

تعیین پاسخ خستگی تیر مدور کامپوزیتی با به کارگیری یک مدل نوین آسیب کوپلی پیشرو

محمود ذبیح پور

استادیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی هوافضا، ایران، zabihpoor@mut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۵/۱۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۰/۰۱

چکیده

محاسبات مربوط به پاسخ خستگی ساختارهای کامپوزیتی، از طرفی با چالش وجود مدل‌های نه‌چندان کارآمد و از طرف دیگر با هزینه‌های گزاف در اجرای آزمایشات متعدد با پیچیدگی‌های عملی و نیاز به تجهیزات پیشرفته و دقیق مواجه است. از این منظر، توسعه و تکامل هرچه بیشتر مدل‌ها در تعیین پاسخ خستگی المان‌ها و سازه‌ها بسیار ارزشمند است. در این مقاله، ضمن ارائه مدل کوپلی نوین آسیب از ارزیابی خستگی، پاسخ خستگی تیر مدور کامپوزیتی مشخصه‌سازی شده است. با تعریف یک متغیر آسیب سیکلی تابع مکان، رابطه پاسخ مکانیکی با متغیر آسیب از طریق مدل مکانیک آسیب پیوسته^۱ تعیین شده است. در ادامه از طریق کوپل نمودن متغیر آسیب با یک مدل آسیب موضعی و تئوری اصلاح‌شده تیر مدور با ترم‌های غیرخطی، محاسبه پیشرفت موضعی آسیب با هر سیکل بارگذاری هر نقطه از تیر میسر شده است. مقادیر ثابت معرفی شده در روابط مدل، از طریق انجام تعداد بسیار محدودی آزمایش تحت بارگذاری‌های نوسانی دامنه ثابت تا تعداد محدودی سیکل به دست آمده است. نتایج نهایی حاصل از طریق محاسبات مدل، تطابق رضایت‌بخشی با نتایج تجربی نشان می‌دهد. در نتیجه کارآمدی فرایند ارائه شده، کاهش قابل ملاحظه تعداد آزمایشات مورد نیاز و در نهایت کاهش هزینه و زمان لازم میسر شده است.

واژگان کلیدی

خستگی، تیر مدور کامپوزیتی^۲، مکانیک آسیب پیوسته، مدل آسیب موضعی، آسیب کوپلی پیشرو

۱. مقدمه

جز این‌ها گواهی بر این مدعاست [۱]. در مقابل مزایای بسیار زیاد سازه‌ای به کارگیری این نوع مواد، رفتارهای ناشناخته و پیچیده مکانیکی از مهم‌ترین معایب آنها به‌شمار می‌رود. یکی از این رفتارهای پیچیده، ارزیابی رفتار خستگی مواد کامپوزیت در

مواد کامپوزیت به دلیل خواص ویژه و قابل طراحی، همواره یکی از انتخاب‌های مهم در طراحی و ساخت سازه‌ها با شرایط بهینه می‌باشند. کاربردهای گسترده و روزافزون آنها در حوزه‌های متنوع مهندسی مثل سازه‌های هوافضایی، خودرویی، سازه‌های دریایی و

وضعیت‌های مختلف بارگذاری است. پیچیدگی این نوع رفتارها، عمدتاً ناشی از پیچیدگی مکانیزم‌های متفاوت در ایجاد و به‌ویژه رشد آسیب در مقایسه با مواد ایزوتروپ می‌باشد [۳-۲]. به‌طور معمول، جدایش الیاف از ماتریس، ترک در ماتریس، شکست الیاف و تورق از وضعیت‌های اصلی آسیب در بارگذاری‌های خستگی مواد کامپوزیت است [۴-۷]. به‌کارگیری تیرهای کامپوزیتی با مقطع مدور در کاربردهای مهمی به‌عنوان سازه‌های اصلی^۳ مسبوق به سابقه و گاهاً به‌دلیل مزایای آنها اجتناب‌ناپذیر است. از مثال‌های مهم در این زمینه می‌توان به اسپار ملخ هلیکوپتر مشهور یو. اچ. بلک‌هاوک^۴ اشاره کرد [۸].

تاریخچه بررسی تحقیقات روی پاسخ خستگی تیرهای کامپوزیتی در سه بخش تکامل پژوهش‌ها بر محاسبات مربوط به رفتار خستگی کامپوزیت‌ها، رفتار خمش استاتیکی تیرهای مدور و در نهایت رفتار خستگی خمشی این نوع تیرهای کامپوزیتی قابل دسته‌بندی است. محاسبات مربوط به شکست و رفتار مکانیکی تیرهای کامپوزیتی تحت بار خمش استاتیکی با پیچیدگی‌هایی در تعیین لحظه شکست همراه است. ترکیب این پیچیدگی‌ها با ملاحظات هندسی تیرهای مدور و بارگذاری خستگی، مسئله بررسی رفتار خستگی مکانیکی تیرهای مدور کامپوزیتی را، که کاربردهای فراوانی در صنایع دارد، بیش از پیش مهم و پیچیده می‌نماید.

استاربوک (۱۹۹۹) در تحقیقات خود یک حل بسته برای لایه‌چینی‌های تحت بارگذاری نامتقارن به‌دست آورد [۹]. این فرمول‌بندی تا مرحله واماندگی اولین لایه معتبر بود. باتاچاریا و اپیاه (۲۰۰۰) الیاف احاطه‌شده توسط ماتریس تحت بارگذاری عرضی را برای تعیین حل دقیق الاستوپلاستیک شبیه‌سازی نمودند [۱۰]. اما به‌دلیل نقش بالای همه الیاف در رفتار نهایی، نتایج حاصل از شبیه‌سازی به‌طور مستقیم قابل اعمال نمی‌باشد. هوانگ (۲۰۰۴) به‌کمک یک مدل ماکرومکانیکی جدید، تحقیقی بر استحکام استاتیک کامپوزیت‌های استوانه‌ای انجام داد [۱۱]. تلاش این تحقیق با فرضیات اتخاذشده برای ساختارهایی خاص و ساده در تعیین لحظه شکست، تطابق قابل قبولی با نتایج تجربی از خود نشان داده است. در مجموع، تاکنون فقط برای تحلیل استاتیکی روش هوانگ می‌تواند تا حدودی پیش‌بینی‌های نسبتاً خوبی ارائه دهد. از طرف دیگر، در تحلیل رفتارهای خستگی تیرها، تعداد معدودی تحقیق انجام شده است. سیدوروف و

سوباگیو (۱۹۸۴)، مدل جدیدی برای تعیین آسیب در تیرها ارائه نمودند [۱، ۳]. در تحقیقات از عبارات غیرخطی صرف‌نظر شده است که خود موجب ایجاد خطاهایی نسبتاً مهم در نتایج می‌گردد. همچنین، هریس (۱۹۸۵) طی بررسی‌های خود نشان داد که مدل‌های متفاوت بارگذاری و اندازه قطعه بر رفتار خستگی تیر و نمودارهای S-N کامپوزیت‌های الیافی مؤثر است [۲]. دنگ و همکاران (۱۹۹۹) اثر به‌کارگیری الیاف آکرپلونیتریل در رفتار خستگی مکانیکی تیر را بررسی نمودند. بر اساس نتایج حاصل، عمر خستگی با افزودن این نوع الیاف تا ۱۲ درصد ارتقا می‌یابد [۱۲]. پیگم (۲۰۰۱) روش سیدوروف (محدود به عبارات خطی) را با تکنیک‌های اجزای محدود ترکیب نمود تا رفتار خستگی تیرهای کامپوزیتی را آن هم با مقاطع و پروفیل‌های ساده و غیر دایروی تعیین‌نماید [۱۳]. در غالب تحقیقات موجود در تاریخچه، تحلیل‌ها، بدون توجه به روابط غیرخطی در نظر گرفته شده است [۱۴-۱۹]. مدل‌های تجربی پیشنهادی در تحقیقات آدام و همکاران (۲۰۱۴)، مدل تحلیل حل بسته زی و همکاران (۲۰۱۵)، اگرچه قابلیت پیش‌بینی مناسب نتایج را دارند، اما محدود به شرایط ویژه می‌باشند [۲۰-۲۱].

