



پیش‌بینی عمر خستگی در اتصالات چسبی بر اساس سفتی اولیه و مقدار افت سفتی

پوریا اکبرزاده^۱ و خلیل فرهنگدوست^{۲*}^۱ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد^۲ دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۰/۲۱؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۴/۰۵/۱۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۱/۲۴

چکیده

امروزه استفاده از اتصالات چسبی در سازه‌ها به دلیل مزایای متعددشان افزایش یافته است. در کاربردهای سازه‌ای، با توجه به عمر کاری، خستگی به عنوان مهمترین شکل بارگذاری در نظر گرفته می‌شود. در این مقاله، آزمایش‌های تجربی به منظور بررسی فرآیند خرابی خستگی اتصالات چسبی دولبه، تشکیل شده از ۱۶ لایه الیاف شیشه نوع E و رزین اپوکسی حاوی ذرات TiO₂ P25 به عنوان چسب، تحت بارگذاری سیکلی انجام شده است و سپس روشی برای پیش‌بینی عمر خستگی این اتصالات بر اساس سفتی اولیه ارائه شده است. پراکندگی نتایج نشان می‌دهد که عمر نهایی خستگی تا حد زیادی به سفتی اولیه آنها بستگی دارد. به این منظور یک رابطه نمایی برای تخمین اولیه عمر نهایی اتصالات بر حسب سفتی اولیه ارائه شده است. علاوه بر سفتی اولیه، میزان افت سفتی در اتصالات تحت بارگذاری خستگی نیز بر روی کارکرد نهایی آنها تأثیرگذار است و لذا می‌توان بر این اساس تخمین اولیه عمر خستگی را که بر اساس سفتی اولیه تعیین شده است اصلاح نمود. همچنین یک شاخص خرابی با استفاده از مقدار کاهش سفتی برای کنترل فرآیند خرابی خستگی در حین بارگذاری معرفی شده است.

کلمات کلیدی: پیش‌بینی عمر؛ بارگذاری خستگی؛ اتصال چسبی؛ سفتی اولیه؛ افت سفتی.

Fatigue Life Prediction of Adhesive Joints Based on Initial Stiffness and Stiffness Degradation

P. Akbarzadeh¹, K. Farhangdoost^{2,*}¹ Ph.D. Student, Mech. Eng., Ferdowsi University, Mashhad, Iran.² Assoc. Prof., Mech. Eng., Ferdowsi University, Mashhad, Iran.

Abstract

Use of adhesively bonded joints in structures has been increased in recent years because of their advantages. In structural applications, fatigue is generally considered to be the most important form of loading in respect to long-term service life. In this paper, experimental tests have been performed in order to examine the fatigue damage process of double lap adhesive joints, composed of E-glass laminates and epoxy adhesive with TiO₂ P25 particles, under fatigue loading and then a method was proposed for fatigue life prediction based on initial stiffness. The scatter in results shows that the fatigue life is mostly dependent on initial stiffness. According to this, an exponential equation based on the initial stiffness has been proposed to have an initial estimation of fatigue life of the adhesive joints. In addition to the initial stiffness, stiffness degradation of the joints under fatigue loading influences on their final performance and therefore the initial estimation of fatigue life based on the initial stiffness could be modified. Also to have an online control of the fatigue damage process during the fatigue loading, a damage index using stiffness degradation was introduced.

Keywords: Life Prediction; Fatigue Loading; Adhesive Joint; Initial Stiffness; Stiffness Degradation.

۱- مقدمه

در بسیاری کاربردها اتصالات چسبی به عنوان جایگزین برای روش‌های اتصال مرسوم از قبیل پیچ و پرچ، در نظر گرفته می‌شود که این موضوع به دلیل مزایای متعدد آنها شامل سفتی بالا، نسبت استحکام به وزن خوب، توانایی اتصال مواد غیرمشابه و توزیع تنش یکنواخت‌تر می‌باشد. اما به‌رحال در کنار این مزایا، یکی از عوامل محدودکننده کاربرد گسترده‌تر اتصالات چسبی در سازه‌ها، دشواری مربوط به پیش‌بینی مطمئن کارکرد آنها می‌باشد که منجر به تمایل برای طراحی محافظه‌کارانه آنها می‌شود. در بیشتر حالات، اتصالات چسبی تحت بارگذاریهای چرخه‌ای قرار خواهند گرفت و از این‌رو در معرض شکست خستگی می‌باشند. پیش‌بینی کارکرد اتصالات چسبی تحت بارگذاری خستگی یک مساله پیچیده است و روش‌های متعددی برای آن پیشنهاد شده است [۱].

از دید مهندسی می‌توان گفت که مهمترین هدف در بررسی رفتار خستگی اتصالات چسبی، پیش‌بینی عمر خستگی اتصال می‌باشد. در این زمینه تحقیقات مختلفی صورت گرفته است و روش‌های مختلفی نیز در این رابطه مورد استفاده قرار گرفته است [۲-۶]. شنوی^۱ و همکارانش [۷ و ۸] با استفاده از روش مکانیک شکست و مکانیک خرابی برای پیش‌بینی عمر خستگی در اتصال چسبی تحت بارگذاری با دامنه متغیر، استفاده کرده‌اند. آنها با استفاده از روش عددی به پیش‌بینی عمر خستگی پرداخته‌اند. این روش عمر خستگی را کمتر از واقعیت پیش‌بینی می‌کند. روش دیگری که آنها استفاده کرده‌اند، روش خرابی پیش‌رونده بر اساس ارتباط دادن خرابی موضعی به کرنش پلاستیک در یک رابطه تجربی می‌باشد. این روش برخلاف روش مکانیک شکست، پیش‌بینی بیشینه‌ای از عمر خستگی دارد.

