



بررسی اثر شکل و تعداد موج بر استحکام بخشی اتصالات چسبی موج دار

فیاض نصوحی دهنوی¹، محمدرضا فراهانی^{2*}، مهدی انصاری³

1- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران

2- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران

3- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* تهران، صندوق پستی 1439957131، mrfarahani@ut.ac.ir

کلیدواژگان

اتصال چسبی
لبه موجی
مدل ناحیه چسبنده

چکیده

افزایش استحکام اتصالات چسبی، گسترش استفاده از آن‌ها را در پی داشته است. هندسه موجی در لبه اتصال یک روش برای افزایش استحکام در اتصالات صفحات با ضخامت کم است. در این مقاله تأثیر هندسه موجی بر استحکام اتصال چسبی مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش از چسب آرالادیت 2015 که یک چسب دوجزئی خشک شونده در دمای اتاق است استفاده شد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد اتصال با لبه موجی در مقایسه با اتصال تخت بیش از 35% افزایش استحکام داشته است. در ادامه برای بررسی بیشتر اتصال با لبه موجی از شبیه سازی المان محدود استفاده شده است. در این شبیه سازی رفتار چسب بر اساس مدل ناحیه چسبنده در نظر گرفته شد. با استفاده از نتایج المان محدود تأثیر پارامترهای تعداد موج و شکل موج بر استحکام اتصال مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده از المان محدود در هماهنگی کامل با نتایج حاصل از بررسی های تجربی جهت افزایش استحکام اتصالات چسبی موجی می باشد.

Investigation on the effect of wave shape and number on the strengthening of wavy adhesive joints

Fayyaz Nosouhi¹, Mohammadreza Farahani^{1*}, Mahdi Ansari³

1- School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

3- Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Moddares University, Tehran, Iran

* P.O.Box. 1439957131, Tehran. Iran. Email: mrfarahani@ut.ac.ir

Keywords

Adhesive joint
Wavy edge
Cohesive zone model

Abstract

Increasing in the adhesive joint strength is followed by expanding on its application. Employment of wavy edge configuration in comparison to the traditional single lap joint is a one way to increase the adhesive joint strength with thin adherent. In this paper the effects of wavy configuration on the strength of the wavy joints were studied. Araldite 2015 was employed in this study. Araldite 2015 is a two component, room temperature curing paste adhesive giving a resilient bond. It was observed that the wavy joints have more strength than the single lap joint about 35%. For more investigation, a 3D finite element model was developed. In this study the cohesive zone model (CZM) was used for simulating the adhesive behavior. The effects of wave shape and number on the strengthening of wavy joints were studied. The finite element results were in good accordance with the experimental outcomes for the strengthening of wavy edges.

1- مقدمه

پیدا کرده است. مهم‌ترین مزیت استفاده از چسب‌ها در متصل کردن اجزای مختلف، کاهش وزن سازه، توزیع یکنواخت تنش در اتصال و عدم تمرکز تنش است. مهم‌ترین عامل محدود کننده در استفاده از اتصالات چسبی نیز استحکام مکانیکی کمتر آن‌ها نسبت به سایر اتصالات می‌باشد.

استفاده از اتصالات در سازه‌ها اجتناب‌ناپذیر است. اتصالات مکانیکی مانند پیچ و مهره، پرچ، جوشکاری و لحیم‌کاری رایج ترین اتصالات سازه‌ای هستند. استفاده از اتصالات چسبی نیز با گسترش صنایع شیمیایی و تولید چسب‌های مستحکم افزایش

Please cite this article using:

F. Nosouhi, M.R. Farahani, M. Ansari, Investigation on the effect of wave shape and number on the strengthening of wavy adhesive joints, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 2, No. 3, pp. 37-44, 2015 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

