مدل سازي رفتار خستگي كامپوزيت هاي تك جهته كربن/اپوكسي

محمود مهرداد شكريه*[۱] و فتح اله طاهري بهروز[۲]

[۱]استاد دانشكده مهندسي مكانيك - دانشگاه علم و صنعت ايران

[۲]دانشجوي دكتري دانشكده مهندسي مكانيك - دانشگاه علم و صنعت ايران

(تاريخ دريافت ۸۴/۸/۳۰ ، تاريخ دريافت روايت اصلاح شده ۸۵/۲/۳ ، تاريخ تصويب ۸۶/۷/۷)

چكيده

در اين تحقيق يك مدل جديد خستگي براي پيش بيني عمر خستگي تك لايه هاي كامپوزيتي تحت بارگذاري خستگي با دامنه ثابت و براي حالت هاي بارگذاري كششي-كششي و فشاري- فشاري ارائه شده است. مدل ارائه شده يك مدل نرماليزه بر پايه روش انرژي بوده و از عدد تخريب استاتيكي معيار ساندو (Sandhu) بعنوان يك سنجه جديد خستگي استفاده نموده است. اين مدل قادر به پيش بيني عمر خستگي كامپوزيت هاي تك جهته با جهت هاي دلخواه، براي كليه وضعيت هاي تنش و نسبت تنش هاي مثبت مي باشد. با استفاده از اين مدل كليه نتايج بدست آمده از نسبت هاي مختلف تنش و جهت هاي مختلف الياف به يك منحني اصلي خلاصه مي شوند. نتايج پيش بيني شده توسط مدل و نتايج آزمايشگاهي موجود در مقالات از همخواني بسيار خوبي برخوردار هستند.

واژه‌هاي كليدي: كامپوزيت هاي پليمري - مدل سازي خستگي- روش انرژي

مقدمه

رفتار خستگي كامپوزيت هاي زمينه پليمري به جهت الياف، نوع الياف و رزين، نوع بافت پارچه، تعداد لايه ها، نوع لايه چيني، نسبت تنش، وضعيت تنش، نوع بارگذاري، شرايط محيطي و فركانس بارگذاري وابسته مي باشد. علاوه بر آن اين مواد در پيش و پس از تخريب، غير همگن و غير همسانگرد هستند به همين دليل مطالعه رفتار خستگي اين مواد بسيار پيچيده تر از رفتار مواد سنتي مي باشد. فرآيند تخريب اين مواد تحت بارگذاري خستگي، با آنچه كه در مواد مرسوم مشاهده مي‌شود، تفاوت قابل ملاحظه‌اي دارد. در فلزات مرحله تدريجي و غير قابل مشاهده در افت خواص مكانيكي تقريبا تا نزديكي عمر قطعه امتداد پيدا مي كند. در طول فرآيند خستگي، هيچ كاهش قابل توجهي در خواص مكانيكي(سفتي و استحكام) مشاهده نشده و مرحله پاياني فرآيند با تشكيل ترک ريز شروع شده كه رشد آن منجر به بوجود آمدن ترک بزرگتر و در آخر رشد بيشتر باعث شكست نهايي مي شود. بطوريكه سفتي يک فلز تقريبا بدون تغيير باقي مانده و رابطه بين تنش و كرنش بصورت خطي معتبر مي ماند، لذا فرآيند خستگي در اغلب مواد مي تواند با تحليل الاستيک خطي و مكانيک شكست خطي مطالعه شود. در حالي كه در كامپوزيت هاي زمينه پليمري انتشار ترک به سادگي فلزات نيست، مسير تركها خيلي پيچيده است و ترک، تنها عامل تخريب در سازه نيست. در اين مواد، ترک هاي متعددي در اولين مراحل عمر شروع شده و در طي فرآيند اين نوع آسيب ممكن است با يك يا چند مكانيسم تخريب ديگر از قبيل ، ترک در ماتريس، شكست سطح تماس بين رزين و الياف، شكست الياف، كمانش الياف، جدايش بين لايه اي همراه شود. افزون بر اين، آسيب ممكن است بطور گسترده‌اي پراكنده بوده و لزوماً در ناحيه‌ي نوک ترک نباشد[۱]. همچنين در طي فرآيند نوع آسيب تغيير كرده، ماده افت خواص پيدا مي كند و در محل آسيب سفتي ماده تقليل پيدا كرده و به دنبال آن توزيع مجدد تنش و افت ضرايب تمركز تنش در داخل ماده بوجود مي آيد. در نتيجه پيش بيني عمر ماده نيازمند مطالعه رفتار ماده در طي كل فرآيند خستگي مي باشد. پارامتر هاي فوق باعث گسترش روش هاي متعددي براي مطالعه رفتار خستگي مواد كامپوزيتي شده است. مرور كاملي در اين زمينه در مقالات مروري [۲-۴] موجود مي باشد.

