



بررسی عددی تأثیر تنش‌های تورمی حاصل از نفوذ رطوبت بر رفتار آسیب اتصالات چسبی تحت بارگذاری استاتیکی

هادی خرمی شاد^{1*}، زهرا عباسی²

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

* Khoramishad@iust.ac.ir، 16846-13114، صندوق پستی

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 22 آبان 1393

پذیرش: 10 دی 1393

ارائه در سایت: 11 بهمن 1393

کلید واژگان:

اتصالات چسبی

رطوبت

تورم

مدل ناحیه چسبناک

آسیب محیطی

یکی از محدودیت‌های مهم استفاده از اتصالات چسبی، تضعیف لایه‌ی چسب در مقابل عوامل مخرب محیطی مانند رطوبت می‌باشد. استفاده از روش‌های عددی برای پیش‌بینی استحکام اتصالات چسبی در معرض رطوبت می‌تواند موجب صرفه‌جویی مهمی در وقت و هزینه شود. در این تحقیق ابتدا نحوه‌ی بررسی آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی فرایند کامل نفوذ رطوبت به داخل لایه‌ی چسب و اثر تخریبی آن بر استحکام اتصال چسبی، تبیین شده است. سپس فرایند مذکور برای یک اتصال تک لپه‌ای با چسب حساس به فشار SBT 9244 و چسبده‌ی آلایژ آلومینیوم AL2024-T3 با طول اتصال و زمان‌های در معرض‌گذاری مختلف به کار برده شد. در مرحله‌ی اول توزیع رطوبت در زمان‌های در معرض‌گذاری 30، 60 و 90 روز در محیط با رطوبت نسبی 100% به دست آمد. سپس با استفاده از مدل ناحیه چسبناک، تست کشش اتصال تک لپه‌ای در زمان‌های مختلف شبیه‌سازی شد و استحکام باقیمانده‌ی آن تخمین زده شد. در این شبیه‌سازی پارامترهای مدل ناحیه چسبناک براساس نتایج آزمایشگاهی سایر محققین به دست آمد و اثر تخریبی رطوبت با تعریف پارامترهای مدل ناحیه چسبناک به‌صورت تابعی از میزان رطوبت جذب شده تعیین گردید. شبیه‌سازی یک بار بدون در نظر گرفتن تورم لایه‌ی چسب و بار دیگر با در نظر گرفتن تورم انجام شد. تنش‌های تورمی نیز به‌طور جداگانه در زمان‌های مختلف به‌دست آمد. مشخص شد، تأثیر تورم در اتصال با طول بزرگ‌تر و زمان در معرض‌گذاری کم‌تر، قابل توجه‌تر بوده است.

Numerical study of the effect of moisture-induced swelling stresses on damage behavior of adhesive joints under static loading

Hadi Khoramishad*, Zahra Abbasi

Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

*P.O.B. 16846-13114 Tehran, Iran, Khoramishad@iust.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 13 November 2014
Accepted 31 December 2014
Available Online 31 January 2015

Keywords:
Adhesive joints
Moisture
Swelling
cohesive zone model
environmental degradation

ABSTRACT

The main limitation of the use of adhesive joints is susceptibility of the adhesive layer to damaging environmental factors such as humidity. Use of numerical methods for predicting the strength of adhesive joints exposed to moist environment can save a significant amount of time and cost. In this study, first, experimental investigation and numerical modeling of the complete process of moisture diffusion into the adhesive layer and its damaging effect on the adhesive joint strength were determined. Then this process was applied for a single lap joint of SBT 9244 pressure sensitive adhesive and AL2024-T3 aluminum alloy substrate with two 12.5 and 50 mm overlap of lengths. In the first step, moisture distribution for 30, 60 and 90 days exposure time in environmental condition of 100% relative humidity was obtained. Then single lap joint tensile test was simulated using cohesive zone model for different exposure times. In this simulation cohesive zone model parameters were determined in such a way that numerical failure load and the existing experimental failure load were in good agreement. The cohesive zone model parameters were determined depending on the moisture content. The first simulation was done without considering swelling and in the second, swelling was considered. Swelling stress was obtained separately at different exposure time periods. It was found that swelling effect was more considerable in the joints with longer overlap length and shortened exposure time.

1- مقدمه

روش‌های اتصال از قبیل اتصالات پیچ و مهره‌ای، جوشی، پرچی و لحیمی دارد، امروزه به‌طور گسترده‌ای در صنایع مختلف مورد استفاده و استقبال قرار گرفته است. از جمله مزایای اتصالات چسبی نسبت به انواع دیگر اتصالات رقیب می‌توان به بهبود توزیع تنش به دلیل توزیع تنش در سطح و در نتیجه

یکی از قدیمی‌ترین روش‌های اتصال اجسام به یکدیگر استفاده از چسب بوده است، آثار گذشته نشان می‌دهد که از حدود سه هزار سال قبل بشر از چسب استفاده نموده است. روش اتصال چسبی به دلیل مزایایی که نسبت به دیگر

Please cite this article using:

H. Khoramishad, Z. Abbasi, Numerical study of the effect of moisture-induced swelling stresses on damage behavior of adhesive joints under static loading, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 3, pp. 189-198, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

استحکام خستگی بالا، جذب شوک، خاصیت میراکنندگی ارتعاشات، حذف خوردگی گالوانیک در اثر تماس فلزات غیرهم جنس، قابلیت اتصال هر ترکیبی از مواد هم جنس و غیر هم‌جنس، بهبود نسبت استحکام به وزن سازه، قابلیت آب‌بندی اتصال و بهبود یکنواختی سطح و زیبایی اشاره داشت. با این وجود، برخی نقاط ضعف اتصالات چسبی مانع از کاربرد وسیع‌تر آن‌ها شده است. مهم‌ترین نقطه ضعف اتصالات چسبی، آسیب‌پذیری آن‌ها در مقابل برخی عوامل همچون دمای بالا، رطوبت و محیط‌های خورنده است که باعث کاهش استحکام این اتصالات در سازه‌ها می‌شود [1]. رطوبت اثر مخربی بر استحکام اتصال چسبی دارد به‌طوری که می‌تواند ظرفیت تحمل بار اتصالات چسبی را به مقدار قابل توجهی کاهش دهد که در نتیجه باعث شکست زود به‌نگام می‌گردد. اثر تخریبی رطوبت بر اتصالات چسبی اگر با درجه حرارت بالا توأم باشد، تشدید می‌گردد [1]. نوع شکست نیز متأثر از وجود یا عدم وجود رطوبت در محیط کاری می‌باشد. به این صورت که اگر محیط کاری اتصال فاقد میزان رطوبت قابل توجه باشد، در صورت اعمال فرایند آماده‌سازی سطحی مناسب، غالباً شکست از داخل جان چسب اتفاق می‌افتد در صورتی که با افزایش میزان رطوبت محیط، نوع شکست به سمت بین وجهی تغییر می‌کند [2].

عوامل متعددی بر ماندگاری یک اتصال چسبی در محیط مرطوب اثرگذار است. برخی از این عوامل شامل میزان رطوبت محیط، درجه حرارت محیط، نوع چسب، نحوه‌ی آماده‌سازی سطوح قطعات به هم چسبیده شده و نوع تنش اعمالی به لایه‌ی چسب می‌باشند. مطالعه و بررسی اثر تخریبی رطوبت بر اتصالات چسبی را می‌توان به‌صورت آزمایشگاهی و یا از طریق مدل‌سازی انجام داد. با توجه به این‌که در روش آزمایشگاهی بررسی اثر رطوبت بر اتصالات چسبی لازم است تعدادی اتصال برای مدت زمان‌های نسبتاً طولانی در شرایط محیطی با میزان رطوبت و درجه حرارت مشخص و ثابت قرار گیرند، این آزمایش‌ها معمولاً زمان‌بر و هزینه‌بر هستند. استفاده از مدل‌های عددی برای بررسی اثرات تخریبی رطوبت بر اتصالات چسبی می‌تواند باعث کاهش قابل توجه هزینه و زمان در این مهم گردد.