کروگر و رالفز (۲۰۱۵) مدلی ساده بر پایه وضعیت فیزیکی برای آسیب خستگی در لایه‌های کامپوزیتی پیشنهاد کردند که اگرچه از عمومیت کاربرد برخوردار بود، اما با دقت مناسبی در حالت‌های مختلف همراه نبود [۲۲]. همچنین مدل‌های ارائه‌شده در تحقیقات هو و همکاران (۲۰۱۵) و فانگ و همکاران (۲۰۱۵)، مدل‌های توانمندی در تعیین رشد آسیب در لایه‌چینی‌های کامپوزیتی می‌باشند، اما به‌طور خاص برای بررسی رفتار خستگی توسعه داده نشده‌اند [۲۳-۲۴]. مدل عددی مدهوسودانان (۲۰۱۶) و سورش کومار و همکاران (۲۰۱۶) نیز نتایج را با دقت مناسب اما برای لایه‌چینی‌های خاص ارائه می‌دهند [۲۵-۲۶].

همان‌گونه که بررسی تاریخچه نشان می‌دهد، محاسبه و تعیین رفتار خستگی تیرهای کامپوزیتی الیافی با دشواری‌های جدی روبروست و هنوز به‌طور کامل شناسایی نشده است. این بدان معناست که ارتقای آن، به توسعه مدل‌های کامل‌تر و تحقیقات بیشتری نیازمند است.

مقاله حاضر به انجام همین ضرورت می‌پردازد و هدف آن تعیین پاسخ خستگی مکانیکی تیرهای کامپوزیتی با مقطع دایروی با محاسبه آسیب تجمعی سیکلی و در نظر گرفتن روابط غیرخطی

خواهد بود. برای انجام این فرایند، یک مدل آسیب موضعی معرفی و به کار گرفته شده است. مدل آسیب موضعی شامل ضرایب و مقادیر ثابتی است که خود از طریق تعداد بسیار محدودی آزمایشات پایه خستگی به دست می آید. بارگذاری های خستگی در شرایط اعمال جابه جایی سیکلی با دامنه ثابت اجرا می گردند.

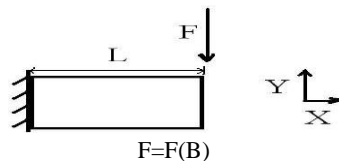
با مشخص بودن توزیع آسیب سیکلی در تمام نقاط، توزیع تنش و کرنش در هر نقطه از تیر (در راستای طول و حتی مقطع) و در هر سیکل قابل تعیین است. در نهایت به منظور ارزیابی، اعتبارسنجی و مقایسه نتایج پیش بینی شده از مدل، آزمایشات اصلی و اندازه واقعی سازه تیر تحت بار خستگی نیز اجرا می گردد.

۳. شبیه سازی

در این بخش جزئیات مدلسازی به صورت گام به گام ارائه می شود.

۳-۱. هندسه و شرایط مرزی

شرایط مرزی مسئله به صورت تیر یک طرف آزاد - یک طرف گیردار در نظر گرفته شده است. هندسه بارگذاری مسئله بر اساس وضعیت تیر یک سر گیردار کامپوزیتی با مقطع مدور مطابق شکل ۲ می باشد. ارتباط بین جابه جایی انتهای آزاد تیر (B)، با بار وارد شده (F)، به صورت رابطه ۱ به دست می آید.



شکل ۲. هندسه بارگذاری تیر مدور کامپوزیتی (F مقدار نیرو در نقطه B)

گفتنی است در مدلسازی فرض می شود مقدار آسیب در سیکل اول، صفر می باشد ($D=0$). لذا با استفاده از مدول الاستیک اولیه تیر، از روابط حاکم بین نیرو و جابه جایی، نیرو از رابطه ۱ محاسبه می شود.

$$u(B) = F \int_0^L \frac{(L-x)^2}{EI(x)} dx \quad (1)$$

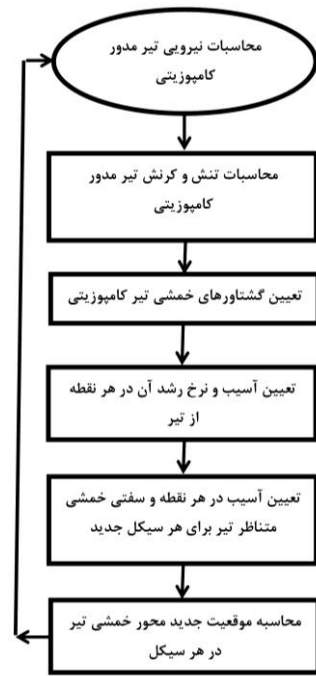
در این رابطه، L طول تیر، u میزان جابه جایی، EI مدول سفتی تیر، u(B) مقدار جابه جایی در نقطه B می باشد. با توجه به نیروی به دست آمده از رابطه ۱ می توان کرنش و تنش را طبق تعریف سازگار در تئوری تیرها با استفاده از روابط زیر محاسبه کرد:

$$M(x) = F(L-x) \quad (2)$$

است. بدین منظور، روابط سفتی از تئوری اصلاح شده تیر استخراج شده، سپس از طریق مکانیک آسیب پیوسته و معرفی یک مدل آسیب موضعی دربرگیرنده رشد آسیب، رفتار خستگی مکانیکی تیرهای مدور بررسی می گردد. در نتیجه آن، نقاط و نواحی بحرانی در راستای طول و داخل صفحه مقطع تیر مشخصه سازی گردیده و وضعیت آسیب لحظه ای در آن نقاط قابل محاسبه خواهد بود.

