

مدل عمر خستگی برای مواد کامپوزیتی GRP تحت بارگذاری محوری و خارج از محور

سعید ادیب نظری^۱

دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی هوافضا

جعفر اسکندری جم^۲

دانشگاه صنعتی مالک اشتر

نیما سلطانی^۳

دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات،
دانشکده مهندسی مکانیک و هوافضا

چکیده

خستگی ماده کامپوزیتی نیاز به مدلی خاص دارد تا هر سه ناحیه عمر خستگی را بتواند جوابگو باشد. این مدل باید دارای یک فرم خاص بوده تا به درستی رفتار عمر خستگی را در ناحیه اول پیش بینی کند. همچنین در تعیین پارامترهای آن دچار واگرایی نشود و دارای روند حل ساده-ای باشد تا به آسانی بتوان از آن استفاده کرد. لذا در این تحقیق ابتدا مدلی که منطبق بر رفتار عمر خستگی ماده کامپوزیتی باشد، ارائه خواهد شد. سپس به منظور مشاهده تطابق این مدل با رفتار خستگی مواد کامپوزیتی، از داده‌های عمر خستگی برای کامپوزیت‌های مختلف که در قسمت داده‌های تجربی معرفی می‌گردند، استفاده می‌شود. این همخوانی مدل با داده‌های تجربی در زوایای اعمال بار مختلف و نسبت تنش‌های گوناگون نشان داده خواهد شد. همچنین ضمن بحث در مورد تغییرات منحنی عمر بر مبنای این مدل تحت شرایط گوناگون، نشان داده خواهد شد که این مدل رفتاری مناسب در هر سه ناحیه عمر خستگی دارد. این مدل می‌تواند انواع بارگذاری‌های کششی-کششی، کششی-فشاری و فشاری-فشاری را پیش بینی کند.

واژه‌های کلیدی: خستگی، کامپوزیت، مدل ماکرومکانیکی، مدل عمر خستگی

Sigmoidal Fatigue Life Model for Composite Materials under On-axis and Off-axis Loading

S. Adib-Nazari

Aerospace Eng. Dep't, Sharif
Univ. of Tech., Tehran, Iran

J. Eskandari-Jam

Malek-Ashtar Univ. of
Tech., Tehran, Iran

N. Soltani

Mechanical and Aerospace Eng. Dep't, Science
and Research Branch, Islamic Azad Univ.,
Tehran, Iran

ABSTRACT

In this research a fatigue life model is introduced which is in good agreement with fatigue life behaviors of tested composite coupons for different loading condition. In order to show the conformity of this model with fatigue life behavior of composites, fatigue life data of different composite was used to show this conformity between the model and data for different on-axis and off-axis loading and various stress ratios. Also, it was shown that this model has appropriate behavior for all three regions of fatigue life for composite coupons. This model can predict fatigue life for tension-tension, tension-compression and compression-compression loadings.

Key Words: Fatigue, Composite, Macro mechanical model, Fatigue life model

۱- دانشیار

۲- دانشیار

۳- دانشجوی دکتری (نویسنده پاسخگو): soltani_nima@srbiau.ac.ir

۱- مقدمه

آسیب در لایه‌های مواد کامپوزیتی تحت بار خستگی انجام می‌گیرند [۳]. توسعه یک درک بهبود یافته از پاسخ مکانیکی کامپوزیت نسبت به بارهای اعمالی، برای استفاده بهینه و روزافزون از مواد کامپوزیتی ضروری می‌نماید. اگرچه این تلاش‌ها برای بررسی مکانیزم‌های آسیب با توجه به خواص و رفتار خستگی الیاف، رزین و برهمکنش آنها نسبت به هم به سرعت در حال گسترش است، اما نتوانسته است به جایی برسد که رفتار خستگی یک ورق کامپوزیتی عمومی را پیش بینی کند.

همان گونه که بیان شد، اکثر مدل‌های عمر خستگی بکار رفته تا کنون نتوانسته‌اند که هر سه ناحیه عمر خستگی را به طور هم زمان مدل سازی کنند و اغلب در ناحیه اول و سوم عمر خستگی دارای انحرافات زیادی از داده‌های تجربی می‌باشند. لذا در این تحقیق مدل عمر خستگی جدیدی ارائه می‌شود که ضمن تطابق با رفتار عمر خستگی مواد کامپوزیتی بتواند بدون نیاز به راه حل‌های پیچیده هر سه ناحیه عمر خستگی را پیش بینی کند. ضمن اینکه این مدل عمر خستگی می‌تواند خود را برای بارگذاری‌های با زوایای خروج از محور مختلف و تحت بارگذاری‌های کششی-کششی، کششی-فشاری و فشاری-فشاری (تحت نسبت تنش‌های مختلف) مطابقت دهد.

