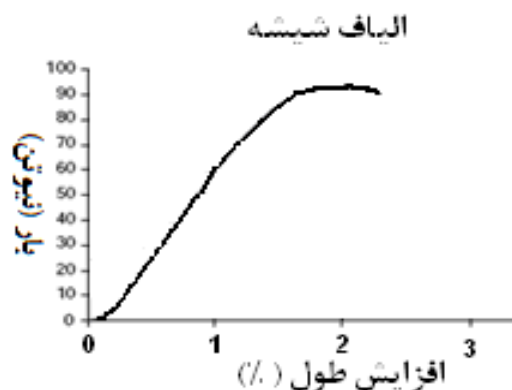
شکل ۱۰. نمودار بار-افزایش طول و انرژی صوتی-اتفاق صوتی کامپوزیت پلی پروپیلن / اپوکسی با الیاف ۴۵ درجه (الف) و الیاف پلی پروپیلن خالص (ب) [۱۷]

۱۲. مقایسه الیاف پلی پروپیلن با الیاف شیشه از

نظر مکانیکی و صوتی

مطابق شکل ۱۱ دیده می‌شود که شکست برای الیاف پلی پروپیلن و شیشه به ترتیب در افزایش طولی معادل ۹/۳٪ و ۲٪ اتفاق می‌افتد. به عبارتی درصد افزایش طول الیاف پلی پروپیلن در موقع شکست تقریباً ۴/۶۵ برابر شیشه است. از طرفی بار لازم برای شکست الیاف پلی پروپیلن ۴۶۸N و بار لازم برای شکست الیاف شیشه در ۹۴ N اتفاق می‌افتد. در

نتیجه کرنش ۵ برابری الیاف پلی پروپیلن نسبت به الیاف شیشه تنش حدود ۵ برابری را نیز تحمل می‌کند. که ترکیب تنش و کرنش به مفهوم مدول یانگ نمونه می‌باشد. از این نکته می‌توان پی برد که مدول یانگ الیاف شیشه و الیاف پلی پروپیلن باهم متفاوت بوده و پس از محاسبه دیده می‌شود که مدول یانگ الیاف شیشه و الیاف پلی پروپیلن به ترتیب برابر با ۷۴ و ۱۸ مگا پاسکال می‌باشد.



شکل ۱۱. مقایسه شیشه با پلی پروپیلن از نظر مکانیکی

در جدول ۵ پارامترهای صوتی اعم از تعداد اتفاقات، دامنه، فرکانس و انرژی در مورد وضعیت‌های مختلف الیاف پلی پروپیلن و الیاف شیشه خشک ارائه شده است. قابل مشاهده است که تعداد اتفاقات الیاف شیشه خشک نسبت به الیاف پلی پروپیلن خشک خیلی بیشتر و به ترتیب برابر با ۴۷۸۵ و ۸۴۸ می‌باشد. به بیان دیگر در شرایط مساوی تعداد اتفاقات شیشه نسبت به پلی پروپیلن ۵/۶۴ برابر می‌باشد. دلیل اصلی

این مسئله این است که طبق جدول ۱ از نظر عددی قطر لیف شیشه نسبت به قطر لیف پلی پروپیلن حدود یک سوم می‌باشد، بنابراین در یک دسته الیاف با سطح مقطع یکسان تعداد لیف‌های شیشه سه برابر تعداد لیف‌های پلی پروپیلن بوده و به تبع آن طی بارگذاری، لیف‌های شیشه بیشتری درگیر شده و تعداد خرابی و اتفاقات حاصله در دسته الیاف شیشه بیشتر خواهد بود. عامل بعدی این است که پلی پروپیلن نسبت به شیشه بسیار چقرمه بوده و برخلاف شیشه، شکست در آن به راحتی حاصل نمی‌شود. به عبارت دیگر در طول کل مدت بارگذاری، لیف‌های پلی پروپیلن به خاطر نرخ کرنش بسیار زیاد و ویژه‌اش فقط کش آمده و اتفاق یا سیگنال قابل ثبتی از خود صادر نکرده است. لیکن تردی الیاف شیشه که جزء ماهیت ذاتی آن بوده و ناشی از غیر آلی بودن ساختار آن است سبب می‌شود که الیاف شیشه نسبت به پلی پروپیلن با کوچک‌ترین بارگذاری، اتفاقی را رخ داده و سیگنال قابل ثبتی از خود آزاد کند.

