

بررسی تاثیر افزودن ذرات اکسید کاهش یافته گرافن بر رفتار خزشی اتصالات چسبی

غلامرضا مرآمی

فرید وکیلی تهامی

محمد علی صائمی صدیق*

دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

چکیده

در این تحقیق، رفتار خزشی اتصالات چسب تقویت شده توسط ۰/۵ درصد وزنی نانو ذرات اکسید کاهش یافته گرافن در دماهای ۲۵ و ۵۵ درجه سلسیوس مورد مطالعه قرار گرفته است. برای این منظور، نمونه‌های حجمی چسب و همچنین اتصالات تک لبه چسبی تحت آزمایشات خزش تک محوره قرار گرفته و تغییر طول نمونه‌ها به همراه زمان شکست ثبت گردیده است. علاوه بر این از روش المان محدود به منظور مدلسازی رفتار خزشی اتصالات چسبی استفاده شده است. در این تحقیق از یک مدل ساختاری خزش با قابلیت مدلسازی رفتار ویسکوالاستیک غیر خطی چسب بهره برده شده است. نتایج آزمایشات نشان می‌دهند، کاربرد ذرات اکسید گرافن سبب بهبود رفتار خزشی می‌گردد. به طوری که نمونه‌های تقویت شده تغییر فرم خزشی کمتر و بهبود عمر تا ۳۰ درصد را نشان می‌دهند. نهایتاً مقایسه نتایج آزمایشات و تحلیل عددی نشان می‌دهد که مدل ساختاری خزشی بکار رفته می‌تواند با دقت بالا رفتار خزشی اتصالات چسب را پیش‌بینی نماید.

واژه‌های کلیدی: اتصال چسبی، اکسید کاهش یافته گرافن، خزش.

Effects of Reduced Graphene Oxide Particles on the Creep Behavior of Adhesively Bonded Joints

Gh. R. Marami

Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

F. Vakili-Tahanmi

Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

M. A. Saeimi Sadigh

Department of Mechanical Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran

Abstract

In this research, effects of introducing 0.5wt% reduced graphene oxide (RGO) reinforcement on the creep behavior of the adhesively bonded joints are investigated at 25°C and 55°C. To this aim, uni-axial creep tests are conducted, and creep deformations of the bulk specimens produced via the neat adhesive and adhesive-RGO composite are recorded. Also, creep tests are performed to obtain creep behavior of the single lap joints. Furthermore, results of the bulk specimen tests are used in a finite element based numerical analysis to simulate the creep behavior of the joints. Results show that, a significant decrease in the creep deformations along with a remarkable increase of 30% in the creep life time occurs in the reinforced joints. Finally, comparing the numerical results and experimental data shows that the numerical analysis accurately simulates the creep behavior of the joints.

Keywords: Adhesive joints; Reduced Graphene Oxide; Creep.

۱- مقدمه

وابسته به زمان و به عبارت دیگر پدیده خزش در اپوکسی می‌باشد. در ادبیات فن رفتار وابسته به زمان چسب‌ها با استفاده از مدل‌های مختلفی مدلسازی شده‌اند. از جمله می‌توان به مدل ویت و ماکسول، که ساده-ترین مدل‌های رفتاری برای مدلسازی رفتار ویسکوالاستیک مواد می-باشند، اشاره کرد [۳]. با توجه به ضعف این مدل‌ها در شبیه‌سازی رفتار خزشی، اخیراً مدل‌های ویسکوالاستیک و ویسکوپلاستیک با قابلیت شبیه‌سازی دقیق‌تر رفتار غیر خطی اتصالات چسبی در سال‌های اخیر توسعه یافته‌اند [۴-۷]. یو و همکارانش [۸] از مدل سختی شونده‌گی توانی جهت مدلسازی رفتار خزشی چسب پایه اپوکسی استفاده کردند. مجدا و همکارانش [۹] رفتار غیر خطی چسب‌های اپوکسی را با استفاده مدل اصلاح شده بورگر شبیه سازی کردند.

علاوه بر این، در سال‌های اخیر مطالعات گسترده‌ای به منظور شبیه‌سازی رفتار خزشی اتصالات چسبی با استفاده از تکنیک‌های تحلیلی و عددی به همراه کاربرد مدل‌های رفتاری وابسته به زمان انجام

اتصالات چسبی به طور متداول در صنایع خودروسازی، کشتی-سازی و هوافضا به کار می‌روند. در نتیجه بررسی رفتار مکانیکی چسب-ها تحت بارهای ثابت یا متغیر و همچنین بررسی رفتار آنها در شرایط محیطی مختلف از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با توجه به اینکه بسیاری از چسب‌ها حتی در دمای محیط و تنش‌های کم رفتار ویسکوالاستیک نشان می‌دهند [۱]، مطالعه رفتار ویسکوالاستیک و رفتار خزشی در اتصالات چسبی به منظور طراحی سازه‌ها با عمر مناسب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

آزمایشات نشان می‌دهند که اپوکسی‌ها در سطوح تنش پایین تغییر شکل خطی داشته اما با افزایش تنش، تحت تاثیر افزایش بار، تغییر فرم غیر خطی نشان می‌دهند [۲]. مقدار این تغییر شکل با گذشت زمان افزایش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد که حاکی از تغییر فرم

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: saeimi.sadigh@azaruniv.ac.ir

شده است [۲، ۱۰-۱۳]. فریر و همکارانش [۱۴] استحکام و عملکرد وابسته به زمان چسبهای اپوکسی که به منظور تقویت سازه‌های بتنی به کار می‌روند را مطالعه نمودند. آنها از یک مدل تجربی به منظور شبیه‌سازی رفتار خزشی چسب تحت تنش‌های مختلف استفاده کردند. چویی [۱۵] مدل رئولوژی برای یک چسب خاص که به منظور تقویت تیرهای بتنی بکار می‌رود پیشنهاد داده و با انجام آزمایشات گسترده نشان داده است که خزش مهترین عامل شکست در این تیرها می‌باشد. زهساز و همکارانش [۱۶] مدل تجربی برای شبیه‌سازی رفتار چسب و اتصال چسبی تحت تنش‌های مختلف در یک گستره دمایی ارائه دادند. آنها نشان دادند با استفاده از این مدل می‌توان رفتار خزشی اتصالات دو لبه آلومینیوم را با استفاده از روش المان محدود با دقت بالایی تخمین زد.