۲- مدل پیشنهادی برای تعیین عمر خستگی

اغلب مدل‌های ارائه شده تا کنون ناحیه دوم عمر خستگی را مدل سازی می‌کنند و در ناحیه اول و سوم عمر خستگی پیش بینی مناسبی ندارند. اغلب این مدل‌ها مقداری بسیار بالاتر از استحکام استاتیکی را برای عمر یک سیکل پیش بینی می‌کنند، که این به علت عدم تطابق رفتار مدل با رفتار ماده کامپوزیتی (نتایج تجربی) می‌باشد. همچنین بعضاً این مدل‌ها نتوانسته‌اند پیش بینی مناسبی برای تغییر رفتار ماده در ابتدای ناحیه سوم عمر خستگی ارائه کنند، همان گونه که در شکل ۱ دیده می‌شود در ابتدای ناحیه III، شیب منحنی S-N شروع به کاهش می‌کند تا اینکه به واماندگی نهایی برسد.

در دهه‌های اخیر، کامپوزیت‌های لایه‌ای به عنوان مواد جایگزین فلزات در صنایع دریایی، برق و قدرت، اتومبیل سازی و هوافضا توسعه داده شده‌اند، ولی رفتار خستگی کامپوزیت‌های لایه‌ای آنقدر متفاوت و پیچیده است که دانش کنونی بسیار تا کامل شدن فاصله دارد. البته این پیچیدگی در بررسی رفتار خستگی مواد کامپوزیتی دو چندان می‌شود. برای بررسی رفتار خستگی مواد کامپوزیتی می‌توان از دو دیدگاه استفاده کرد، یکی از دیدگاه ماکرومکانیک و دیگری از نقطه نظر میکرومکانیک. مدل‌های میکرومکانیکی به علت نیاز کمتر آنها به آزمایشات، دارای مزیت می‌باشند ولی خطای آنها همچنان زیاد است. برعکس مدل‌های ماکرومکانیکی در عین وابستگی بیشترشان به نتایج تجربی، در پیش بینی رفتار خستگی مواد کامپوزیتی توانا تر هستند. در این بین مدل‌های عمر خستگی دارای اهمیت به سزایی در پیش بینی رفتار خستگی ماده کامپوزیتی تحت بار با دامنه ثابت، می‌باشند. اما اکثر این مدل‌های عمر خستگی از پیش بینی رفتار ماده کامپوزیتی در هر سه ناحیه عمر خستگی ناتوانند و فقط برای ناحیه گسترش آسیب، یعنی ناحیه دوم عمر خستگی، دارای دقت مناسب می‌باشند. همچنین بعضاً مدل‌های ارائه شده دارای پیچیدگی‌های بسیار برای پیدا کردن پارامترهای مدل می‌باشند.

از شیوه‌های دیگر مدل سازی رفتار خستگی مواد کامپوزیتی روش‌های استحکام باقیمانده^۱ و سختی باقیمانده^۲ هستند که این روش‌ها بر پایه توزیع آسیب مشاهده شده در کامپوزیت تحت بار خستگی، می‌باشند. در این بین مدل‌های کوپل سختی/استحکام که تأثیر انواع مختلف آسیب در آنها لحاظ شده است، نیز حائز اهمیت هستند [۱]. بسیاری از بررسی‌های مبتنی بر انباشتگی آسیب^۳، برای مدل سازی پاسخ خستگی مواد کامپوزیتی از تئوری‌های مورد استفاده در مواد فلزی همگن استفاده می‌کنند. فاطمی و یانگ^۴ به طور گسترده‌ای این روش‌ها را بررسی کرده‌اند [۲]. تحقیق‌های بسیاری نیز برای درک مکانیزم‌های متضمن

¹ Residual strength

² Residual stiffness

³ Damage accumulation

⁴ Yang

چیدمان مختلف ماده کامپوزیتی در ذیل آورده شده است. این داده‌های خستگی، تحت بارگذاری‌های کششی-کششی، فشاری-فشاری و کششی-فشاری مختلف می‌باشند. این داده‌ها از منابع و منحنی‌های مختلف استخراج شده‌اند، که برای مواد کامپوزیتی الیاف شیشه با رزین پلی‌استر یا رزین اپوکسی می‌باشند. این نوع الیاف در صنایع هواپیمایی و پره‌های توربین باد کاربرد فراوان دارد.

دسته اول داده‌ها توسط فیلپییدیس و همکارانش [۴] به دست آمده‌اند. این داده‌ها مربوط به کامپوزیت تقویت شده با الیاف E شیشه و با رزین پلی‌استر می‌باشند. نمونه‌های آزمایشی تحت زوایای خروج از محور مختلف از صفحه لایه چینی اولیه بریده شده‌اند. برای ساخت این کامپوزیت از لایه چینی دستی بهره گرفته شده است. چیدمان این دسته از کامپوزیت‌ها شامل چهار لایه تک جهته است که دارای وزن 700 g/m^2 می‌باشند. همچنین دارای چهار لایه بافته شده $45^\circ \pm$ با وزن‌های 450 g/m^2 و 225 g/m^2 در هر زاویه خروج از محور می‌باشند. اگر الیاف تک جهته به عنوان الیاف با زاویه 0° در نظر گرفته شوند، چیدمان لایه چینی ماده کامپوزیتی را می‌توان به فرم $[0/(\pm 45)_2/0]_T$ بیان کرد. در این داده‌ها برای ایجاد زوایای بار مختلف، صفحات لایه چینی شده فوق را توسط چرخ الماس در زاویه محوری 0° و زوایای خروج از محور 15° ، 30° ، 45° ، 60° ، 75° و 90° بریده‌اند.