۲. بیان مسئله

در این مقاله، رفتار خستگی تیرهای کامپوزیتی استوانه ای مورد بررسی قرار می گیرد. شمای کلی الگوریتم حل مسئله در شکل ۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱. شمای کلی الگوریتم حل مسئله

جهت استخراج روابط و معرفی مدلی کارآمد، روابط تئوری کلاسیک تیرها به همراه عبارات غیرخطی اصلاح شده و از طریق کوپل نمودن آنها با مدلی نوین از نوع آسیب موضعی، آسیب در هر نقطه تیر مدور کامپوزیت با در نظر گرفتن عبارات غیرخطی آن تحت بارگذاری خستگی مکانیکی به دست می آید. تعیین آسیب جمعی هر نقطه و تا هر سیکلی از بارگذاری تیر، گامی اساسی در مشخص نمودن مکانیزم و لحظه و اماندگی تحت بار خستگی است. بر این اساس، با به کارگیری مفاهیم مکانیک آسیب پیوسته، رابطه بین پاسخ مکانیکی تیر و متغیر آسیب ($D(x,y)$) تعریف می گردد. از آنجا، رشد آسیب سیکلی موضعی هر نقطه از تیر قابل محاسبه

از روش محاسباتی انتگرال عددی در حل این انتگرال‌های دومتغیره استفاده می‌شود. مجدداً نیرو از رابطه ۱ با حضور مقدار آسیب جدید به دست می‌آید و الگوریتم برای هر سیکل یا هر پرش دوره‌ای سیکلی تکرار می‌شود.

۳-۲. تعریف و به کارگیری متغیر پرش دوره‌ای

موضوع قابل توجه برای پیش‌بینی رفتار خستگی این است که لازمه به دست آوردن یک تحلیل دقیق، بررسی سیکل به سیکل توزیع تنش و رشد آسیب می‌باشد. از طرفی برای یک تحلیل عددی جهت پیش‌بینی رفتار خستگی، سرعت، دقت و توانایی انجام حجم بالای محاسبات نیاز است. تحلیل دقیق سیکل به سیکل با وجود این قابلیت در مدل، از نظر سخت‌افزاری برای میلیون‌ها سیکل بارگذاری به راحتی ممکن نیست؛ زیرا این عمل به چندین میلیون محاسبات عددی نیاز خواهد داشت و در هر مرحله، کمیت‌های مختلفی ذخیره می‌گردد که نیاز به فضای زیادی برای ذخیره داده‌هاست. در نتیجه نمی‌توان به سادگی نتایج را برای هر سیکل دنبال کرد. لذا باید محاسبات را برای دسته‌های سیکلی مشخصی انجام داد. نکته مهم در این مرحله، تعیین دوره‌ها و دسته‌های سیکلی برای اجرای محاسبات عددی است؛ در سیکل‌های ابتدایی چون آهنگ رشد آسیب در تیر زیاد است، لازم است فاصله بین دوره‌ها بسیار کم باشد. اما با افزایش تعداد دوره‌ها این آهنگ کاهش می‌یابد و می‌توان از پرش دوره‌ای (یا دسته بزرگ سیکلی) استفاده کرد. آسیب در پرش دوره‌ای از رابطه ۱۰ محاسبه می‌شود:

$$D_{N+Jump} = D_N + \left. \frac{dD}{dN} \right|_N Jump \quad (10)$$

به طوری که در این رابطه D_{N+jump} مقدار آسیب برای سیکل N ام به علاوه پرش دوره‌ای، D_N مقدار آسیب برای سیکل N ام، $\frac{dD}{dN}$ رشد آسیب محاسبه شده در سیکل N ام و $Jump$ دوره‌ای می‌باشند. با استفاده از این پرش دوره‌ای، میزان محاسبات کاهش بسیار و سرعت آن افزایش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. از طرفی با انتخاب صحیح پرش دوره‌ای سیکل‌ها دقت محاسبات در حد قابل قبولی حفظ می‌شود.

۳-۳. کد و برنامه نویسی در محیط متلب

بر اساس الگوریتم محاسبات بیان شده، برنامه‌ای در محیط متلب تدوین شده است که با بهره‌گیری از آن، توزیع رشد آسیب، تنش و

$$\varepsilon_{xx}(x, y) = \frac{M(x)(y - y_0(x))}{EI(x)} \quad (3)$$

$$\sigma_{xx}(x, y) = E_0(1 - D(x, y))\varepsilon_{xx}(x, y) \quad (4)$$

که در این روابط، پارامتر $D=D(x, y)$ مقدار آسیب در هر سیکل و هر نقطه از تیر (که با افت مقدار مدول الاستیک آن نقطه تعریف می‌شود)، E_0 مدول الاستیک اولیه، $M(x)$ گشتاور خمشی و $y_0(x)$ موقعیت نقطه یا محور خنثی در مختصه (x) می‌باشد. طبق تعریف از مکانیک آسیب:

$$D = D(x, y, N) = 1 - \frac{E(x, y, N)}{E_0(x, y)} \quad (5)$$

نقطه عطف مقاله حاضر معرفی و وارد نمودن مدل رشد آسیب موضعی از طریق مؤلفه تنش و کرنش به دست آمده در فرایند شبیه‌سازی است. میزان رشد آسیب سیکلی از طریق مدل آسیب موضعی زیر به دست می‌آید [۳]. سپس اندازه آسیب برای سیکل بعدی محاسبه می‌شود.

$$\frac{d}{dN} D(x, y) = \begin{cases} \frac{A (\Delta\sigma_T(x, y))^c}{(1 - D(x, y))^b} & \text{کشش} \\ 0 & \text{فشار} \end{cases} \quad (6)$$

که در آن، A و b و c مقادیر ثابت معرفی شده در مدل می‌باشند که از طریق انجام آزمایشات مستقیم خستگی خمشی به دست می‌آیند. همچنین $\Delta\sigma_T$ نیز معرف دامنه نوسانات تنش در محدوده کششی است. گفتنی است مکان محور خنثی با تغییر اندازه آسیب و در نتیجه افت خواص سازه دائماً در حال تغییر است. بر اساس تعریف تغییرات دیفرانسیلی، رشد آسیب در سیکل بعدی عبارت است از:

$$D_{N+1} = D_N + \frac{dD}{dN} \quad (7)$$

بر اساس روابط و ویژگی‌های محور خنثی و آثار آسیب ایجاد شده، موقعیت جدید محور خنثی و مقدار مدول سفتی در سیکل جاری با وارد کردن رابطه ممان اینرسی تیر مدور محاسبه می‌شود:

$$y_0(x) = \frac{\int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} (1 - D(x, y)) y dy}{\int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} (1 - D(x, y)) dy} \quad (8)$$

$$EI(x) = E_0 \left[\int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} (1 - D) y^2 dy - \frac{\left(\int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} (1 - D) y dy \right)^2}{\int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} (1 - D) dy} \right] \quad (9)$$

کرنش در راستای ضخامت تیر تحت بارگذاری‌های مختلف به دست می‌آید.