قرار گرفته اند. هندسه موجی توسط ژنگ و سان ارائه شد. این هندسه در مقایسه با اتصال تخت استحکام بیشتری از خود نشان داد. تحقیق آن‌ها همچنین نشان داد میزان افزایش اتصال در کامپوزیت‌ها به جهت گیری الیاف در لبه اتصال بستگی دارد [13]. در مقاله‌ای دیگر از همین محققین اتصال لبه موجی تحت بار خستگی مورد مطالعه قرار گرفت و به مقایسه رفتار آن با اتصال تخت پرداخته شد [14]. سال 2004 اونا و بوینو به بررسی اتصال موجی و مقایسه آن با اتصال تخت پرداختند [15]. در مقالات دیگری نیز به بررسی اتصالاتی مشابه با اتصال لبه موجی پرداخته شده است [16-18]. در این مقاله سعی شده تا با انجام آزمایش‌های تجربی و استفاده از مدل ناحیه چسبیده و شبیه‌سازی المان محدود به بررسی اثر پارامترهای هندسی بر استحکام اتصال لبه موجی پرداخته شود.

2- بررسی تجربی اتصال چسبی لبه موج‌دار

2-1- نمونه‌سازی

در این پژوهش برای ساخت کامپوزیت از روش لایه‌گذاری دستی استفاده شده است. برای ساخت نمونه‌های موجی قالب‌هایی از جنس گچی ساخته شدند. روال ساخت قالب این‌گونه بود که ابتدا شکل قالب موردنظر در نرم‌افزار کتیا رسم و نقشه‌های قالب‌های موردنیاز تهیه شد. سپس با استفاده از دستگاه برش لیزر شابلون‌هایی مطابق با پروفیل اکستروژن شده قالب‌ها بر روی ورق‌های پلکسی به ضخامت 4 mm تهیه شد. لازم به ذکر است که برای هر قالب دو شابلون تهیه شد. سپس شابلون‌ها را به دو لبه روبرویی یک فیکسچر چسبانده و بین شابلون‌ها را با گچ قالب‌گیری می‌کنیم و با کمک شابلون‌ها و استفاده از یک خط‌کش فلزی سطح گچ را به شکل نهایی قالب موردنظر درمی‌آوریم. این یک روش سریع، مؤثر، با دقت قابل‌قبول و درعین‌حال ارزان برای ساخت قالب نمونه‌های موجی است که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفت.

نمونه‌ها از الیاف 200 gr/m^2 با اعمال فشار یکنواخت بر روی قطعه ساخته شده‌اند. رزین مورد استفاده برای ساخت کامپوزیت یک اپوکسی ترموست با نام تجاری RL440/HY441 است و جدول 1 خواص رزین مورد استفاده جهت ساخت نمونه‌های کامپوزیتی را طبق کاتالوگ سازنده نشان می‌دهد. پس از پایان مرحله لایه گذاری پنل‌ها پخت رزین به مدت 48 ساعت در دمای اتاق انجام شده است.

مدل‌سازی‌های ریاضی شرایط را برای مطالعه بهتر جهت بهبود استحکام اتصالات چسبی فراهم می‌آورد. تلاش‌های بسیاری برای تحلیل اتصالات چسبی تا کنون انجام شده است. از اولین مدل‌های تحلیلی ارائه شده می‌توان به مدل ولکرسن در سال 1938 اشاره کرد. در این مدل که تنش برشی لنگ¹ نام دارد تأثیر تغییر شکل الاستیک چسبنده‌ها و ایجاد تمرکز تنش در لبه‌های اتصال در نظر گرفته شده بود [1]. گولاند و ریسینر در مدلی تحلیلی تأثیر تنش در راستای ضخامت را در تحلیل چسب به کار بردند [2]. مدل‌های تحلیل هرچند ابزاری ارزشمند در درک بیشتر ما از رفتار اتصالات چسبی داشتند اما در تحلیل مسائل پیچیده‌تر مانند انواع هندسه چسبی یا در نظر گرفتن رفتار پلاستیک چسبنده‌ها توانایی لازم را نداشتند. امروزه روش‌های المان محدود برای حل این‌گونه مسائل گسترش یافته است. تحقیق هریس و آدامز یکی از اولین تحلیل‌های المان محدود اتصالات چسبی بود [3]. استفاده از معیارهای مرسوم تنش یا کرنش نهایی برای پیش‌بینی استحکام اتصالات چسبی به‌وفور استفاده شده است. اما در این روش‌ها به دلیل وجود نقاط تکین در لبه‌های اتصال تحلیل به‌اندازه مش در این نقاط وابسته است. یکی از جدیدترین رهیافت‌ها برای تحلیل اتصالات چسبی مدل ناحیه چسبیده است. کامانهو در سال 2002 فرمولاسیونی برای پیش‌بینی جدا لایگی در کامپوزیت‌های پایه پلیمری بر اساس مدل ناحیه چسبیده ارائه داد. در این مدل چسب به‌صورت المان‌های صفحه‌ای بدون ضخامت بین المان‌های سه بعدی کامپوزیت مدل شد. رفتار این المان‌ها به این گونه است که با افزایش نیرو تا یک نقطه مشخص نیرو را تحمل می‌کنند اما پس از آن متناسب با جابجایی خواص مکانیکی آن‌ها افت می‌کند [4]. انواع روابط ساختاری برای پیش‌بینی رفتار چسب طبق مدل ناحیه چسبیده مورد استفاده قرار گرفته است [5,6]. ضعف اتصال در سازه عامل محدود کننده مهمی در استفاده از اتصالات چسبی است. روش‌های متنوعی برای استحکام بخشی اتصالات چسبی پیشنهاد شده است. استفاده از پودر نانو [7,8] و استفاده از سیم‌های فلزی [9] در فصل مشترک اتصال کارهایی بوده که برای تقویت چسب انجام شده است. افزایش استحکام با اصلاح هندسه نیز همواره مورد توجه بوده است. انواع هندسه‌های پله‌ای [10]، شیب دار [11] و شیب‌دار دوطرفه [12] مورد تحلیل و بررسی