نمونه‌های آزمایشی بر اساس استاندارد *ASTM 3039-76* آماده شده‌اند. برای نمونه‌های آزمایشی در ناحیه اتصال نمونه به دو فک هیدرولیک^۱ از صفحات آلومینیومی که به نمونه چسبانده‌اند، بهره گرفته شده است. زوایای نمونه نیز به وسیله کاغذ سنباده نرم مرتب شده است. طول هر نمونه برابر با 250 mm و عرض آن 25 mm در نظر گرفته شده است. ضخامت اسمی این نمونه‌های آزمایشی $2/6 \text{ mm}$ بوده است. طول ناحیه درگیر در دو فک 45 mm و ضخامت آن 2 mm در نظر گرفته شده است.

بار نوسانی اعمالی به صورت امواج سینوسی با دامنه ثابت و تحت کنترل مقدار بار بوده است. این آزمایشات در

برای بیان رفتار خستگی ماده کامپوزیتی در قالب نمودار عمر خستگی S-N فرض می‌شود که رفتار خستگی ماده از فرم پیشنهادی S شکل زیر تبعیت کند:

$$\frac{\sigma_p}{S_u} = \frac{a-b}{1 + \left(\frac{\log N}{n_0}\right)^p} + b \quad (1)$$

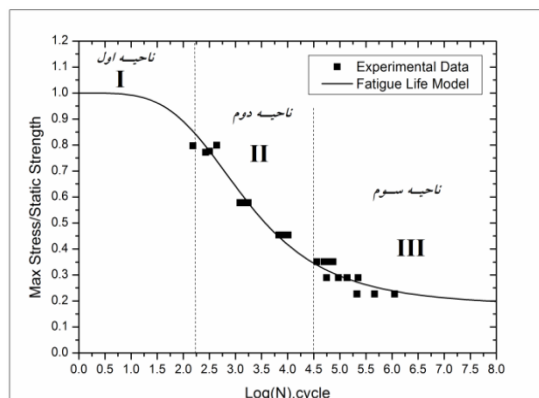
برای اعمال شرط مرزی منحنی S-N در ابتدای این نمودار، فرض می‌شود که حد خستگی ماده کامپوزیتی در چند سیکل ابتدایی همچنان نزدیک به مقدار استحکام نهایی استاتیکی باشد، بنابراین با قرار دادن $N=1$ و $\sigma_p = S_u$ در رابطه (۱) مشاهده می‌شود:

$$\frac{S_u}{S_u} = \frac{a-b}{1 + \left(\frac{\log N}{n_0}\right)^p} + b \Rightarrow a=1. \quad (2)$$

با اعمال رابطه (۲) در معادله (۱)، فرم مدل به صورت رابطه (۳) در می‌آید:

$$\frac{\sigma_p}{S_u} = \frac{1-b}{1 + \left(\frac{\log N}{n_0}\right)^p} + b \quad (3)$$

که در رابطه (۳) b ، n_0 و p پارامترهای برازش منحنی می‌باشند. در بخش چهارم صحت این مدل پیشنهادی برای کامپوزیت‌های مختلف تحت بارگذاری محوری و خارج از محور با نسبت تنش‌های گوناگون مورد ارزیابی قرار داده می‌شود.



شکل (۱): سه ناحیه منحنی عمر خستگی برای کامپوزیت شیشه/اپوکسی.

۳- داده‌های تجربی

به منظور درک تأثیر زاویه اعمال بار و نسبت تنش بر روی رفتار خستگی، داده‌های خستگی و خواص مکانیکی دو نوع

¹ Tab

۴- صحت سنجی مدل

به منظور نشان دادن تغییرات رفتار منحنی عمر خستگی ماده کامپوزیتی تحت زوایای مختلف اعمال بار وقتی که مقدار نسبت تنش ثابت است و همچنین نشان دادن تغییرات رفتار همان ماده کامپوزیتی وقتی تحت نسبت تنش‌های مختلف است در حالی که زاویه اعمال بار ثابت است، از داده‌های عمر خستگی برای کامپوزیت‌های دسته اول و دوم استفاده شده است. با این روش ضمن نشان دادن این رفتار متفاوت، صحت مدل پیشنهادی برای کامپوزیت‌های مختلف با چیدمان‌های گوناگون تحت بارگذاری محوری و خارج از محور برای حالت‌های کششی-کششی، کششی-فشاری و فشاری-فشاری مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. برای این منظور پارامترهای برازش منحنی‌ای که در رابطه (۳) وجود دارند، به دست آورده می‌شوند (b ، n_0 و p). برای این کار از روش برنامه نویسی مارکورد^۳ برای حل حداقل مربعات در حالت غیر خطی استفاده شده است، که در این جا تابع غیر خطی که قرار است مربعات فواصل داده‌ها تا آن محاسبه شود همان مدل عمر خستگی ارائه شده در رابطه (۳) می‌باشد. در این روش برای به دست آوردن تخمین حداکثر درست نمایی از معیار کمینه کردن تابع مزیت^۴ که با نماد « χ^2 » نمایش داده شده است، استفاده می‌شود.