۴. چیدمان آزمایشات

در این مقاله دو سری آزمایش برنامه ریزی شده است: الف) آزمایش تعیین مقادیر و خواص مورد نیاز در روابط مدل ب) آزمایش تعیین رفتار خستگی خمشی با هدف مقایسه و اعتبارسنجی نتایج محاسباتی

۴-۱. تعیین خواص مکانیکی قطعه

برای انجام آزمون‌های خستگی، ابتدا باید آزمون‌های استاتیکی روی قطعات ساخته شده انجام شود تا خواص مکانیکی مانند استحکام و مدول و جز این‌ها تعیین شود. با استفاده از این نتایج، می‌توان آزمایشات خستگی را اجرا کرد. جهت انجام آزمایش تحت بار عرضی باید نمونه‌های آماده شده به صورت یک سر گیردار باشند. بدین منظور باید قید و بندی طراحی کرد که در یکی از گیره‌های دستگاه قرار گیرد و نمونه به آن وصل شود. به دلیل کوچک بودن ابعاد قطعه و حساس بودن قطعات ساخته شده، ممکن است در اثر اعمال نیرو برای محکم کردن پیچ، نمونه‌ها دچار آسیب یا حتی شکست اولیه شوند. برای حل این مشکل دو روش زیر می‌تواند از گزینه‌های قابل اجرا باشند:

الف) استفاده از چسب برای اتصال تیر به قید و بند: برای استفاده از چسب باید این نکته را مد نظر داشت که استحکام چسب به اندازه کافی بالا باشد تا در هنگام تست و تا پایان آن کارایی خود را حفظ کند. این امر مستلزم دقت زیاد در انتخاب چسب است. از مشکلات این روش، جدا کردن قطعه از گیره دستگاه پس از پایان آزمایش است که به حلال مناسب نیاز دارد. مشکل دیگر برای انتخاب این روش هزینه چسب می‌باشد ب) استفاده از یک جسم صلب: هنگام ساخت قطعه می‌توان در یک سمت قالب یک قطعه جسم صلب قرار داد تا بعد از پخت به قطعه متصل گردد. برای این منظور لازم است جسم صلب در اندازه بسیار دقیق تهیه شود. این روش، نسبت به روش قبل مناسب‌تر بوده و کارایی بیشتری دارد.

پیش از شروع آزمایش استاتیکی، توجه به دو پارامتر ذیل، حائز اهمیت است که قبل از انجام آزمایش باید تعیین شوند:

۱. طول قطعه برای آزمایش

۲. نرخ اعمال نیرو

شرایط انجام آزمایش، مطابق با استانداردهای ASTM D790 و D7246 می‌باشد [۲۷-۲۸]. در بهره‌گیری از این استانداردها، روش B در آن، که ویژه قطعاتی با میزان کرنش شکست بالاست، اعمال می‌شود. برای این منظور باید تعداد شش میله که در شرایط کاملاً یکسان ساخته شده‌اند را مورد آزمایش قرار داد. نسبت طول به قطر قطعه باید حداقل ۳۲:۱ باشد تا بتوان تغییر شکل برشی آن را ناچیز شمرد. خواص ماده با تغییرات ضخامت، دما و شرایط محیطی و تغییرات سرعت اعمال نیرو تغییر می‌کند و برای اینکه نتایج از دقت کافی برخوردار باشند، سعی شده است آزمایشات حتی‌الامکان در شرایط یکسان و ثابتی اجرا گردند. آزمایش‌ها در محدوده دمای 2 ± 23 درجه سانتی‌گراد و رطوبت 5 ± 5 درصد انجام شده‌اند.

۴-۲. تعیین رفتار خستگی

معمولاً برای کاهش زمان و هزینه انجام آزمایش خستگی آزمایش‌ها را در بالاترین فرکانس ممکن انجام می‌دهند. اما برای انجام این کار ضروری است حتماً دو نکته مورد توجه قرار گیرد:

۱. به دلیل هدایت حرارتی پایین پلاستیک‌ها و دمپینگ بالا، احتمال گرم شدن قطعه در طول انجام آزمایش وجود دارد
۲. خواص ماده به نرخ و سرعت انجام آزمایش بستگی دارد

پلاستیک‌ها به علت ویژگی حرارتی، چنانچه فرکانس بارگذاری بیش از اندازه باشد، می‌توانند باعث افزایش وسیع دما در مدت انجام تست خستگی گردند. افزایش دما، خواص ماده را کاهش و اجرای صحیح تست خستگی را متوقف می‌کند، در نتیجه اگرچه عموماً برای اینکه مدت زمان انجام تست را کاهش دهند، فرکانس انجام آزمایش را در صورت امکان در حداکثر مقدار، انتخاب می‌کنند، اما برای پرهیز از افزایش بیش از اندازه دمای قطعه، فرکانس انجام آزمایش باید با دقت انتخاب شود. علاوه بر آن قابلیت اعمال بار خستگی توسط دستگاه‌های استاندارد در فرکانس‌های بالا بسیار محدود است. در این مقاله، دو نوع آزمایش خستگی انجام شده است:

۱. انجام آزمایشات خستگی تیر تا سیکل‌های محدود، جهت

تعیین مقادیر ثابت مدل پیشنهادی آسیب موضعی تیر

۲. انجام آزمایشات خستگی تیر تا سیکل‌های دلخواه، جهت

مقایسه رفتار پیش‌بینی شده از مدل با نتایج تجربی تیر

۳-۴. تجهیزات ساخت قطعه

۱-۳-۴. قالب

قالب مورد استفاده در ساخت قطعه به روش پالتروژن به صورت یک لوله موئین به قطر ۱/۶ میلی متر با دهانه‌ای با هندسه شیپوری می‌باشد.

۲-۳-۴. دستگاه انجام آزمایش خواص مکانیکی

دستگاه مورد استفاده، اینسترون^۷ ۸۵۰۳ است که به صورت سرو هیدرولیکی کنترل می‌شود. سرعت حرکت محور ۰/۰۰۵ تا ۸۰۰ میلی متر بر ثانیه قابل تغییر است و تا دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد امکان انجام آزمایش را دارد. ماکزیمم فرکانس قابل اعمال دستگاه ۲۵ هرتز است و از طریق آن، امواج خطی، سینوسی، مستطیلی و مثلثی می‌توان اعمال نمود. بارگذاری اعمالی در این مقاله از نوع سینوسی مد نظر قرار گرفته است.

۴-۴. آماده‌سازی مواد و ساخت قطعات آزمایش

۱-۴-۴. رزین

رزین مورد استفاده برای ساخت قطعه، پلی‌استر با نام تجاری بوشپول^۸ ۷۵۱۱۲۹ شامل ۶۱ درصد مونومر استایرن است.

۲-۴-۴. الیاف

الیاف به کار رفته در ساخت قطعه، کربن از نوع AS 2G محصول شرکت هکسل^۹ بوده که خواص مکانیکی کامپوزیت آن در ترکیب با رزین پلی‌استر معرفی شده در بخش قبل، در جدول ۲ آمده است.

۳-۴-۴. عامل پخت

رزین پلی‌استر جز آن دسته از رزین‌هایی است که برای سخت شدن نیاز به یک عامل پخت دارند. عامل پخت مورد استفاده، نفتانات کبالت است و با اضافه نمودن به رزین مرحله شبکه‌ای شدن یا اصطلاحاً سخت شدن رزین آغاز شده است.

۴-۴-۴. شتاب‌دهنده

به منظور افزایش سرعت فرایند شبکه‌ای شدن عموماً از موادی با نام شتاب‌دهنده استفاده می‌شود. شتاب‌دهنده به کار رفته در قطعات آزمایش این مقاله، محلول ۳۰ تا ۶۰ درصد متیل اتیل کتون پروکساید^{۱۰} با نام علمی دی هیدرو پروکسی بوتان با فرمول مولکولی $C_4H_{10}O_4$ می‌باشد.