اگر چه اساس رفتار خستگي كامپوزيتهاي پليمري بسيار متفاوت از فلزات مي باشد، اما خيلي از مدلهاي خستگي بر اساس منحني هاي معروف S-N براي اين مواد توسعه داده شده اند. اين روش نياز به حجم زيادي از آزمايشات داشته و مكانيسم هاي واقعي آسيب از قبيل شكست رزين و الياف را در نظر نمي گيرد.

* نويسنده مسئول: تلفن : ۷۷۲۰۸۱۲۷ , فاكس : ۷۷۲۴۰۴۸۸ , Email: shokrieh@iust.ac.ir

از جمله اولين مدل هاي خستگي ارائه شده بر اساس منحني هاي معروف S-N، مدل هشين و روتم (Hashin - Rotem)[۵] است. ايشان با انجام تست هاي تك جهته روي نمونه هاي شيشه/اپوكسي در زواياي مختلف و وضعيت هاي مختلف تنش با نسبت تنش ثابت منحني تنش- عمر مربوطه را ارائه داده اند، سپس با جايگزيني استحكام خستگي به صورت تابعي از عمر خستگي به جاي استحكام هاي استاتيكي در يك معادله تخريب استاتيكي عمر يك تك لايه را در جهت هاي متعدد پيش بيني كردند. مدل ارائه شده توسط سيمس (Sims) و برودن (Brodon) [۶] نيز مشابه همين مدل رفتار مي كند. اليين(Ellyin) و الكادي (El kadi) [۷] نشان دادند چگالي انرژي كرنشي الاستيك را مي توان به عنوان يك معيار خستگي مورد استفاده قرار داد. در اين مدل كل چگالي انرژي كرنشي الاستيك وارد شده به ماده در سيكل اول محاسبه شده و به عمر خستگي N_f مرتبط مي شود.

بعدها فواز (Fawaz) و اليين(Ellyin) [۸] يك مدل ماكروسكوپي توسعه دادند كه در آن تنش اعمالي از طريق يك رابطه نيمه لگاريتمي به عمر خستگي مرتبط مي شود. ايشان با داشتن منحني S-N براي يك جهت از الياف قادر به پيش بيني منحني هاي تنش-عمر براي بقيه زوايا بودند. هر چند فيليپيديس و همكارانش (Philippidis) [۹] با استفاده از مدل خود نشان دادند مدل فواز (Fawaz) به انتخاب خط مرجع بسيار حساس بوده و نتايج خستگي چند محوره پيش بيني شده توسط مدل براي نمونه هاي سيلندري مناسب نمي باشد.

اخيرا كاواي (Kawai) [۱۰] با نرماليزه كردن تنش اعمالي به استحكام استاتيكي و تعريف نسبت استحكام خستگي مدلي را براي پيش بيني عمر خستگي يك تك لايه ارتوتروپيك در نسبت تنش هاي مثبت ومنفي و زواياي متعدد ارائه داده اند. پلومتري (Plumtree) و چنگ (Cheng) [۱۱] با تعريف صفحات بحراني در كامپوزيت‌هاي تك جهته به موازات الياف بيان داشتند تخريب در كامپوزيت‌ها در اثر تاثير مولفه نرمال و برشي تنش در اين صفحات اتفاق مي‌افتد. ايشان با اضافه كردن پارامتر SWT [۱۲] به مدل خود نهايتا يك پارامتر جديد خستگي براي مواد كامپوزيتي تك جهته گسترش دادند. بعد ها پلومتري(Plumtree)و پيترمانن (Petermann) [۱۳] از مفهوم چگالي انرژي كرنشي در صفحات بحراني استفاده نموده و پارامتر ديگري را براي مطالعه خستگي ارائه نمودند.