۴-۱- تغییرات عمر خستگی برحسب زاویه اعمال بار

پارامترهای مجهول مدل عمر خستگی طبق روش ذکر شده در بالا برای کامپوزیت دسته اول وقتی که تحت نسبت تنش $R=0.1$ می‌باشد برای زوایای اعمال بار 0° ، 15° ، 45° و 75° و 90° محاسبه شده‌اند که به همراه تابع مزیت مربوط به هر مورد در جدول ۱ درج گردیده‌اند. منحنی مدل عمر خستگی مربوط به هر دسته از پارامترهای به دست آمده به همراه داده‌های عمر خستگی به کار برده شده، در شکل ۲ ترسیم شده‌اند. همان گونه که از شکل ۲ مشخص است، در کامپوزیت دسته اول که دارای چیدمان $[0/(\pm 45)_2/0]_T$ است وقتی تحت بار کششی-کششی و با $R=0.1$ قرار می‌گیرد با ازدیاد زاویه خروج از محور بار اعمالی، منحنی

فرکانس 10 Hz به منظور اجتناب از ازدیاد دما انجام گرفته است و تحت نسبت تنش‌های 0.1 ، 0.5 ، 1.0 و 1 .

این آزمایشات خستگی تا زمان واماندگی کامل نمونه و یا تا عمر 10^6 سیکل ادامه پیدا می‌کردند. البته در مواردی به ویژه در بارگذاری کاملاً معکوس ($R = -1$) این مقدار سیکل تا 5×10^6 نیز ادامه پیدا کرده است. در آزمایشات خستگی تحت بار فشاری از بست ممانعت کننده از کمانش، استفاده شده است. تمام داده‌های خستگی ارائه شده در این دسته در دمای $18-22^\circ\text{C}$ به دست آمده‌اند.

دسته دوم داده‌ها توسط هریک و همکارانش [۵] تحت خستگی با سیکل کم^۱ ارائه گردیده است که برای لایه چینی تک جهته و تحت زاویه صفر درجه می‌باشد. این کامپوزیت شیشه-اپوکسی که از پیش آغشته^۲ 8553/S2-glass در آن استفاده شده است، در گرم خانه تحت فشار (اتوکلاو) عمل آورده شده است. برای تهیه این کامپوزیت از شش صفحه^۳ پیش آغشته در محفظه^۴ ایجاد خلاء استفاده کرده‌اند. رزین زیادی را نیز قبل از بالا رفتن ویسکوزیته آن با تحت فشار قرار دادن صفحه کامپوزیتی از آن خارج کرده‌اند. رزین بکار رفته در این لایه‌های پیش آغشته که به وسیله کارخانه Owens Corning تولید شده، توسط کارخانه Hexcel مهیا شده است. در این نمونه‌های آزمایشی طول هر نمونه برابر با 147 mm و عرض آن 10 mm در نظر گرفته شده است. ضخامت اسمی این نمونه‌های آزمایشی 1.2 mm بوده و طول ناحیه درگیر در دو فک 49 mm در نظر گرفته شده است.

آزمایشات خستگی این دسته از داده‌ها توسط دستگاه هیدرولیک تک جهته^۱ انسترون ۱۳۳۱ انجام گرفته است. جهت ایجاد نمونه‌های آزمایشی از روی صفحه^۲ کامپوزیتی اصلی از ااره^۳ چرخ الماس خنک شونده با آب استفاده کرده‌اند. آزمایشات خستگی بر اساس استاندارد ASTM D3479 انجام گرفته‌اند. دمای آزمایشات 20°C و فرکانس انجام تست خستگی بسیار کم و برابر 0.25 Hz بوده است. شکل موج اعمالی به فرم شبه مستطیلی بوده است، به طوری که 0.3 s طول می‌کشد که تنش کمینه^۴ σ_{\min} به تنش بیشینه^۵ σ_{\max} برسد.

³ Marquardt

⁴ Merit

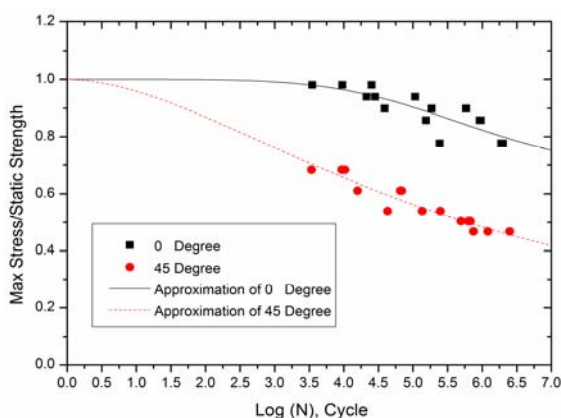
¹ Low cycle fatigue

² Prepreg

محور بار اعمالی، منحنی $S-N$ به سمت پایین و چپ شیفت پیدا می‌کند، که این به معنای کاهش عمر خستگی برای مقدار بار مشخص است. این تقلیل عمر خستگی ناشی از ازدیاد زاویه خروج از محور، در ناحیه اول بیشتر خود را نشان می‌دهد.

