

بررسی عددی و تجربی رشد ترک در کامپوزیت پلیمری هیبرید تقویت شده با الیاف کربن و کولار

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۲۷

کد مقاله: ۷۲۵۴۹

امیررضا ساکی نژاد^۱، حامد بازوندی^۲

چکیده

در جهان امروز با توجه به نیازهای جدید صنعتی سری تازه ای از مواد مرکب مانند کامپوزیت‌های هیبریدی^۳ و نانو کامپوزیت‌ها^۴ مورد توجه قرار گرفته اند. ماده کامپوزیت یک سیستم ماده ای است که از ترکیب دو یا چند جز ماکرو ساختار که در فرم ماده متفاوت و غیر قابل حل در یک دیگر ساخته شده است که ساختار آن دارای سه فاز زمینه، ساختار اصلی (تقویت کننده ها) و فاز میانی است. در این پژوهش هیبرید کردن ساختار اصلی (تقویت کننده ها) مورد نظر بود. کامپوزیت‌ها با تقویت کننده های مختلفی مانند الیاف، نانو ذرات و پولک‌ها تقویت می شوند که انتخاب هر کدام از آنها با توجه به جنس زمینه و شرایط طراحی مشخص می شوند. در این پژوهش کامپوزیت‌ها در تعداد لایه ۴، ۶، ۸، ۱۰، ۱۲، ۱۴، ۱۶، ۱۸، ۲۰، ۲۲، ۲۴، ۲۶، ۲۸، ۳۰، ۳۲، ۳۴، ۳۶، ۳۸، ۴۰ و ۴۵ درصد حجمی تحت تست کشش قرار گرفتند و در تعداد لایه های ۴، ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ درصد حجمی های ۳۰، ۳۵، ۴۰ و ۴۵ درصد حجمی تحت تست خستگی برای بررسی رشد ترک قرار گرفتند. نتایج بدست آمده نشان داد که با تغییر تعداد لایه و درصد حجمی مقاومت در برابر رشد ترک افزایش و کاهش می یابد.

واژگان کلیدی: کامپوزیت هیبریدی، الیاف کولار، الیاف کربن، تست خستگی، تست کشش

۱- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک طراحی کاربردی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خرم آباد، ایران
۲- استادیار و عضو هیئت علمی گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خرم آباد، ایران

3- Hybrid
4- Nano composite

۱- مقدمه

کامپوزیت به موادی اطلاق می‌شود که در ساختار آن بیش از یک جز ماده استفاده شده باشد. در این مواد اجزاء مختلف خواص فیزیکی و شیمیایی خود را حفظ کرده و در نهایت ماده‌ای حاصل می‌شود که دارای خواص بهینه‌ای هست. این خواص در تک‌تک مواد شرکت‌کننده به صورت مجزا و در همه حالت‌ها وجود ندارد. (ریاحی و همکاران، ۱۳۸۱) مواد کامپوزیت در محصولات زیادی در زندگی روزمره ما یافت می‌شوند، از اتومبیل‌ها تا قایق‌ها، چوب‌های اسکی و گلف و غیره. علاوه بر این، کامپوزیت‌ها در بسیاری از کاربردهای صنعتی حساس، هوافضا و نظامی استفاده می‌شوند. در بازاری که تقاضا برای محصول همواره در حال افزایش است، مواد کامپوزیت در کاهش هزینه‌ها و افزایش کارایی، ثابت کرده‌اند که مؤثر می‌باشند. کامپوزیت‌ها، مشکلات را حل می‌کنند، سطح کارایی را بالا می‌برند و توسعه محصولات جدید را قادر می‌سازند. در حدود ۹۰٪ کامپوزیت‌های تولیدشده از الیاف شیشه و رزین پلی‌استر و وینیل استر استفاده می‌شود. ۶۵٪ کامپوزیت‌ها با استفاده از روش قالب‌گیری بازساخته می‌شوند و ۳۵٪ باقیمانده با استفاده از روش‌های قالب‌گیری بسته یا پیوسته تولید می‌شوند. (احمدی و همکاران، ۱۳۹۴). در اغلب پژوهش‌های انجام‌شده هدف مطالعه بر روی رشد ترک در بین لایه‌ها و به وجود آمدن پدیده لایه‌لایه شدگی بوده است. (مهدوی فکور و همکاران، ۱۳۹۱) در این پژوهش رشد ترک عرضی در کامپوزیت‌های پلیمری هیبریدشده که با دو نوع الیاف کربن و کولار تقویت‌شده‌اند مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور رشد ترک کامپوزیت در لایه‌های مختلف، ۴ لایه - ۶ لایه و ۸ لایه مورد مطالعه قرار می‌گیرد. پارامتر دیگر پژوهش درصد حجمی استفاده الیاف کربن و کولار در کامپوزیت می‌باشد که در چهار حالت ۳۰٪، ۳۵٪ و ۴۰٪ و ۴۵٪ مورد بررسی قرار می‌گیرد. نمونه‌های اولیه پس از آماده‌سازی تحت تست کشش و تست خستگی قرار می‌گیرند و رشد ترک در قطعات به صورت آزمایشگاهی محاسبه خواهد شد. سپس مدل‌سازی نمونه‌ها با استفاده از نرم‌افزار اجزا محدود آباکوس^۱ انجام خواهد شد و نتایج تجربی و عددی مقایسه می‌شوند.

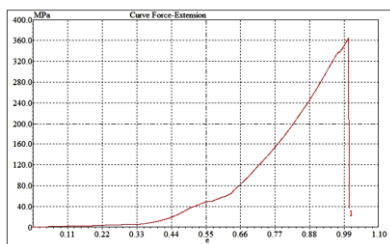
۲- روش تحقیق

در این تحقیق از روش المان محدود سه‌بعدی، نرم‌افزار آباکوس برای مدل‌سازی و تحلیل مسئله ورق ترک‌دار کامپوزیتی استفاده شده است. برای ورق ترک‌دار و اجزای سازنده ورق از المان‌های ۸ گره ای C3D8R ایزوتروپیک استفاده شده برای مدل‌سازی قطعات SOLID ورق‌های کامپوزیتی مختلفی که در این تحقیق استفاده شده از المان‌های ۸ گره ای C3D8R ایزوتروپیک و قطعاتی که به صورت SHELL هستند از المان‌های S4R استفاده شده است... برای ورق کامپوزیتی ترک‌دار در اطراف ترک از المان‌ها و نودهای بیشتری استفاده شده است. تحلیل به صورت الاستیک خطی در نظر گرفته شده است تا پارامترهای خروجی با دقت بالاتری به دست آیند.