در زمینه‌ی بررسی اثر تخریبی رطوبت بر استحکام اتصالات چسبی برخی محققین تحقیقاتی انجام داده‌اند. لو و همکارانش [3] در سال 2005 به بررسی تأثیر نفوذ رطوبت و انبساط حرارتی چسب اپوکسی پرداختند. آن‌ها چسب را در شرایط محیطی با 81/5% و 95/8% رطوبت نسبی و غوطه‌ور در آب در دمای 50°C قرار دادند و نفوذ رطوبت دو مرحله‌ای¹ را مشاهده نمودند. لیلجدال و همکارانش [5,4] در سال‌های 2006 و 2007 از روش ناحیه چسبناک برای بررسی استحکام اتصالات چسبی در معرض رطوبت استفاده کردند. آن‌ها اتصالات چسبی را در محیط با رطوبت نسبی زیاد، در آب آشامیدنی و آب دیونیزه شده، قرار دادند. در این بررسی یکبار اتصال به همراه تنش و بار دیگر بدون تنش در معرض رطوبت قرار داده شد و مشاهده شد که اتصال با اعمال تنش سریع‌تر تخریب می‌شود. همچنین آنان نشان دادند پارامترهای مدل ناحیه چسبناک به‌طور مستقیم با غلظت رطوبت ارتباط دارد. مباشر و همکارانش [6] در سال 2009 روشی برای پیش‌بینی غلظت رطوبت در چسب اپوکسی در شرایط رطوبتی سیکی ارائه کردند. نفوذ رطوبت به داخل چسب از روش ثقل سنجی² مورد بررسی قرار گرفت. در فرایند جذب رطوبت، جذب رطوبت غیرفیک³ مشاهده شد در حالی که فرایند از دست

دادن رطوبت فیک³ بود. روش اجزا محدود برای پیش‌بینی غلظت رطوبت در شرایط رطوبت سیکی، توسعه داده شد و در این بررسی مورد استفاده قرار گرفت. آن‌ها دریافتند با افزایش زمان در معرض‌گذاری بار شکست کاهش می‌یابد، در صورتی که استحکام اتصال پس از دفع رطوبت، تقریباً به طور کامل به مقدار اولیه‌اش باز می‌گردد [7].

کنتم و همکارانش [8] در سال 2010 خواص ناحیه‌ی چسبناک برای اتصال چسبی در معرض رطوبت را مشخصه‌یابی نمودند. آن‌ها با انجام تست پوست‌کنی⁴ بر روی اتصال چسبی آلومینیوم T3 2024 و چسب FM73 منحنی نیرو- طول ترک را برای شرایط خشک و مرطوب پس از 360 روز غوطه‌وری در آب دیونیزه⁵ به دست آوردند. در نهایت با استفاده از روش ناحیه چسبناک تست پوست‌کنی را در شرایط خشک و مرطوب مدل‌سازی نموده و پارامترهای چسبناک را در هر دو حالت به دست آوردند.

سوگیم و همکاران [9-11] در سال‌های 2011 تا 2013 رفتار اتصالات چسبی در معرض رطوبت تحت بار ایستا و نوسانی را مورد بررسی قرار دادند. آنان ابتدا نفوذ رطوبت به چسب را بررسی و ضریب نفوذ رطوبت را به‌دست آوردند. سپس با انجام تست‌های آزمایشگاهی و مدل‌سازی عددی برای چند نوع اتصال چسبی در شرایط خشک و مرطوب، تأثیر رطوبت بر اتصالات چسبی را بررسی نمودند.

ژوفر و ژولیان [12] در سال 2013 به بررسی نفوذ رطوبت و کاهش استحکام اتصال چسبی قطعات کامپوزیتی و فولادی پرداختند. آن‌ها با استفاده از مدل‌سازی عددی، نفوذ رطوبت و کاهش استحکام اتصال چسبی را مدل‌سازی نموده و نتایج حاصل را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه کردند. هان و همکارانش [13] در سال 2014 با توسعه‌ی روش‌های مدل‌سازی عددی، نفوذ رطوبت، افزایش دما و اعمال بار در اتصالات چسبی را به طور همزمان در نظر گرفتند.

همان‌طور که ذکر گردید استفاده از روش‌های مدل‌سازی عددی در بررسی اثرات تخریبی رطوبت بر اتصالات چسبی، می‌تواند باعث کاهش قابل توجه هزینه و زمان گردد. همچنین واضح است دست‌یابی به یک مدل عددی قابل اطمینان که بتواند مکانیزم‌های مهم و مؤثر بر تأثیر رطوبت بر لایه‌ی چسب را در نظر بگیرد، حائز اهمیت می‌باشد. یکی از اثرات رطوبت بر لایه‌ی چسب، تورم ناشی از رطوبت است. چسب‌های پلیمری در صورت جذب رطوبت متورم می‌شوند. غلظت رطوبت در لایه‌ی چسب غیر یکنواخت بوده و در مناطق نزدیک‌تر به لبه‌های اتصال بیش‌تر می‌باشد. تورم ناشی از رطوبت نیز در این نواحی بیش‌تر و در نواحی مرکزی اتصال ناچیز و یا حتی نزدیک به صفر است. در نتیجه بخشی از لایه‌ی چسب، تمایل به تورم داشته در حالی که بخش دیگر مقاومت می‌کند که این امر موجب ایجاد تنش‌های تورمی می‌شود [2]. در این تحلیل اثر تنش‌های تورمی بر رفتار آسیب اتصال چسبی تک لبه‌ای مورد بررسی و مدل‌سازی قرار گرفته است.

در این مقاله، ابتدا نحوه‌ی بررسی تجربی و عددی نفوذ رطوبت به داخل لایه‌ی چسب به‌صورت وابسته به زمان و سپس تضعیف اتصال بر اثر نفوذ رطوبت تشریح شده است. فرایند مذکور برای یک نمونه چسب حساس به فشار و اتصال تک لبه‌ای حاصله اعمال می‌گردد. تنش‌های تورمی حاصل از رطوبت بررسی و مدل‌سازی شده و با استفاده از مدل ناحیه چسبناک وابسته به غلظت رطوبت بار گسیختگی اتصال پیش‌بینی می‌شود.

1- Dual stage moisture uptake
2- Gravimetric experiment
3- Non- Fickian moisture absorption

4- Peel test
5- Deionized water

2- نفوذ رطوبت

رطوبت می‌تواند از طریق جان چسب یا فصل مشترک چسب و چسبنده جذب اتصال چسبی گردد. جذب رطوبت از طریق جان چسب اغلب موجب نرم شدگی یا پلاستیک شدن چسب می‌شود. در واقع طی این پدیده مدول الاستیک چسب کاهش یافته و در نتیجه موجب توزیع یکنواخت‌تر تنش در لایه‌ی چسب می‌شود. هر چند این پدیده بخودی خود مطلوب است اما چون همزمان باعث کاهش استحکام برشی چسب می‌شود کاهش توانایی تحمل بار سازه را به همراه دارد [2].

رطوبت از طریق فصل مشترک چسب و چسبنده نیز می‌تواند به اتصال چسبی نفوذ کند. این پدیده موجب تخریب اتصال بین وجهی می‌شود و باعث کاهش استحکام اتصال می‌گردد. رطوبت همچنین از طریق برخی چسبنده‌ها مانند چسبنده‌های کامپوزیتی نیز می‌تواند به اتصال نفوذ نماید.

2-1- بررسی آزمایشگاهی نفوذ رطوبت

برای بررسی نفوذ رطوبت، از روش ثقل‌سنجی استفاده می‌شود. در این روش آزمایش بر روی نمونه‌های حجمی چسب انجام می‌گیرد. پیش از این‌که چسب در معرض رطوبت قرار داده شود وزن آن به‌طور دقیق اندازه‌گیری می‌شود. سپس نمونه‌ی حجمی چسب در معرض رطوبت قرار داده شده و در زمان‌های مختلف از محیط مرطوب خارج شده و مجدداً وزن آن اندازه‌گیری شده و به محیط مرطوب بازگردانده می‌شود. مقدار رطوبت جذب شده از رابطه‌ی (1) به‌دست می‌آید.

$$M_t = \frac{W_t - W_0}{W_0} \quad (1)$$

که M_t وزن آب جذب شده در زمان t ، W_t وزن اندازه‌گیری شده در زمان t و W_0 وزن اولیه (پیش از در معرض‌گذاری) است.

در نهایت وزن‌های اندازه‌گیری شده به صورت تابعی از زمان در معرض‌گذاری ارائه می‌شود. زمانی که پس از آن وزن لایه‌ی چسب ثابت می‌ماند، زمان اشباع و مقدار رطوبت جذب شده در این زمان مقدار رطوبت جذب شده در حالت اشباع نامیده می‌شود. برای به‌دست آوردن مقدار ضریب نفوذ رطوبت، با استفاده از نتایج تجربی، نمودار M_t/M_{sat} نسبت به $t^{1/2}$ رسم شده و شیب بخش خطی در زمان‌های اولیه‌ی در معرض‌گذاری به‌دست آورده می‌شود. طبق رابطه‌ی (2) مقدار ضریب نفوذ رطوبت از برابری شیب به‌دست آمده و $\frac{8}{b} \left(\frac{D}{\pi} \right)^{1/2}$ به‌دست می‌آید. باید توجه داشت که رابطه‌ی (2) برای زمان‌های در معرض‌گذاری کم صحت دارد. بازه‌ی زمانی که در آن رابطه‌ی بین M_t/M_{sat} و $t^{1/2}$ خطی است به عوامل متعددی از جمله جنس ماده‌ی به‌کار رفته، رطوبت نسبی محیط و... بستگی دارد. به‌طور مثال در چسب SBT 9244، با توجه به نمودار M_t/M_{sat} نسبت به $t^{1/2}$ (طبق مرجع [14] مقاله)، این زمان تقریباً برابر با 49 ساعت است.