جدول (۲): پارامترهای مدل عمر خستگی برای کامپوزیت دسته اول با نسبت تنش $R=0.5$ تحت زوایای اعمال بار گوناگون.

| Degree of off-axis | 0° | 45° |
|--------------------|------|------|
| b | 0.63 | 0.04 |
| n_0 | 6.08 | 5.48 |
| p | 5.25 | 1.82 |
| χ^2 | 2E-3 | 7E-4 |



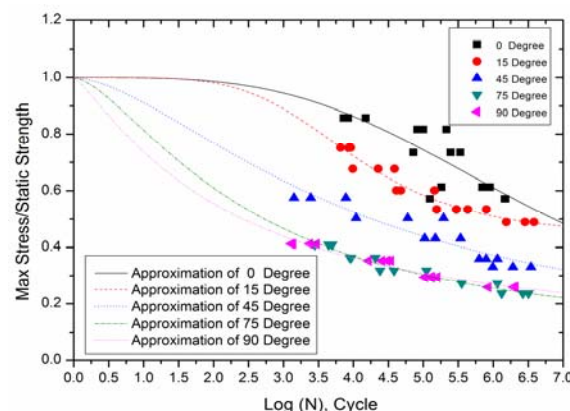
شکل (۳): تغییرات منحنی $S-N$ با توجه به مدل عمر خستگی برای ماده دسته اول، تحت زوایای اعمال بار مختلف و با $R=0.25$.

پارامترهای مجهول مدل عمر خستگی طبق روش ذکر شده برای کامپوزیت دسته اول وقتی که تحت نسبت تنش $R=10$ می‌باشد برای زوایای اعمال بار 0° ، 30° ، 45° و 60° و 90° محاسبه شده‌اند که به همراه تابع مزیت مربوط به هر مورد در جدول ۳ درج گردیده‌اند. منحنی مدل عمر خستگی مربوط به هر دسته از پارامترهای به دست آمده که مربوط به یک زاویه اعمال بار می‌باشند به همراه داده‌های عمر خستگی به کار برده شده، در شکل ۴ ترسیم شده‌اند. همان گونه که از شکل ۴ مشخص است، در کامپوزیت دسته اول وقتی تحت بار فشاری- فشاری قرار می‌گیرد با ازدیاد زاویه خروج از محور بار اعمالی، لزوماً منحنی $S-N$ به سمت

$S-N$ به سمت پایین و چپ شیفت پیدا می‌کند، که این به معنای کاهش عمر خستگی برای مقدار بار مشخص است. این تقلیل عمر خستگی ناشی از ازدیاد زاویه خروج از محور، در ناحیه اول بیشتر خود را نشان می‌دهد.

جدول (۱): پارامترهای مدل عمر خستگی برای کامپوزیت دسته اول با نسبت تنش $R=0.1$ تحت زوایای اعمال بار گوناگون.

| Degree of off-axis | 0° | 15° | 45° | 75° | 90° |
|--------------------|------|------|------|------|------|
| b | 0.05 | 0.44 | 0.05 | 0.06 | 0.05 |
| n_0 | 6.66 | 4.02 | 4.00 | 2.51 | 2.22 |
| p | 3.49 | 4.78 | 1.64 | 1.52 | 1.21 |
| χ^2 | 5E-3 | 7E-4 | 1E-3 | 2E-4 | 2E-4 |



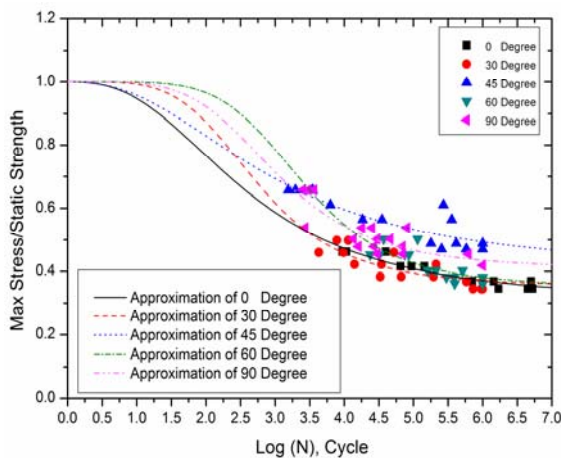
شکل (۴): تغییرات منحنی $S-N$ با توجه به مدل عمر خستگی برای ماده دسته اول، تحت زوایای اعمال بار مختلف و با $R=0.1$.