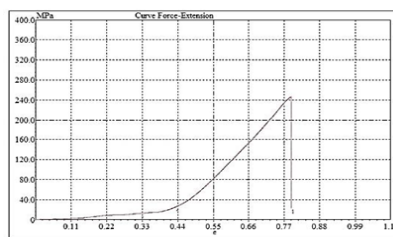
برای ورق‌های کامپوزیتی با توجه به اینکه مدل‌سازی مواد مرکب از مدل‌سازی مواد معمولی نظیر فولاد قدری مشکل‌تر است (از لحاظ دقت در تعیین و تعریف لایه‌ها) بنابراین مواد مرکب (بخصوص موادی که لایه‌های موادی زیادی دارند) باید دقت بیشتری به خرج داد. در نرم‌افزار آباکوس قابلیت مدل‌سازی مواد مرکب با لایه چینی متفاوت، ضخامت‌های مختلف، زوایای گوناگون و انتخاب نوع جنس برای هر لایه، تعیین شده است. امروزه مواد کامپوزیتی کاربرد گسترده‌ای در صنایع مختلف پیدا کرده‌اند. با افزایش کاربرد این مواد، نیاز بیشتری برای تحلیل سازه‌های کامپوزیتی احساس می‌شود که این امکان در نرم‌افزارهای مختلفی از جمله آباکوس وجود دارد.

۳- تجزیه و تحلیل داده‌ها

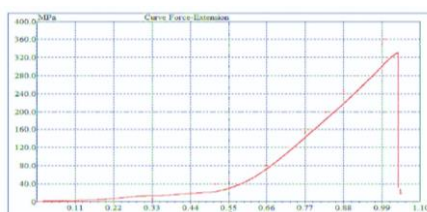
در این مرحله با استفاده از مدول visualization می‌توان بارهای ایجادکننده کششی را برای المان‌های مختلف به دست آورد. همچنین تنش‌ها، خیزها، انرژی، افزایش طول و ضخامت ترک و سایر مشخصه‌های مربوط را به صورت رنگی بر روی مدل مشاهده کرد. این مرحله بیشتر به صورت گرافیکی است و دید کلی به طراح می‌دهد. می‌توان پارامترهای مربوطه را به صورت نمودار از این مرحله استخراج نمود.



نمودار ۲- تنش - کرنش برای کامپوزیت ۶ لایه در حالت آزمایشگاهی



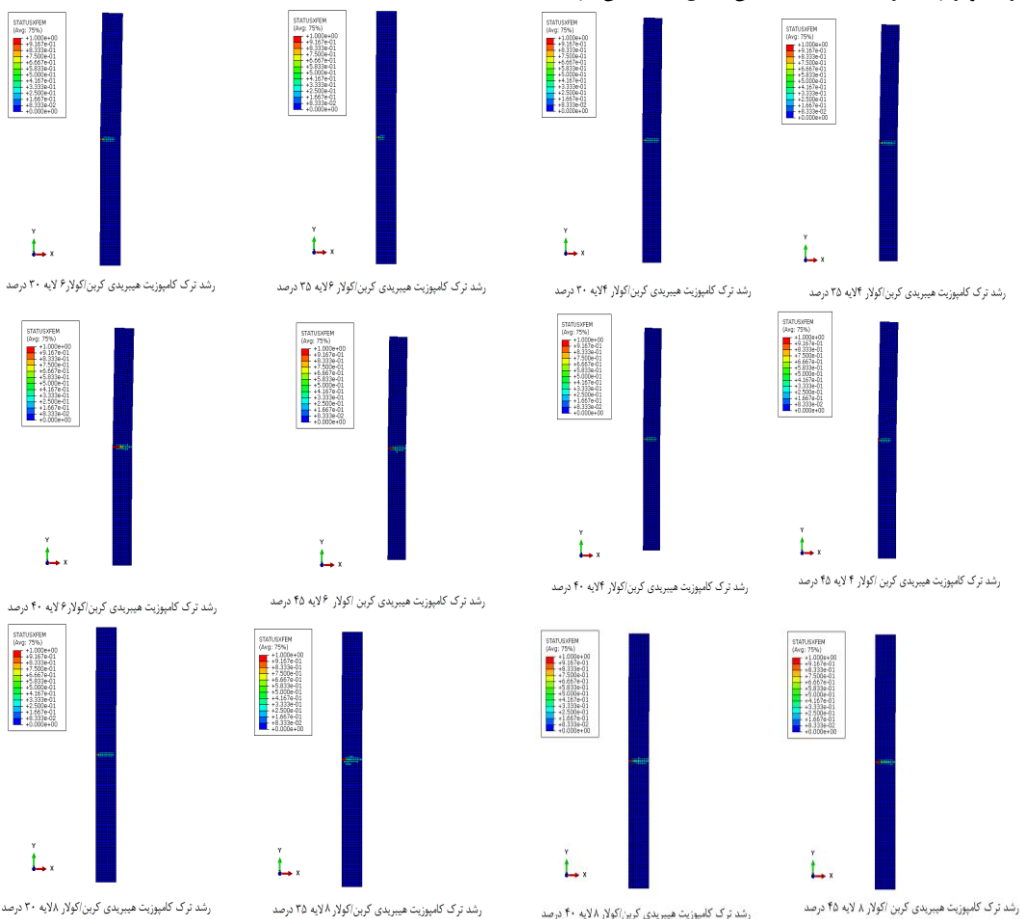
نمودار ۱- تنش کرنش برای حالت آزمایشگاهی ۴ لایه



نمودار ۳- تنش - کرنش برای کامپوزیت ۸ لایه در حالت آزمایشگاهی

۳-۱- مشاهده نتایج در مدول Visualization

در این مدول می‌توان وضعیت اجسام بعد اجرای برنامه به صورت عکس و پویانمایی و مش بندی شده مشاهده نمود. در تصویر زیر تصویر رشد ترک تا لحظه جدایش کامل به نمایش درآمده است.