در سالهای اخیر با توجه به کاربرد وسیع اتصالات چسبی روش‌های مختلفی برای اصلاح خواص مکانیکی آنها پیشنهاد شده است [۱۷-۲۰]. از میان این روشها، افزودن نانو ذرات توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است [۲۱-۲۴]. محققین نشان داده‌اند که افزودن نانو تیوب‌های کربنی به اتصالات چسبی سبب افزایش چقرمگی، استحکام شکست، مدول یانگ و حتی بهبود ویژگیهای حرارتی از جمله دمای گذار شیشه‌ای و رسانایی گرمایی چسبها می‌گردد. در این بین، گرافن به عنوان یک نانو ذره با ویژگی‌های منحصر به فردی همچون مدول یانگ 1TPa، استحکام نهایی 130GPa، رسانایی گرمایی بالا 3000W/mK توجه بسیاری از محققین را به خود جلب کرده است. مرامی و همکارانش [۲۵] نشان دادند، افزودن 0.5 درصد وزنی اکسید کاشی یافته گرافن به چسب اپوکسی آلدایت ۲۰۱۱ سبب افزایش 30% استحکام نهایی اتصالات تک لبه آلومینیوم می‌شود. زندگی آتشبار و همکارانش [۲۶] نشان دادند که افزودن اکسید گرافن به طور چشمگیری تغییر شکل خزشی اپوکسی را کاهش می‌دهد. همچنین تانگ و همکارانش [۲۷] نشان دادند که افزودن اکسید کاشی یافته گرافن به طور چشمگیری رفتار خزشی کامپوزیت پلی استر را بهبود می‌دهد. وانگ و همکارانش [۲۸] با انجام آزمایش‌های متعدد نشان دادند که افزودن اکسید کاشی یافته گرافن به کامپوزیت پلی استر سبب بهبود خواص مکانیکی، حرارتی و همچنین دمای شیشه‌ای آن می‌شود.

با توجه تحقیقات انجام گرفته در ادبیات فن، تاثیر افزودن اکسید کاشی یافته گرافن در رفتار خزشی چسب اپوکسی و اتصالات چسبی مورد مطالعه قرار نگرفته است. بنابراین در این مقاله تاثیر افزودن 0.5 درصد وزنی اکسید کاشی یافته گرافن در رفتار خزشی چسب با کاربرد صنعتی و همچنین اتصال تک لبه استاندارد آلومینیوم مطالعه شده است. علاوه بر این جهت شبیه‌سازی رفتار خزشی چسب، از یک مدل تجربی جهت مدلسازی رفتار خزشی اتصالات چسب استفاده شده است. برای این منظور ثوابت خزشی وابسته به جنس در این مدل با استفاده از برازش بدست آمده و با توسعه کد سابروتین ویژه در نرم‌افزار آباکوس^۱ رفتار خزشی اتصال پیش‌بینی شده و با نتایج حاصل از آزمایش خزش مقایسه شده است.

۲- روش آماده‌سازی و ساخت نمونه

در این تحقیق، آزمایشات خزشی تک محوره برای بررسی رفتار خزشی چسب اپوکسی آلدایت ۲۰۱۱ با کاربرد صنعتی و چسب تقویت شده توسط نانو ذرات اکسید کاشی یافته گرافن، تحت تنش ثابت و در دمای ۲۵ و ۵۵ درجه سلسیوس بالا انجام گرفته است. نانو ذرات اکسید گرافن بکار رفته در این تحقیق که به روش سریع و در مقیاس صنعتی توسط محققین گروه مواد دانشگاه تبریز تولید شده، مورد استفاده قرار گرفته است. برای این منظور، نمونه‌های استاندارد حجمی چسب بر اساس استاندارد ASTM D 638 از چسب خالص و چسب تقویت شده ساخته شده‌اند. نمونه‌های چسب با ترکیب سخت-کننده و رزین چسب با نسبت وزنی یکسان و قالبگیری در قالب سلیکونی آماده شده‌اند. شایان ذکر است که نوع چسب پس از اختلاط نیاز به عملیات بازپخت دارد، لذا چسب پس از قالبگیری بلافاصله در کوره با دمای 67°C به مدت ۳۵ دقیقه نگهداری شده است. ساخت نمونه‌های چسب-گرافن نیاز به اختلاط صحیح چسب و گرافن دارند. برای این منظور، مقدار ۰/۵ درصد وزنی از نانو ذرات اکسید کاشی یافته گرافن به مدت ۱۲ ساعت در دستگاه آسیاب گلوله‌ای^۲ با جزء رزین چسب اپوکسی مخلوط شده و سپس جزء سخت‌کننده افزوده شده و به مدت ۱۰ دقیقه در دستگاه همزن با امواج صوتی^۳ با فرکانس ۴۸۰ هرتز، مخلوط می‌گردد تا مخلوط همگن چسب-گرافن بدست آید. سپس مخلوط بدست آمده به مدت ۳۰ دقیقه در دستگاه خلا نگهداری می‌شود تا حباب‌های هوا از مخلوط خارج گردد. سپس مخلوط چسب گرافن قالب گیری شده و در کوره با دمای 67°C و به مدت 35 دقیقه بازپخت می‌گردد. بررسی کیفیت توزیع گرافن در مخلوط و تاثیر افزودن اکسید کاشی یافته گرافن در ریخت‌شناسی چسب با استفاده از دستگاه‌های TEM و SEM انجام گرفته و نتایج آن در مقاله پیشین نویسندگان [۲۵] ارائه شده است. شایان ذکر است، مطابق نتایج ارائه شده در مرجع [۲۵]، افزودن اکسید کاشی یافته گرافن سبب افزایش ۳۰ درصدی استحکام اتصالات چسبی می‌گردد.