همانند روند بالا ولی این بار برای نسبت تنش $R=0.5$ و تحت زوایای اعمال بار 0° و 45° ، پارامترهای مجهول مدل عمر خستگی برای کامپوزیت دسته اول محاسبه می‌شوند. این پارامترها به همراه تابع مزیت مربوط به هر مورد در جدول ۲ درج گردیده‌اند. منحنی مدل عمر خستگی مربوط به هر دسته از پارامترهای به دست آمده به همراه داده‌های عمر خستگی به کار برده شده، در شکل ۳ ترسیم شده‌اند. همان گونه که از شکل ۳ مشخص است، این بار نیز در کامپوزیت دسته اول وقتی تحت بار کششی- کششی و با $R=0.5$ قرار می‌گیرد با ازدیاد زاویه خروج از

۵ مشخص است، در کامپوزیت دسته اول که دارای چیدمان $[0/(\pm 45)_2/0]_T$ است وقتی تحت بار کششی-فشاری با $R = -1$ قرار می‌گیرد روند متفاوتی را برای منحنی $S-N$ نسبت به حالت‌های قبل مشاهده می‌کنیم.

جدول (۴): پارامترهای مدل عمر خستگی برای کامپوزیت دسته اول با نسبت تنش $R = -1$ تحت زوایای اعمال بار گوناگون.

| Degree of off-axis | 0° | 30° | 45° | 60° | 90° |
|--------------------|------|------|------|------|------|
| b | 0.3 | 0.35 | 0.4 | 0.35 | 0.41 |
| n_0 | 2.61 | 2.76 | 2.95 | 3.43 | 3.05 |
| p | 2.62 | 4.38 | 2.38 | 5.35 | 4.46 |
| χ^2 | 2E-4 | 9E-4 | 1E-3 | 1E-3 | 2E-3 |



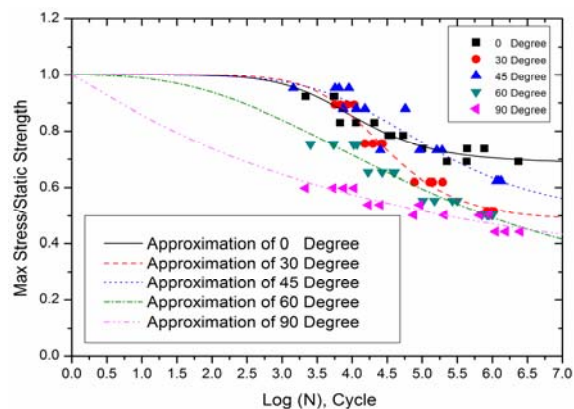
شکل (۵): تغییرات منحنی $S-N$ با توجه به مدل عمر خستگی برای ماده دسته اول، تحت زوایای اعمال بار مختلف و با $R = -1$.

مشاهده می‌شود که بهترین منحنی عمر خستگی مربوط به زاویه خروج از محور 45° می‌باشد و بعد از آن بارگذاری عرضی بهترین منحنی عمر خستگی را دارد و پس از آنها زوایای 60° ، 0° و 30° در واقع در حالت بارگذاری کاملاً معکوس روند قرارگیری منحنی‌های عمر خستگی تحت زوایای باری مختلف نسبت به قبل بهم می‌خورد، این امر به دو علت است اول آن که مقادیر استحکام فشاری که توسط آنها منحنی بی بعد شده است در زوایای بار مختلف متفاوت است و دوم اینکه ماده کامپوزیتی نسبت به خستگی در

پایین و چپ شیفیت پیدا نمی‌کند، بلکه دیده می‌شود که در زاویه اعمال بار 45° منحنی عمر خستگی بعضاً از منحنی عمر خستگی با زاویه اعمال بار 0° بالاتر قرار گرفته است (در ناحیه دوم عمر خستگی)، که این به معنای روند کندتر کاهش عمر خستگی در این زاویه اعمال بار می‌باشد.

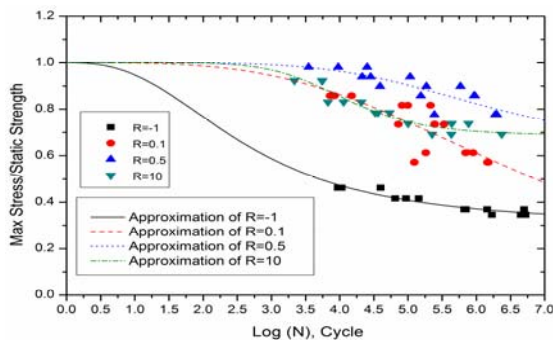
جدول (۳): پارامترهای مدل عمر خستگی برای کامپوزیت دسته اول با نسبت تنش $R = 10$ تحت زوایای اعمال بار گوناگون.

| Degree of off-axis | 0° | 30° | 45° | 60° | 90° |
|--------------------|------|------|------|------|------|
| b | 0.69 | 0.48 | 0.49 | 0.17 | 0.08 |
| n_0 | 4.09 | 4.46 | 5.1 | 5.10 | 4.58 |
| p | 7.14 | 8.42 | 5.8 | 2.71 | 1.12 |
| χ^2 | 7E-4 | 8E-4 | 2E-3 | 7E-4 | 5E-4 |



شکل (۴): تغییرات منحنی $S-N$ با توجه به مدل عمر خستگی برای ماده دسته اول، تحت زوایای اعمال بار مختلف و با $R = 10$.