خرمی شاد^۲ و همکارانش [۹] از مدل عددی برای پیش‌بینی عمر خستگی تحت بارگذاری سیکلی با دامنه متغیر استفاده کرده است. آنها تأثیر بارگذاری با دامنه متغیر را بر روی عمر خستگی بررسی کرده‌اند. همچنین آنها با استفاده از مدل‌سازی عددی و نتایج تجربی، تأثیر نسبت نیرو در بارگذاری خستگی را بر عمر خستگی مورد مطالعه قرار

داده‌اند [۱۰ و ۱۱]. روش‌های محاسباتی و تحلیلی نیز به منظور پیش‌بینی شکست خستگی مورد استفاده قرار گرفته است. کومار و پاندی^۳ [۱۲] شبیه‌سازی محاسباتی غیرخطی را برای اتصالات چسبی برشی تک لبه برای پیش‌بینی زمان جوانه‌زنی ترک خستگی (FCI)^۴ با به‌کارگیری معادله کوفین-مانسون^۵ انجام داده‌اند. هوی یان^۶ و همکارانش [۱۳] برای پیش‌بینی طول ترک خستگی در نمونه‌های تک لبه تحت بارگذاری پیچشی خستگی، از روش پیزوالکتریک استفاده کرده‌اند. آنها یک رابطه نسبتاً خطی بین طول ترک و تعداد سیکل ارائه کرده‌اند. کنیارت و مران^۷ [۱۴] از روش الگوریتم ژنتیک برای تخمین استحکام خستگی در اتصالات چسبی استفاده کرده‌اند.

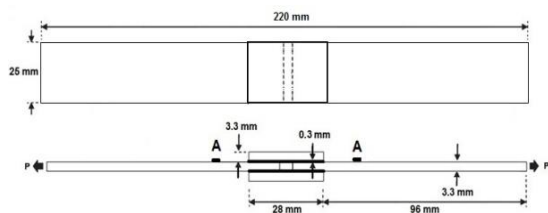
در این مطالعه، روشی بر اساس سفتی برای پیش‌بینی عمر خستگی اتصالات چسبی دو لبه ارائه شده است. در بخش اول مقاله، نتایج آزمایش‌های تجربی اتصالات چسبی دو لبه تحت بارگذاری خستگی با دامنه ثابت ارائه شده است. آزمایش‌ها در سه سطح بارگذاری انجام شده است و نتایج حاصل، پراکندگی در کارکرد و عمر نمونه‌ها را نشان می‌دهد. در بخش دوم، به ارائه راهکاری برای پیش‌بینی عمر خستگی اتصالات چسبی بر اساس سفتی اولیه^۸ آنها پرداخته شده است.

۲- نمونه‌ها و روش آزمایش

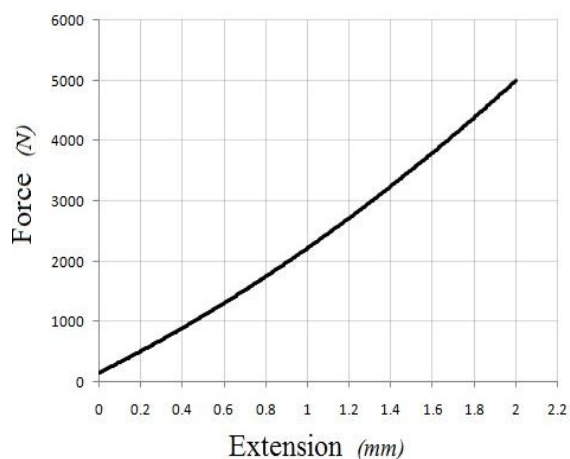
اتصالات چسبی مورد استفاده از الیاف شیشه نوع E و چسب اپوکسی حاوی نانو ذرات TiO_2 تشکیل شده‌اند. نانو ذرات اضافه شده در ماتریس پلیمری به دلیل ارائه خواص منحصربه‌فرد علاقه‌مندی زیادی پیدا کرده‌اند. اضافه کردن نانو ذرات TiO_2 به چسب اپوکسی می‌تواند خواص مکانیکی اتصال چسبی را به طور قابل توجهی بهبود بخشد [۱۷-۱۵]. خواص سازه‌ای و کارایی سازه‌های کامپوزیتی با اتصال چسبی وابسته به خواص چسب و روش اتصال سازه می‌باشد. به منظور آماده کردن چسب، ابتدا پودر $P25 TiO_2$ در خلا به

³ Kumar & Pandey⁴ Fatigue Crack Initiation⁵ Coffin-Manson⁶ Hui Yun⁷ Canyaurt & Meran⁸ Initial Stiffness¹ Shenoy² Khoramishad

دمای اتاق انجام شد و دستگاه MTS تحت کنترل نیرو عمل کرد. برای اندازه‌گیری کرنش، یک کرنش‌سنج با طول شاخص پنجاه میلی‌متری وسط نمونه‌ها قرار داده شد (شکل ۳). دقت اندازه‌گیری کرنش در طول انجام آزمایش در حدود یک میلی میکرون بوده است.