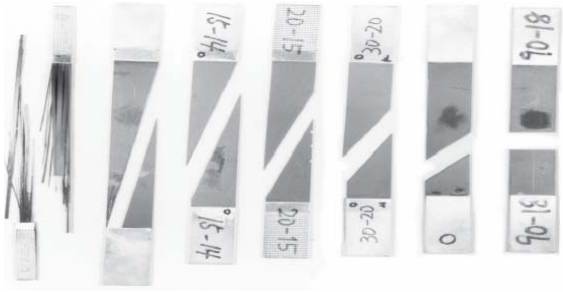
هر دو مدل ارائه شده توسط پلومتري (Plumtree) و همكارانش [۱۱و ۱۳] قادر به پيش بيني عمر خستگي در جهت الياف نبوده و براي جهت ماتريس مقايسه اي بين نتايج تجربي و مدل آنها ارائه نشده است. علاوه بر اين در كامپوزيت ها با تغيير جهت الياف مد تخريب از مد الياف به مد ماتريس تغيير مي كند [۱۴]. مدل ارائه شده تنها بر اساس مد تخريب ماتريس نوشته شده و لذا به نظر مي رسد براي زواياي كمتر از زاويه گذر نتايج پيش بيني شده توسط اين مدل نياز به بازنگري جدي داشته باشد. در مدل ارائه شده در اين تحقيق يك معيار جديد خستگي بر اساس معيار تخريب استاتيكي ساندو (Sandhu) [۱۵] ارائه شده است. اين معيار بر خلاف معيارهاي ارائه شده توسط پلومتري (Plumtree) و همكارانش هر دو مد تخريب ماتريس و الياف را در يك معادله كلي در نظر گرفته و به همين دليل قادر به پيش بيني عمر خستگي در كليه جهت هاي الياف است. مدل جديد به طور ذاتي نرماليزه بوده و در حقيقت به جاي مولفه هاي تنش از عدد تخريب معيار استاتيكي ساندو (Sandhu) در هر وضعيت تنش به عنوان يك سنجه جديد خستگي بهره مي برد. با معيار جديد خستگي امكان مطالعه عمر خستگي يك لايه ارتوتروپيك درحالت‌هاي كششي- كششي و فشاري- فشاري، براي كليه وضعيت‌هاي تنش با نسبت تنش مثبت و در زواياي مختلف فراهم شده است.

زمينه تئوري

آسيب و انباشت آن در كامپوزيت ها توسط محققين زيادي مطالعه شده است[۱۶-۱۷]. در يك تك لايه كامپوزيتي ترك ابتدايي در مراحل اوليه عمر خستگي به موازات الياف شروع شده و بسته به جهت الياف با جهت بارگذاري به يكي از سه صورت زير گسترش پيدا مي كند. در صورتي كه جهت الياف موازي با جهت بارگذاري باشد، بسته به وضعيت تنش با گذشت عمر، شكست در الياف باعث تخريب قطعه مي شود ، در اين حالت تنش در جهت الياف عمر قطعه را كنترل مي كند. در صورتي كه جهت بارگذاري عمود بر جهت الياف باشد، ترك هاي اوليه در رزين شروع شده و گسترش و انباشت آنها باعث شكست در رزين در صفحاتي به موازات الياف مي شود. در اين حالت

تنش در جهت عمود بر الياف عمر قطعه را كنترل مي كند. حالت سوم، در صورتي كه جهت الياف با جهت بار گذاري زاويه بين صفر و نود درجه داشته باشد در اين حالت بسته به جهت الياف با جهت بارگذاري يكي از حالت هاي زير پيش مي آيد: در حالت اول با فرض اينكه زاويه الياف كمتر از زاويه گذر باشد، ترك هاي اوليه بعد از شروع در رزين به موازات الياف رشد كرده و به ناحيه مشترك الياف و ماتريس وارد مي شود در اين ناحيه تركيب مولفه‌هاي تنش در جهت الياف و تنش برشي داخل صفحه تخريب در قطعه را كنترل مي كنند. در حالت دوم با فرض اينكه زاويه الياف بيشتر از زاويه گذر باشد، ترك هاي اوليه بعد از شروع در رزين در جهت عمود بر الياف رشد كرده، به ناحيه مشترك الياف و ماتريس مي رسند در اين ناحيه تركيب مولفه‌هاي تنش در جهت رزين و تنش برشي داخل صفحه تخريب در قطعه را كنترل مي كنند.

شكل (١) بطور شماتيك فرايند تخريب خستگي كامپوزيت هاي تك جهته در زواياي مختلف الياف را نشان مي دهد.



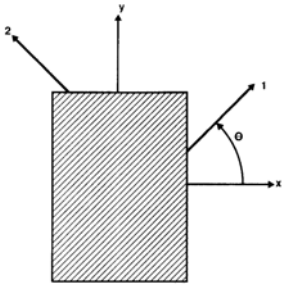
شكل ١: تخريب خستگي كامپوزيت هاي كربن/اپوكسي تحت بار خستگي [١٠].

هان [١٨] رفتار خستگي كامپوزيت هاي تك جهته كربن / اپوكسي را در جهت هاي ($\theta =$ 0,10, 20, 30, 45, 60, 90°) با استفاده از منحني هاي معروف S-N مطالعه كرده است. زاويه گذر براي اين مواد بر اساس رابطه (١) ٩/٩٨ درجه است. بر اساس تئوري اصلاح شده هشين [١۴] ايشان فقط مد تخريب رزين را در نمونه هاي خود مشاهد كرده اند:

$$\theta_{transition} = Arc\tan(\sqrt{\frac{X_t}{Y_t}}) = Arc\tan(\sqrt{\frac{56.9}{1836}}) = 9.98^\circ$$

(١)

كه در X_t و Y_t آن به ترتيب استحكام كششي در جهت الياف و رزين هستند. شكل (٢) محورهاي مادي (١-٢) و محورهاي بارگذاري(x-y) در يك لايه اورتوتروپيك را نشان مي دهد.