این بار محاسبات انجام شده مشابه روند قبل، برای خستگی با بار کاملاً معکوس ($R = -1$) انجام می‌شود. در نتیجه پارامترهای نامعلوم مدل عمر خستگی برای کامپوزیت دسته اول با زوایای اعمال بار 0° ، 30° ، 45° ، 60° و 90° به دست می‌آیند. این پارامترهای مدل عمر خستگی به همراه تابع مزیت مربوط به هر مورد در جدول ۴ درج گردیده‌اند. منحنی مدل عمر خستگی مربوط به هر دسته از پارامترهای به دست آمده که مربوط به یک زاویه اعمال بار می‌باشند به همراه داده‌های عمر خستگی به کار برده شده، در شکل ۵ ترسیم شده‌اند. همان گونه که از شکل



شکل (۶): تغییرات منحنی $S-N$ با توجه به مدل عمر خستگی برای ماده دسته اول، تحت نسبت تنش‌های مختلف و بار محوری.

این پارامترها به همراه تابع مزیت مربوط به هر مورد در جدول ۶ درج گردیده‌اند. منحنی مدل عمر خستگی مربوط به هر دسته از پارامترهای به دست آمده به همراه داده‌های عمر خستگی به کار برده شده، در شکل ۷ ترسیم شده‌اند. همان گونه که از شکل ۷ مشخص است، مانند دفعه قبل وقتی این کامپوزیت تحت بار کششی-کششی قرار می‌گیرد با ازدیاد نسبت تنش (از $R=0.1$ به $R=0.5$) منحنی عمر خستگی بهبود می‌یابد و به عبارتی دیگر منحنی $S-N$ به سمت بالا انتقال پیدا می‌کند. ولی این بار کمترین افت خستگی مربوط به حالت فشاری-فشاری ($R=10$) است. همچنین رفتار خستگی کامپوزیت در بارگذاری کاملاً معکوس ($R=-1$) نسبت به حالات دیگر بهبود یافته است و کم‌ترین منحنی عمر برای دامنه تنش ثابت این بار مربوط به حالت بارگذاری کششی-کششی با $R=0.1$ می‌باشد.

جدول (۶): پارامترهای مدل عمر خستگی برای کامپوزیت دسته اول برای نسبت تنش‌های مختلف که تحت بار با زاویه 45° قرار دارند.

| Stress Ratio | $R = -1$ | $R = 0.1$ | $R = 0.5$ | $R = 10$ |
|--------------|----------|-----------|-----------|----------|
| b | 0.4 | 0.05 | 0.04 | 0.49 |
| n_0 | 2.95 | 4.00 | 5.48 | 5.10 |
| p | 2.38 | 1.64 | 1.82 | 5.76 |
| χ^2 | 2E-3 | 1E-3 | 7E-4 | 2E-3 |

زوایای اعمال بار مختلف در حالت کششی بیشتر حساس است تا حالت فشاری.

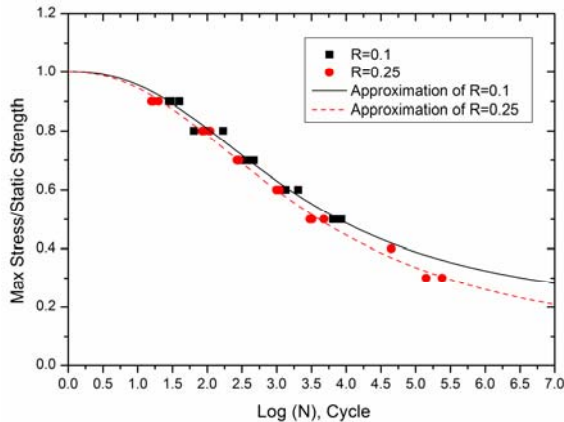
۲-۴- تغییرات عمر خستگی بر حسب نسبت تنش

پارامترهای مجهول مدل عمر خستگی طبق روند قبل برای کامپوزیت دسته اول وقتی که تحت زاویه اعمال بار محوری (0°) قرار دارد و نسبت تنش ۱-، ۰/۱، ۰/۵ و ۱۰ می‌باشد، محاسبه شده‌اند که به همراه تابع مزیت مربوط به هر مورد در جدول ۵ درج گردیده‌اند. منحنی مدل عمر خستگی مربوط به هر دسته از پارامترهای به دست آمده به همراه داده‌های عمر خستگی به کار برده شده، در شکل ۶ ترسیم شده‌اند. همان گونه که از شکل ۶ مشخص است، در کامپوزیت دسته اول وقتی تحت بار کششی-کششی قرار می‌گیرد با ازدیاد نسبت تنش (از $R=0.1$ به $R=0.5$) منحنی عمر خستگی بهبود می‌یابد و به عبارتی دیگر با کاهش بازه تنش اعمالی منحنی $S-N$ به سمت بالا انتقال پیدا می‌کند. ولی در حالت فشاری-فشاری ($R=10$) هم حساسیت خستگی منحنی عمر کمی افزایش می‌یابد و هم منحنی به سمت پایین میل می‌کند. کم‌ترین منحنی عمر برای دامنه تنش ثابت مربوط به حالت بارگذاری کاملاً معکوس ($R=-1$) می‌باشد.