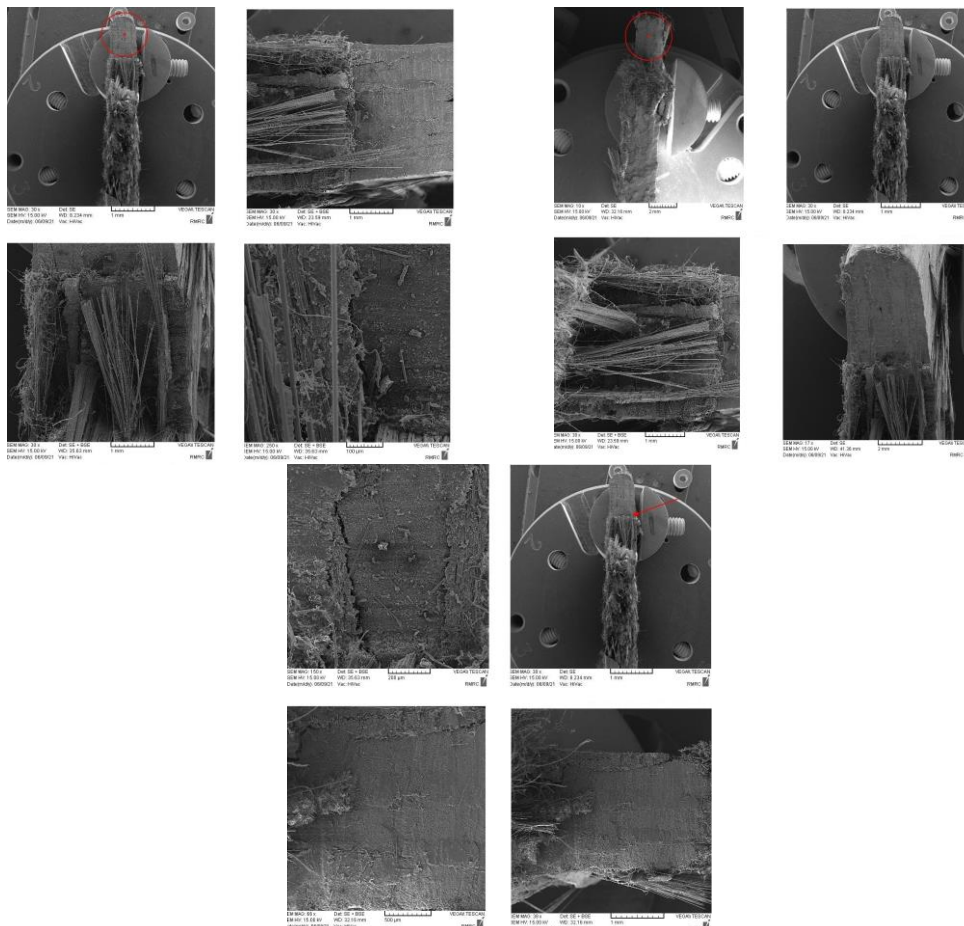


شکل ۱- رشد ترک در نمونه ورق ترک‌دار ساده تحت بار دانه‌ای

جدول ۱- نتایج آزمایشگاه خستگی

بار اعمالی	فرکانس	تعداد سیکل عمر خستگی	نام نمونه
$P_{max}=21/20 \text{ KN}$ $P_{min}=2/12 \text{ KN}$	5HZ	1۰۸۴۲	کامپوزیت هیبریدی کربن / کولار ۴ لایه ۳۰ درصد حجمی
$P_{max}=21/20 \text{ KN}$ $P_{min}=2/12 \text{ KN}$	5HZ	۱۱۲۱۸	کامپوزیت هیبریدی کربن / کولار ۴ لایه ۳۵ درصد حجمی
$P_{max}=21/20 \text{ KN}$ $P_{min}=2/12 \text{ KN}$	5HZ	۱۱۲۸۳	کامپوزیت هیبریدی کربن / کولار ۴ لایه ۴۰ درصد حجمی
$P_{max}=21/20 \text{ KN}$ $P_{min}=2/12 \text{ KN}$	5HZ	۱۲۴۰۰	کامپوزیت هیبریدی کربن / کولار ۴ لایه ۴۵ درصد حجمی
$P_{max}=31/87 \text{ KN}$ $P_{min}=3/187 \text{ KN}$	5HZ	۱۱۹۵	کامپوزیت هیبریدی کربن / کولار ۶ لایه ۳۰ درصد حجمی
$P_{max}=31/87 \text{ KN}$ $P_{min}=3/187 \text{ KN}$	5HZ	۲۳۹۶	کامپوزیت هیبریدی کربن / کولار ۶ لایه ۳۵ درصد حجمی
$P_{max}=31/87 \text{ KN}$ $P_{min}=3/187 \text{ KN}$	5HZ	۸۸۰۰	کامپوزیت هیبریدی کربن / کولار ۶ لایه ۴۰ درصد حجمی
$P_{max}=31/87 \text{ KN}$ $P_{min}=3/187 \text{ KN}$	5HZ	۶۸۴۰	کامپوزیت هیبریدی کربن / کولار ۶ لایه ۴۵ درصد حجمی
$P_{max}=28/856 \text{ KN}$ $P_{min}=2/856 \text{ KN}$	5HZ	۱۳۵۸۰	کامپوزیت هیبریدی کربن / کولار ۸ لایه ۳۰ درصد حجمی
$P_{max}=28/856 \text{ KN}$ $P_{min}=2/856 \text{ KN}$	5HZ	۶۲۰۰	کامپوزیت هیبریدی کربن / کولار ۸ لایه ۳۵ درصد حجمی
$P_{max}=28/856 \text{ KN}$ $P_{min}=2/856 \text{ KN}$	5HZ	۱۰۱۳۵	کامپوزیت هیبریدی کربن / کولار ۸ لایه ۴۰ درصد حجمی
$P_{max}=28/856 \text{ KN}$ $P_{min}=2/856 \text{ KN}$	5HZ	۸۴۵۴	کامپوزیت هیبریدی کربن / کولار ۸ لایه ۴۵ درصد حجمی