نمونه‌های حجمی جهت بررسی رفتار خزشی، تحت آزمایش خزش تک محوره با استفاده از دستگاه Amsler قرار می‌گیرند. شکل ۱- الف نمونه‌های حجمی بکار رفته در آزمایش خزش را نشان می‌دهد. آزمایشات در دمای آزمایشگاه، 25°C، و تحت بار ثابت انجام گرفته‌اند. افزایش طول نمونه طی بارگذاری با استفاده از طول‌سنج مکانیکی متصل به یک ساعت اندیکاتور با دقت 0.0001(in) اندازه‌گیری شده است. ثبت اطلاعات از طریق یک دوربین متصل به رایانه و در بازه‌های زمانی از پیش تعیین شده صورت پذیرفته است.

به منظور مطالعه تاثیر اکسید کاشی یافته گرافن بر رفتار خزشی اتصال چسبی، نمونه‌های اتصال چسبی آلومینیوم با استفاده از چسب خالص و چسب تقویت شده ساخته شده‌اند. این نمونه‌ها با اتصال ورق-هایی از جنس آلومینیوم آلیاژی 7075-T6 و ضخامت ۲ میلیمتر بر اساس استاندارد ASTM D 1002 ساخته شده‌اند. مطابق استاندارد

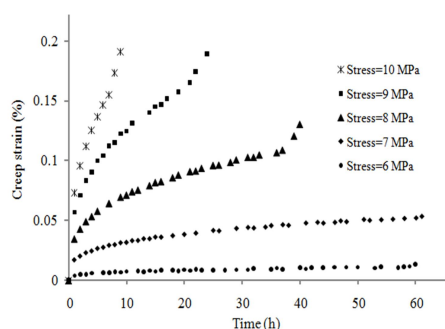
² Ball-Mill

³ Sonication Machine

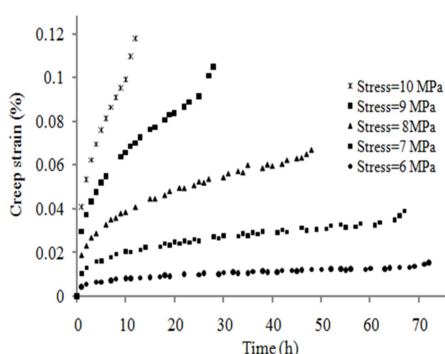
¹ ABAQUS

متوقف شده است. این نمودارها نشانگر رخ دادن مرحله اول و دوم خزش می‌باشند.

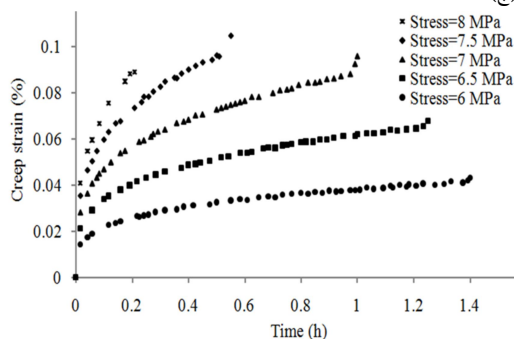
(الف)



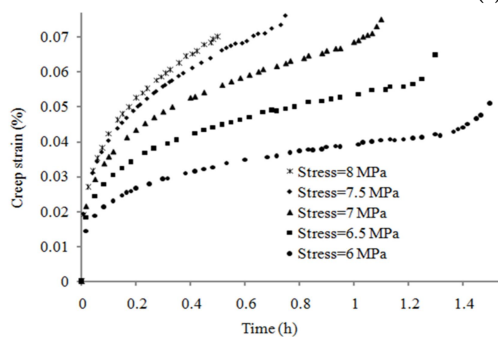
(ب)



(ج)



(د)



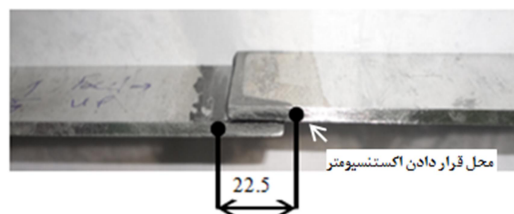
شکل ۲- منحنی های کرنش خزشی: (الف): چسب خالص در 25°C (ب): چسب با گرافن در 25°C (ج): چسب خالص در 55°C (د): چسب با گرافن در 55°C