همانند روند بالا ولی این بار برای زاویه خروج از محور 45° و تحت نسبت تنش‌های ۱-، ۰/۱، ۰/۵ و ۱۰ پارامترهای نامعلوم b ، n_0 و p برای کامپوزیت دسته اول محاسبه می‌شوند.

جدول (۵): پارامترهای مدل عمر خستگی برای کامپوزیت دسته اول برای نسبت تنش‌های مختلف که تحت بار محوری قرار دارند.

| Stress Ratio | $R = -1$ | $R = 0.1$ | $R = 0.5$ | $R = 10$ |
|--------------|----------|-----------|-----------|----------|
| b | 0.3 | 0.05 | 0.63 | 0.69 |
| n_0 | 2.61 | 6.66 | 6.08 | 4.09 |
| p | 2.62 | 3.49 | 5.25 | 7.14 |
| χ^2 | 2E-4 | 5E-3 | 2E-3 | 7E-4 |



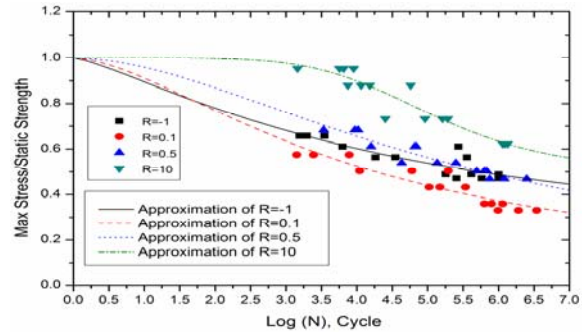
شکل (۸): تغییرات منحنی S-N با توجه به مدل عمر خستگی برای ماده دسته دوم، تحت نسبت تنش‌های مختلف و زاویه اعمال بار $\theta = 0^\circ$.

۵- نتیجه‌گیری

از روی پارامترها و منحنی به دست آمده می‌توان مشاهده کرد که مدل عمر خستگی ارائه شده به خوبی توانسته است رفتار عمر خستگی مواد کامپوزیتی را در هر سه ناحیه عمر خستگی شبیه سازی کند، که این شامل ناحیه خستگی با سیکل کم و ناحیه خستگی با سیکل زیاد می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که این مدل برای انواع بارگذاری مختلف کششی-کششی، کششی- فشاری و فشاری-فشاری با زوایای اعمال بار مختلف کاربرد دارد. از سویی دیگر می‌توان از این مدل عمر خستگی برای انواع چیدمان‌های مختلف مواد کامپوزیتی لایه‌ای استفاده کرد.

مراجع

- Zabihpoor, M. and Adibnazari, S. "Simulation of Fiber/Matrix Debonding in Unidirectional Composite under Fatigue Loading", J. Reinforced Plastics and Composites, Vol. 26, No. 8, pp. 743-760, 2007.
- Fatemi, A. and Yang, L. "Cumulative Fatigue Damage and Life Prediction Theories: A Survey of the State of the Art for Homogeneous Materials", Int. J. Fatigue, Vol. 20, pp. 9-34, 1998.
- Talreja, R. "Fatigue of Composite Materials", In: Altenbach, H. and Becker, W. "Modern Trends in Composite Laminate Mechanics", Springer-Verlag, New York, pp. 281-94, 2003.



شکل (۷): تغییرات منحنی S-N با توجه به مدل عمر خستگی برای ماده دسته اول، تحت نسبت تنش‌های مختلف و زاویه خروج از محور $\theta = 45^\circ$.

اگر محاسبات فوق برای داده‌های عمر خستگی کامپوزیت دسته دوم که تحت بار محوری با نسبت تنش‌های ۰/۱ و ۰/۲۵ قرار دارد انجام شود، داده‌های جدول ۷ برای پارامترهای منحنی عمر خستگی (رابطه (۳)) به دست می‌آیند.

جدول (۷): پارامترهای مدل عمر خستگی برای کامپوزیت دسته دوم با نسبت تنش‌های مختلف که تحت بار محوری قرار دارند.

| Stress Ratio | R=0.1 | R=0.25 |
|--------------|-------|--------|
| b | 0.17 | 0.05 |
| n_0 | 3.29 | 3.44 |
| p | 2.43 | 2.26 |
| χ^2 | 4E-4 | 2E-4 |

منحنی مدل عمر خستگی مربوط به هر دسته از پارامترهای به دست آمده به همراه داده‌های عمر خستگی به کار برده شده، در شکل ۸ ترسیم شده‌اند. همان گونه که از شکل ۸ مشخص است، با ازدیاد نسبت تنش از $R=0.1$ به $R=0.25$ منحنی عمر خستگی دچار افت می‌گردد، البته حساسیت خستگی منحنی عمر در این کامپوزیت برای نسبت تنش کم است.

4. Philippidis, T.P. and Vassilopoulos, A.P. "Fatigue of Composite Laminates under Off-axis Loading", *Int. J. Fatigue*, Vol. 21, pp. 253-262, 1999.
5. Harik, V.M., Klinger, J.R., and Bogetti, T.A. "Low Cycle Fatigue of Unidirectional Laminates: Stress Ratio Effects", *J. Eng. Materials and Technology*, Vol. 122, pp. 415-419, 2000.