۳-۲- شکست نگاری



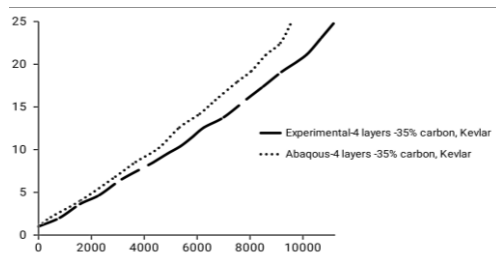
شکل ۲- تصاویر میکروسکوب الکترونی

به جدا یا قطعه قطعه شدن یک جسم جامد به دو یا چند قسمت تحت تأثیر تنش‌های وارده، شکست گفته می‌شود. از دیدگاه کرنش، شکست شامل دو نوع نرم و سخت دسته‌بندی می‌شود. شکست نرم در تغییر شکل مومسان در قبل و حین اشاعه ترک مشخص می‌شود که این اتفاق در دسته مواد نرم رخ می‌دهد اما شکست ترد با سرعت زیاد اشاعه ترک مشخص می‌گردد. با توجه به این که کامپوزیت‌ها در دسته مواد ترد و شبه ترد قرار می‌گیرند بررسی رشد ترک در آنها از اهمیت بالایی جهت طراحی برخوردار است. برای بررسی شکست در نمونه‌های شکسته شده در طی آزمایش خستگی، سطوح شکست در دو نمونه ۶ لایه با ۳۰ درصد حجمی و ۸ لایه با ۳۰ درصد حجمی بوسیله میکروسکوپ الکترونی عکس برداری شدند.

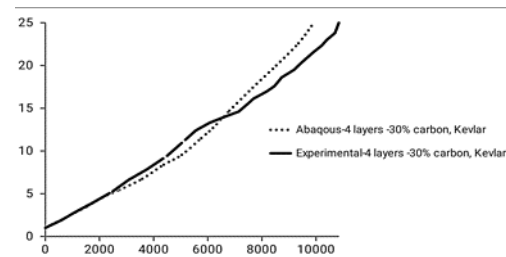
۳-۳- نمودار عمر ترک - فاصله طول ترک برای تنش با دامنه تعریف شده

نمودار ۴ عمر ترک - فاصله طول ترک برای کامپوزیت هیبریدی کربن/کولار ۴ لایه ۳۰ درصد حجمی در دو حالت آزمایشگاهی و نرم‌افزاری با نرم‌افزار آباکوس را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار بیشینه عمر خستگی قطعه در حالت آزمایشگاهی ۱۰۸۴۳ سیکل به دست آمده است نتایج نرم‌افزاری ۹۹۲۰ سیکل را برای قطعه نشان می‌دهد که اختلاف حالت آزمایشگاهی و نرم‌افزاری حدود ۸/۵۱٪ درصد می‌باشد. در نمودار ۵ عمر ترک - فاصله طول ترک برای کامپوزیت هیبریدی کربن/کولار ۴ لایه ۳۵ درصد حجمی در دو حالت آزمایشگاهی و نرم‌افزاری با نرم‌افزار آباکوس را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار بیشینه عمر خستگی قطعه در حالت آزمایشگاهی ۱۱۲۱۸ سیکل به دست آمده است نتایج نرم‌افزاری ۹۵۸۰ سیکل را برای قطعه نشان می‌دهد که اختلاف حالت آزمایشگاهی و نرم‌افزاری حدود ۱۴/۶٪ درصد می‌باشد.

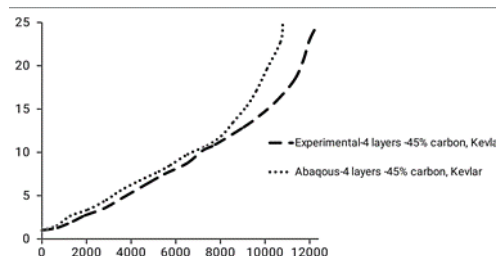
نمودار ۶ عمر ترک - فاصله طول ترک برای کامپوزیت هیبریدی کربن/کولار ۴ لایه ۴۰ درصد حجمی در دو حالت آزمایشگاهی و نرم‌افزاری با نرم‌افزار آباکوس را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار بیشینه عمر خستگی قطعه در حالت آزمایشگاهی ۱۱۲۸۳ سیکل به دست آمده است نتایج نرم‌افزاری ۱۰۱۰۰ سیکل را برای قطعه نشان می‌دهد که اختلاف حالت آزمایشگاهی و نرم‌افزاری حدود ۱۰/۴۸٪ درصد می‌باشد. نمودار ۷ عمر ترک - فاصله طول ترک برای کامپوزیت هیبریدی کربن/کولار ۴ لایه ۴۵ درصد حجمی در دو حالت آزمایشگاهی و نرم‌افزاری با نرم‌افزار آباکوس را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار بیشینه عمر خستگی قطعه در حالت آزمایشگاهی ۱۲۴۰۰ سیکل به دست آمده است نتایج نرم‌افزاری ۱۰۸۰۰ سیکل را برای قطعه نشان می‌دهد که اختلاف حالت آزمایشگاهی و نرم‌افزاری حدود ۱۲/۹٪ درصد می‌باشد.