شکل ۱- نمونه اتصال چسبی دو لبه برای آزمایش کشش و خستگی



شکل ۲- منحنی نیرو-کشش در اتصال چسبی



شکل ۳- تجهیزات آزمایش کشش و بارگذاری سیکلی

مدت سه ساعت در دمای ۱۰۵ سانتی گراد و فشار ۵۰۰ میلی بار (فشار بیرون ۸۶۸ میلی بار)، خشک شد. سپس رزین بیسفنل اپوکسی به پودر اضافه شده و بوسیله مخلوط کن مکانیکی در سرعت دورانی ۲۰۰۰ دور بر دقیقه به مدت یک ساعت مخلوط شدند. مرحله بعد اضافه کردن اپوکسی سخت کننده (HA-11) به صورت قطره به قطره در مخلوط اپوکسی و مخلوط کردن آنها بوسیله مخلوط کن مکانیکی در سرعت ۴۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۱۵ دقیقه است. در نهایت مخلوط چسب به مدت ۱۵ دقیقه تحت خلا قرار داده شد. در این کار، تمام نمونه‌ها تحت شرایط یکسان با ۱۶ لایه از مواد چند لایه تقویت شده الیاف شیشه نوع E در زاویه ۰-۹۰ آماده شده‌اند. همه‌ی لایه‌ها با رزین اپوکسی به عنوان چسب خیس شدند. بعد از ۲۴ ساعت خشک شدن کامپوزیت در دمای اتاق، لمینیت ها به اندازه مورد نظر برش خورده تا بر اساس استاندارد ASTM D3528-Type B به هم متصل شوند. نهایتاً، نمونه‌ها به مدت دو ساعت در دمای ۹۰ درجه سانتی گراد و یک ساعت هم در دمای ۱۱۰ درجه سانتی گراد درون محیط خلأ پخت شدند. شکل و ابعاد کلی اتصالات دو لبه در شکل ۱ نشان داده شده است.

۲-۱- آزمایش کشش برای اتصال چسبی

تعداد ده نمونه از اتصالات دو لبه ساخته شده برای آزمایش کشش اختصاص داده شد تا استحکام نهایی آنها مشخص شود. به این منظور دستگاه کشش STM به کار گرفته شد و آزمایش در دمای اتاق صورت گرفت. در همه نمونه‌ها، شکست در ماده چسب اتفاق افتاد. ظرفیت نهایی تحمل نیرو و میزان کشش نمونه‌ها در آزمایش کشش تعیین شد و منحنی نیرو-کشش میانگین برای اتصال چسبی رسم شد که این منحنی در شکل ۲ نشان داده شده است.

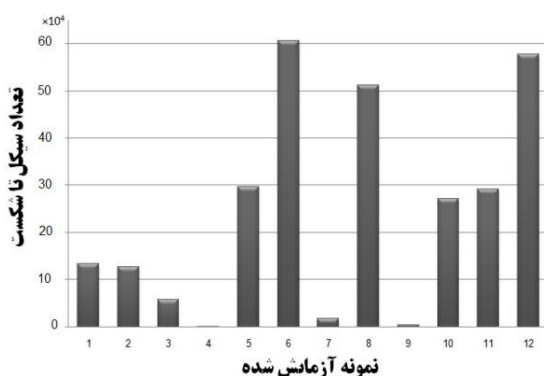
۲-۲- آزمایش خستگی اتصال چسبی

برای انجام آزمایش‌های خستگی، سیستم هیدرولیکی دستگاه خودکار MTS 647 به کار گرفته شد (شکل ۳). سیستم آزمایش MTS 647 شامل واحد بارگذاری ۱۰۰ kN و ۲/۵ kN و یک اکستنسیومتر با طول اولیه پنجاه میلی متر می‌باشد. دستگاه با یک کامپیوتر PC با کنترل و فایل‌های ثبت داده شامل تعداد سیکل، نیرو، جابجایی و کرنش مجهز شد. آزمایش‌ها در

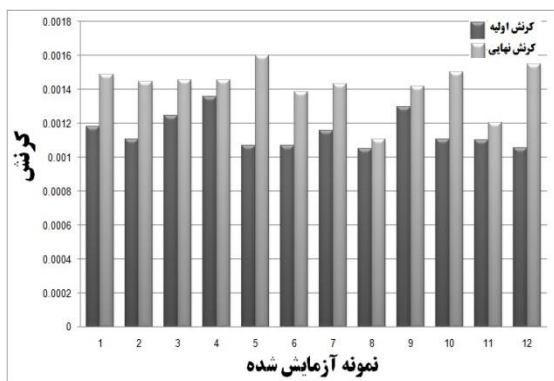
۳- نتایج و ارزیابی سفتی

۱-۳ نتایج آزمایش خستگی

نتایج آزمایش خستگی برای ۱۲ نمونه مربوط به دسته اول آزمایش ($F_{max}=2200\text{ N}$) به صورت تعداد سیکل تا شکست در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطور که دیده می‌شود نتایج دارای پراکندگی نسبتاً زیادی می‌باشد. همچنین شکل ۶ نتایج مربوط به کرنش حداکثر اولیه و نهایی مربوط به هر یک از نمونه‌های تحت آزمایش خستگی را برای این دسته نشان می‌دهد.