ASTM D 1780، قبل از اعمال چسب روی سطوح اتصال، بایستی عملیات آماده سازی سطح انجام شود. عملیات آماده سازی سطح به منظور پاک کردن سطوح از هرگونه آلودگی و افزایش چسبندگی چسب به سطح آلومینیوم انجام می‌گیرد. در این روش سطوح اتصال با استفاده از استون پاک شده و سپس با استفاده از کاغذ سنباده با زبری متوسط سطح اتصال خشن ایجاد می‌شود. سپس سطح ورقها شسته شده و در محلول H_2SO_4 با خلوص ۹۹ درصد به مدت ۱۰ دقیقه قرار داده می‌شوند. پس از اتمام عملیات آماده سازی و خشک کردن ورقها، اتصالهای آلومینیوم با استفاده از چسب خالص و چسب تقویت شده ساخته شده است. شکل ۱-ب نمونه اتصال تک لبه و ابعاد نمونه ساخته شده را نشان می‌دهد. این نمونه‌ها به منظور بررسی تاثیر افزودن اکسید کاهش یافته گرافن، تحت آزمایش خزش قرار گرفته‌اند. آزمایشات در دمای 25°C و تحت کشش با بار ثابت انجام گرفته‌اند. طول سنج در نمونه حجمی 33cm و در نمونه اتصال تک لبه سنج های مکانیکی در فاصله ۵ میلیمتری از لبه اتصال مطابق شکل ۱ در نظر گرفته شده است.

(الف)



(ب)



شکل ۱- نمونه های خزش (الف): نمونه حجمی (ب): نمونه اتصال تک لبه.

۳- نتایج آزمایشات و شبیه سازی

۳-۱- رفتار خزشی نمونه های حجمی

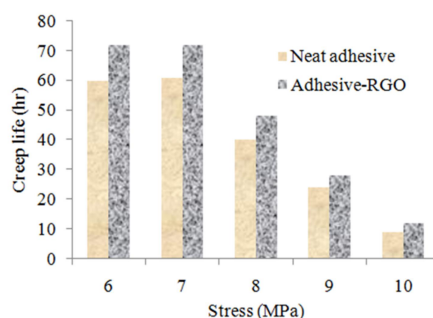
در این تحقیق آزمون خزش تک محوری برای ارزیابی رفتار خزش چسب خالص و چسب مخلوط با ۰/۵ درصد وزنی اکسید کاهش یافته انجام شده است. در حین تست خزش، ازدیاد طول نمونه های حجمی ثبت شده و کرنش خزشی (ϵ_c) با استفاده از معادله (۱) محاسبه شده است. در این معادله کرنش کل ϵ_{total} است و ϵ_e کرنش الاستیک است.

$$\epsilon_c(t) = \epsilon_{total}(t) - \epsilon_e \quad (1)$$

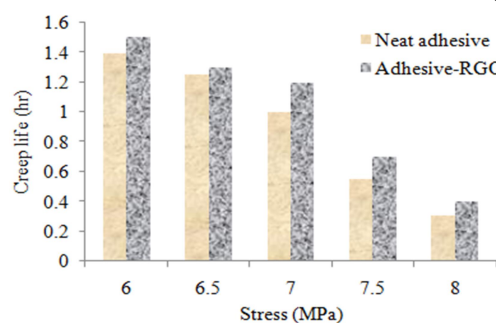
شکل ۲ منحنی های خزش نمونه های چسب خالص و چسب تقویت شده با گرافن کاهش یافته را در دمای ۲۵°C و ۵۵°C درجه سلسیوس نشان می‌دهد. مطابق شکل های ۲-الف و ۲-ب نمونه های حجمی در دمای محیط و تحت تنش 6MPa کرنش خزشی کمی نشان داده و پس از ۶۰ ساعت به دلیل ناچیز بودن نرخ کرنش، آزمایش

اما با افزایش تنش، نرخ کرنش در نمونه‌ها چشمگیر بوده به طوری که در نمونه‌های تحت تنش بالاتر از 8 MPa علاوه بر مرحله اول و دوم خزش مرحله سوم خزش نیز مشاهده می‌شود. همچنین مطابق شکل ۲-ج و ۲-د مشاهده می‌شود با افزایش دما نرخ خزش افزایش قابل ملاحظه‌ای داشته و سبب شده است که عمر نمونه‌ها کاهش چشمگیری یابد. شکل ۳ مقایسه‌ای از عمر نمونه‌های چسبی خالص و تقویت شده را نشان می‌دهد. مطابق این شکل افزودن ذرات اکسید گرافن کاهش یافته سبب افزایش ۸ الی ۳۰ درصدی عمر خزشی نمونه‌ها در دمای محیط و دمای ۵۵ درجه سلسیوس شده است.

(الف)



(ب)



شکل ۳- نمودار مقایسه عمر خزشی نمونه‌ها در دمای (الف): 25°C (ب): 55°C

۳-۲- مدلسازی عددی رفتار خزشی چسب

زه‌ساز و همکارانش با انجام آزمایشات خزش تک محوره نمونه‌های حجمی چسب در دماهای مختلف و با کاربرد ترکیبی از مدل‌های ماکسول-ویت و مدل زنر، مدلی ارائه دادند که با دقت قابل قبولی رفتار خزشی چسب را پیش بینی می‌نماید. این مدل قادر است رفتار ویسکوالاستیک غیر خطی چسب را با استفاده از المانهای فنر و دمپری که به طور سری و موازی ترکیب یافته‌اند، تحت تنش و دماهای مختلف شبیه سازی کند. ویژگی بارز این مدل، توانایی آن در مدلسازی توام مرحله اول و دوم خزش می‌باشد. آنها با انجام آزمایشات مختلف مدل ساده شده‌ای پیشنهاد دادند که قادر است رفتار خزشی چسب را در بازه گسترده‌ای از تنشها و دماها با دقت مناسب مدلسازی کند. رابطه (۲) مدل ارائه شده توسط زه‌ساز و همکارانش [۱۶] را نشان می‌دهد که در این رابطه a_1 تا a_6 ثوابت مربوط به جنس می‌باشند که از برازش غیر