در مورد دامنه و فرکانس مطابق جدول ۵ دیده می‌شود که این دو پارامتر صوتی در الیاف پلی پروپیلن کمی بیش از الیاف شیشه است و به سبب دامنه باید مقدار انرژی صوتی نیز بیشتر گردد ولی این اتفاق حاصل نشده است. چرا که در فرمول انرژی صوتی، دامنه در صورت و زمان استمرار در مخرج قرار دارد و چون زمان الیاف شیشه خشک خیلی کمتر از زمان الیاف پلی پروپیلن خشک است، بنابراین کاستی زمان شکست الیاف شیشه، کاستی دامنه را جبران کرده و نهایتاً در فرمول انرژی صوتی الیاف شیشه نسبت به الیاف پلی پروپیلن، دامنه به زمان چربیده و شیشه انرژی بیشتری حاصل کرده است. در نهایت انرژی صوتی الیاف شیشه خشک و الیاف پلی پروپیلن خشک به ترتیب برابر ۱۴/۶۲ و ۰/۸۷۹ اتوزول^{۳۴} احراز شد. علاوه بر بحث تأخیر زمان استمرار شکست لیف‌ها، انرژی صوتی ناشی از اصطکاک سایش لیف‌ها به خصوص در وضعیت خشک خیلی مؤثر است. به این نحو که پارامترهای مؤثر انرژی صوتی (دامنه و زمان استمرار

سیگنال) ناشی از اصطکاک سایش لیفها خیلی کمتر از پارامترهای مؤثر انرژی صوتی شکست لیاف شیشه بوده و مقدار میانگین انرژی صوتی شیشه در وضعیت خشک را نسبت به پلی پروپیلن به شدت کاهش داده است.

با اصلاح تأخیر زمان استمرار و همچنین حذف اصطکاک سایش لیفها با چرب کردن در مورد لیاف پلی پروپیلن آغشته به روغن و لیاف پلی پروپیلن همسان آغشته به روغن، انرژی صوتی به طور چشمگیری زیاد شده و نتیجه عددی آن در دو سطر آخر جدول ۵ قابل مشاهده است.

۱۳. مقایسه کامپوزیت شیشه/ اپوکسی با کامپوزیت پلی پروپیلن/ اپوکسی از نظر صوتی و مکانیکی

در جدول ۶ و جدول ۷ به ترتیب تمامی اطلاعات مکانیکی لازم در مورد کامپوزیت شیشه/ اپوکسی و کامپوزیت پلی پروپیلن/ اپوکسی ارائه شده است. به طوری که مدول یانگ طولی کامپوزیت شیشه/ اپوکسی برابر 41 GPa و مدول یانگ طولی کامپوزیت پلی پروپیلن/ اپوکسی تقریباً برابر 6 GPa محاسبه شده است. از طرفی استحکام طولی کامپوزیت شیشه/ اپوکسی و کامپوزیت پلی پروپیلن/ اپوکسی به ترتیب برابر 1100 و 360 مگا پاسکال محاسبه شده است. در ادامه مطابق جدول ۸ پارامترهای صوتی کامپوزیت شیشه/ اپوکسی با کامپوزیت پلی پروپیلن/ اپوکسی جهت ارزیابی ارائه شده است. توضیح و نتیجه اینکه سیگنالهای صادر شده از کامپوزیت شیشه/ اپوکسی نسبت به کامپوزیت پلی پروپیلن/ اپوکسی از منظر تعداد اتفاقات، دامنه، فرکانس و انرژی بیشتر می باشد بنابراین سازگاری پلی پروپیلن نسبت به شیشه با اپوکسی بهتر و به تبع آن از نظر خواص مکانیکی مناسب تر می باشد.