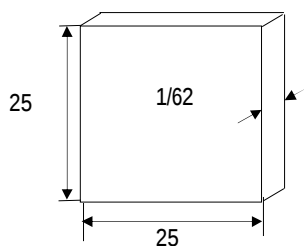
$$\frac{M_t}{M_{sat}} = \frac{8}{b} \left(\frac{Dt}{\pi} \right)^{1/2} \quad (2)$$

که b ضخامت چسب و D ضریب نفوذ رطوبت است.

در این مقاله چسب حساس به فشار SBT 9244 در نظر گرفته شده است. این چسب نوعی از چسب‌های حساس به فشار اپوکسی/اکریلیک هیبرید است که توسط کمپانی 3M تولید می‌شود. خواص فیزیکی و مکانیکی چسب در جدول 1 آورده شده است. ابعاد نمونه حجمی چسب به کار رفته

جدول 1 خواص فیزیکی و مکانیکی AL2024-T3 و SBT [14]

خواص	آلیاژ AL2024-T3	SBT
چگالی (kg/m^3)	2780	880
سختی، برینل ¹	120	—
استحکام کششی تسلیم ² (MPa)	345	—
استحکام کششی نهایی ³ (MPa)	485	20
افزایش طول در شکست	18%	96%
مدول الاستیک (E) (MPa)	72400	61/6
ضریب پواسون (ν)	0/33	0/35



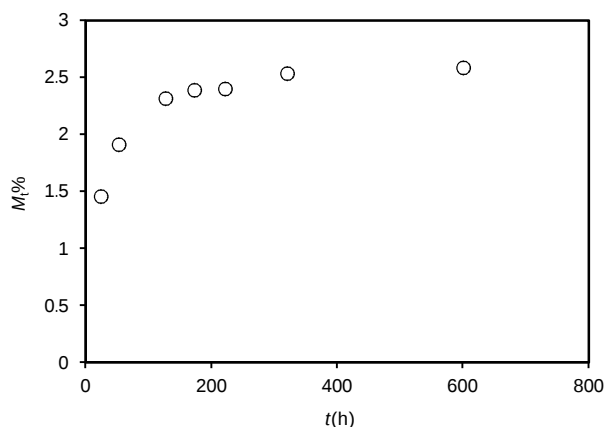
شکل 1 ابعاد قطعه چسب به‌کار رفته در تحلیل رطوبتی (ابعاد به میلی‌متر هستند)

برای جذب رطوبت در شکل 1 نشان داده شده است.

چسب در دمای 145°C و فشار $0/5\text{MPa}$ به مدت 45 دقیقه تحت پرس گرم⁴ پخته شده و در محیط با رطوبت نسبی 100% و دمای اتاق قرار داده شده است. سپس با استفاده از روش ثقل‌سنجی مقدار رطوبت جذب شده به صورت تابعی از زمان (شکل 2) به‌دست آمده است.

مقدار آب جذب شده در حالت اشباع، زمان اشباع (t_{sat}) و ضریب نفوذ رطوبت برای چسب SBT 9244 در جدول 2 آورده شده است. برای تعیین ضریب نفوذ رطوبت از رابطه‌ی (2) استفاده شده است.

اتصالات چسبی تک لایه‌ای نیز با چسب SBT 9244 و چسبنده آلیاژ



شکل 2 درصد جذب رطوبت SBT در محیط با رطوبت نسبی 100% [14]

جدول 2 میزان آب جذب شده در زمان اشباع، زمان اشباع و ضریب نفوذ رطوبت SBT [14]

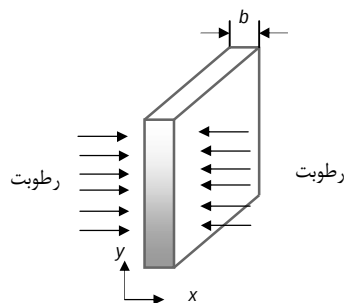
مقدار آب جذب شده در زمان اشباع (g)	زمان اشباع (h)	ضریب نفوذ رطوبت (m^2/s)
0/023	600	$6/31 \times 10^{-10}$

1- Brinell

2- Yield tensile strength

3- Ultimate tensile strength

4- Hot press



شکل 4 شماتیک نفوذ رطوبت در یک لایه نازک چسب

نفوذ رطوبت بایستی همگن باشد و میدان دمایی آن نیز در یک زمان داده شده، یکنواخت باشد (میدان دمایی در نقاط مختلف محیط یکسان باشد اما می‌تواند با زمان تغییر کند). دلیل این موضوع این است که ضریب نفوذپذیری به طور قابل توجهی به دما وابسته است. جزئیات روش هم‌ارزی مستقیم در جدول 3 آورده شده است.

در هم‌ارزی مستقیم می‌توان از تحلیل رسانش حرارتی که در تمام نرم‌افزارهای اجزا محدود موجود است، استفاده کرد. بدین صورت که در تحلیل رسانش حرارتی، دما معادل غلظت رطوبت، چگالی برابر یک، نفوذپذیری حرارتی (k) معادل ضریب نفوذ رطوبت (D) و گرمای ویژه برابر یک در نظر گرفته می‌شود. در این صورت توزیع درجه حرارت به دست آمده از تحلیل حرارتی معادل توزیع غلظت رطوبت در ماده می‌باشد.

2-2-2 هم‌ارزی اصلاح شده

از هم‌ارزی اصلاح شده حرارتی- رطوبتی برای تحلیل نفوذ جرم در سیستم‌های چند ماده‌ای استفاده می‌شود. در این روش، متغیر جدید غلظت نرمال شده (ϕ) وارد می‌شود که به شکل رابطه‌ی (7) تعریف می‌شود.

$$\phi = \frac{c}{S} \quad (7)$$

که S ، حل‌شوندگی³ است. غلظت نرمال شده به واکنش‌پذیری⁴ ماده‌ی نفوذ کننده اشاره دارد [16].

غلظت رطوبت اشباع (c_{sat})، حداکثر رطوبت قابل جذب در واحد حجم ماده در شرایط محیطی داده شده می‌باشد. در اغلب موارد می‌توان فرض کرد که سیستم بخار/ پلیمر از قانون هنری⁵ (رابطه‌ی 8) پیروی می‌کند.

$$c_{sat} = SP_{vp} \quad (8)$$

که P_{vp} فشار بخار محیط است که با رطوبت نسبی ($RH\%$) و فشار بخار اشباع ($P_{vp,sat}$) به شکل معادله‌ی (9) رابطه دارد.

$$P_{vp} = RH\% \times P_{vp,sat} \quad (9)$$

حل‌شوندگی می‌تواند تابعی از دما و غلظت باشد. اگر وابستگی حل‌شوندگی به غلظت زیاد باشد، قانون هنری دیگر معتبر نیست و باید از یک مدل غیرخطی استفاده کرد [17]. جزئیات روش هم‌ارزی اصلاح شده نیز در جدول 3 آورده شده است.

2-2-3 مدل‌سازی نفوذ رطوبت در اتصال چسبی تک لبه‌ای

در این بخش به بررسی مدل‌سازی نفوذ رطوبت به اتصال تک لبه‌ای SBT

آلومینیوم AL2024-T3 در نظر گرفته شده است. ابعاد چسب و چسبنده در شکل 3 نشان داده شده است. اتصالات چسبی تک لبه‌ای به مدت 30، 60 و 90 روز در محیط مرطوب با دمای اتاق و رطوبت نسبی 100% قرار داده شده‌اند.

2-2- بررسی عددی نفوذ رطوبت

نفوذ یک فرایند وابسته به زمان است که ماده با حرکت پراکنده مولکول‌ها جابجا می‌شود. پدیده‌ی نفوذ اغلب به وسیله‌ی اختلاف غلظت ماده، هدایت می‌شود. آب در هر دو حالت مایع و بخار به لایه‌ی چسب نفوذ می‌کند. فرایند نفوذ تابعی از غلظت رطوبت، زمان، ضخامت لایه و دما است. به طور کلی آب در یک لایه نازک چسب با ضخامت b و عرض بی‌نهایت (شکل 4)، در جهت ضخامت نفوذ می‌کند. نرخ نفوذ آب به داخل پلیمر یا شار رطوبت (F) با استفاده از قانون اول فیک¹ [15] که در معادله‌ی (3) بیان شده است، مدل‌سازی می‌شود.

$$F_x = -D \frac{dc}{dx} \quad (3)$$

که c غلظت رطوبت، D ضریب نفوذ رطوبت، x راستای نفوذ و F_x شار رطوبت در راستای x است.

تغییر غلظت رطوبت (c) با زمان (t) با استفاده از قانون دوم فیک² (معادله‌ی 4) مدل‌سازی می‌شود.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (4)$$

با توجه به این که فرم معادلات حاکم بر رسانش حرارتی و نفوذ رطوبت مشابه است با استفاده از این هم‌ارزی می‌توان برای مدل‌سازی نفوذ رطوبت از تحلیل رسانش حرارتی استفاده کرد.