شکل ۵- پراکندگی تعداد سیکل تا شکست برای حداکثر نیروی اعمال شده 2200 N



شکل ۶- کرنش حداکثر اولیه و نهایی در فرآیند خستگی برای نیروی 2200 N

نتایج مربوط به تعداد سیکل تا شکست برای دسته دوم ($F_{max}=2600\text{ N}$) و دسته سوم ($F_{max}=3000\text{ N}$) آزمایش خستگی در شکل ۷ نشان داده شده است.

در این مطالعه، آزمایش‌های خستگی تحت بارگذاری سیکلی با سه سطح نیروی حداکثر مختلف انجام شد. تعداد ۱۲ نمونه تحت بارگذاری معادل با ۴۴٪ سطح بار (متوسط) شکست استاتیکی (5024 N) قرار گرفتند. در این دسته، نیروی حداکثر سیکلی اعمال شده برابر با 2200 N بوده است. دسته دوم آزمایش‌ها شامل چهار نمونه می‌باشد که تحت بارگذاری خستگی با نیروی معادل ۵۲٪ نیروی شکست استاتیکی آزمایش شدند و چهار نمونه هم در دسته سوم تحت بارگذاری خستگی با نیروی معادل ۶۰٪ نیروی شکست استاتیکی قرار گرفتند. فرکانس بارگذاری برای همه آزمایش‌ها به طور ثابت ۴ Hz تعیین شد درحالی‌که نسبت بارگذاری (نسبت نیروی حداقل به حداکثر) برابر ۰/۱ بود که منجر به یک بارگذاری کشش - کشش می‌شود. تعداد نمونه‌ها و سطح بارگذاری مربوطه در هر دسته آزمایش در جدول ۱ بیان شده است.

جدول ۱- تعداد نمونه‌ها و سطح بارگذاری اعمال شده

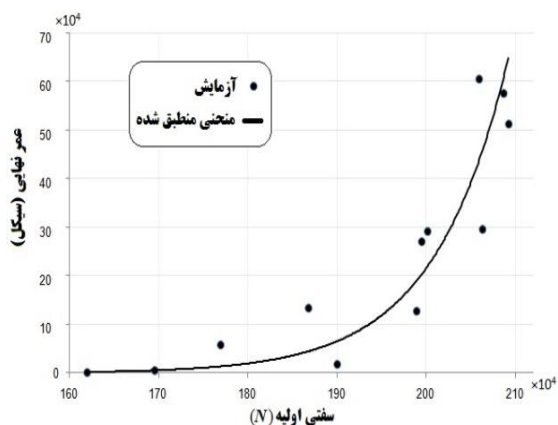
F_{min}, N	F_{max}, N	تعداد نمونه‌ها (کد نمونه)	سطح بارگذاری (٪)
۲۲۰	۲۲۰۰	۱۲ (۱-۱۲)	۴۴
۲۶۰	۲۶۰۰	۴ (۱۳-۱۶)	۵۲
۳۰۰	۳۰۰۰	۴ (۱۷-۲۰)	۶۰

بررسی سطح شکست نشان می‌دهد که خرابی عمدتاً به دلیل شکست در لایه چسب می‌باشد (شکل ۴).



شکل ۴- یک نمونه از شکست در لایه چسب در اثر خرابی خستگی

مقدار سفتی اولیه و عمر نهایی نمونه‌ها نشان می‌دهد که به طور کل نمونه‌های با سفتی اولیه‌ی بالاتر طول عمر نهایی بیشتری دارند. به عبارت دیگر هر چقدر که مقدار سفتی اولیه در اتصالی بیشتر باشد پیش‌بینی عمر طولانی‌تری برای آن می‌شود. برای درک بهتر این موضوع، مقدار عمر نهایی هر نمونه در مقابل سفتی اولیه آن برای دسته اول آزمایش خستگی در شکل ۸ نشان داده شده است.



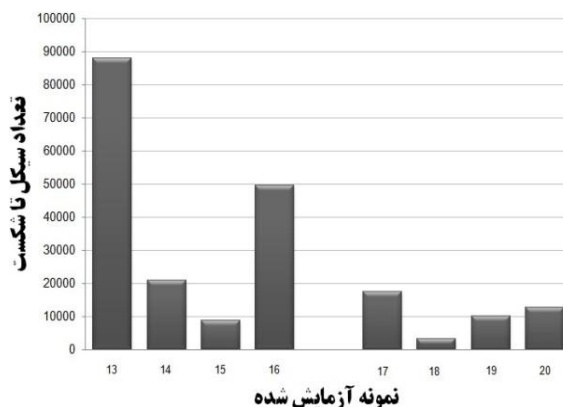
شکل ۸- عمر نهایی در مقابل سفتی اولیه ($F_{max}=2200 \text{ N}$)

همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، می‌توان رابطه‌ی بین عمر نهایی و سفتی اولیه را با استفاده از یک منحنی نمایی نشان داد. بررسی نتایج دو دسته دیگر هم نشان می‌دهد که می‌توان بین عمر نهایی نمونه‌ها با سفتی اولیه‌شان یک رابطه‌ی نمایی برقرار کرد (شکل ۹).