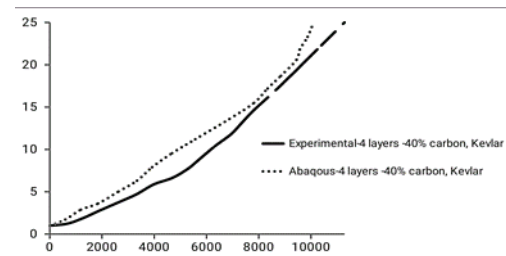
نمودار ۵- عمر ترک - فاصله طول ترک برای کامپوزیت هیبریدی کربن/کولار ۴ لایه ۳۵ درصد حجمی در دو حالت آزمایشگاهی و نرم‌افزاری



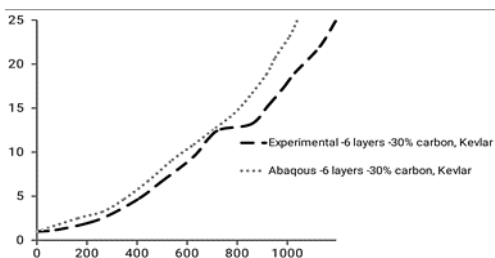
نمودار ۶- عمر ترک - فاصله طول ترک برای کامپوزیت هیبریدی کربن/کولار ۴ لایه ۳۰ درصد حجمی در دو حالت آزمایشگاهی و نرم‌افزاری



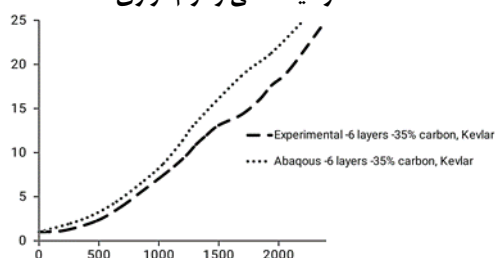
نمودار ۷- عمر ترک - فاصله طول ترک برای کامپوزیت هیبریدی کربن/کولار ۴ لایه ۴۵ درصد حجمی در دو حالت آزمایشگاهی و نرم‌افزاری



نمودار ۸- عمر ترک - فاصله طول ترک برای کامپوزیت هیبریدی کربن/کولار ۴ لایه ۴۰ درصد حجمی در دو حالت آزمایشگاهی و نرم‌افزاری

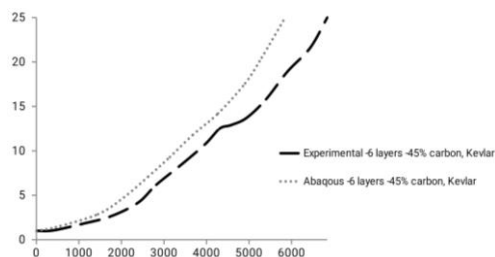


نمودار ۸- عمر ترک - فاصله طول ترک برای کامپوزیت هیبریدی کربن/کولار ۶ لایه ۳۰ درصد حجمی در دو حالت آزمایشگاهی و نرم‌افزاری



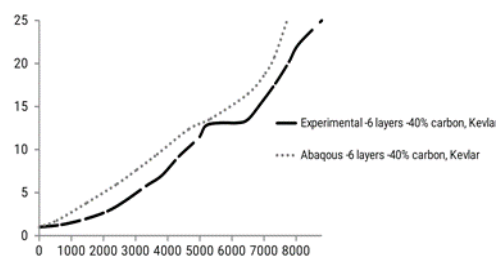
نمودار ۹- عمر ترک - فاصله طول ترک برای کامپوزیت هیبریدی کربن/کولار ۶ لایه ۳۵ درصد حجمی در دو حالت آزمایشگاهی و نرم‌افزاری

نتایج نرم‌افزاری ۷۷۲۰ سیکل را برای قطعه نشان می‌دهد که اختلاف حالت آزمایشگاهی و نرم‌افزاری حدود ۱۲/۳۷٪ درصد می‌باشد. نمودار ۱۱ - عمر ترک - فاصله طول ترک برای کامپوزیت هیبریدی کربن/کولار ۶ لایه ۴۵ درصد حجمی در دو حالت آزمایشگاهی و نرم‌افزاری با نرم‌افزار آباکوس را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار بیشینه عمر خستگی قطعه در حالت آزمایشگاهی ۶۸۴۰ سیکل به دست آمده است نتایج نرم‌افزاری ۵۸۵۰ سیکل را برای قطعه نشان می‌دهد که اختلاف حالت آزمایشگاهی و نرم‌افزاری حدود ۱۴/۴۷٪ درصد می‌باشد.



نمودار ۱۱- عمر ترک - فاصله طول ترک برای کامپوزیت هیبریدی کربن/کولار ۶ لایه ۴۵ درصد حجمی در دو حالت آزمایشگاهی و نرم‌افزاری

نمودار ۸ عمر ترک - فاصله طول ترک برای کامپوزیت هیبریدی کربن/کولار ۶ لایه ۳۰ درصد حجمی در دو حالت آزمایشگاهی و نرم‌افزاری با نرم‌افزار آباکوس را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار بیشینه عمر خستگی قطعه در حالت آزمایشگاهی ۱۱۹۵ سیکل به دست آمده است نتایج نرم‌افزاری ۱۰۴۰ سیکل را برای قطعه نشان می‌دهد که اختلاف حالت آزمایشگاهی و نرم‌افزاری حدود ۱۲/۹۷٪ درصد می‌باشد. نمودار ۹ عمر ترک - فاصله طول ترک برای کامپوزیت هیبریدی کربن/کولار ۶ لایه ۳۵ درصد حجمی در دو حالت آزمایشگاهی و نرم‌افزاری با نرم‌افزار آباکوس را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار بیشینه عمر خستگی قطعه در حالت آزمایشگاهی ۲۳۹۶ سیکل به دست آمده است نتایج نرم‌افزاری ۲۲۱۰ سیکل را برای قطعه نشان می‌دهد که اختلاف حالت آزمایشگاهی و نرم‌افزاری حدود ۷/۷۶٪ درصد می‌باشد. نمودار ۱۰ عمر ترک - فاصله طول ترک برای کامپوزیت هیبریدی کربن/کولار ۶ لایه ۴۰ درصد حجمی در دو حالت آزمایشگاهی و نرم‌افزار آباکوس را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار بیشینه عمر خستگی قطعه در حالت آزمایشگاهی ۸۸۰۰ سیکل به دست آمده است.