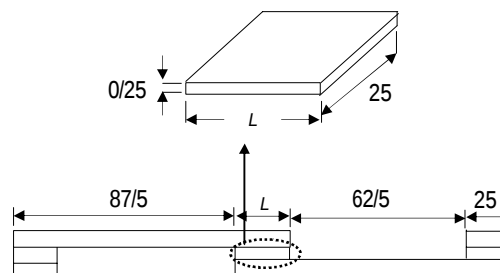
2-2-1 هم‌ارزی مستقیم

تحلیل نفوذ رطوبت را می‌توان با استفاده از هم‌ارزی مستقیم معادلات رسانش حرارتی و نفوذ رطوبت (به ترتیب معادلات 5 و 6) انجام داد.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \alpha \nabla^2 \theta \quad (5)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \nabla^2 c \quad (6)$$

از آنجایی که معادلات (5) و (6) بر پایه‌ی فرض رسانش و نفوذپذیری یکنواخت به دست آمده‌اند، بنابراین هم‌ارزی مستقیم تنها زمانی قابل استفاده است که نفوذپذیری در محیط، یکنواخت باشد. این بدان معناست که محیط



شکل 3 شماتیک اتصال چسبی تک لبه‌ای AL2024-T3 و SBT (ابعاد به میلی‌متر می‌باشند) [14]

3- Solubility
4- Activity
5- Henry's law

1- Fick's first law
2- Fick's second law

جدول 3 هم‌ارزی مستقیم و اصلاح شده بین پارامترهای توزیع حرارتی و توزیع

رطوبت [16]

انتقال حرارت	هم‌ارزی مستقیم	هم‌ارزی اصلاح شده
متغیر میدان	غلظت رطوبت (c)	پارامتر اصلاح شده غلظت رطوبت (ρ)
چگالی	1	1
نفوذپذیری	D	S
گرمای ویژه	1	DS
	ρ	
	κ	
	C_p	

9244 و AL2024-T3 که در محیط با رطوبت نسبی 100% قرار داده شده است، پرداخته می‌شود. برای مدل‌سازی نفوذ رطوبت از نرم‌افزار اجزا محدود آباکوس و هم‌ارزی مستقیم حرارت- رطوبت استفاده شده و اتصال تک لایه‌ای با ابعاد داده شده در شکل 3 و طول اتصال 12/5 و 50 میلی‌متر مدل‌سازی شده است. برای این شبیه‌سازی از مدل سه‌بعدی استفاده شده و خواص چسب به شکلی که در جدول 3 ذکر شد، تعیین شده است. علاوه بر پارامترهای ذکر شده در جدول 3، مدول الاستیک و ضریب پواسون چسب و چسبندگی نیز به نرم‌افزار داده می‌شود. با توجه به این‌که نفوذ رطوبت به درون چسبندگی بسیار ناچیز است، مقدار ضریب نفوذ رطوبت چسبندگی، صفر قرار داده شده است. تحلیل در قالب انتقال حرارت گذرا¹ انجام شده و بیشترین زمان در معرض‌گذاری 90 روز بوده است که به نرم‌افزار نیز همین زمان داده می‌شود. در این مدل‌سازی غلظت رطوبت نرمال شده (c/c_{sat}) معادل دما در نظر گرفته شده است، بنابراین برای سطوحی از چسب که در معرض رطوبت قرار دارند شرط مرزی دمایی برابر با یک ($c/c_{sat} = 1$) قرار داده می‌شود. المان‌های چسب و چسبندگی هر دو از نوع المان‌های انتقال حرارت² انتخاب شده‌اند.

برای به‌دست آوردن مقدار کلی رطوبت جذب شده توسط چسب (M_{H_2O}) در هر یک از اتصالات و زمان‌ها، متوسط غلظت رطوبت نرمال شده لایه‌ی چسب ($(c/c_{sat})_{avg}$) توسط نرم‌افزار اجزا محدود محاسبه و در رابطه‌ی (10) جای‌گذاری شده است. V_{adh} حجم لایه‌ی چسب به‌کار رفته در اتصال است.

$$M_{H_2O} = (c/c_{sat})_{avg} \times c_{sat} \times V_{adh} \quad (10)$$

غلظت رطوبت اشباع (c_{sat}) با استفاده از میزان آب جذب شده در زمان اشباع (M_{sat}) (مذکور در جدول 2) و حجم لایه چسبی که برای تحلیل رطوبتی به کار رفته ($V_{bulk\ adh}$) (نشان داده شده در شکل 1) از طریق رابطه‌ی (11) به دست می‌آید [2].

$$c_{sat} = \frac{M_{sat}}{V_{bulk\ adh}} \quad (11)$$

با جای‌گذاری مقادیر M_{sat} و $V_{bulk\ adh}$ در رابطه‌ی (11) مقدار غلظت رطوبت اشباع برابر با $2.27 \times 10^{-5} \frac{g}{mm^3}$ به‌دست خواهد آمد.

در جدول‌های 4 و 5، متوسط غلظت رطوبت نرمال شده، جرم آب جذب شده و درصد وزنی آب جذب شده $M\%$ برای چسب SBT 9244 در اتصال تک

جدول 4 میزان جذب رطوبت برای چسب SBT 9244 با اتصال تک لایه‌ای با طول اتصال 12/5 میلی‌متر در معرض محیط با رطوبت نسبی 100% در زمان‌های مختلف

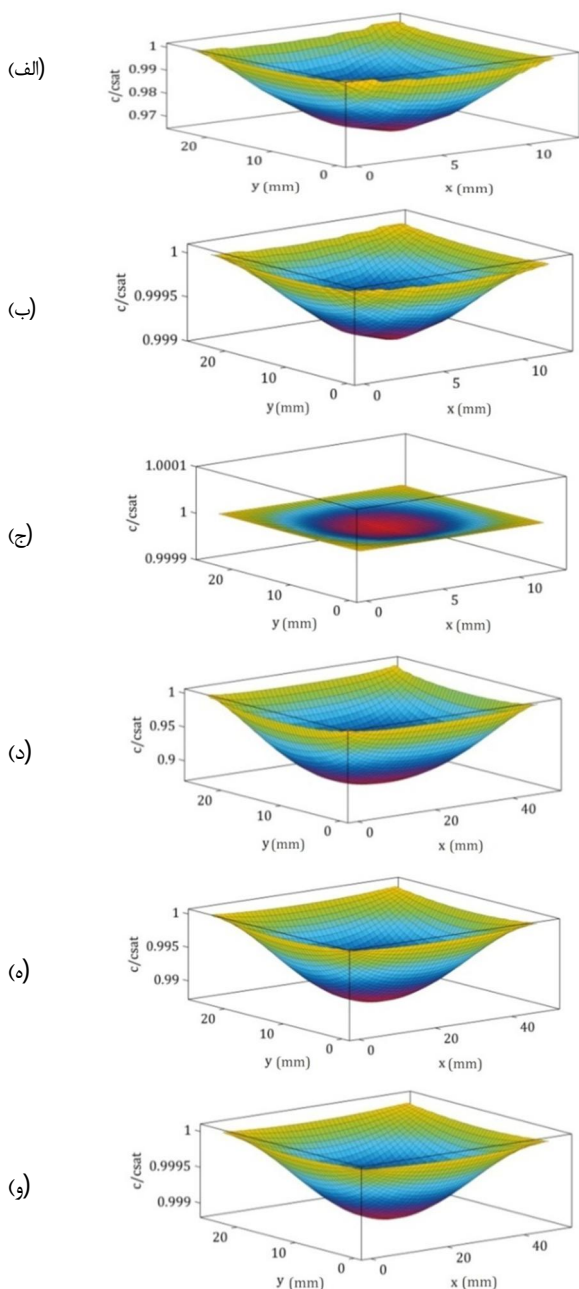
زمان در معرض‌گذاری (روز)	$(c/c_{sat})_{avg}$	$M_{H_2O}(g)$	$M\%$
30	0/994898	0/00176439	2/566385
60	0/999965	0/00177338	2/579455
90	1	0/00177344	2/579545

1- Transient heat transfer
2- Heat transfer

لایه‌ای به‌ترتیب با طول اتصال‌های 12/5 و 50 میلی‌متر در معرض محیط با رطوبت نسبی 100% در زمان‌های مختلف به‌دست آمده از تحلیل اجزای محدود آورده شده است. در شکل 5 توزیع رطوبت در زمان‌های مختلف در سطح لایه‌ی چسب نشان داده شده است.

جدول 5 میزان جذب رطوبت برای چسب SBT 9244 با اتصال تک لایه‌ای با طول اتصال 50 میلی‌متر در معرض محیط با رطوبت نسبی 100% در زمان‌های مختلف

زمان در معرض‌گذاری (روز)	$(c/c_{sat})_{avg}$	$M_{H_2O}(g)$	$M\%$
30	0/982574	0/0069701	2/534594
60	0/999551	0/0070906	2/578387
90	1	0/0070938	2/579545



شکل 5 توزیع رطوبت در سطح لایه‌ی چسب برای اتصال با طول 12/5 میلی‌متر در زمان‌های (الف) 30، (ب) 60 و (ج) 90 روز و برای اتصال با طول 50 میلی‌متر در زمان‌های (د) 30، (ه) 60 و (و) 90 روز

3- آسیب ناشی از بارگذاری استاتیکی

تست کشش بر روی اتصال تک لبه‌ای SBT 9244 و AL2024-T3 با طول اتصال 12/5 و 50 میلی‌متر انجام شده است. در این تست با استفاده از دستگاه تست کشش با سرعت 5 mm/min بار شکست اتصال تک لبه‌ای به دست آمده است [14].