۵-۴. کسر حجمی الیاف

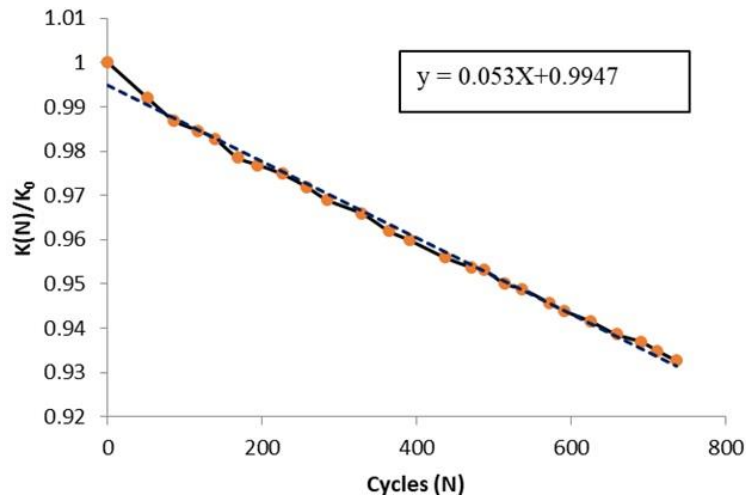
برای به دست آوردن کسر حجمی الیاف از طریق آزمایش، استاندارد ASTM D2584 اندازه‌گیری حجم الیاف مصرفی و حجم قطعه استفاده شده است [۲۹]. نتایج حاصل، مقدار کسر حجمی الیاف $V_f = 0.64$ را نتیجه داده است. در این روش، ابتدا قطعات از نمونه‌های اصلی تیر کامپوزیتی جدا شده و وزن و ابعاد دقیق آنها اندازه‌گیری و ثبت شده است. سپس با قرار دادن این قطعات در کوره از روش سوزاندن رزین در دمای پایین‌تر از دمای مربوط به دوده شدن^{۱۱} الیاف (حداکثر ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد برای الیاف کربن و رزین معرفی شده)، رزین موجود در قطعات کامپوزیتی حذف شد. با مشخص بودن چگالی قطعات کامپوزیت (از محاسبات و اندازه‌گیری‌های ابعاد و وزن) و چگالی رزین و الیاف کربن (از اطلاعات کارخانه‌ای این محصولات)، کسر حجمی الیاف در ۶ نمونه اندازه‌گیری کسر حجمی قطعات کامپوزیت به شرح جدول ۱ به دست آمده است. خواص مکانیکی لایه کامپوزیتی حاصل با انجام آزمایشات مشخصه‌سازی توسط مؤلف این مقاله، به شرح جدول ۲ حاصل شده است.

۵. نتایج و بحث

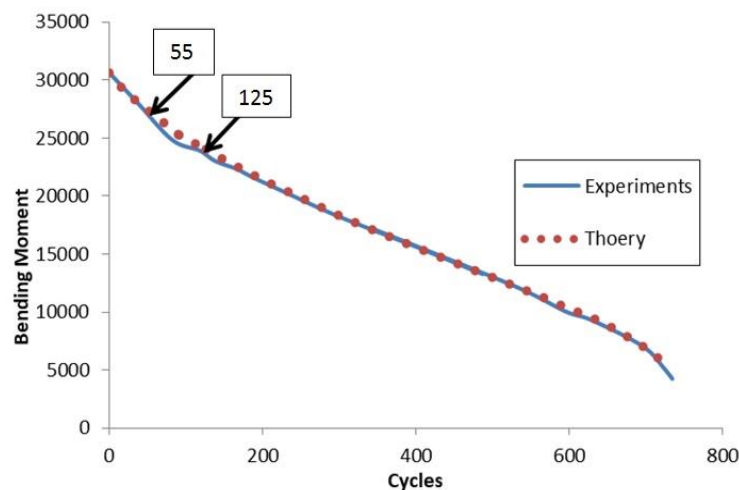
بر اساس مراحل توصیف شده، شش قطعه ساخته شده مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج حاصل برای تعیین مقادیر ثابت ماده در مدل به کار رفته‌اند. ابتدا برای محاسبه مقدار A اندازه b و c برابر مقادیر دلخواه ۲ و ۵ در نظر گرفته شده و منحنی تغییرات سیکی سفتی به سفتی اولیه به صورت شکل ۳ رسم شده است. با توجه به نمودار، مقدار A بر مبنای ترسیم خط بهینه، برابر با ۰/۵۳ به دست آمده است که برای تعیین b و c مشابه آنچه در بیشتر تشریح شده است عمل می‌شود. نمودار رسم شده به صورت شکل ۴ می‌باشد. همان‌طور که از نمودارها مشخص است، نتایج به دست آمده از اجرای برنامه، تطابق قابل قبولی با آزمایشات را نشان می‌دهد. حداکثر خطای محاسبه شده بین نتایج تجربی و تئوری (از شکل ۴، ۴/۵ درصد حاصل شده است. این اختلاف به وضوح در محدوده ۵۵ تا ۱۲۵ سیکل اولیه بارگذاری از نمودار شکل ۴ قابل مشاهده است. بنابراین فرایند محاسبه مقادیر ثابت مدل، با حداکثر ۴/۵ درصد خطا در تطابق مواجه است. طبق نمودار، مقدارهای $c = 6.2$ ، $b = 0.85$ بهترین سازگاری را با نتایج به دست آمده دارد. حال با جایگذاری مقادیر ثابت ماده به دست

ذاتی کامپوزیت‌ها که به وجود آسیب‌های اولیه حساسیت کمتری دارند و اهمیت دقت پیش‌بینی نتایج در سیکل‌های بعدی بالاتر است همخوانی بسیار خوبی دارد. در ادامه این مرحله، با استفاده از برنامه تدوین‌شده و خواص قطعه ساخته‌شده، تغییرات و توزیع تنش، کرنش، کاهش سفتی و رشد آسیب برای قطعه ساخته‌شده به دست می‌آید. رشد و توزیع آسیب در راستای ضخامت در سیکل‌های مختلف در شکل ۶ آمده است.