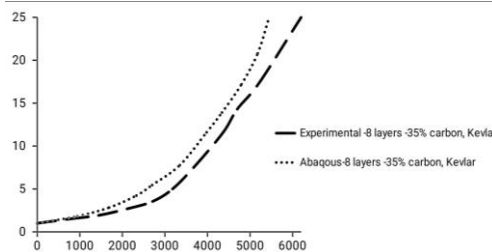
نمودار عمر ۱۰- ترک - فاصله طول ترک برای کامپوزیت هیبریدی کربن/کولار ۶ لایه ۴۰ درصد حجمی در دو حالت آزمایشگاهی و نرم‌افزاری

نمودار ۱۲ عمر ترک - فاصله طول ترک برای کامپوزیت هیبریدی کربن/کولار ۸ لایه ۳۰ درصد حجمی در دو حالت آزمایشگاهی و نرم‌افزاری با نرم‌افزار آباکوس را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار بیشینه عمر خستگی قطعه در حالت آزمایشگاهی ۱۳۵۸۰ سیکل به دست آمده است نتایج نرم‌افزاری ۱۱۱۷۴ سیکل را برای قطعه نشان می‌دهد که اختلاف حالت آزمایشگاهی و نرم‌افزاری حدود ۱۷/۷۱٪ درصد می‌باشد. نمودار ۱۳ عمر ترک - فاصله طول ترک برای کامپوزیت هیبریدی کربن/کولار ۸ لایه ۳۵ درصد حجمی در دو حالت آزمایشگاهی و نرم‌افزاری با نرم‌افزار آباکوس را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار بیشینه عمر خستگی قطعه در حالت آزمایشگاهی ۶۲۰۰ سیکل به دست آمده است نتایج نرم‌افزاری ۵۴۵۰ سیکل را برای قطعه نشان می‌دهد که اختلاف حالت آزمایشگاهی و نرم‌افزاری حدود ۱۲/۰۹٪ درصد می‌باشد.

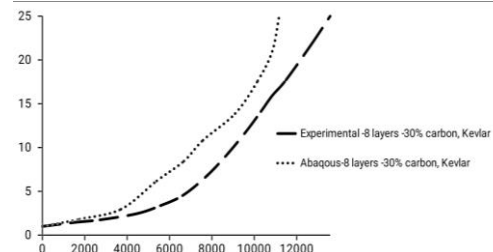
نمودار ۱۴ عمر ترک - فاصله طول ترک برای کامپوزیت هیبریدی کربن/کولار ۸ لایه ۴۰ درصد حجمی در دو حالت آزمایشگاهی و نرم‌افزاری با نرم‌افزار آباکوس را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار بیشینه عمر خستگی قطعه در حالت آزمایشگاهی

۱۰۱۳۵ سیکل به دست آمده است نتایج نرم‌افزاری ۸۷۱۰ سیکل را برای قطعه نشان می‌دهد که اختلاف حالت آزمایشگاهی و نرم‌افزاری حدود ۱۴/۰۶٪ درصد می‌باشد.

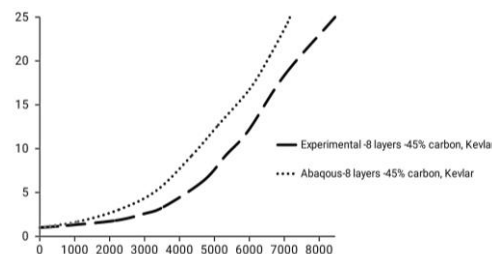
نمودار ۱۵ عمر ترک - فاصله طول ترک برای کامپوزیت هیبریدی کربن/کولار ۸ لایه ۴۵ درصد حجمی در دو حالت آزمایشگاهی و نرم‌افزاری با نرم‌افزار آباکوس را نشان می‌دهد. با توجه به نمودار بیشینه عمر خستگی قطعه در حالت آزمایشگاهی ۸۴۵۴ سیکل به دست آمده است نتایج نرم‌افزاری ۷۱۶۰ سیکل را برای قطعه نشان می‌دهد که اختلاف حالت آزمایشگاهی و نرم‌افزاری حدود ۱۵/۳٪ درصد می‌باشد.



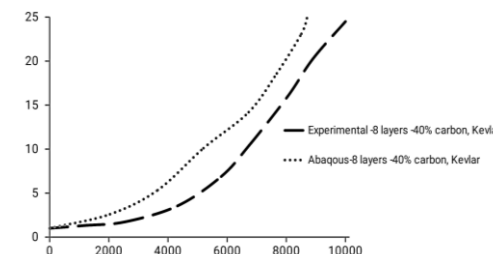
نمودار (۱۳): عمر ترک - فاصله طول ترک برای کامپوزیت هیبریدی کربن/کولار ۸ لایه ۳۵ درصد حجمی در دو حالت آزمایشگاهی و نرم‌افزاری



نمودار (۱۲): عمر ترک - فاصله طول ترک برای کامپوزیت هیبریدی کربن/کولار ۸ لایه ۳۰ درصد حجمی در دو حالت آزمایشگاهی و نرم‌افزاری



نمودار (۱۵): عمر ترک - فاصله طول ترک برای کامپوزیت هیبریدی کربن/کولار ۸ لایه ۴۵ درصد حجمی در دو حالت آزمایشگاهی و نرم‌افزاری



نمودار ۱۴ - عمر ترک - فاصله طول ترک برای کامپوزیت هیبریدی کربن/کولار ۸ لایه ۴۰ درصد حجمی در دو حالت آزمایشگاهی و نرم‌افزاری

۴- نتیجه گیری

با توجه به کارهای انجام شده توسط محققان دیگر در این زمینه، نوآوری تحقیق حاضر مطالعه بر روی سه نوع ورق کامپوزیتی هیبریدی کربن/کولار ۴ لایه، ۶ لایه و ۸ لایه هر کدام با درصد حجمی ۳۰، ۴۰، ۴۵، ۴۵، ۴۰، ۳۰ در حالت آزمایشگاهی و نرم‌افزاری با نرم‌افزار آباکوس تحت آزمایش تست کشش و تست عمر خستگی قرار گرفتند.

و مقایسه نقش الیاف کربن و کولار در تست خستگی با درصد های مختلف در این تحقیق بر روی ورق کامپوزیتی هیبریدی انجام شد. برای این هدف شکل نمونه‌ها به صورت آزمایشگاهی ساخته شد و مورد بررسی واقع شده است و نتایج به دست آمده با نتایج حل عددی به روش اجزاء محدود به وسیله نرم‌افزار آباکوس صحت سنجی گردید. که نتایج به شرح ذیل حاصل گردید.