3-1- مدل ناحیه چسبناک

در سال‌های اخیر به علت مزیت‌های مدل ناحیه چسبناک، استفاده از این روش برای مدل‌سازی آسیب مکانیکی گسترش یافته است. از مزیت‌های مهم این روش قابلیت شبیه‌سازی شروع و رشد آسیب در قالب یک مدل واحد است. این روش نیاز به ترک اولیه ندارد و آسیب درون اتصال بدون دخالت کاربر پیشرفت می‌کند. از مدل ناحیه چسبناک به‌طور وسیعی برای تحلیل شکست در اتصالات چسبی، مواد فلزی، کامپوزیتی و سرامیکی استفاده شده است [18].

مدل ناحیه چسبناک بر پایه‌ی مفاهیم مکانیک آسیب و مکانیک شکست، آسیب مکانیکی را مدل‌سازی می‌نماید. اساس روش مدل ناحیه چسبناک بر پایه‌ی معرفی رابط‌های ساختاری نرم‌شونده در ناحیه‌ی آسیب دیده‌ی اطراف نوک ترک است [19]. المان‌هایی که از قانون چسبناک تبعیت می‌کنند را المان‌های چسبناک می‌نامند. المان‌های چسبناک در محلی قرار می‌گیرند که احتمال وقوع آسیب وجود دارد. مدل ناحیه چسبناک از قانون کشش-جدایش پیروی می‌کند.

3-1-1- قانون کشش-جدایش

بر طبق قانون کشش-جدایش، با افزایش کشش با یک شیب ثابت (سفتی بین وجهی اولیه) تا رسیدن به یک مقدار بحرانی (استحکام چسبناک) افزایش می‌یابد. بعد از این نقطه، آسیب شروع می‌شود و با افزایش جدایش، کشش کم می‌شود تا اینکه به صفر برسد و ماده دچار آسیب کامل شده و ترک شکل می‌گیرد. این رفتار در تک تک المان‌های چسبناک اتفاق می‌افتد. در واقع رابط‌های تنش و کرنش (یا جابجایی) در المان‌های چسبناک در ابتدا به‌صورت الاستیک خطی بوده و پس از رسیدن تنش به یک مقدار حداکثری که استحکام چسبناک می‌باشد، افت تدریجی سفتی المان چسبناک شروع می‌شود تا در نهایت با رسیدن سفتی المان چسبناک به مقدار صفر، المان چسبناک دچار تخریب کامل گردد. نسبت مقدار افت سفتی به سفتی اولیه در هر وضعیت کرنش، متغیر آسیب نامیده می‌شود [19].

برای بهره‌گیری از قانون کشش-جدایش در روش اجزا محدود، تعیین مقدار سفتی الاستیک اولیه¹، استحکام چسبناک، انرژی شکست، معیار شروع آسیب² و معیار رشد آسیب³ ضروری است.

3-2- بررسی عددی استحکام اتصال تک لبه‌ای خشک

برای بررسی استحکام اتصال تک لبه‌ای SBT 9244 و AL2024-T3 از مدل ناحیه چسبناک و قانون کشش-جدایش استفاده شده است. با توجه به اینکه در تست کشش اتصال تک لبه‌ای، چسب تنش‌های ترکیبی برشی و عمودی را تجربه می‌کند از معیار شروع آسیب مربعات تنش اسمی⁴ (رابطه‌ی 12) استفاده شده است.

$$\left\{ \frac{\langle \sigma_n \rangle}{T_n} \right\}^2 + \left\{ \frac{\sigma_s}{T_s} \right\}^2 + \left\{ \frac{\sigma_t}{T_t} \right\}^2 = 1 \quad (12)$$

- 1- Initial elastic stiffness
- 2- Damage initiation criterion
- 3- Damage propagation criterion
- 4- Quadratic nominal stress criterion

که σ_n و σ_s و σ_t به ترتیب مؤلفه‌های کشش در راستای عمودی و برشی داخل صفحه و خارج صفحه و T_n ، T_s و T_t به ترتیب مؤلفه‌های کشش بحرانی (استحکام چسبناک)⁵ در راستای عمودی و برشی داخل و خارج صفحه هستند. علامت () کروهی مکانی⁶ است و به این معنی است که تنش فشاری موجب شروع آسیب نمی‌شود. طبق رابطه‌ی 12 هر سه مؤلفه‌ی کشش در شروع آسیب دخالت دارند.

رشد آسیب با استفاده از انرژی شکست کنترل می‌شود و قسمت نزولی نمودار کشش-جدایش به‌صورت خطی در نظر گرفته شده است. برای تحلیل مود ترکیبی رشد آسیب می‌توان از هر یک از دو معیار توانی شکست⁷ و معیار بنزگا-کنان⁸ (BK) استفاده نمود. برای کاهش داده‌ها بهتر است که از معیار BK استفاده شود، چرا که این معیار برای مواقعی که انرژی شکست مود برشی در راستای اول و دوم با یکدیگر برابر قرار داده می‌شوند، کارآمد است [20]. معیار BK در رابطه‌ی 13 بیان شده است. در معادله‌ی 13، G انرژی شکست و زیرنویس n ، s و t به ترتیب نشان‌دهنده‌ی راستای عمودی، برشی اول و برشی دوم در مسائل سه بعدی هستند. G_n^C ، G_s^C و G_t^C به ترتیب انرژی شکست بحرانی لازم برای تخریب در راستای عمودی، برشی اول و برشی دوم می‌باشد. براساس معیار رشد آسیب BK آسیب زمانی کامل می‌شود که مجموع انرژی‌های شکست مود اول و دوم و سوم برابر با انرژی شکست بحرانی مود ترکیبی (سمت چپ رابطه‌ی 13) شود.

$$G_n^C + (G_s^C - G_n^C) \left(\frac{G_s + G_t}{G_n + G_s + G_t} \right)^\eta = G_n + G_s + G_t \quad (13)$$

مقدار پارامتر مادی η در معیار BK، 2 انتخاب شده است چرا که در این صورت نتایج عددی و آزمایشگاهی تطابق بهتری دارند.

برای مدل‌سازی اتصال تک لبه‌ای، ابتدا چسب و چسبنده به‌طور یکپارچه مدل‌سازی شده و سپس با استفاده از گزینه‌ی پارتیشن در آباکوس به دو قسمت مجزای چسب و چسبنده با خواص مکانیکی مختلف تقسیم شده است. در قسمت تعیین ویژگی‌های چسب، ضخامت اولیه برابر با ضخامت واقعی چسب قرار داده شده است، در نتیجه سفتی الاستیک اولیه قانون کشش-جدایش برابر با مدول الاستیک واقعی چسب قرار داده شده است. مقادیر سفتی الاستیک اولیه برشی نیز برابر با مدول برشی چسب قرار داده شده است.

شرایط مرزی در نظر گرفته شده در تحلیل اجزای محدود در شکل 6 نشان داده شده است. شرایط مرزی بدین‌گونه است که هر شش درجه آزادی وجه a (شکل 6) با استفاده از قید کوپلینگ- سینماتیک به جابجایی نقطه‌ی B وابسته شده است. بنابراین با اعمال جابجایی به نقطه‌ی B کل وجه a جابجا می‌شود. جابجایی نقطه‌ی B نیز تنها در راستای محور x است و در جهات دیگر مقید می‌باشد. همان‌طور که در شکل 6 مشخص است وجه b کاملاً مقید شده است. مقدار جابجایی نقطه‌ی B افزایش داده شده است و بار عکس‌العملی از تحلیل اجزای محدود براساس آسیب ایجاد شده به‌دست آمده است. این در واقع همان اتفاقی است که در تست کشش واقع می‌گردد. برای مدل‌سازی چسب و چسبنده‌ها به ترتیب از المان‌های چسبناک (COH3D8) و تنش سه بعدی⁹ (C3D8R) در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس استفاده شده است.