خطی داده‌های آزمایش خزش بدست می‌آیند. همچنین در این رابطه t زمان و σ تنش می‌باشد.

$$\varepsilon_{\text{total}}(t) = \varepsilon_{\text{elastic}} + \alpha \hat{t} + \beta \sinh(\alpha_6 \hat{t}) \quad (2)$$

که در این رابطه:

$$\begin{aligned} \alpha &= \alpha_1 + \alpha_2 \sigma \\ \beta &= \alpha_3 + \alpha_4 \sigma + \alpha_5 \sigma^2 \\ \hat{t} &= \log_{10}(t) \end{aligned} \quad (3)$$

جدول ۱ مقدار پارامترهای مدل خزش بکار رفته در این مقاله را نشان می‌دهد. از این مدل به منظور شبیه‌سازی و پیش‌بینی رفتار خزشی اتصال چسب استفاده شده است. جهت بدست آوردن مقادیر پارامترهای مذکور برازش غیر خطی روی داده‌های آزمایش خزش در نرم‌افزار MATLAB انجام گرفته و مقدار خطای برازش R^2 در جدول نشان داده شده است. هر چقدر مقدار R^2 به عدد ۱ نزدیکتر باشد کیفیت بالای برازش را نشان می‌دهد.

جدول ۱- مقدار پارامترهای مدل خزش

	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	R^2
دمای ۲۵	9.8e-4	-9.65e-5	-1.03e-4	-2.2e-6	2.9e-6	0.99
دمای ۵۵	3.3e-2	-7.83e-3	-0.20	0.05	-1.5e-3	0.99

۳-۳- رفتار خزشی نمونه‌های اتصال چسب

در این مرحله نمونه‌های اتصال تک لایه چسبی، به منظور بررسی تاثیر افزودن ذرات اکسید کاهنده گرافن روی اتصال چسب، تهیه شده‌اند. اتصالات تک لایه از ورق‌های آلومینیوم الیای 7075-T6 به ابعاد ۲۵.۴×۱۲.۰ میلیمتر و ضخامت ۲ میلیمتر ساخته شده‌اند.

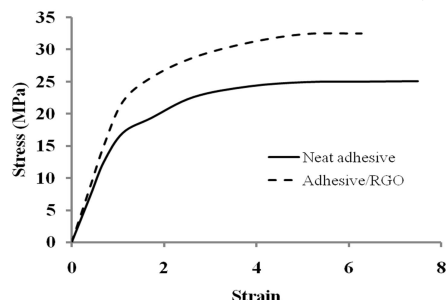
پس از انجام عملیات آماده‌سازی سطح، سطوح مورد نظر نمونه‌ها با چسب آغشته شده و داخل فیکسچر مخصوص قرار داده شده‌اند [۲۹]. با کاربرد این فیکسچر می‌توان با قرار دادن فیلر بین ورق و سطح فیکسچر ضخامت چسب دلخواه را ایجاد نمود. سپس مجموعه به داخل کوره با دمای ۶۷ درجه سلسیوس و به مدت ۳۰ دقیقه جهت بازپخت انتقال داده شده است. ضخامت توصیه شده برای این چسب توسط سازنده ۰/۲ میلیمتر می‌باشد که با قرار دادن فیلر با ضخامت ۲/۲ میلیمتر بین ورق و سطح فیکسچر ایجاد می‌گردد. به این ترتیب می‌توان نمونه‌هایی با ابعاد و شرایط ساخت یکسان به دست آورد.

نمونه‌های تهیه شده به منظور آزمایش در دستگاه تست خزش قرار داده شده و در دو دمای ۲۵ درجه سلسیوس و ۵۵ درجه سلسیوس با هدف بررسی تاثیر افزودن تقویت‌کننده اکسید کاهنده گرافن تحت آزمون خزش قرار داده شده‌اند. در این مرحله هشت نمونه تحت دو سطح بارگذاری متفاوت آزمایش شده و تغییر طول نمونه‌ها در اثر پدیده خزش ثبت شده‌اند. بارگذاری از طریق اعمال وزنه به آهستگی جهت شبیه‌سازی بار استاتیکی در دستگاه خزش اعمال شده است. دستگاه خزش به وزنه‌هایی مجهز شده است که با حرکت دادن آنها با سرعت قابل تنظیم روی بازوی مدرج اعمال بار، نیروی لازم روی نمونه-ها اعمال می‌گردد. نمونه‌های آزمایش شده در دمای ۵۵ درجه

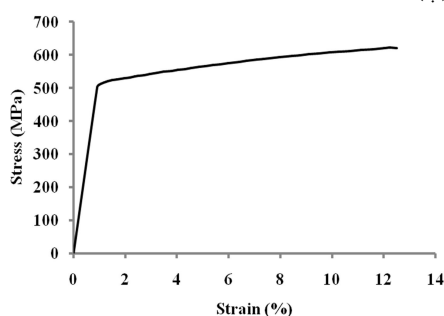
مربوط به این مدلها در تحقیقات گذشته مرامی و همکارانش [۱۶] ارائه شده‌اند. در این رابطه مقدار پارامتر a در جدول ۲ نشان داده شده و مقدار پارامتر $b=2$ برای چسب خالص و تقویت شده در نظر گرفته شده است. همچنین جهت مدلسازی رفتار خزشی چسب معادله (۲) برای چسب تعریف شده و با توجه به اینکه در دما و بارهای اعمالی پدیده خزش در ورق آلومینیوم رخ نمی‌دهد نیازی به تعریف مدل ساختاری خزش برای آلومینیوم نمی‌باشد.

$$\sigma = p + p_t \quad (3)$$

(الف)



(ب)



شکل ۵- نمودار تنش کرنش (الف): چسب، (ب): آلومینیوم 7075-T6.