۱. در تست های کشش کامپوزیت هیبریدی کربن/کولار ۸ لایه و ۶ لایه و ۴ لایه با ۴۰ درصد حجمی در دو حالت آزمایشگاهی و نرم‌افزاری مورد بررسی قرار گرفت که نقطه شکست برای کامپوزیت ۴ لایه ۲۵۰Mpa و برای کامپوزیت ۶ لایه ۳۶۴Mpa و برای کامپوزیت ۸ لایه ۳۳۴Mpa می‌باشد که بسیار استحکام مناسبی برای کامپوزیت می‌باشد و در صحت سنجی به وسیله نرم‌افزار آباکوس به طور میانگین ۱۲٪ در صد اختلاف با حالت آزمایشگاهی را نشان داد که قابل قبول می‌باشد.

۲. پس از اعمال ترک ۱ میلی‌متری در ورق و اعمال بار چرخه‌ای مورد نظر در تحقیق به قطعه عمر خستگی برای کامپوزیت هیبریدی کربن/کولار ۴ لایه ۳۰ درصد حجمی برابر ۱۰۸۴۲ سیکل، کامپوزیت ۴ لایه ۳۵ درصد حجمی برابر ۱۱۲۱۸ سیکل، کامپوزیت هیبریدی کربن/کولار ۴ لایه ۴۰ درصد حجمی برابر ۱۱۲۸۳ سیکل، کامپوزیت هیبریدی کربن/کولار ۴ لایه ۴۵ درصد حجمی برابر ۱۲۴۰۰ سیکل، کامپوزیت هیبریدی کربن/کولار ۶ لایه ۳۰ درصد حجمی برابر ۱۱۹۵ سیکل، کامپوزیت ۶ لایه ۳۵ درصد حجمی برابر ۲۳۹۶ سیکل، کامپوزیت هیبریدی کربن/کولار ۶

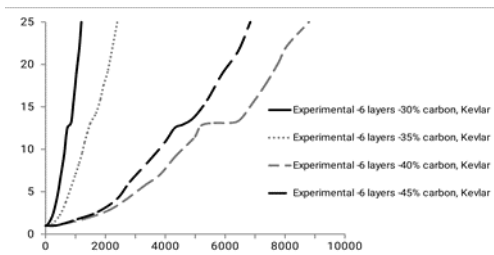
لایه ۴۰ درصد حجمی برابر ۸۸۰۰ سیکل، کامپوزیت هیبریدی کربن/کولار ۶ لایه ۴۵ درصد حجمی برابر ۶۸۴۰ سیکل، کامپوزیت هیبریدی کربن/کولار ۸ لایه ۳۰ درصد حجمی برابر ۱۳۵۸۰ سیکل، کامپوزیت ۸ لایه ۳۵ درصد حجمی برابر ۶۲۰۰ سیکل، کامپوزیت هیبریدی کربن/کولار ۸ لایه ۴۰ درصد حجمی برابر ۱۰۱۳۵ سیکل، کامپوزیت هیبریدی کربن/کولار ۸ لایه ۴۵ درصد حجمی برابر ۸۴۵۴ سیکل، در حالت آزمایشگاهی می‌باشد که نتایج باحالت تست های نرم افزار آباکوس به طور میانگین ۱۲/۶۶٪ درصد اختلاف دارند که صحت کار آزمایشگاهی را تأیید می‌کند.

۳. در مقایسه نمودارهای عمر ترک - فاصله طول ترک برای کامپوزیت هیبریدی کربن/کولار ۴ لایه با درصد حجمی ۳۰،۳۵،۴۰،۴۵ در حالت آزمایشگاهی، تعداد سیکل در درصد حجمی ۴۵ که بالاترین درصد حجمی موردتحقیق است بیشینه می‌باشد.

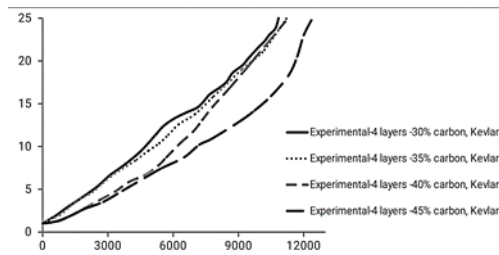
۴. با مقایسه بیشینه نمودارهای عمر ترک - فاصله طول ترک برای کامپوزیت هیبریدی کربن/کولار ۴ لایه و ۶ لایه و ۸ لایه در حالت آزمایشگاهی می‌توان نتیجه گرفت با افزایش تعداد لایه‌ها از ۴ لایه (با درصد حجمی ۴۵) به ۶ لایه (با درصد حجمی ۴۰) تعداد سیکل‌های عمر خستگی کاهش پیدا می‌کند و با افزایش لایه‌ها از ۶ لایه (با درصد حجمی ۴۰) به ۸ لایه (با درصد حجمی ۳۰) افزایش تعداد سیکل‌های عمر خستگی مشهود می‌باشد.

در مقایسه نمودارهای عمر ترک - فاصله طول ترک برای کامپوزیت هیبریدی کربن/کولار ۶ لایه با درصد حجمی ۳۰،۳۵،۴۰،۴۵ در حالت آزمایشگاهی، تعداد سیکل در درصد حجمی ۴۰ بیشینه می‌باشد و در مقایسه نمودارهای عمر ترک - فاصله طول ترک برای کامپوزیت هیبریدی کربن/کولار ۸ لایه با درصد حجمی ۳۰،۳۵،۴۰،۴۵ در حالت آزمایشگاهی، تعداد سیکل در درصد حجمی ۳۰ که پایین‌ترین درصد حجمی موردتحقیق است بیشینه می‌باشد.

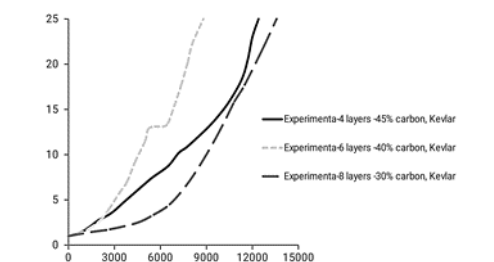
به نظر می‌رسد بیشتر شدن تعداد لایه‌ها در کامپوزیت هیبریدی مقدار کمتر استفاده از درصد حجمی کربن و کولار تعداد سیکل‌های عمر خستگی را به نسبت سایر درصد های بیشتر می‌کند.