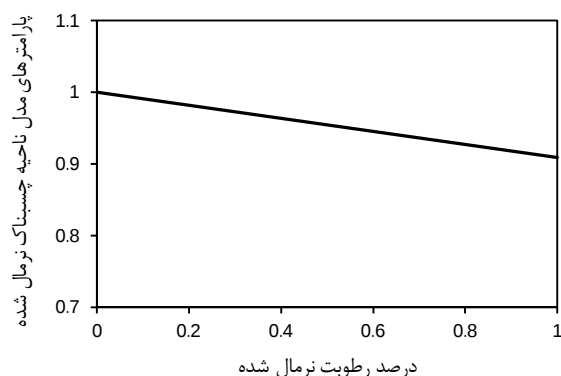
5- Cohesive strength
6- Macaulay bracket
7- Power law fracture
8- Benzeggagh- Kenane
9- 3D stress

مدل‌سازی گردد (بخش 2-3). نتیجه‌ی این تحلیل توزیع غلظت رطوبت در لایه‌ی چسب می‌باشد. این توزیع غلظت رطوبت در لایه‌ی چسب را می‌توان با استفاده از میدان از پیش تعریف شده¹ در نرم‌افزار آباکوس وارد تحلیل آسیب مکانیکی نمود. مدل‌سازی برای زمان‌های مختلف در معرض‌گذاری و طول اتصالات‌های مختلف انجام می‌شود. به‌منظور مدل‌سازی نمودن اثر تخریبی رطوبت بر استحکام مکانیکی اتصال چسبی، پارامترهای مدل ناحیه چسبناک به‌صورت وابسته به میزان غلظت رطوبت تعریف می‌گردد. به‌عبارت دیگر با افزایش میزان غلظت رطوبت، پارامترهای مدل ناحیه چسبناک تنزل داده می‌شوند. برای ساده‌سازی می‌توان فرض کرد که پارامترهای چسبناک، درصد کاهش یکسانی دارند[8].

شکل 8 رابطه‌ی بین پارامترهای مدل ناحیه چسبناک و درصد رطوبت جذب شده توسط لایه‌ی چسب را نشان می‌دهد. پارامترهای مدل ناحیه چسبناک نرمال شده برابر با نسبت استحکام چسبناک، سفتی اولیه و انرژی شکست چسب در معرض رطوبت به مقادیر متناظر در چسب خشک هستند. در جدول 6 پارامترهای مدل ناحیه چسبناک برای شرایط خشک و اشباع آورده شده است. در جدول 7 مقادیر بار شکست آزمایشگاهی و عددی با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

5- تورم رطوبتی

تورم، انبساط حجمی ناشی از جذب رطوبت است و متفاوت با انبساط حرارتی است. هنگامی که آب به داخل پلیمر نفوذ می‌کند، حجم آزاد پلیمر را پر می‌کند و آب آزاد² درون پلیمر جای می‌گیرد. با افزایش زمان در معرض گذاری، آب می‌تواند اتصالات بین زنجیره‌ای را گسسته و به آب مقید³ تبدیل شود. آب مقید حجم بیشتری را اشغال می‌کند و موجب تورم رزین اپوکسی می‌شود[21]. هنگامی که دما افزایش می‌یابد، نرخ نفوذ رطوبت و ماکزیمم رطوبت جذب شده افزایش می‌یابد[22]. تورم نیز با افزایش دما و افزایش ماکزیمم رطوبت جذب شده افزایش می‌یابد[23].



شکل 8 رابطه‌ی بین پارامترهای مدل ناحیه چسبناک و درصد رطوبت جذب شده توسط لایه‌ی چسب

جدول 6 پارامترهای مدل ناحیه چسبناک برای اتصالات تک لبه‌ای خشک و اشباع

درصد رطوبت	K_n (MPa/mm)	$K_s=K_t$ (MPa/mm)	T_n (MPa)	$T_s=T_t$ (MPa)	G_n (kJ/m ²)	$G_s=G_t$ (kJ/m ²)
0	61/6	22/8	22	9/85	5	10
1	56	20/72	20	8/95	4/54	9/09

1- Predefined field
2- Free water
3- Bonded water

جهت بررسی تأثیر تعداد المان‌ها بر نتایج عددی، بار شکست اتصال تک لبه‌ای خشک با طول اتصال 50 میلی‌متر با تعداد المان‌های مختلف به دست آمد و با یکدیگر مقایسه شد و نهایتاً اندازه‌ی المان مطلوب تعیین گردید. تعداد المان‌ها در اتصال با طول 12/5 میلی‌متر 1872 و برای اتصال با طول 50 میلی‌متر 3991 بوده است.

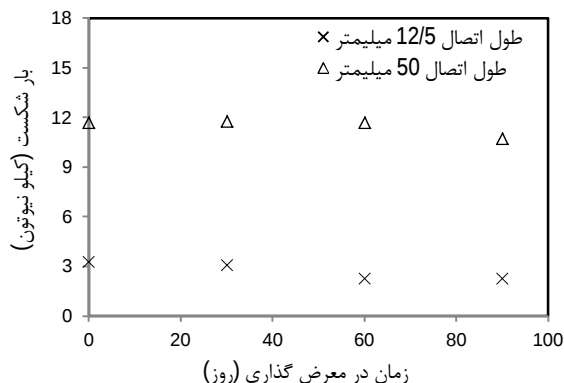
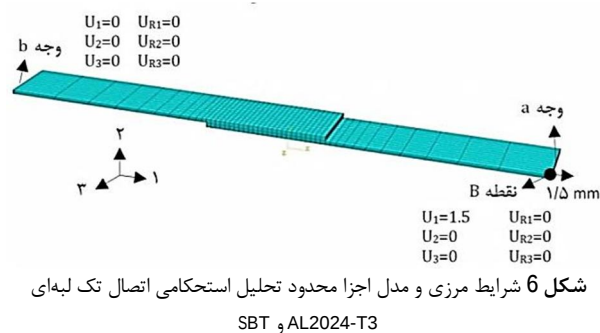
4- آسیب ناشی از رطوبت

1-4- بررسی آزمایشگاهی آسیب ناشی از رطوبت

همان‌طور که در بخش 1-2 ذکر شد اتصال تک لبه‌ای SBT 9244 و AL2024-T3 با طول اتصال 12/5 و 50 میلی‌متر در معرض محیط با دمای اتاق و رطوبت نسبی 100% قرار داده شده است. کل زمان در معرض‌گذاری 90 روز بوده است که در زمان‌های 30 روزه، چهار نمونه از اتصالات از محیط مرطوب خارج شده و تست کشش با استفاده از دستگاه تست کشش با نرخ 5mm/min بر روی آن‌ها انجام شده است. بار شکست اتصال تک لبه‌ای در هر یک از زمان‌های در معرض‌گذاری به‌دست آمده و نتایج در شکل 7 نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل 7 مشاهده می‌شود، پس از گذشت 90 روز، اتصال با طول 12/5 میلی‌متر، 35% کاهش و اتصال با طول 50 میلی‌متر 7% کاهش استحکام دارد. از نتایج آزمایشگاهی مشاهده می‌شود که میزان کاهش استحکام اولیه در اثر نفوذ رطوبت با افزایش طول اتصال، کم می‌شود [14].

2-4- بررسی عددی آسیب ناشی از رطوبت

برای تخمین استحکام باقیمانده‌ی اتصال چسبی ابتدا لازم است نفوذ رطوبت با استفاده از تحلیل حرارتی براساس هم‌ارزی رسانش حرارتی و نفوذ رطوبت



شکل 7 بار شکست برای اتصال تک لبه‌ای AL2024-T3 و SBT با طول اتصال 12/5 و 50 میلی‌متر [14]

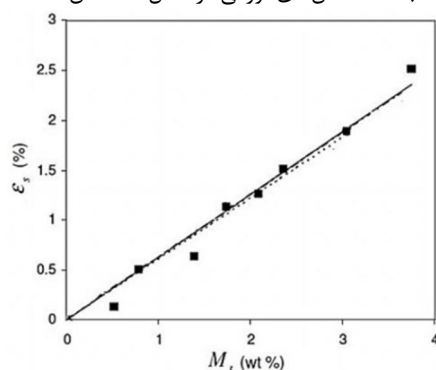
جدول 7 مقایسه‌ی بار شکست آزمایشگاهی و بار شکست عددی اتصال چسبی تک لایه‌ای AL2024-T3 و SBT در شرایط خشک و در معرض رطوبت

طول اتصال (mm)	زمان (روز)	بار شکست آزمایشگاهی (kN)	بار شکست عددی بدون تورم (kN)	درصد خطا (%)
12/5	0	3/26	2/9	-11/04
12/5	30	3/09	2/61	-15/53
12/5	60	2/25	2/61	16
12/5	90	2/25	2/61	16
50	0	11/7	11/7	0
50	30	11/7	10/7	-8/55
50	60	11/7	10/7	-8/55
50	90	10/7	10/7	0

شکست آزمایشگاهی و عددی با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

5-2-1- تنش‌های تورمی رطوبتی

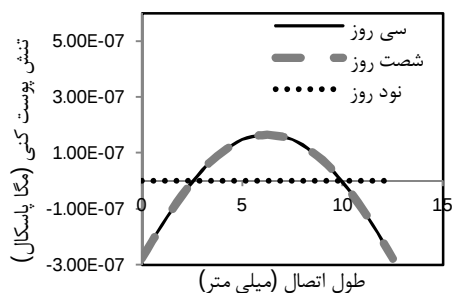
با قرار دادن اتصال در محیط مرطوب، رطوبت جذب لایه‌ی چسب می‌شود و چسب دچار تورم می‌شود. کرنش حاصل از تورم توسط چسبنده‌ها محدود می‌شود و در لایه‌ی چسب تنش‌های تورمی ایجاد می‌شود. با توجه به این که رطوبت از لایه‌های اتصال وارد لایه‌ی چسب می‌شود، میزان غلظت رطوبت در لایه‌ها بیشتر بوده، لذا کرنش تورمی بیشتری نیز در لایه‌ها نسبت به مرکز اتصال اتفاق می‌افتد. با افزایش زمان در معرض گذاری اختلاف غلظت رطوبت در نقاط مختلف چسب کاهش می‌یابد و در نتیجه تنش‌های تورمی کاهش می‌یابند، به‌طوری که در زمان 90 روز صفر می‌شوند. تنش‌های تورمی در اتصال تک لایه‌ای در زمان‌های مختلف در شکل‌های 10 و 11 نشان داده شده‌اند. فرایند کامل تخمین استحکام باقیمانده‌ی یک اتصال چسبی در معرض رطوبت با لحاظ تنش‌های تورمی در شکل 12 نشان داده شده است.