شكل٢ : محورهاي مادي(١-٢) و محورهاي بارگذاري(x-y) در يك لايه اورتوتروپيك.

پلومتري (Plumtree) و همكارانش [١١و ١٣] يك پارمتر جديد خستگي W^* براساس مفهوم صفحات بحراني طبق معادله (٢) ارائه دادند.

$$W^* = \lambda(\sigma_2^{\max}\varepsilon_2^{\max} + \sigma_6^{\max}\varepsilon_6^{\max})$$

(٢)

كه در آن $\lambda = \frac{1-R^2}{2}$ و σ_2 ، σ_6 و ε_2 ، ε_6 مولفه هاي تنش و كرنش در مختصات مادي وR نسبت تنش هستند.

بر اساس معادله (٢) براي كليه جهت هاي بارگذاري تنها مولفه هاي جهت رزين و برش داخل صفحه اي تنش در پارامتر خستگي موثر هستند، در صورتي كه بر اساس تئوري اصلاح شده هشين در زواياي كمتر از زاويه گذر تنش هاي در جهت الياف و برش داخل صفحه اي در تخريب قطعه موثر هستند. به منظور لحاظ كردن اثر كليه مولفه هاي تنش در تخريب خستگي در اين تحقيق يك پارامتر جديد خستگي بر اساس روش انرژي ارائه شده است.

ارائه پارامتر جديد خستگي

در موقع استفاده از منحني هاي معروف S-N دامنه تنش حداكثر بعنوان معيار خستگي انتخاب شده و در برابر عمر رسم مي شود. محققين زيادي [۵ و١٨] نشان داده اند در صورتي كه بجاي دامنه تنش حداكثر معيار مناسب ديگري انتخاب شود تعداد آزمايشات مورد نياز براي پيش بيني عمر خستگي در كامپوزيت ها به شدت كاهش خواهد يافت. در اين تحقيق نشان داده شده است با اتخاب معيار جديد خستگي بصورت تركيبي از مولفه هاي نرماليزه شده

چگالي انرژي كرنشي در جهات مادي، تعداد آزمايشات كاهش يافته و نتايج پيش بيني شده توسط معيار جديد با نتايج آزمايشگاهي موجود همخواني خوبي دارند.

بر اساس تحقيقات مولفين اولين معيار تخريب استاتيكي بر اساس چگالي انرژي كرنشي توسط ساندو(Sandhu) [۱۵] براي مواد كامپوزيتي ارائه شده است. اين معيار بدون توجه به مدهاي تخريب از كليه مولفه هاي تنش و كرنش در يك معادله نرماليزه شده براي پيش بيني تخريب استاتيكي استفاده نموده است. براي يك كامپوزيت ارتوتروپيك و بارگذاري داخل صفحه‌اي اي معيار با معادله (۳) ارائه شده است.

$$\frac{\sigma_1\varepsilon_1}{X\varepsilon_{1u}}+\frac{\sigma_2\varepsilon_2}{Y\varepsilon_{2u}}+\frac{\sigma_6\varepsilon_6}{S\varepsilon_{6u}}=1$$

(۳)

كه در آن ε_1 ، ε_2 ، ε_6 و σ_1 ، σ_2 ، σ_6 به ترتيب مولفه هاي كرنش و تنش در جهات مادي و X ، Y ، S و ε_{1u} ، ε_{2u} ، ε_{6u} به ترتيب استحكام و كرنش هاي حداكثر در جهت هاي مادي هستند. در اين تحقيق مقدار تخريب استاتيكي معادله (۳) به عنوان سنجه جديدي، براي بررسي خستگي كامپوزيت هاي تك جهته براي نسبت هاي مختلف تنش و زواياي دلخواه الياف معرفي شده است. معيار جديد خستگي در محور هاي مادي با معادله (۴) ارائه شده است:

$$\Delta W^*=\Delta W_I^*+\Delta W_{II}^*+\Delta W_{III}^*=\frac{\Delta\sigma_1\Delta\varepsilon_1}{X\varepsilon_{u1}}+\frac{\Delta\sigma_2\Delta\varepsilon_2}{Y\varepsilon_{u2}}+\frac{\Delta\sigma_6\Delta\varepsilon_6}{S\varepsilon_{u6}}$$

(۴)

كه در آن Δ قبل از هر پارامتر، محدوده تغييرات آن را نشان مي دهد و ΔW^* پارامتر جديد خستگي است.

لازم به ذكر است كه در بارگذاري كششي-كششي $X=X_t$ و $Y=Y_t$ و در بارگذاري فشاري- فشاري $X=X_c$ و $Y=Y_c$ در معادله (۴) استفاده مي شود.