نتایج نشان داده شده در شکل‌های ۸ و ۹ تأیید می‌کند که عمر نهایی اتصالات چسبی تا حد زیادی به سفتی اولیه بستگی دارد. بنابراین با اندازه‌گیری سفتی اولیه اتصال چسبی در اولین سیکل‌های کارکرد آنها می‌توان با تقریب قابل قبولی عمر نهایی اتصال را تحت بارگذاری خستگی پیش‌بینی نمود. بنابراین رابطه نمایی برای تخمین اولیه عمر اتصالات بر اساس سفتی اولیه به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$N_{f0} = C_1 \times \exp(C_2 \times E_0) \quad (2)$$

که N_{f0} تخمین اولیه عمر نهایی نمونه و E_0 مقدار سفتی اولیه نمونه و C_1 و C_2 ضرایبی هستند که باید تعیین شوند. کارایی این رابطه وابسته به دقت در تخمین این دو ضریب می‌باشد. برای ساده‌سازی رابطه ارائه شده، فقط ضریب C_2 متغیر و به صورت تابعی از سطح نیروی در نظر گرفته شده



شکل ۷- پراکندگی تعداد سیکل تا شکست برای دسته دوم و سوم آزمایش خستگی

۳-۲- ارزیابی سفتی اولیه و تنزل سفتی

همان‌طور که از نتایج آزمایش خستگی دیده می‌شود، پراکندگی در کارکرد و عمر نهایی نمونه‌های آزمایش شده در هر سه دسته آزمایش وجود دارد. از آنجاکه شرایط بارگذاری و آزمایش برای همه نمونه‌ها در هر دسته آزمایش یکسان بوده است، بنابراین این پراکندگی به احتمال زیاد به دلیل تفاوت در خواص مکانیکی هر یک از نمونه‌ها می‌باشد. این تفاوت احتمالاً در اثر عدم توزیع یکنواخت ماده چسب می‌باشد که منجر به خواص متفاوت در هر اتصال چسبی شده است. یکی از خواص مکانیکی اتصال چسبی سفتی آن می‌باشد که بر روی کارکرد تأثیر مستقیم دارد. در این مطالعه با اندازه‌گیری سفتی اولیه هر یک از نمونه‌ها، به بررسی ارتباط آن با عمر نهایی اتصال چسبی پرداخته شد.

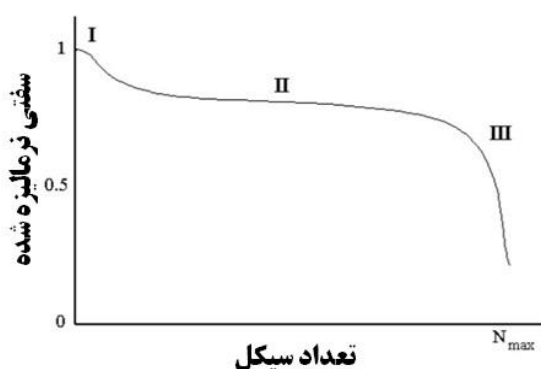
برای تعریف سفتی در سازه‌ها روش‌های مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مقاله به دلیل ساده‌سازی و امکان به‌کارگیری عملی روش ارائه شده در شرایط کارکرد اتصالات، سفتی اتصال به صورت زیر تعریف شده است:

$$E = \frac{F_{max}}{\varepsilon_{max}} \quad (1)$$

که F_{max} حداکثر نیروی اعمال شده به نمونه آزمایش شده است و ε_{max} حداکثر کرنش ایجاد شده در اثر همان نیرو می‌باشد. به این ترتیب می‌توان در هر سیکل مقدار سفتی را اندازه‌گیری نمود. برای تعیین سفتی اولیه در هر یک از اتصالات چسبی، مقدار متوسط سفتی در سیکل‌های اولیه آزمایش خستگی مورد استفاده قرار گرفت. مقدار این کمیت همچون عمر نهایی نمونه‌ها دارای پراکندگی می‌باشد. بررسی

اتصال، تخمین اولیه‌ای از عمر نهایی را بیان نمود که این موضوع کاربرد مهمی در طراحی سازه خواهد داشت.

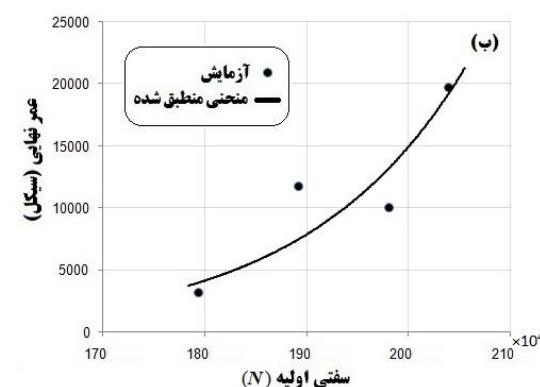
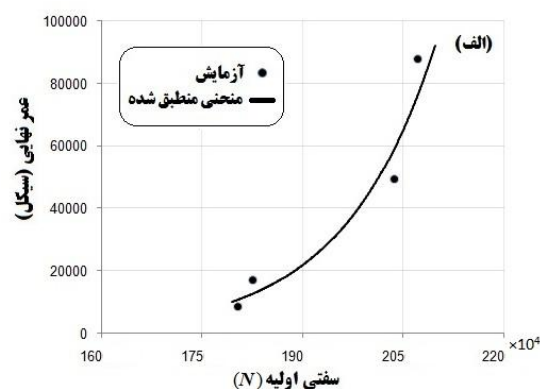
باید اشاره شود که مقدار سفتی اتصال چسبی در طی بارگذاری خستگی و کارکرد آن ثابت باقی نمی‌ماند و تغییر می‌کند. نوسانات سفتی در طی عمر خستگی سازه، افت سفتی نامیده می‌شود که می‌تواند به عنوان یک شاخص خرابی غیر مخرب مورد استفاده قرار گیرد. در طی عمر خستگی، سه مرحله مختلف قابل شناسایی می‌باشد (شکل ۱۰): ناحیه اول که مقدار سفتی در ابتدا برای مدت کوتاهی تقریباً ثابت است و سپس سریعاً کاهش می‌یابد (مرحله ۱)، ناحیه میانی که مقدار سفتی تقریباً به صورت خطی با شیب ملایم کاهش می‌یابد (مرحله ۲) و ناحیه پایانی که شامل کاهش ناگهانی سفتی و نهایتاً شکست می‌شود (مرحله ۳) [۱۸].