شکل 9 کرنش تورمی یک چسب پلیمری نسبت به مقدار رطوبت جذب شده [9]

جدول 8 مقایسه‌ی بار شکست آزمایشگاهی و بار شکست عددی اتصال چسبی تک لایه‌ای AL2024-T3 و SBT در شرایط خشک و در معرض رطوبت با احتساب تورم

طول اتصال (mm)	زمان (روز)	بار شکست آزمایشگاهی (kN)	بار شکست عددی با تورم (kN)	درصد خطا (%)
12/5	0	3/26	3/26	0
12/5	30	3/09	2/72	-11/97
12/5	60	2/25	2/72	20/89
12/5	90	2/25	2/72	20/89
50	0	11/7	11/7	0
50	30	11/7	9/3	-20/51
50	60	11/7	9/3	-20/51
50	90	10/7	9/3	-13/08



شکل 10 تنش‌های تورمی در اتصال تک لایه‌ای با طول اتصال 12/5 میلی‌متر در زمان‌های مختلف

5-1-1- بررسی آزمایشگاهی تورم رطوبتی

زمانی که قطعه چسب در معرض رطوبت قرار داده شده است، ضخامت آن با استفاده از میکرومتر با دقت کافی (مثلاً $\pm 0/001$ میلی‌متر) در فواصل زمانی معین اندازه‌گیری می‌شود. بهتر است که اندازه‌گیری‌ها روی یک موقعیت مکانی مشخص چسب انجام شود چرا که ممکن است اختلاف بین ضخامت‌های اندازه‌گیری شده در فواصل زمانی در محل‌های مختلف چسب متغیر باشد. برای این کار می‌توان محل مورد نظر را علامت‌گذاری نمود. با توجه به این که تورم ایزوتروپیک است، نیازی به اندازه‌گیری تمامی ابعاد نیست و می‌توان تنها به اندازه‌گیری بعد ضخامت پرداخت. با به دست آوردن اندازه‌ی ضخامت چسب در زمان‌های مختلف در معرض گذاری و داشتن مقدار رطوبت جذب شده در این زمان‌ها (بخش 2-1) می‌توان نمودار کرنش تورمی - مقدار رطوبت جذب شده را رسم نمود. بین مقدار رطوبت جذب شده و کرنش تورمی (ϵ_s) رابطه‌ی (14) برقرار است.

$$\epsilon_s = CME \times \Delta M_t \quad (14)$$

که CME ضریب انبساط رطوبتی¹ یا ضریب تورم² بوده و ΔM_t اختلاف مقدار رطوبت جذب شده بین دو زمان مختلف در معرض گذاری می‌باشد. برای به دست آوردن ضریب تورم، کافی است شیب نمودار کرنش تورمی - مقدار رطوبت جذب شده را به دست آورد. شکل 9 نمودار کرنش تورمی - مقدار رطوبت جذب شده‌ی یک چسب پلیمری را نشان می‌دهد. با توجه به شکل 9 مقدار ضریب تورم برای این چسب 0/0063/wt% است که برابر با شیب نمودار است [9].

5-2-2- مدل‌سازی عددی تورم رطوبتی

با توجه به هم‌ارزی معادلات حاکم بر انبساط حرارتی و انبساط رطوبتی (تورم)، برای مدل‌سازی کرنش‌های تورمی از تحلیل انبساط حرارتی استفاده می‌شود. برای شبیه‌سازی کرنش‌های تورمی در لایه‌ی چسب کافی است در مدل تست کشش اتصال تک لایه‌ای در قسمت تعیین ویژگی‌های چسب، مقدار ضریب انبساط حرارتی را معادل ضریب تورم چسب در نظر گرفت و توزیع درجه حرارت را معادل توزیع غلظت رطوبت در لایه‌ی چسب قرار داد. رابطه‌ی بین پارامترهای مدل ناحیه چسبناک و درصد رطوبت جذب شده با در نظر گرفتن تورم نیز با شکل 8 بیان می‌شود. در جدول 8 نیز مقادیر بار

1- coefficient of moisture expansion
2- Swelling coefficient

چسب، کاهش یا افزایش استحکام اتصال را در پی دارد به برآیند اثرات مثبت و منفی فوق‌الذکر برمی‌گردد. در این مقاله اثر تنش‌های تورمی حاصل از نفوذ رطوبت بر استحکام باقیمانده اتصال مد نظر بوده است.

6- نتیجه‌گیری

در این مقاله روش عددی بررسی اثر تخریبی رطوبت بر آسیب اتصال چسبی در معرض محیط مرطوب ارائه شده است. نتایج تحلیل‌های عددی با نتایج آزمایشگاهی محققان دیگر [14] اعتبارسنجی شده است. سایر تحلیل‌ها بر روی اتصال تک لایه‌ای SBT 9244 و AL2024-T3 با طول اتصال 12/5 و 50 میلی‌متر که در محیط با رطوبت نسبی 100% قرار گرفته، انجام شده است. کل زمان در معرض‌گذاری 90 روز بوده و نتایج آزمایشگاهی برای فاصله‌ی زمانی 30 روز می‌باشند. ابتدا تحلیل رطوبتی بر روی اتصال تک لایه‌ای با استفاده از هم‌ارزی مستقیم حرارتی - رطوبتی در نرم‌افزار آباکوس انجام شده و توزیع رطوبت در لایه‌ی چسب در زمان‌های مختلف به دست آمده است. با استفاده از روابط تحلیلی و نتایج عددی، درصد رطوبت جذب شده توسط چسب به دست آمده است.

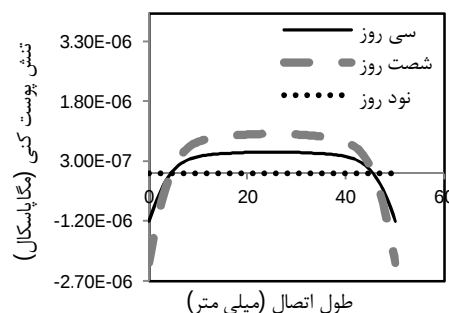
از تحلیل رطوبتی انجام شده برای بررسی استحکام اتصال در معرض رطوبت استفاده می‌شود. برای این منظور تست کشش اتصال تک لایه‌ای خشک و مرطوب با استفاده از مدل ناحیه چسبناک شبیه‌سازی شده است. برای اتصالات مرطوب با استفاده از گزینه‌ی میدان از پیش تعیین شده، توزیع غلظت رطوبت لایه‌ی چسب به عنوان شرط اولیه در تحلیل آسیب وارد می‌شود. بار شکست آزمایشگاهی برای تطابق نتایج عددی و تجربی به کار گرفته شده و پارامترهای چسبناک به‌گونه‌ای تعیین شده‌اند که بهترین تطابق بین نتایج عددی و آزمایشگاهی مشاهده شود. به‌ترتیب از معیار مربعات تنش اسمی و BK برای شبیه‌سازی شروع و رشد آسیب استفاده شده است. در نهایت پارامترهای مدل ناحیه چسبناک نرمال شده (نسبت به مقادیر متناظر در اتصال خشک) نسبت به درصد رطوبت جذب شده ارائه شده است.

از آنجایی که نفوذ رطوبت موجب تورم لایه‌ی چسب می‌شود، شبیه‌سازی فوق مجدداً با در نظر گرفتن تورم چسب بررسی شده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت تأثیر تورم در اتصال با طول بزرگ‌تر و زمان در معرض‌گذاری کم‌تر مشهودتر بود.