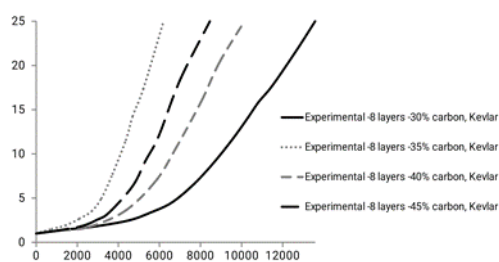
نمودار ۱۷- مقایسه نمودارهای عمر ترک - فاصله طول ترک برای کامپوزیت هیبریدی کربن/کولار ۶ لایه با درصد حجمی ۳۰،۳۵،۴۰،۴۵ در حالت آزمایشگاهی



نمودار ۱۶- مقایسه نمودارهای عمر ترک - فاصله طول ترک برای کامپوزیت هیبریدی کربن/کولار ۴ لایه با درصد حجمی ۳۰،۳۵،۴۰،۴۵ در حالت آزمایشگاهی



نمودار ۱۹- مقایسه بیشینه نمودارهای عمر ترک - فاصله طول ترک برای کامپوزیت هیبریدی کربن/کولار ۴ لایه و ۶ لایه و ۸ لایه در حالت آزمایشگاهی



نمودار ۱۸- مقایسه نمودارهای عمر ترک - فاصله طول ترک برای کامپوزیت هیبریدی کربن/کولار ۸ لایه با درصد حجمی ۳۰،۳۵،۴۰،۴۵ در حالت آزمایشگاهی

۱. ابراهیم نژاد خالجبیری، ح. اسلامی فارسانی، ر. خرسند، ح. عباس بنایی، ک. ۱۳۹۳. اثر هیبرید نمودن الیاف تقویت کننده بر خواص کششی کامپوزیت های زمینه اپوکسی، علوم و فناوری کامپوزیت، ۱(۲): ۲۱-۲۸
۲. احمدی ومکانی، س. نصرتی، ه. طهرانی دهکردی، م. ۱۳۹۴. تأثیر میزان خمش بر افت استحکام در کامپوزیت های خالص و هیبریدی تقویت شده با الیاف ترد و انعطاف پذیر. مکانیک سازه ها و شاره ها. دومین کنفرانس بین المللی دست آوردهای نوین پژوهشی در مکانیک، صنایع هوافضا، تهران.
۳. رباحی همایون، افضلی محمدرضا، ۱۳۸۱، مکانیک مواد مرکب، چاپ اول، تهران: گسترش علوم پایه ۲۷۶ صفحه
۴. مجیدی آیت اللهی مجید رضا، هاشمی روح الله، ۱۳۸۴، بررسی اثر تقویت کننده کامپوزیتی بر ترک مرکزی در یک ورق جدار نازک، دومین کنفرانس سازه های جدار نازک، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ۲۵ تا ۲۶ آبان، ص ۸۱-۸۹
۵. مهدوی فکور مهدی، لاسمی نیما، ۱۳۹۱، شبیه سازی ترک در قطعات کامپوزیتی با استفاده از مدل ترک مجازی، بیستمین همایش سالیانه بین المللی مهندسی مکانیک ایران، دانشگاه شیراز، شیراز، ۲۶ تا ۲۸ اردیبهشت، ص ۱۹۴-۱۹۸.
6. Arai, M., Noro, Y., Sugimoto, K.i., Endo, M. "Mode I and mode II interlaminar fracture toughness of CFRP laminates toughened by carbon nanofiber interlayer", *Composites Science Technol*, pp. 516-525, 2008.
7. Cheng, W., Finnie, I., "Computation of mode I stress intensity factors for three-dimensional bodies using displacements at an arbitrary location", *International Journal of Fracture*, Vol. 83, pp. 91- 104, 1997.
8. Fereidoon, A., Rajabpour, M., Hemmatian, H., "Fracture analysis of epoxy/SWCNT nanocomposite based on global-local finite element model", *Composite Part B*, pp. 401-407, 2013.
9. Gawandi, A.A., "Interaction Between a Nanofiber and an Arbitrarily Oriented Crack", *Journal of Composite Materials*, pp. 42-45, 2008.
10. Gawandi, A.A., Whitney, J.M., Tandon, G.P., Brockman, R.B., "Three-dimensional analysis of the interaction between a matrix crack and nanofiber", *Composites*, pp. 698- 704, 2009.
11. Gojny, F.H., Wichmann, M.H.G., Kopke, U., Fiedler, B., Schulte, K., "Carbon nanotubereinforced epoxy-composites: enhanced stiffness and fracture toughness at low nanotube content", *Composites Science Technol*, pp. 64-71, 2004.
12. Haddi, A., Weichert, A., "Three-dimensional interaction between a crack front and particles", *International Journal of numerical method in ingeneering*, pp. 63- 76, 1998.
13. Kim, J., Paulino, G., "On Fracture Criteria for Mixed-Mode Crack Propagation in Functionally Graded Materials", *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, pp. 227-244, 2007.
14. Pipes, R.B., Hubert, P., "Helical carbon nanotube arrays", *Composites Science Technol* 62, pp. 419-428, 2002.
15. Qian, D., Dickey, EC., Andrews, R., Rantell, T., " Load transfer and deformation mechanisms in carbon nanotube-polystyrene Composites", *Appl Phys Lett*, pp. 76-90, 2000.
16. Rafiee, R., Fereidoon, A., Heidarhaei, M., "Influence of non-bonded interphase on crack driving force in carbon nanotube reinforced polymer", *Computational material science* 56, pp. 2528, 2012.
17. Renjie, M., Sun, G., "A Study of the interaction between Matrix crack and matrix-fiber interface", *Engineering Fracture mechanics*, Vol. 51, No. 3, pp. 469-477, 1995.
18. Won-Ho Yang, Ki- Hyum Chung. 2002, fracture mechanics analysis on the bonded repair of a skin/ stiffener with an inclined central crack, *composite structures*, 55: PP 269-276