مقدار كل چگالي انرژي كرنشي تحت بارگذاري خستگي با معادله (۵) نشان داده مي شود:

$$\Delta W=\frac{1}{2}(\Delta\sigma_1\Delta\varepsilon_1+\Delta\sigma_2\Delta\varepsilon_2+\Delta\tau_{66}\Delta\gamma_{66})$$

(۵)

مقدار نرماليزه شده چگالي انرژي كرنشي توسط مولفه هاي تنش و كرنش در جهت الياف طبق معادله (۶) است:

$$\Delta W_I^*=\frac{1}{X\varepsilon_{1u}}(\sigma_{1\max}\varepsilon_{1\max}-\sigma_{1\min}\varepsilon_{1\min})$$

(۶)

با فرض رفتار خطي بين تنش و كرنش بين كليه مولفه هاي تنش و كرنش در مختصات مادي معادله (۶) به فرم معادله (۷) تغيير داده مي شود:

$$\Delta W_I^*=\frac{1}{X^2}\frac{(1+R)}{(1-R)}(\Delta\sigma)^2$$

(۷)

كه در آن $R=\sigma_{\min}/\sigma_{\max}$ نسبت تنش است.

با استفاده از يك تبديل مناسب مولفه هاي تنش در مختصات مادي مشخص شده و بعد از جايگزيني در معادله (۷) و ساده سازي معادله (۸) بدست آمده است.

$$\Delta W_I^*=\frac{1}{X^2}\frac{(1+R)}{(1-R)}(\Delta\sigma_x)^2(\cos^4\theta)$$

(۸)

كه در آن θ جهت الياف است.

به همين ترتيب چگالي انرژي كرنشي در جهت ماتريس و برش داخل صفحه اي طبق معادلات (۹) و (۱۰) بست آمده اند:

$$\Delta W_{II}^*=\frac{1}{Y^2}\frac{(1+R)}{(1-R)}(\Delta\sigma_x)^2(\sin^4\theta)$$

(۹)

$$\Delta W_{III}^*=\frac{1}{S^2}\frac{(1+R)}{(1-R)}(\Delta\sigma_x)^2(\sin^2\theta\cos^2\theta)$$

(۱۰)

با جايگذاري معادلات (۸-۱۰) در معادله (۴) معيار جديد خستگي طبق معادله (۱۱) حاصل مي شود:

$$\Delta W^*=\Delta W_I^*+\Delta W_I^*+\Delta W_{III}^*=\frac{(1+R)}{(1-R)}(\Delta\sigma_x)^2(\frac{\cos^4\theta}{X^2}+\frac{\sin^4\theta}{Y^2}+\frac{\sin^2\theta\cos^2\theta}{S^2})$$

(۱۱)

بايد توجه داشت معيار جديد خستگي، معادله (۱۱)، براي نسبت تنش هاي صفر و مثبت ($R\geq 0$) و حالت بارگذاري كششي-كششي و فشاري-فشاري و زواياي دلخواه الياف ارائه شده است. اليين و الكادي [۷] بيان داشتند عمر خستگي از طريق رابطه $\Delta W^t=g(N_f)$ به كل انرژي وارد شده به داخل قطعه مرتبط مي شود. آنها يك تابع نمايي به فرم معادله (۱۲) براي پيش بيني عمر خستگي ارائه نمودند.

$$\Delta W^t = k\, N_f^{\alpha} + C$$

(١٢)

كه در آن k ، α و C ثوابت مادي بوده و از طريق آزمايش مشخص مي شوند. k و α توابعي از نسبت تنش و جهت الياف بوده و مشخص كردن آنها نياز به انجام آزمايشات زيادي دارد كه علاوه بر زمان بر بودن نياز به هزينه زيادي نيز دارد. جهت ساده تر شدن معادله ١٢ ضريب C براى مواد همسانگرد و همچنين كامپوزيت ها صفر فرض شده است. در اين تحقيق معادله (١٢) با جايگزين كردن معيار جديد (معادله ١١) در سمت چپ آن و صفر فرض كردن ضريب C مشابه محققين قبلى به صورت معادله (١٣) اصلاح شده است:

$$\Delta W^* = k\, N_f^{\alpha}$$

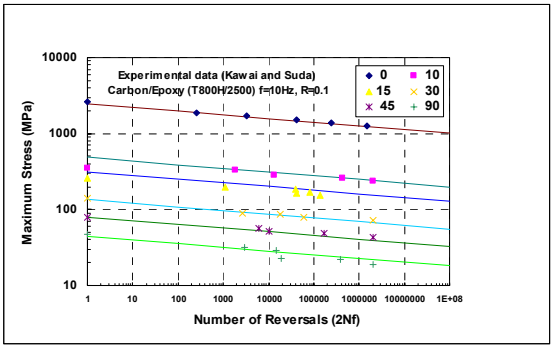
(١٣)