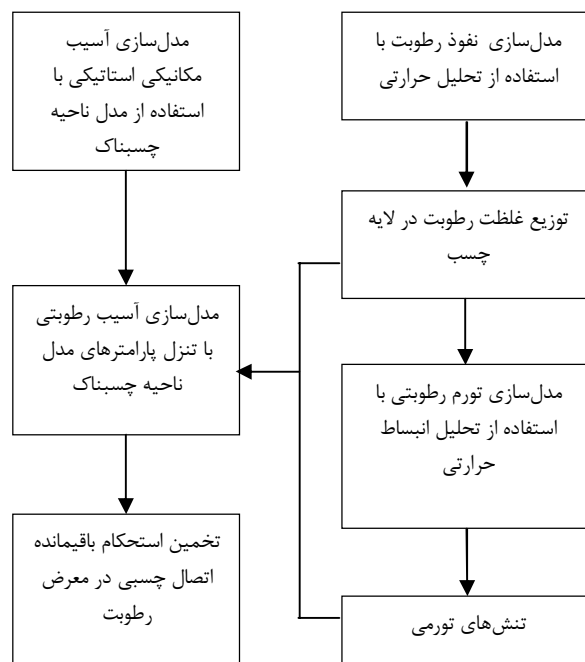
توزیع تنش پوست‌کشی و تنش برشی تورمی نیز در قسمت میانی چسب در راستای طول اتصال در زمان‌های مختلف و سطح بارگذاری ثابت با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

7- فهرست علائم

b	ضخامت (m)
c	غلظت رطوبت (kg/m^3)
c_p	گرمای ویژه (kJ/kgK)
D	ضریب نفوذ رطوبت (m^2/s)
E	مدول الاستیک (Pa)
F	شار رطوبت ($\text{kg/m}^2\text{s}$)
G	انرژی شکست (kJ/m^2)
K	سفتی (Pa/m)
L	طول اتصال (m)
M	جرم (kg)
P	فشار (Pa)



شکل 11 تنش‌های تورمی در اتصال تک لایه‌ای با طول اتصال 50 میلی‌متر در زمان‌های مختلف



شکل 12 فرایند کامل تخمین استحکام باقیمانده‌ی یک اتصال چسبی در معرض رطوبت با لحاظ تنش‌های تورمی

همان‌طور که در شکل 12 نشان داده شده است، برای تخمین استحکام باقیمانده اتصال چسبی در معرض رطوبت، ابتدا لازم است توزیع غلظت رطوبت در لایه‌ی چسب تعیین شود. سپس تنش‌های تورمی به دست آمده و پارامترهای مدل ناحیه چسبناک براساس غلظت رطوبت تنزل می‌یابد.

لازم به ذکر است نفوذ رطوبت به داخل لایه چسب می‌تواند باعث تغییراتی در رفتار مکانیکی چسب شود. از مهمترین این تغییرات، تغییرات در خواص مادی و تغییرات در توزیع تنش می‌باشد. نفوذ رطوبت به داخل لایه چسب باعث نرم‌تر شدن ماده بواسطه فرآیند نرم‌شدگی می‌شود که این امر موجب یکنواخت‌تر شدن لایه چسب گردیده و در نتیجه افزایش استحکام را در پی خواهد داشت. از طرف دیگر نفوذ رطوبت به داخل لایه چسب باعث کاهش استحکام ذاتی جنس چسب می‌گردد که این پدیده باعث کاهش استحکام اتصال می‌گردد. پدیده دیگری که در اثر نفوذ رطوبت به داخل لایه چسب اتفاق می‌افتد، ایجاد تنش‌های تورمی می‌باشد که موضوع اصلی مقاله حاضر می‌باشد. نحوه ایجاد تنش‌های تورمی که در اثر ایجاد کرنش‌های تورمی حاصل می‌شوند نیز همان‌طور که در بخش 5-2-1 توضیح داده شد باعث افزایش استحکام می‌گردد. البته این که در مجموع اثر نفوذ رطوبت در لایه

- [5] C. D. M. Liljedahl, A. D. Crocombe, M. A. Wahab, I. A. Ashcroft, Modelling the environmental degradation of adhesively bonded aluminium composite joints using a CZM approach, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 27, pp. 505-518, 2007.
- [6] A. Mubashar, I. A. Ashcroft, G. W. Critchlow, A. D. Crocombe, Modelling cyclic moisture uptake in an epoxy adhesive, *The Journal of Adhesion*, vol. 85, pp. 711-735, 2009.
- [7] A. Mubashar, I. A. Ashcroft, G. W. Critchlow, A. D. Crocombe, Moisture absorption-desorption effects in adhesive joints, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 29, pp. 751-760, 2009.
- [8] K. B. Katnam, J. P. Sargent, A. D. Crocombe, H. Khoramishad, I. A. Ashcroft, Characterisation of moisture-dependent cohesive zone properties for adhesively bonded joints, *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 77, pp. 3105-3119, 2010.
- [9] S. Sugiman, *Combined environmental and fatigue degradation of adhesively bonded metal structures*, Doctoral dissertation in Mechanical Engineering, University of Surrey, United Kingdom, 2012.
- [10] S. Sugiman, A. D. Crocombe, K. B. Katnam, Investigating the static response of hybrid fibre-metal laminate doublers loaded in tension, *Composites Part B: Engineering*, vol. 42, pp. 1867-1884, 2011.
- [11] S. Sugiman, A. D. Crocombe, I. A. Ashcroft, Experimental and numerical investigation of the static response of environmentally aged adhesively bonded joints, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 40, pp. 224-237, 2013.
- [12] L. D. Joffe, E. O. Julian, *Durability of adhesively-bonded CFRP/steel joints*, Master's Thesis in the Master's Programme Structural Engineering and Building, Chalmers University of Technology, 2013.
- [13] X. Han, A. D. Crocombe, S. N. R. Anwar, P. Hu, The strength prediction of adhesive single lap joints exposed to long term loading in a hostile environment, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 90, pp. 420-436, 2014.
- [14] S. Temiz, A. Özel, M. D. Aydin, A study on durability of joints bonded with pressure-sensitive adhesives, *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 18, pp. 1187-1198, 2004.
- [15] J. Crank, *The Mathematic of diffusion*, Oxford University Press, London 1975.
- [16] S. Yoon, B. Han, Z. Wang, On moisture diffusion modeling using thermal-moisture analogy, *Journal of Electronic Packaging*, vol. 129, pp. 421-426, 2007.
- [17] W. R. Vieth, Diffusion in and through polymers: principles and applications, *Hanser Publishers*, 1991.
- [18] M. M. Shokrieh, M. Salamat-Talab, M. Heidari-Rarani, Numerical analysis of mode I delamination growth in laminated DCB specimens using cohesive zone models, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No 1, p.p. 38-48. 2013. (In Persian).
- [19] B. Mohammadi, D. Salimi-Majd, M. H. Ali-Bakhshi, Analysis of composite skin/stringer debonding and failure under static loading using cohesive zone model, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No 10, p.p. 17-25. 2014. (In Persian).
- [20] ABAQUS 6.4, Analysis users manual, section 6.8.1.
- [21] M. J. Adamson, Thermal-expansion and swelling of cured epoxy-resin used in graphite-epoxy composite materials, *Journal of Materials Science*, vol. 15, pp. 1736-1745, 1980.
- [22] M. R. Vanlandingham, E. F. Eduljee, J. W. Gillespie, Moisture diffusion in epoxy system, *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 71, pp. 787-798, 1999.
- [23] G. Z. Xiao, M. E. R. Shanahan, Swelling of DGEBA/DDA epoxy resin during hygrothermal ageing, *Polymer*, vol. 39, pp. 3253-3260, 1998.

رطوبت نسبی	RH
حل‌شوندگی ($\text{Kg m}^{-3} \text{Pa}^{-1}$)	S
زمان (s)	t
استحکام چسبناک (Pa)	T
حجم (m^3)	V
وزن (N)	W
علائم یونانی	
پارامتر مادی در معیار BK	η
دما ($^{\circ}\text{C}$)	θ
ضریب رسانش حرارتی (W/Km)	κ
ضریب پواسون	ν
عدد پی	π
چگالی (kg/m^3)	ρ
کشش (Pa)	σ
غلظت اصلاح شده (Pa)	φ
بالانویس‌ها	
بحرانی	C
زیرنویس‌ها	
چسب	adh
متوسط	avg
خشک	Dry
آب	H_2O
راستای عمودی	n
راستای برشی اول	s
اشباع	sat
راستای برشی دوم	t
بخار	vp

8- مراجع

- [1] M. R. Bowditch, The durability of adhesive joints in the presence of water, *International Journal of Adhesion and Adhesives*. Vol. 16, p.p. 73-79, 1996.
- [2] A. Mubashar, *Modelling degradation in adhesive joints subjected to fluctuating service conditions*, Doctoral dissertation in Mechanical Engineering, Loughborough University, 2010.
- [3] W. K. Loh, A. D. Crocombe, M. M. Abdel Wahab, I. A. Ashcroft, Modelling anomalous moisture uptake, swelling and thermal characteristics of a rubber toughened epoxy adhesive, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 25, pp. 1-12, 2005.
- [4] C. D. M. Liljedahl, A. D. Crocombe, M. A. Wahab, I. A. Ashcroft, Modelling the environmental degradation of the interface in adhesively bonded joints using a cohesive zone approach, *The Journal of Adhesion*, vol. 82, pp. 1061-1089, 2006.