۱۴. بحث و نتیجه گیری

در صنایع مختلف بیشترین کاربرد از آن موادی است که الزامات مربوط به وزن، هزینه و خواص را ارضا کند. عموماً کامپوزیتها علاوه بر قیمت مناسب، مدول یانگ و استحکام بالایی نسبت به وزن داشته و به این دلیل کاربرد بالایی در صنایع مهندسی پیدا کرده اند. ولی علاوه بر موارد فوق الزامات دیگری هم هست که شاید در تمامی انواع کامپوزیتها یکسان نیستند و ضرورتاً کامپوزیتها را متمایز تر می نماید. از جمله آن موارد سازگاری بعضی لیاف با برخی رزینها می باشد که این سنخیت می تواند ختم به ایجاد مواد مرکبی با انواع و اقسام خواص مطلوب از نظر صنعتی گردد. حال این سنخیت در مورد لیاف UHMWPP و رزین اپوکسی L160 تقریباً پس از نیم قرن به دست آمده و پیرو نتایج تحقیق انجام گرفته خواص مهندسی فوق العاده ای را به صورت تجربی و عددی از خود نشان می دهد. با در نظر گرفتن تضاد در ویژگیهای لیاف شیشه و پلی پروپیلن و طبق آزمایشهای انجام گرفته دیده شد که کارکرد بهینه در مواد مرکب با پایه اپوکسی زمانی اتفاق می افتد که از لیاف شیشه و لیاف پلی پروپیلن به صورت تلفیقی استفاده گردد. به طوری که اگر از لیاف شیشه در سطوح خارجی و از لیاف پلی پروپیلن در مغز کامپوزیت به صورت ساندویچ بهره برداری شود، افزایش مقاومت به ضربه، افزایش استحکام، کاهش چگالی، کاهش قیمت و کاهش ضریب دی الکتریک می تواند همزمان اتفاق بیفتد بنابراین در آینده ای نزدیک باید منتظر استفاده چشمگیر و انفجار گونه ای از این مواد مرکب در اکثر صنایع بود.

جدول ۵. مقایسه پارامترهای صوتی انواع حالت الیاف پلی پروپیلن و الیاف شیشه خشک

شیشه خشک	PP خشک	PP آغشته به روغن	PP همسان آغشته به روغن	
۴۷۸۵	۸۴۸	۶۵۴	۴۱۰	تعداد اتفاق
۷۵/۵۷	۹۱/۲۵	۸۷/۰۴۱	۸۷۱/۲۰	دامنه (dB)
۴۷۵/۲۱	۵۵۶/۸۶	۵۵۶/۸۶	۵۵۶۶/۸	فرکانس بیشینه
۱۶۴/۳۷	۲۹۷/۱۴	۲۹۷/۱۴	۲۹۷۴/۱	فرکانس متوسط
۱۴/۶۲	۰/۸۷۹	۵/۵۲۲	۲۳۸،۵۴	انرژی سیگنال متوسط

جدول ۶. مشخصات مکانیکی کامپوزیت شیشه/اپوکسی

بیشینه تنش (UTS)	تنش شکست (FS)	تنش تسلیم (YS)	محل تسلیم ۰،۲٪	
۲۲۴/۱	۲۰۴/۲	۱۱۲/۳	۱۴۹/۲	نیرو (N)
۴/۴۴	۴/۶۸	۱/۶۵	۱/۹۷	افزایش طول (mm)
۲۲۰۰/۶	۲۰۰۳/۸	۱۱۰۰/۴	۱۵۸۸/۸	تنش (MPa)
۲/۷۸	۲/۹۳	۰/۸۳	۱/۲۳	درصد افزایش طول (%)
۰/۵۹۵	۰/۹۷۱	۰/۱۰۴	۰/۰۴۰	درصد افزایش طول در محل شکست (%)
۳/۲۸	۱۸/۲۳	۰/۳۴	۰/۷۴	انرژی (kJ)

مدول یانگ در محل تسلیم = ۴۱ گیگا پاسکال

جدول ۷. مشخصات مکانیکی کامپوزیت پلی پروپیلن/اپوکسی

بیشینه تنش (UTS)	تنش شکست (FS)	تنش تسلیم (YS)	محل تسلیم ۰،۲٪	
۱۲۲۹۸/۱	۱۱۱۹۸/۱	۶۱۴۷/۲	۸۸۱۹/۸	نیرو (N)
۲۲/۲۱	۲۳/۴۲	۶/۶۱	۹/۸۷	افزایش طول (mm)
۱۶۴/۱	۱۴۹/۳	۸۲/۳	۱۱۷/۶	تنش (MPa)
۱۳/۸۸	۱۴/۶۴	۴/۱۳	۶/۱۷	درصد افزایش طول (%)
۲/۹۷۴	۴/۸۵۳	۰/۵۲۱	۰/۲۰	درصد افزایش طول در محل شکست (%)
۱۸۰/۲۱	۱۹۴/۸۳	۱۸/۷۲	۴۳/۶۵	انرژی (kJ)