شکل ۱۰- مراحل افت سفتی در طی عمر خستگی

روند تغییرات مقدار سفتی برای اتصالات چسبی آزمایش شده در هر سه سطح بارگذاری دارای یک فرآیند سه مرحله‌ای تا شکست می‌باشد که برای دو نمونه از دسته اول و سوم آزمایش خستگی در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود مقدار سفتی بعد از کاهش در مرحله اول، در مرحله دوم با شیب ملایم‌تری به کاهش ادامه می‌دهد و سپس در مرحله آخر با تغییر ناگهانی تا هنگام شکست کاهش می‌یابد. این روند در همه بیست نمونه تحت آزمایش خستگی دیده شد. بدون توجه به سطح نیروی اعمال شده، به نظر می‌رسد که میانگین نسبت سفتی نهایی به سفتی اولیه $(E_f/E_0)_m$ در هر سه دسته آزمایش خستگی عمدتاً یکسان است و در حدود ۰/۷۸ می‌باشد. نتایج

است در حالیکه ضریب C_1 ثابت فرض شده است. ضرایب رابطه‌نمایی با استفاده از نتایج تجربی دسته اول آزمایش خستگی تعیین شدند که نتیجه حاصل عبارت است از: $C_1=5 \times 10^{-3}$ و $C_2=8.85 \times 10^{-6}$.



شکل ۹- عمر نهایی در مقابل سفتی اولیه: (الف) N

$$F_{\max} = 3000 N \text{ (ب)}, F_{\max} = 2600$$

از آنجایی که C_1 ثابت و مستقل از سطح بار اعمال شده فرض شده است، همان مقدار $(C_1=5 \times 10^{-3})$ برای دسته دوم و سوم آزمایش خستگی هم استفاده شد و C_2 دوباره تعیین شد. نتیجه نشان می‌دهد که C_2 تابع سطح بار اعمال شده می‌باشد و رابطه‌ای به صورت زیر دارد:

$$C_2 = 5.59 \times 10^{-6} \left(\frac{F}{F_{II}} \right)^{-0.556} \quad (3)$$

که F/F_{II} نسبت نیروی حداکثر اعمال شده به نیروی شکست استاتیکی می‌باشد. این معادله یادآوری می‌کند که هر چه سطح نیروی اعمال شده بیشتر باشد مقدار C_2 کوچکتر می‌شود و در نتیجه عمر نهایی اتصال کاهش می‌یابد. بدین ترتیب می‌توان در هر سطح نیرویی و با توجه به سفتی اولیه

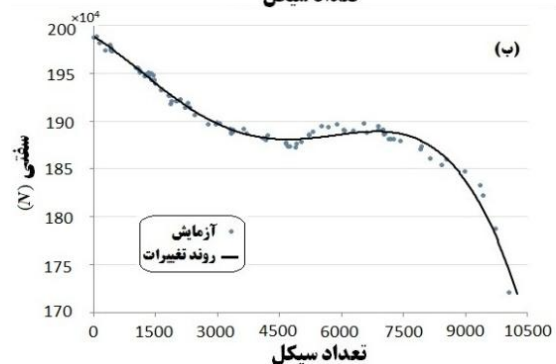
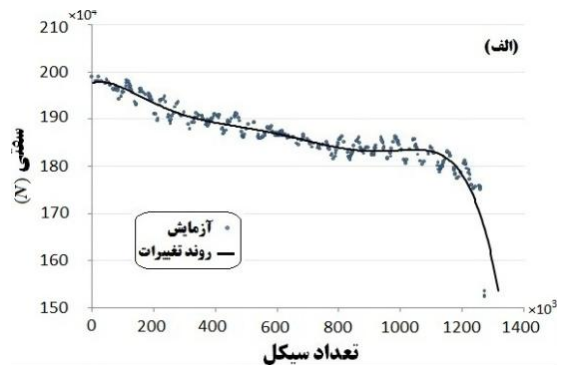
جدول ۲- عمر نهایی و نسبت مقادیر سفتی مربوطه برای بیست نمونه تحت بارگذاری سیکلی