جدول ۲- خواص مکانیکی آلومینیوم و چسب آرالدایت ۲۰۱۱ [۱۶]

ثابت دراکر-پراگر a	استحکام نهایی (MPa)	تنش تسلیم (MPa)	نسبت پواسون	مدول یانگ (MPa)	
۰/۰۹۲	۲۶/۳۶	۱۵/۲۰	۰/۲۹	۱۸۰۲	چسب خالص
۰/۰۹۵	۳۴/۳۵	۲۵/۲۰	۰/۳۱	۲۱۰۵	چسب تقویت شده
-	۶۱۵	۵۱۲	۰/۳۳	۷۰۰۰۰	آلومینیوم

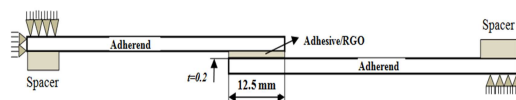
شکل ۶ نمودار تغییر طول نمونه‌های اتصال تک لبه تحت تاثیر پدیده خزش به همراه نتایج شبیه‌سازی المان محدود را نشان می‌دهد. شکل ۶-الف منحنی افزایش طول نمونه‌های متصل شده با استفاده از چسب خالص و تقویت شده تحت بارگذاری‌های ۱.۲۵kN و ۲kN و دمای ۲۵ درجه سلسیوس را نمایش می‌دهد. به طوری که در این شکل مشاهده می‌شود افزایش طول نمونه‌های متصل شده با استفاده از چسب تقویت شده در اثر پدیده خزش کاهش چشمگیری نشان می‌دهد. همچنین مقایسه نتایج آزمایش و تحلیل عددی نشان می‌دهد که

سلسیوس در اثر پدیده خزش دچار گسیختگی از محل اتصال چسب گردیده اما نمونه‌هایی که در دمای ۲۵ درجه سلسیوس آزمایش شدند پس از گذشت ۱۲ روز دچار گسیختگی نشده و آزمایش متوقف گردید.

۴-۳- مدلسازی عددی نمونه‌های اتصال چسب

در مرحله دوم، از معادله ساختاری خزش ارائه شده برای چسب و چسب تقویت شده برای پیش‌بینی رفتار خزشی اتصال چسب بهره گرفته می‌شود. برای این منظور این معادله به عنوان مدل ساختاری چسب در نرم‌افزار المان محدود آباکوس تعریف شده است. جهت تعریف این مدل از روش زیر روال نویسی در این نرم‌افزار استفاده شده است. با توجه ویژگی کرنش صفحه‌ای نمونه‌ها از مدل دو بعدی با کاربرد المانهای ویژه کرنش صفحه‌ای به نام CPE8R استفاده شده است. این المان از نوع مرتبه بالا و هشت گره‌ای می‌باشد. تعداد المانهای بکار رفته در این مدل ۱۱۰۵۴ و تعداد گره‌ها ۳۲۲۲۱ می‌باشد. شکل ۴-الف طرحواره اتصال تک لبه به همراه ابعاد و شکل ۴-ب مدل المان بندی شده اتصال را نشان می‌دهد. به طوری که در این شکل مشاهده می‌شود در قسمت‌های انتهای چسب به دلیل پدیده تمرکز تنش از المانهای ریزتر نسبت به نقاط دورتر استفاده شده است. شرایط مرزی مدل با شرایط مرزی آزمایشهای انجام گرفته مطابقت داده شده و مدل تحت دو مقدار بار ثابت $F=2\text{kN}$ و $F=1.25\text{kN}$ تحلیل شده‌اند.

(الف)



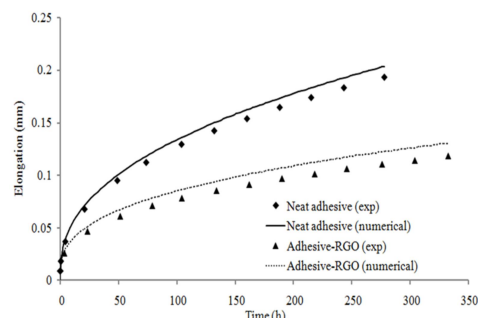
(ب)