آمده در مدل، می‌توان از برنامه تدوین‌شده استفاده و تغییرات نیرو بر حسب سیکل را با نتایج آزمایش مقایسه کرد. این مقایسه در نمودار شکل ۵ نشان داده شده است. مقایسه نتایج پیش‌بینی شده تغییرات نیرو، حداکثر ۰/۸ درصد اختلاف بین نتایج مدل و نتایج تجربی را نشان می‌دهد که عمدتاً در ۲۰۰ سیکل اول واقع می‌شود. این نتیجه نشان‌دهنده کارایی مدل در پیش‌بینی نتایج پس از سیکل‌های ابتدایی است. این مسئله با این ویژگی



شکل ۳. نمودار تغییرات سفتی به سفتی اولیه بر حسب سیکل و رسم خط بهینه در تیر مدور کامپوزیتی



شکل ۴. تغییرات سفتی تیر مدور کامپوزیتی در سیکل‌های مختلف (منحنی‌های تطابق برای تعیین مقادیر ثابت مدل)

جدول ۱. کسر حجمی الیاف در ۶ نمونه انتخاب‌شده

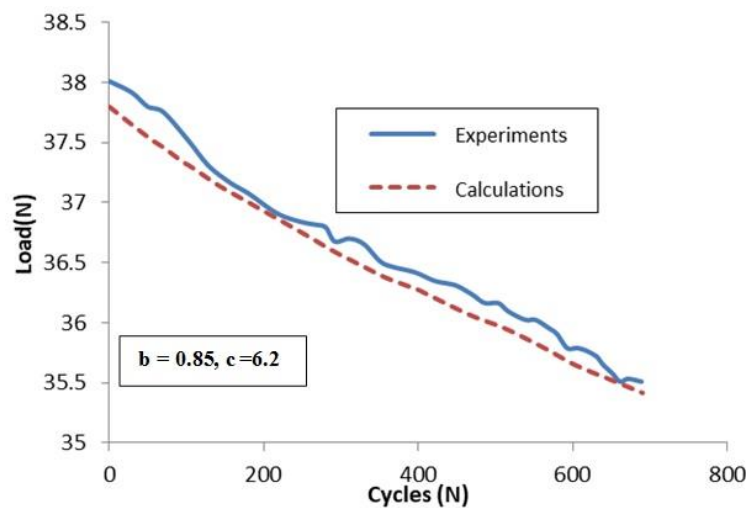
تعداد قطعه	میانگین درصد حجمی	انحراف معیار
۶	۰/۶۴۴	۰/۰۱۶

جدول ۲. خواص فیزیکی / مکانیکی لایه کامپوزیت (کربن / پلی‌استر)

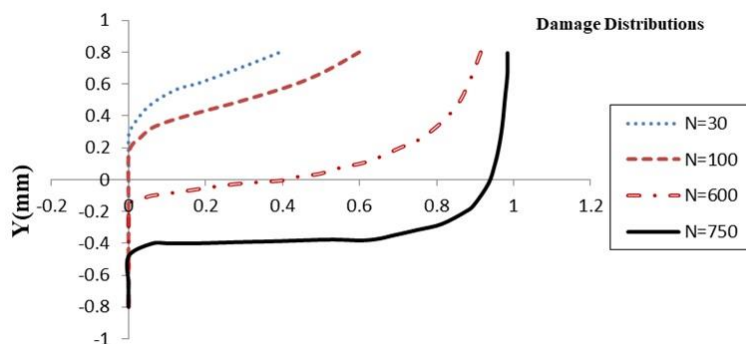
مدول الاستیک (مگاپاسکال)	استحکام نهایی (مگاپاسکال)	ماکزیمم جابجایی (میلی‌متر)	ضخامت (میلی‌متر)
۳۶/۲۲	۵۸۴/۷	۴۴/۲	۲/۸

علاوه بر تغییر مقادیر رشد آسیب در سیکل‌های مختلف، نوع انحنای منحنی‌ها نیز با تغییر سیکل‌ها (از محدب به مقعر) تبدیل شده‌اند. در این نوع تغییر رفتار، افزایش شدت تغییرات مقدار آسیب در نواحی مجاور داخل مقطع در راستای ضخامت، حائز اهمیت است. علاوه بر آن، جابه‌جایی این ناحیه در سیکل‌های بعدی به پایین محور خنثی قابل توجه است. طبق نمودارهای شکل ۶ پس از ۶۰۰ سیکل، در دو نقطه مجاور دو طرف محور خنثی، آسیب بین ۰/۳ تا ۰/۴۵ تغییر می‌کند در حالی که بعد از ۷۵۰ سیکل، مشابه چنین وضعیتی در ۰/۵ میلی‌متر پایین محور خنثی اتفاق می‌افتد. با ادامه بارگذاری در سیکل‌های بعدی، این جابه‌جایی همچنان ادامه خواهد داشت. در نتیجه تغییرات (رشد) آسیب سیکلی تیر، نشان داده شده در شکل ۶ توزیع تنش در راستای ضخامت، به صورت آنچه در شکل ۷ ارائه شده است، حاصل می‌شود. تغییرات و توزیع غیرخطی تنش در سیکل‌های اولیه تا ۷۵۰ سیکل بارگذاری ناشی از اثر رشد آسیب و جابه‌جایی محور خنثی تیر در شکل ۷ به وضوح قابل مشاهده است. همچنین به دلیل حفظ شرایط

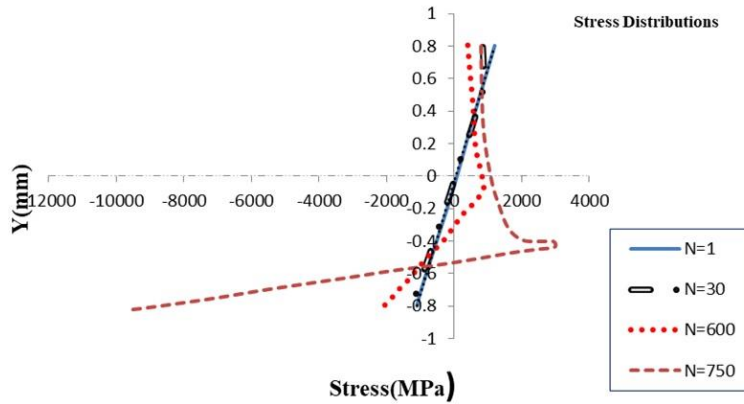
پیوستگی تیر با وجود رشد آسیب در سیکل‌های مختلف، منحنی تغییرات توزیع کرنش در راستای ضخامت تیر، به صورت آنچه در شکل ۸ نمایش داده شده است به دست می‌آید. تغییر شدید شیب نمودارهای خطی توزیع کرنش متأثر از رشد آسیب سیکلی در مقطع تیر، از نکات قابل توجه شکل ۸ است. همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده است، نمودار تغییرات نیرو بر حسب سیکل با شیب قابل توجهی همراه بوده و تغییرات را می‌توان خطی فرض نمود. افت ۸/۷ درصد نیرو در ۱۰۰۰ سیکل اولیه بارگذاری خستگی خمشی با دامنه جابه‌جایی ثابت، بیانگر آثار و حساسیت شدید رفتار مکانیکی تیر مدور کامپوزیتی به رشد آسیب است. نمودار رشد آسیب در نقاط مختلف تیر بر حسب سیکل‌های مختلف (شکل ۶)، نشان می‌دهد که با افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری مناطق گسترده‌تری از جمله پایین محور خنثی اولیه دچار آسیب می‌شود. منحنی‌های توزیع آسیب سیکلی در فرم تابعی، تغییراتی دارند. به‌عنوان مثال فرم تابعی توزیع آسیب از حالت محدب در سیکل‌های اولیه منحنی به منحنی مقعر در سیکل‌های بالاتر تبدیل می‌شود.