شماره نمونه	عمر نهایی (سیکل)	E_f/E_0
۱	۱۳۳۱۲۹	۰/۷۹۰
۲	۱۲۷۱۸۰	۰/۷۶۶
۳	۵۷۳۸۸	۰/۸۵۴
۴	۹۶۶	۰/۹۳۳
۵	۲۹۶۲۹۴	۰/۷۱۵
۶	۶۰۵۵۵۸	۰/۶۹۳
۷	۱۸۱۶۱	۰/۸۱۳
۸	۵۱۲۴۲۵	۰/۷۸۱
۹	۴۹۶۵	۰/۹۱۴
۱۰	۲۷۱۱۸۹	۰/۶۹۲
۱۱	۲۹۱۲۴۲	۰/۷۹۵
۱۲	۵۷۷۰۱۹	۰/۶۸۲
۱۳	۸۷۹۴۷	۰/۷۴۲
۱۴	۱۷۱۰۴	۰/۷۱۱
۱۵	۸۷۳۲	۰/۸۵۱
۱۶	۴۹۵۶۷	۰/۸۱۳
۱۷	۱۹۷۵۴	۰/۷۴۴
۱۸	۳۲۴۵	۰/۸۳۱
۱۹	۱۰۰۶۰	۰/۸۷۲
۲۰	۱۱۷۸۹	۰/۷۲۳

صورت می‌بایست انتظار کارکرد کمتری نسبت به تخمین اولیه عمر نهایی‌اش داشت و برعکس اگر میزان کاهش سفتی بیش از ۲۲ درصد باشد کارکردش بیشتر از تخمین اولیه خواهد بود. برای مثال، نمونه شماره ۲ و ۱۰ دارای سفتی اولیه تقریباً یکسانی هستند و بنابراین انتظار عمر نهایی یکسانی را داریم اما از آنجا که افت سفتی در نمونه ۱۰ بیشتر است عمر نهایی آن بیشتر از نمونه ۲ شده است (جدول ۲).

علاوه بر اهمیت پیش‌بینی عمر نهایی خستگی در اتصالات چسبی، می‌بایست امکان ارزیابی لحظه‌ای فرآیند خرابی خستگی در حین بارگذاری نیز فراهم باشد تا بتوان در صورت نیاز اقدامات مناسب جهت پیشگیری از شکست سازه را انجام داد. از آنجا که مکانیزم خرابی خستگی در اتصالات چسبی شناخته شده نیست، در مقایسه با گسترش ترک در فلزات، نیازمند به کارگیری یک شاخص خرابی مناسب بدون

مربوط به تعداد سیکل تا شکست و نسبت مقادیر سفتی مربوطه برای همه بیست نمونه آزمایش شده تحت بارگذاری خستگی در جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۱۱- افت سفتی در طی عمر خستگی: الف) نمونه آزمایشی شماره ۲ ($F_{max}=2200 \text{ N}$) و ب) نمونه آزمایشی شماره ۱۹ ($F_{max}=3000 \text{ N}$)

با بررسی نتایج مربوط به افت سفتی، می‌توان به این نتیجه رسید که صرف‌نظر از مقدار سفتی اولیه، هرچه مقدار کاهش سفتی بیشتر باشد عمر نهایی نیز افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، اگر مقدار سفتی اولیه به عنوان پتانسیل اولیه برای کارکرد اتصال چسبی فرض شود، درصد کاهش سفتی را می‌توان به عنوان میزان استفاده از این پتانسیل در نظر گرفت. از این رو می‌توان یک تصحیح برای تخمین عمر نهایی اتصال چسبی بر اساس افت سفتی ارائه نمود:

$$N_f = N_{f0} \times \left(\frac{E_f}{0.78E_0} \right)^k \quad (4)$$

در این رابطه نمای k باید به صورت تجربی تعیین شود که در این مقاله بر اساس نتایج دسته اول آزمایش خستگی مقدار آن $k = -5/9$ تعیین شد. به طور کلی می‌توان گفت اگر درصد کاهش سفتی برای نمونه‌ای کمتر از ۲۲ درصد باشد، در آن

افت سفتی در اتصالی بیشتر باشد کارکرد نهایی آن تحت بارگذاری خستگی نیز بیشتر بوده است.

(۴) با تعریف یک شاخص خرابی بر اساس مقدار کاهش سفتی در اتصال چسبی می‌توان بدون تخریب یا خلل در حین شرایط کاری‌اش، ارزیابی دقیقتری از کارکرد نهایی اتصال را ارائه نمود. از این جهت افت سفتی می‌تواند به عنوان یک ابزار کنترلی فرآیند خرابی خستگی در حین کار سازه مورد استفاده قرار گیرد.

۵- مراجع

- [1] Ashcroft IA, Crocombe AD (2008) Modeling of adhesively bonded joints. Oechsner A, da Silva LFM (eds). Chapter 7: Fatigue. Springer.
- [2] Quaresimin M, Ricotta M (2006) Life prediction of bonded joints in composite materials. *Int J Fatigue* 28(10): 1166-1176.
- [3] Naderi M, Maligno AR (2012) Fatigue life prediction of carbon/epoxy laminates by stochastic numerical simulation. *Compos Struct* 94(3): 1052-1059.
- [4] Sun GQ, Shang DG (2010) Prediction of fatigue lifetime under multiaxial cyclic loading using finite element analysis. *Materials & Design* 31(1): 126-133.
- [5] Lian W, Yao W (2010) Fatigue life prediction of composite laminates by FEA simulation method. *Int J Fatigue* 32(1): 123-133.
- [6] Pironi A, Moroni F (2009) An investigation of fatigue failure prediction of adhesively bonded metal/metal joints. *Int J Adhes Adhes* 29(8): 796-805.
- [7] Shenoy V, Ashcroft IA, Critchlow GW, Crocombe AD (2010) Fracture mechanics and damage mechanics based fatigue lifetime prediction of adhesively bonded joints subjected to variable amplitude fatigue. Original Research Article. *Eng Frac Mech* 77(7): 1073-1090.
- [8] Shenoy V, Ashcroft IA, Critchlow GW, Crocombe AD (2010) Unified methodology for the prediction of the fatigue behaviour of adhesively bonded joints. *Int J Fatigue* 32(8): 1278-1288.
- [9] Khoramishad H, Crocombe AD, Katnam KB, Ashcroft IA (2011) Fatigue damage modelling of adhesively bonded joints under variable amplitude loading using a cohesive zone model. *Eng Frac Mech* 78(18): 3212-3225.
- [10] Khoramishad H, Crocombe AD, Katnam KB, Ashcroft IA (2010) A generalised damage model for constant amplitude fatigue loading of