شکل ۴- مدل اتصال تک لبه (الف): ابعاد اتصال (ب): مدل المان بندی شده محل اتصال

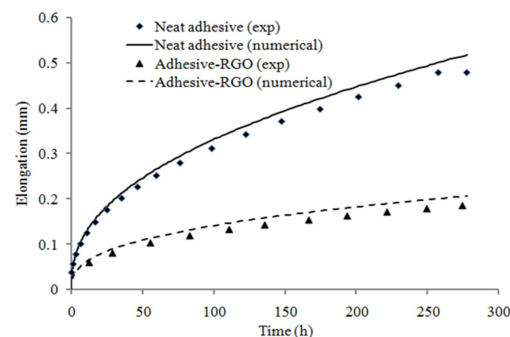
برای مدلسازی رفتار مکانیکی اتصال، ویژگی ورق آلومینیومی و چسب مطابق شکل ۵ و جدول ۲ تعریف شده است. برای مدلسازی رفتار مکانیکی ورق آلومینیوم از مدل سخت‌شوندگی ون-میسس و برای مدلسازی رفتار چسب از مدل سخت‌شوندگی دراکر-پراگر استفاده شده است. مدل سخت‌شوندگی خطی دراکر-پراگر در حقیقت مدل اصلاح شده سخت‌شوندگی ون-میسس است که قادر است تاثیر تنشهای هیدرواستاتیک در تسلیم ماده را لحاظ کند. البته مدل خطی دراکر-پراگر دقت کمی در مدلسازی چسب به دلیل وجود تغییرات شدید تنش در مجاورت اتصال به جنس اتصال‌دهنده دارد. برای افزایش دقت در مدلسازی چسب از مدل توانی دراکر-پراگر استفاده می‌شود. مدل دراکر-پراگر در نرم‌افزار آباکوس مطابق رابطه (۳) تعریف می‌شود. در این رابطه a و b پارامترهای وابسته به جنس، q تنش موثر و p_t پارامتر سختی شوندگی و p فشار هیدرواستاتیک می‌باشد. پارامترهای

معادله ساختاری بکار رفته قادر است رفتار خزشی چسب را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی کند.

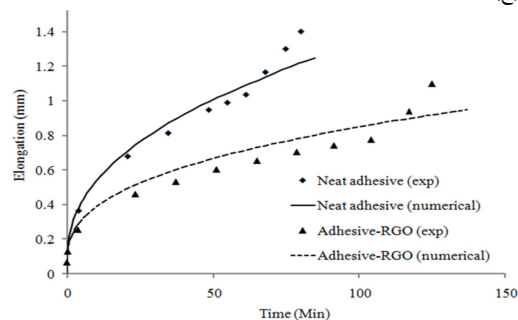
(الف)



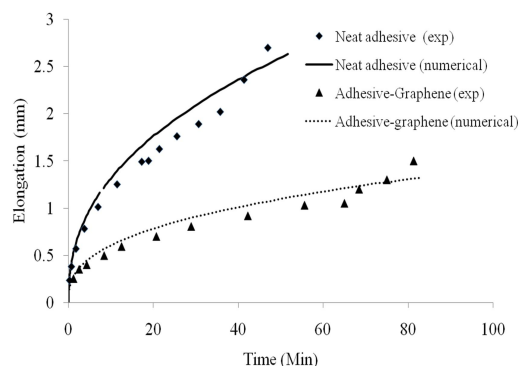
(ب)



(ج)



(د)



شکل ۶- نمودار تغییر طول نمونه‌های اتصال تک لبه تحت تاثیر پدیده خزش (الف): دمای ۲۵°C نیروی $p=1.25\text{kN}$ ، (ب): دمای ۲۵°C نیروی $p=2\text{kN}$ ، (ج): دمای ۵۵°C نیروی $p=1.25\text{kN}$ ، (د): دمای ۵۵°C نیروی $p=2\text{kN}$

شایان ذکر است که آزمایشات خزش اتصالات چسبی در دمای ۲۵ درجه سلسیوس بعد از ۱۲ روز و گسیخته نشدن اتصال متوقف گردیده است. آزمایشات مشابه در دمای ۵۵ درجه سانتیگراد انجام شده و نتایج آن در شکل‌های ۶-ب ارائه شده است. مطابق نتایج این آزمایش‌ها افزایش دما سبب کاهش قابل توجه عمر خزشی اتصالات شده است. اما همچنان مقایسه نتایج نمونه‌ها متصل شده با چسب تقویت شده و چسب خالص نشان می‌دهد که افزودن اکسید کاهش یافته گرافن سبب کاهش افزایش طول نمونه و افزایش عمر خزشی نمونه شده است. به طوری که افزایش عمر خزشی ۵۰٪ و ۴۵٪ به ترتیب در نمونه‌های تحت بار ۱.۲۵kN و ۲kN مشاهده می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، آزمایش‌های خزش تک محوره جهت بررسی تاثیر افزودن ذرات اکسید گرافن کاهش یافته بر رفتار خزشی چسب اپوکسی انجام گرفته است. نمونه‌ها تحت بارگذاری‌های مختلف و دماهای ۲۵ و ۵۵ درجه سلسیوس آزمایش شده اند. همچنین از یک مدل ساختاری با قابلیت شبیه‌سازی رفتار خزشی مرحله اول و دوم جهت شبیه‌سازی عددی رفتار خزشی چسب استفاده شده است.

نتایج نشان می‌دهد افزودن اکسید گرافن کاهش یافته سبب بهبود رفتار خزشی چسب اپوکسی می‌گردد. بطوریکه نمونه‌های تقویت شده توسط این ذرات تغییر طول کمتری تحت تاثیر پدیده خزش نشان می‌دهند. همچنین نتایج آزمایشات نشان می‌دهند که افزودن این ذرات سبب افزایش قابل ملاحظه عمر خزشی می‌گردد. علاوه بر این مقایسه نتایج آزمایش و حل عددی نشان می‌دهد که مدل ساختاری خزش بکار رفته، رفتار خزشی اتصال چسب را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی کند.