كه درآن k و α ثوابت مادي بوده و مستقل از جهت الياف و نسبت تنش هستند. ثوابت مادي براي هر ماده با انجام آزمايش در يك زاويه دلخواه و يك نسبت تنش دلخواه بدست آمده و براي بقيه زوايا و نسبت هاي تنش ثابت مي مانند. به همين دليل معيار جديد خستگي ارائه شده در اين تحقيق با انجام آزمايش در يك نسبت تنش و يك زاويه دلخواه توانايي پيش بيني عمر خستگي يك كامپوزيت تك جهته در كليه زوايا و نسبت هاي دلخواه تنش بدون انجام آزمايش ديگري را دارد. لازم به ذكر است در صورتي كه به جاي استفاده از يك زاويه، در چند زاويه آزمايش انجام شده و در بدست آوردن ضرايب استفاده شود (مثلا زواياي صفر و ٤٥ و ٩٠ درجه) دقت مدل بيشتر خواهد شد ولي اين مدل در حالت كلي حتي با داشتن خواص خستگي در يك زاويه قادر به پيش بيني عمر خستگي در زواياي ديگر است. هر چند دقت مدل در صورت استفاده از نتايج آزمايشى كمتر كاهش می يابد. ولي مدل هاي ديگر مشابه مدل پلومتري (Plumtree) و همكارانش [١١و ١٣] با داشتن همين دقت قادر به پيش بيني عمر در همه زوايا نيستند.

مقايسه با نتايج آزمايشگاهي

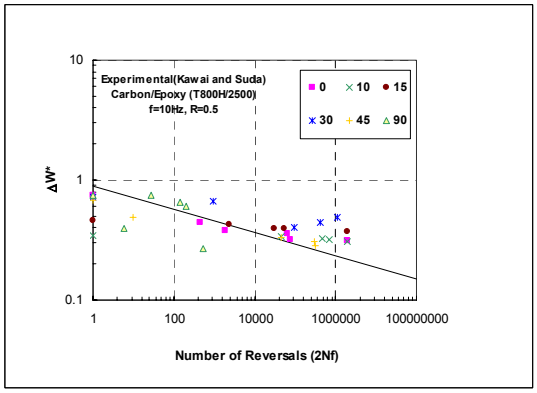
به منظور نشان دادن توانايي معيار جديد خستگي در پيش بيني عمر خستگي قطعات كامپوزيتي، دو دسته از نتايج آزمايشگاهي انجام شده توسط محققين ديگر [١٠، ١٨] در اينجا استفاده شده است.

دسته اول آزمايشات انجام شده توسط كاواي (Kawai) [١٠] با استفاده از كامپوزيت هاي تك جهته كربن/اپوكسي(T800H/2500) براي نسبت تنش هاي مثبت و زواياي مختلف ($\theta = 0, 10, 15, 30, 45, 90^{\circ}$) است. نتايج آزمايشات انجام شده توسط اين محقق در نسبت تنش ٠/١ و فركانس ١٠ هرتز در شكل (٣) آورده شده است.



شكل ٣: مقايسه بين نتايج پيش بيني شده و نتايج آزمايشگاهي R=0.1 [١٠].

همانطور كه شكل نشان مي دهد عمر خستگي به شدت به جهت الياف وابسته است.



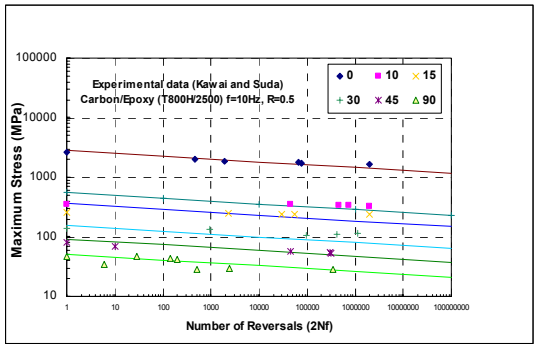
شكل ٤ : تغييرات ΔW^* در برابر تعداد سيكل‌ها (2Nf) R=0.1 [١٠].

با استفاده از معيار جديد خستگي نتايج آزمايشگاهي در مختصات لگاريتمي در شكل (٤) مجددا رسم شده است. با توجه به شكل (٤) نتايج در يك باند محدودي توزيع شده اند. براي بدست آوردن ضرايب مادي موجود در معادله (١٣) با استفاده از روش حداقل مربعات معادله (١٤) به نتايج آزمايشگاهي برازش شده است.