توجه به مکانیزم‌های ریزساختاری اش است تا فرآیند خرابی خستگی در طی شرایط کاری نیز کنترل شود. از این رو همانطور که قبلاً اشاره شد می‌توان یک شاخص خرابی بر اساس میزان افت سفتی معرفی کرد که امکان تعیین میزان آسیب در اتصال را در حین کارکرد فراهم می‌کند. این شاخص خرابی برای اتصال‌های چسبی دو لبه به صورت زیر تعریف شد:

$$D = \frac{E - E_f}{0.22E_0} \quad (5)$$

که E مقدار سفتی و D مقدار آسیب در هر زمان از کارکرد سازه می‌باشد. بنابراین با اندازه‌گیری سفتی اتصال چسبی در هر لحظه می‌توان مقدار آسیب را محاسبه نمود. این شاخص خرابی می‌تواند در حین کارکرد اتصال مورد استفاده قرار بگیرد و با توجه به مقدار آسیب، فرآیند خرابی خستگی در اتصال را مورد ارزیابی قرار داد.

۴- نتیجه‌گیری

آزمایش‌های تجربی به منظور بررسی فرآیند خرابی خستگی و ارائه روشی برای پیش‌بینی عمر اتصالات چسبی دولبه، تشکیل شده از ۱۶ لایه الیاف شیشه نوع E و رزین اپوکسی حاوی ذرات TiO_2 P25 به عنوان چسب، تحت بارگذاری سیکلی در سه سطح نیرویی مختلف انجام شده است و نتایج بدست آمده عبارتند از:

- (۱) عمر نهایی اتصالات چسبی تحت بارگذاری خستگی تا حد زیادی وابسته به اندازه سفتی اولیه‌شان می‌باشد و هر چه که سفتی اولیه در اتصال بزرگتر باشد انتظار کارکرد بیشتری از آن وجود دارد.
- (۲) ارتباط بین عمر نهایی و سفتی اولیه اتصال را می‌توان با استفاده از یک تابع نمایی نشان داد. این موضوع در طراحی سازه‌ها مفید خواهد بود و یک تخمین اولیه از مقدار کارکرد اتصال چسبی را در اختیار قرار می‌دهد که بسیار ارزشمند می‌باشد.
- (۳) در طی کارکرد سازه تحت بارگذاری خستگی، ممکن است که اتصال از تمام ظرفیت اولیه‌اش استفاده نکند و زودتر از پیش‌بینی دچار شکست شود. به همین دلیل می‌بایست مقدار افت سفتی در اتصال را نیز مورد بررسی قرار داد. به طور متوسط افت سفتی در حدود ۲۲٪ بوده است. نتایج نشان دادند که هر چه

- using genetic algorithm approach. *Int J Adhes Adhes* 33: 80-88.
- [15] Zhou Y, White E, Hosur M, Jeelani S (2010) Effect of particle size and weight fraction on the flexural strength and failure mode of TiO₂ particles reinforced epoxy. *Mater Lett* 64:806-809.
- [16] Bittmann B, Hupert F, Karl Schlarb A (2011) Preparation of TiO₂/epoxy nanocomposites by ultrasonic dispersion and their property relationship. *Ultrason Sonochemistry* 18:120-126.
- [17] Bittmann B, Hupert F, Karl Schlarb A (2009) Ultrasonic dispersion of inorganic nanoparticles in epoxy resin. *Ultrason Sonochemistry* 16:622-628.
- [18] Belingardi G, Cavatorta MP (2006) Bending fatigue stiffness and strength degradation in carbon-glass/epoxy hybrid laminates: Cross-ply vs. angle-ply specimens. *Int J Fatigue* 28: 815-825.
- adhesively bonded joints. *Int J Adhes Adhes* 30(6): 513-52.
- [11] Khoramishad H, Crocombe AD, Katnam KB, Ashcroft IA (2010) Predicting fatigue damage in adhesively bonded joints using a cohesive zone model. *Int J Fatigue* 32(7): 1146-1158.
- [12] Kumar S, Pandey PC (2011) Fatigue life prediction of adhesively bonded single lap joints. *Int J Adhes Adhes* 31: 43-47.
- [13] Hwang HY, Kim BJ, Chin WS, Kim HS, Lee DG (2005) Prediction of crack length and crack growth rate of adhesive joints by a piezoelectric method. *J Adhesion Sci Technol* 19(12): 1081-1111.
- [14] Canyurt OE, Meran C (2012) Fatigue strength estimation of adhesively bonded tongue and groove joint of thick woven composite sandwich structures