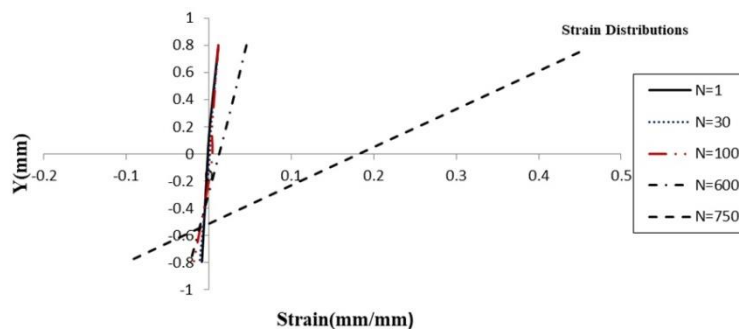
شکل ۵. مقایسه تغییرات نیرو بر حسب سیکل با نتایج آزمایش در تیر مدور کامپوزیتی



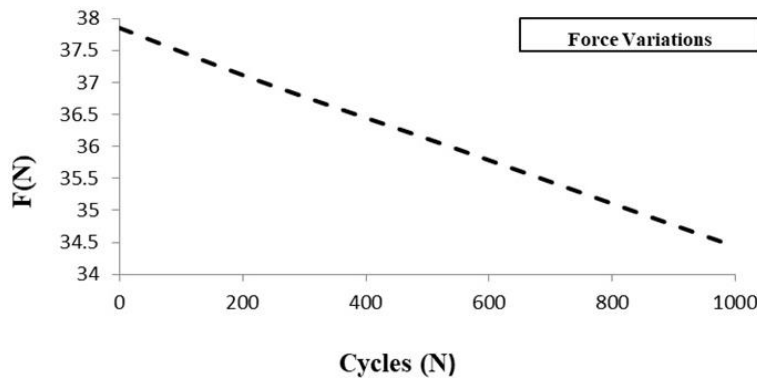
شکل ۶. منحنی تغییرات آسیب در راستای ضخامت تیر در سیکل‌های مختلف



شکل ۷. توزیع تنش در راستای ضخامت تیر در سیکل‌های مختلف



شکل ۸. توزیع کرنش در راستای ضخامت تیر در سیکل‌های مختلف



شکل ۹. نیرو در سیکل‌های مختلف در تیر مدور کامپوزیتی

بالایی برخوردار است. نمودارهای حاصل بر اساس پیش‌بینی مدل، مجدداً بر آثار مهم جابه‌جایی دائمی محور خنثی به دلیل رشد آسیب در تیر تأکید می‌کنند. در مقابل توزیع کرنش در تیر بر حسب سیکل‌های بارگذاری با تغییرات چندانی پیچیده‌ای همراه نمی‌باشد و غیر از تغییر شیب نمودار جابه‌جایی سیکلی مکان محور خنثی، تغییرات مشخص و قابل پیش‌بینی ارائه نموده است. با استخراج چنین نتایجی، طراحی سازه‌های تیر مدور کامپوزیتی با اطمینان بالاتری امکان‌پذیر می‌گردد.

این تغییرات به دلیل تداخل اثر فرم تابعی فرض شده برای مدل آسیب موضعی و روابط سازه‌ای حاکم بر توزیع پارامترهای ورودی مانند تنش یا کرنش از تئوری تیرها است. تغییرات غیرخطی فرم توزیع تنش، خود از نتایج جالب تحقیق حاضر است. با افزایش قابل ملاحظه تعداد سیکل‌ها، خروج از حالت توزیع خطی با تغییرات شدید فرم تابعی قابل توجه است. چون در بسیاری از تحلیل‌های خستگی، توزیع تنش سیکلی از اطلاعات اصلی محاسبات و طراحی است دقت در محاسبه صحیح آن از اهمیت

۶. نتیجه گیری

به قطعه کاهش می‌یابد، این کاهش در نیرو، در سیکل‌های ابتدایی سریع است و به مرور با افزایش تعداد سیکل‌ها، تغییرات بسیار اندکی می‌یابد؛ به عبارت دیگر در همان سیکل‌های اولیه، کاهش شدید سفتی و استحکام در قطعه اتفاق می‌افتد. از طرفی، در شرایط کاری، توجه به این نکته حائز اهمیت است که با وجود بالابودن استحکام استاتیک تیر، در شرایط سرویس و کاری، ممکن است در همان سیکل‌های اولیه و ابتدایی به دلیل کاهش شدید سفتی، قطعه در نیروی بسیار کمتری از آنچه مورد انتظار است دچار شکست شود و از شرایط سرویس و طراحی اولیه خارج گردد. در نهایت براساس نتایج به دست آمده می‌توان گفت که تغییرات نیرو در تیر مدور کامپوزیتی از آزمایشات و محاسبات مدل، اختلاف اندکی (۰/۸ درصد) را نتیجه می‌دهد که مؤید کارآمدی مدل ارائه شده است. افت نیروی وارده به تیر در نتیجه اعمال بار سیکلی با دامنه جابه‌جایی ثابت، بیانگر حساسیت رفتار مکانیکی تیر کامپوزیتی مدور به رشد آسیب در سیکل‌های ابتدایی است. با رشد آسیب در مقطع تیر و متعاقب آن جابه‌جایی محور خشی به سمت دیگر مقطع، شدت تغییرات آسیب در اطراف محور خشی جدید افزایش می‌یابد. همچنین توزیع تنش نرمال در مقطع تیر مدور کامپوزیتی با رشد آسیب از حالت خطی در وضعیت بدون آسیب خارج و به وضعیت به شدت غیرخطی در سیکل‌های بعدی تغییر می‌یابد. این بدان معناست که به کارگیری فرضیات خطی در تعیین پاسخ خستگی تیر مدور کامپوزیتی می‌تواند با خطای زیادی همراه باشد.

امروزه به دلیل گسترش استفاده از قطعات کامپوزیتی در صنایع مختلف به خصوص در صنایع هوایی و کاربرد آنها در شرایط بارگذاری خستگی خمشی به ویژه در اجزای اصلی سازه‌های هوایی بررسی و آگاهی از رفتار خستگی خمشی این سازه‌ها بسیار با اهمیت است. در این کاربردها، قطعه در شرایط کاری نباید دچار شکست شود و پیش از آنکه به این مرحله برسد، لازم است تعویض گردد. بنابراین در این مورد و موارد استفاده مشابه، اطلاع و آگاهی از وضعیت و شرایط قطعه به لحاظ رشد، توزیع و گسترش آسیب ضروری است و دستیابی به این هدف مستلزم آن است که رفتار سازه‌های کامپوزیتی تحت این شرایط به دقت، بررسی شده باشد. دشواری دستیابی به چنین هدفی در تیرهای مدور به دلیل ترکیب اثر جابه‌جایی محور خشی و هندسه مقاطع مدور دوچندان است. از طرف دیگر، اصولاً آزمایشات خستگی بسیار زمان‌بر، پرهزینه و نتایج آن دارای پراکندگی بالایی است. همچنین، انجام این گونه آزمایشات به دستگاه‌های دقیق و حساس نیاز دارد. در مقاله حاضر تلاش شده است با توسعه مدل‌های پیش‌بینی رفتار خستگی تیرها، نیاز به تعداد زیاد آزمایشات، هزینه بالا، زمان زیاد و تجهیزات و فناوری پیشرفته در تعیین پاسخ خستگی تیر مدور کامپوزیتی به شدت کاهش یابد. مهم‌ترین تأثیر ایجاد، رشد و گسترش آسیب در تیر مدور کامپوزیتی، کاهش سفتی و همچنین کاهش استحکام آن می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۹ نمایش داده شده است، در شرایطی که دامنه جابه‌جایی تیر ثابت است به مرور و با افزایش تعداد سیکل‌ها، نیروی اعمالی