مدول یانگ در محل تسلیم = ۶ گیگا پاسکال

جدول ۸. پارامترهای صوتی کامپوزیت شیشه/اپوکسی با کامپوزیت پلی پروپیلن/اپوکسی

شیشه/اپوکسی	پلی پروپیلن/اپوکسی	
۲۱۴۰	۱۱۱۸	تعداد اتفاق
۳۴/۹	۴۴/۲	دامنه (dB)
۲۱۰/۰۷	۲۳۱/۷۳	فرکانس متوسط (kHz)
۱۴/۶۲	۱۰/۲۵۱	انرژی سیگنال متوسط (attojoule)

- [1] MacNeil, R. "Composites Manufacturing", January 2005, pp. 16-29.
- [2] Lewin, M. Preston, J. "Handbook of Fiber Science and Technology", *Material and Manufacturing Process*, vol.3, 1996, pp.105.
- [3] Brian, M. "High modulus thermoplastic fibers for use in thermoset composites" *Innegrity LLC, Greenville, SC*.
- [4] *ASTM E610-98A*, "Definitions of Terms Relating to Acoustic Emission"
- [5] Karger-Kocsis, J. Harmia, T. Cziga'ny, T. "Comparison of the fracture and failure behavior of polypropylene composites reinforced by long glass fibers and by glass mat", *Composites Science and Technology*, vol.54, 1995 pp.287–298.
- [6] Taghizadeh, J. &Ahmadi, M., "Identification of damage modes in polypropylene/epoxy composites by using principal component analysis on AE signals extracted from Mode I delamination" *Nondestructive Testing and Evaluation*, v.27, Issue 2, 2012, pp.151-170.
- [7] Indrani, V. V. "Modeling of fiber reinforced polymer confined concrete cylinders ", *A Thesis Submitted for the degree of Master of Science in Mechanical Engineering in Chaitanya Bharathi Institute of Technology, India*, May, 2006.
- [8] Rochette, A. Bousmina, M. Lavoie, A. "Effect of surface treatment on mechanical properties of polyethylene composite" *Composite Materials*, vol.36, 2002, pp.925–940.
- [9] Peguy, A., Manley, R.S. "Polymer Communications", 1984, pp.25-39.
- [10] Zhao, Y. R. Xing, Y. M. Lei, Z. K. Lang, F. C. "Interfacial stress transfer behavior in a specially-shaped fiber/matrix pullout test" *Acta Mech Sin*, vol.26, 2010, pp.113–119.
- [11] Lesser, A.J. and K.J. Calzia. "Molecular parameters governing the yield response of epoxy-based glassy networks", *Journal of Polymer Science Part B-Polymer Physics*, vol.42, no.11, 2004, pp.2050-2056.
- [12] Kanugi, T. "Oriented Polymer Materials" 1996, pp.394-421.
- [13] Xingmin, Z. Xiong, Y., "Investigation of damage mechanisms in self-reinforced polyethylene composites by acoustic emission" *Composites science and technology*, vol.66, 2006, pp.444-449.
- [14] Brian, M., Brittany A., Brian F., David, S. "Weight reduction and cost savings using hybrid composites containing high modulus polypropylene fiber", *Composites & Polycon, American Composites Manufacturers Association*, January 2009, pp.15-17.
- [15] Taghizadeh, J., Ahmadi Najafabadi, M." Classification of acoustic emission signals collected during tensile tests on unidirectional ultra high molecular weight polypropylene fiber reinforced epoxy composites using principal component analysis" *Russian Journal of Nondestructive Testing*, vol.47, no.7, 2011, pp.491-500.
- [16] Taghizadeh, J., Mofattehi, Shahcheragh. "The Buckling Study in Thin Composite Beams by Using of Multi-layer Classical Beam Theory", *Journal UMP Social Sciences and Technology Management*, vol.3, Issue.1, 2015, pp.432-440.
- [17] Taghizadeh, J., "Study on damage modes in Ultra High Molecular Weight Polypropylene/Epoxy composites by acoustic emission" *In Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of Doctor of Philosophy, Amirkabir University of Technology*, 2011.

1. Matrix
2. Fibers
3. Organic
4. Inorganic
5. Ultra High Molecular Weight Polypropylene (UHMWPP)
6. E-glass
7. In-Service
8. HEXION
9. INNegRITY
10. Isostrain
11. Interfaces
12. Tensile Opening
13. Delamination
14. Pull out
15. Halpin-Tsai equations
16. Sliding
17. Debonded hole
18. Pull out
19. Bamboo
20. Air voids
21. Nano fibers bridge
22. Fflexural Modulus
23. Izod
24. Attojoule