۵- مراجع

- [1] Su N., Mackie R.I., Two-dimensional creep analysis of structural adhesive joints, International Journal of Adhesion and Adhesives, 13,(1), pp. 33-40, 1993.
- [2] Dean G.D., Broughton W., A review of creep modelling for toughened adhesives and thermoplastics, National Physical Laboratory, 2005.
- [3] Brinson H.F., Brinson L.C., Polymer engineering science and viscoelasticity: an introduction, Springer Science & Business Media, 2007.
- [4] Lubliner J., Plasticity theory, Courier Corporation, 2008.
- [5] Dean G., Modelling non-linear creep behaviour of an epoxy adhesive, International Journal of Adhesion and Adhesives, 27,(8), pp. 636-46, 2007.
- [6] Feng C.-W., Keong C.-W., Hsueh Y.-P., Wang Y.-Y., Sue H.-J., Modeling of long-term creep behavior of structural epoxy adhesives, International journal of adhesion and adhesives, 25,(5), pp. 427-36, 2005.
- [7] Yu X., Crocombe A., Richardson G., Material modelling for rate-dependent adhesives, International journal of adhesion and adhesives, 21,(3), pp. 197-210, 2001.
- [8] Yu H., Li Z., Wang Q.J., Viscoelastic-adhesive contact modeling: Application to the characterization of the viscoelastic behavior of materials, Mechanics of Materials, 60, pp. 55-65, 2013.
- [9] Majda P., Skrodzewicz J., A modified creep model of epoxy adhesive at ambient temperature, International Journal of Adhesion and Adhesives, 29,(4), pp. 396-404, 2009.
- [10] Chiu W.K., Jones R., Unified constitutive model for thermoset adhesive, FM73, International Journal of Adhesion and Adhesives, 15,(3), pp. 131-6, 1995.

- [11] Duncan B., Maxwell A., Measurement methods for time-dependent properties of flexible adhesives, NPL, 1999.
- [12] Mortensen F., Thomsen O.T., Analysis of adhesive bonded joints: a unified approach, *Composites Science and Technology*, 62,(7), pp. 1011-31, 2002.
- [13] Pandey P., Shankaragouda H., Singh A.K., Nonlinear analysis of adhesively bonded lap joints considering viscoplasticity in adhesives, *Computers & structures*, 70,(4), pp. 387-413, 1999.
- [14] Ferrier E., Michel L., Jurkiewicz B., Hamelin P., Creep behavior of adhesives used for external FRP strengthening of RC structures, *Construction and Building Materials*, 25,(2), pp. 461-7, 2011.
- [15] Choi K.-K., Reda Taha M.M., Rheological modeling and finite element simulation of epoxy adhesive creep in FRP-strengthened RC beams, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 27,(5-6), pp. 523-35, 2013.
- [16] Zehsaz M., Vakili-Tahami F., Saeimi-Sadigh M.-A., Modified creep constitutive equation for an epoxy-based adhesive with nonlinear viscoelastic behavior, *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 50,(1), pp. 4-14, 2015.
- [17] Flahaut E., Peigney A., Laurent C., Marliere C., Chastel F., Rousset A., Carbon nanotube-metal-oxide nanocomposites: microstructure, electrical conductivity and mechanical properties, *Acta Materialia*, 48,(14), pp. 3803-12, 2000.
- [18] Geng Y., Liu M.Y., Li J., Shi X.M., Kim J.K., Effects of surfactant treatment on mechanical and electrical properties of CNT/epoxy nanocomposites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 39,(12), pp. 1876-83, 2008.
- [19] Gojny F.H., Wichmann M.H., Fiedler B., Schulte K., Influence of different carbon nanotubes on the mechanical properties of epoxy matrix composites—a comparative study, *Composites Science and Technology*, 65,(15), pp. 2300-13, 2005.
- [20] Karapappas P., Vavouliotis A., Tsoira P., Kostopoulos V., Palpetis A., Enhanced fracture properties of carbon reinforced composites by the addition of multi-wall carbon nanotubes, *Journal of Composite Materials*, 2009.
- [21] Siengchin S., Karger-Kocsis J., Structure and creep response of toughened and nanoreinforced polyamides produced via the latex route: Effect of nanofiller type, *Composites Science and Technology*, 69,(5), pp. 677-83, 2009.
- [22] Varela-Rizo H., Weisenberger M., Bortz D.R., Martin-Gullon I., Fracture toughness and creep performance of PMMA composites containing micro and nanosized carbon filaments, *Composites Science and Technology*, 70,(7), 2010, p. 1189-95.
- [23] Yang J.-L., Zhang Z., Schlarb A.K., Friedrich K., On the characterization of tensile creep resistance of polyamide 66 nanocomposites. Part I. Experimental results and general discussions, *Polymer*, 47,(8), pp. 2791-801, 2006.
- [24] Yao Z., Wu D., Chen C., Zhang M., Creep behavior of polyurethane nanocomposites with carbon nanotubes, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 50, pp. 65-72, 2013.
- [25] Marami G., Nazari S.A., Faghidian S.A., Vakili-Tahami F., Etemadi S., Improving the mechanical behavior of the adhesively bonded joints using RGO additive, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 70, pp. 277-86, 2016.
- [26] Zandiatashbar A., Picu C.R., Koratkar N., Control of epoxy creep using graphene, *Small*, 8,(11), pp. 1676-82, 2012.
- [27] Tang L.-C., Wang X., Gong L.-X., Peng K., Zhao L., Chen Q., et al., Creep and recovery of polystyrene composites filled with graphene additives, *Composites Science and Technology*, 91, pp. 63-70, 2014.
- [28] Wang X., Gong L.-X., Tang L.-C., Peng K., Pei Y.-B., Zhao L., et al., Temperature dependence of creep and recovery behaviors of polymer composites filled with chemically reduced graphene oxide, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 69, pp. 288-98, 2015.
- [29] Zehsaz M., Vakili-Tahami F., Saeimi-Sadigh M.-A., Parametric study of the creep failure of double lap adhesively bonded joints, *Materials & Design*, 64, pp. 520-6, 2014.