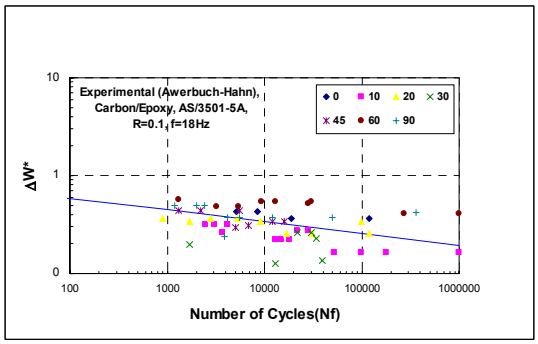
$$\Delta W^* = 0.8928(2N_f)^{-0.09717}$$

(١٤)

نتايج پيش بيني شده توسط معادله (۱۴) بصورت خطوط پر در شكل (۳) نشان داده شده است. نتايج پيش بيني شده توسط معيار جديد و نتايج آزمايشگاهي همخواني خوبي را نشان مي دهد. با استفاده از معادله (۱۴) عمر خستگي براي همين ماده و نسبت تنش ۰/۵ بدست آمده است تا توانايي مدل در پيش بيني عمر خستگي براي نسبت هاي مختلف تنش نشان داده شود. شكل (۵) نتايج پيش بيني شده توسط معادله (۱۴) به همراه نتايج تجربي براي نسبت تنش ۰/۵ را نشان مي دهد. نتايج پيش بيني شده توسط مدل (خطوط پر) همخواني خوبي را با نتايج آزمايشگاهي نشان مي دهند. در ادامه براي نشان دادن توانايي مدل، نتايج آزمايشات انجام گرفته توسط آوريخ و هان [۱۸] روي كامپوزيت هاي تك جهته كربن/اپوكسي با نسبت تنش ۰/۱ و زواياي مختلف الياف ($\theta = 0, 10, 20, 30, 45, 60, 90^\circ$) با نتايج پيش بيني شده توسط مدل (معادله ۱۳) مقايسه شده است.



شكل ۵ : مقايسه بين مقادير پيش بيني شده (معادله ۱۴) و نتايج آزمايشگاهي R=0.5 [۱۰].

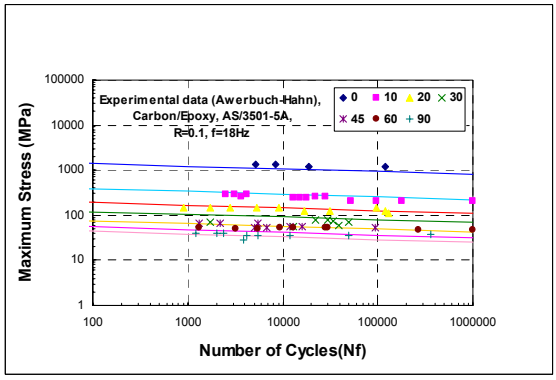


شكل ۶ : تغييرات ΔW^* در برابر تعداد سيكل‌ها (Nf) R=0.1 [۱۸].

شكل (۶) تغييرات معيار جديد خستگي بر حسب عمر خستگي را نشان مي دهد. با استفاده از روش حداقل مربعات معادله (۱۵) به نتايج آزمايشگاهي برازش شده است. با استفاده از معادله (۱۵) براي زواياي مختلف، عمر پيش بيني شده و در شكل (۷) آورده شده است. خطوط پر نتايج پيش بيني شده توسط معادله (۱۵) و نقاط، نتايج آزمايشگاهي را نشان مي دهند.

$$\Delta W^* = 1.028(2N_f)^{-0.1211} \quad (۱۵)$$

اشكال (۴-۷) نشان مي دهند با استفاده از معيار جديد خستگي وابستگي عمر كامپوزيت هاي تك جهته به نسبت تنش و جهت الياف از بين مي رود و با انجام تنها يك دسته آزمايشات خستگي در يك نسبت تنش و يك زاويه دلخواه امكان پيش بيني عمر خستگي براي جهت هاي ديگر الياف و هرنسبت تنش مثبت براي همان ماده با دقت خوبي امكان پذير است.



شكل ۷ : مقايسه بين مقادير پيش بيني شده (معادله ۱۵) و نتايج آزمايشگاهي R=0.1 [۱۸].

برخلاف مدل ارائه شده در اين تحقيق كه توانايي پيش بيني عمر خستگي يك كامپوزيت تك جهته را تحت بارگذاري با دامنه ثابت براي نسبت هاي مثبت تنش و كليه زوايا دارا مي باشد، مدل صفحات بحراني ارائه شده توسط پلومتري (Plumtree) و همكارانش امكان پيش بيني عمر خستگي در جهت الياف و در جهت رزين را ندارد. علاوه بر آن دقت نتايج پيش بيني شده توسط مدل صفحات بحراني پلومتري (Plumtree) براي زواياي كمتر از زاويه گذر از دقت مناسبي برخوردار نمي باشد كه دليل عمده آن در نظر گرفتن مود صحيح تخريب و حذف انرژي جذب شده توسط الياف در زواياي كمتر از زاويه گذر است.