۷. مأخذ

- [1] F. Sidorof, Damage Mechanics and its Application to Composite Materials, Mechanical Characterization of Load Bearing Fiber Composite Laminates, Proceedings of the European Mechanics Colloquium, 1984.
- [2] B. Harris, Fatigue Behavior of Polymer-based Composites and Life Prediction Method, AIB-Vincotte Leestoel, 2maat 1995, Belgium, Nationaal Fonds Voor Wetenschappelijk Onderzoek, 28p, 1985.
- [3] F. Sidorof, B. Subagio, Fatigue Damage Modeling of Composite Materials from Bending Tests, proceedings of Sixth International Conference on Composite Materials (ICCM-VI) & Second European Mechanics Colloquium, 1987.
- [4] J. A. Naim, S Hu., the Initiation and Growth of Delamination Induced By Matrix Microcracks in Laminated Composites, *International Journal of Fracture*, Vol.57.pp.1-24, 1992.
- [5] J. W. Hearle, R. E. Hobbs, M. S. Overington and S. J. Banfield, *Modeling Axial Compression Fatigue in fiber Ropes*, Tension Technology International Ltd (TTI Ltd), 95-RH-02, Lloyds Wharf, 2 Mil Street, London, SE1 2BD, 1995.
- [6] L. V. Griffin, J. C. Gibeling, B. Martin, V. A. Gibson, S. M. Stover, Model of Flexural Fatigue

- damage accumulation for Cortical Bone, *J. Orthop. Res.*, pp. 607-614, 1997.
- [7] K. L. Reifsnider, Some fundamental aspects of fatigue and fracture response of composite materials, 14th annual society of engineering science, 1997.
- [8] www.airforce-technology.com/projects (accessed Dec 31, 2018).
- [9] J. M. Starbuk, Stress Analysis of Laminated Composite Cylinders under Non-Axisymmetric loading, *International SAMPE Tech. Confer.*, Vol. 31, No. 15-604, 1999.
- [10] A. Bhattacharyya, E. J. Appiah, On the Exact Solution of Elasto-Plastic Response of an Infinitely Long Composite Cylinder during Cyclic Radial Loading, *Journal of Mech. Phys. Solids*, Vol. 48, No. 5, pp. 1065-1092, 2000.
- [11] Z. M. Huang., Ultimate Strength of Composite Cylinder Subjected to three point bending: correlation of beam theory with experiment, *Composite Structures*, 2004.
- [12] S. Deng, L. Ye., Influence of Fiber-Matrix Adhesion on Mechanical Properties of graophite/epoxy Composites: I. Tensile, Flexure and Fatigue Properties, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 18, pp. 1021-1040, 1999.
- [13] W. Van Paepegem, J. Degrieck, Finite Element Approach for Modelling Fatigue Damage in fiber-reinforced Composite Material, *Composites Part B*, Vol. 32, No.7, pp. 575-588, 2001.
- [14] M. M. Shokrieh, F. Taheri-Behrooz, Fatigue Life Evaluation of Unidirectional Composites by Using Residual Strain Energy, *Journal of Polymer Science and Technology*, Vol. 21, No. 1, pp. 19-26, 2008.(in Persian).
- [15] M. H. Sabour, B. Ahmadi Moghaddam, M. F. Foghani, International Fatigue and Fracture Responses of Polymer Composites by using Phases Groups, Proceedings of 16th Annual Iranian International Conference on Mechanical Engineering, ISME16-598, 2008, http://www.civilica.com/paper-ISME16-ISME16_598.html.(in Persian).
- [16] W. Yao, J. Renard, N .A. Himmel, Fatigue Behaviour of Fiber Reinforced Polymers, Experiments and Simulations, Fifth International Conference on Fatigue of Composites(ICFC5), Nanjing University of Aeronautics & Astronautics in Nanjing (NUAA), China, October, 16-19, 2010.
- [17] N. K. Kar, E. Barjasteh, Y. Hu, S. R. Nutt, Bend Fatigue of Hybrid Composite Rods, *Composites Part A*, Vol. 42, No. 3, pp. 328-336, 2011.
- [18] P. Huang, G. W. Liu, X. Guo, H. Zhou., X. Zheng, Faigue Life Prediction of RC Beams Strengthened CFRP under Cyclic Bending Loads, *Acta Mechanica Solid Sinica*, Vol. 26, No. 1, pp. 46-52, 2013.
- [19] M. khammohammadi, I. Ahmadi, Progressive Damage analysis of Laminated Composite Plate Subjected to Bending Fatigue, *MME Journal*, Vol. 15m No. 2, pp. 72-80, 2015. (in Persian)
- [20] T. J. Adam, P. Horst, Experiment of the Very High Cycle Fatigue in GFRP [90/0]S Cross-Ply Specimens Subjected to High-Frequency Four-Point Bending, *Composites Science and Technology*, Vol. 101, pp. 62-70, 2014.
- [21] J. Xie, A. Waas, M. Rassaian, Closed form solutions for cohesive zone, American Society for Composites, 2015.
- [22] H. Kruger, R. Rolfes, A physically based fatigue damage model for fiber-reinforced plastics under loading, *International Journal of Fatigue*, Vol. 70, pp. 241-251, 2015.
- [23] C. Hou., Y. Zhou, X. Wan., M. Zhao, A fatigue damage model for failure analysis of single-lap Multi-Bolt Joints, American Society for Composites, American Society of Composites-30th Technical Conference, 2015.
- [24] E. Fang, X. Cui.and J. Lua, Comparative Composite Fatigue Damage Models for Life Prediction of Laminated Composite Structures, American Society for Composites, American Society of Composites, 30th Technical Conference, 2015.
- [25] H. Madhusoodanan, Numerical investigation of damage behavior of GFRPs in the very high cycle regime, 21st European Conference on Fracture, ECF21, 20-24 June 2016, Catania, Italy.
- [26] B. Suresh Kumar, K. Phaneendra Kumar, N. Srinvasa Babu, Survey of flexural fatigue testing by fiber reinforced polymer composites, *International Journal of Engineering*

Computational Research and Technology, Vol. 1, Issue 1, pp. 1-8, 2016.

[27] Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulations Materials, ASTM D790-15e2, 1998.

[28] Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer matrix Composite Materials, ASTM, D7246M, 2007.

[29] Standard Test Method for Ignition loss of Cured Reinforced Resins, ASTM D 2584-11, 2007.

پی نوشت

-
1. continuum damage mechanics (CDM)
 2. composite circular beam (CCB)
 3. primary structures
 4. UH-BOA black hawk rotor blade
 5. MATLAB
 6. fixture
 7. INSTRON 8503
 8. Bushpol 751129
 9. Hexcel
 10. MEKP
 11. smoky state