نتيجه گيري

در اين تحقيق براي پيش بيني عمر خستگي كامپوزيت هاي تك جهته تحت بارگذاري ثابت يك معيار

جديد خستگي ارائه شده است. اين معيار مستقل از نسبت هاي مثبت تنش و زواياي الياف بوده و نياز به انجام آزمايشات بسياركمتري براي پيش بيني عمر خستگي دارد. علاوه بر آن مدل جديد با در نظر گرفتن مقادير استحكام نهايي متفاوت براي بارگذاري كششي و فشاري توانايي پيش بيني عمر خستگي براي حالت هاي بارگذاري خستگي كششي-كششي و فشاري- فشاري در نسبت تنش يكسان را دارد.

مراجع

1 - Harris, B. (1977). "Fatigue and accumulation of damage in reinforced plastics." *SEE Fatigue Group Conference on Fatigue of FRP*, London.

2 - Degreck, J. and Van Paepegem, W. (2001). "Fatigue damage modeling of fiber-reinforced composite materials review." *Applied Mechanic Reviews*, Vol. 54, No. 4, PP.279- 300.

3 - Stinchcomb, W. W. and Reifsnider, K. L. (1979). "Fatigue damage mechanism in composite materials: A Review." *Fatigue Mechanisms, Proceeding of an ASTM –NBS-NSF symposium,* Kansas City, Mo., May 1978, J. T. Fong, Ed., ASTM STP 675, American Society for Testing and Materials, PP. 762-787.

4 - Sendeckyj, G. P. (1990). "Life Prediction for Resin-Matrix Composite Materials", Fatigue of Composite Materials, Ed. K.L. Reifsnider, Elsevier Science Publishers, PP. 431-483.

5 - Hashin, Z. and Rotem, R. (1973). "A fatigue failure criterion for fiber reinforced materials." *J Comp Mater,* Vol. 7, PP.448–64.

6 - Sims, D. F. and Brogdon, V. H. (1977). "Fatigue behavior of composites under different loading modes." In Reifsnider KL, Lauraitis KN, Editors, fatigue of filamentary composite materials. *ASTM STP* 636: PP. 185-205.

7 - Ellyin, F. and EL-Kadi, H. (1990). "A fatigue Failure Criterion for Fiber Reinforced Composite Lamina." *Composite Structures,* Vol. 15, PP.61-74.

8 - Fawaz, Z. and Ellyin, F. (1994). "Fatigue failure model for fiber-reinforced materials under general loading conditions." *J Composite Mat*., Vol. 28, No. 15, PP. 1432- 1451.

9 - Philippidis, T. P. and Vassilopoulos, A. P. (1999). "Fatigue strength prediction under multiaxial stress." *J Composite Mat*., Vol. 33, No. 17, PP.1578- 1599.

10 - Kawai, M. (2004). "A phenomenological model for off-axis fatigue behavior of unidirectional polymer matrix composites under different stress ratios." *Composites: Part A,* Vol. 35, PP.955-963.

11 - Plumtree, A. and Cheng, G.X. (1999). "A fatigue damage parameter for off-axis unidirectional fiber reinforced composites." *International Journal of Fatigue*, Vol. 21, PP.849–856.

12 - Smith, K. N., Watson, P. and Topper, T. H. (1970). "A stress strain function for the fatigue of metals." *J Mater, JMLSA,* Vol. 5, PP.767–78.

13 - Petermann, J. and Plumtree, A. (2001). "A Unified Fatigue Failure Criterion for Unidirectional Laminates." *Composites: Part A*, Vol. 32, PP.107–118.

14 - Shokrieh, M. M. (1996). *Progressive Fatigue Damage Modeling of Composite Materials*, Ph.D. Thesis, Department of Mechanical Engineering, McGill University, Montreal, Canada.

15 - Sandhu, R. S., Gallo, R. L. and Sendeckyj, G. P. (1982). "Initiation and accumulation of damage in composite laminates." *Composite Materials,* PP. 163-182.

16 - Talreja, R. (1994). "Damage characterization by internal variables." *Damage Mechanics of Composite Materials,* Ed. R. Talreja, Elsevier Science B.V., PP. 53-78.

17 - Reifsnider, K. L. (1990). "Damage and damage mechanics." *Fatigue of Composite Materials,* Ed. K.L. Reifsnider, Elsevier Publishers B.V., PP. 11-77.

18 - Awerbuch, J. and Hahn, H. T. (1981). "Off-axis fatigue of graphite/epoxy composites." *Fatigue of Fibrous Composite Materials.* ASTM STP 723, 243–7.