¹ Shear lag model



Fig. 3 Prepared Specimens and tension test

شکل 3 آماده سازی نمونه‌ها و تست کشش

3- تأثیر و تحلیل المان محدود اتصال چسبی لبه موج دار 3-1- تئوری مدل ناحیه چسبیده

در این پژوهش برای مدل‌سازی رفتار شکست چسب از مدل ناحیه چسبیده استفاده شده است. در مدل ناحیه چسبیده رفتار رشد ترک با قانون کشش-جدایش² (TSL) که رابطه بین تنش و جابجایی دو سطح چسبیده را نشان می‌دهد، بیان می‌شود. ساده‌ترین نوع این قانون نوع مثلی است که در شکل 4 نشان داده شده است. این قانون برای هر سه مد شکست در اتصالات چسبی به کار گرفته می‌شود. این سه مد به صورت شماتیک در شکل 5 نشان داده شده است. پس از اعمال بار به اتصال (در هر مد) ابتدا تنش در آن تا یک نقطه بیشینه افزایش پیدا می‌کند. با ادامه بارگذاری پس از نقطه ماکزیمم تنش، اتصال دچار آسیب³ شده و به تدریج استحکام آن تا صفر کاهش می‌یابد.

به ترتیب استحکام نهایی در مد یک، دو و سه، t_t^0, t_s^0, t_n^0 شروع آسیب در مد یک، دو و سه $\delta_0^t, \delta_0^s, \delta_0^n$ جابجایی تا نقطه شکست نهایی در اتصال در مدهای یک، دو و سه است. G_t^c, G_s^c, G_n^c نیز نرخ بحرانی آزاد سازی انرژی در مد یک، دو و سه هستند و مقادیر آنها برابر سطح زیر نمودار TSL است. رابطه تنش با کرنش برای مسائل سه بعدی در این قانون مطابق فرمول (1) است [21]:

$$t = \begin{bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & K_{nt} & K_{ns} \\ K_{tn} & K_{tt} & K_{ts} \\ K_{sn} & K_{st} & K_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_n \\ \delta_t \\ \delta_s \end{bmatrix} = K\delta \quad (1)$$

² Traction-separation Law (TSL)

³ Damage

پس از ساخت نمونه‌ها پنل‌های کامپوزیتی با استفاده از تیغه برش و دستگاه فرز بریده شدند. از چسب آرالدیت¹ 2015 که یک چسب نرم محسوب می‌شود استفاده شده است. مراحل آماده‌سازی بر طبق توصیه‌های شرکت سازنده چسب و استانداردهای ASTM-D 2093 و ASTM-D 5868 انجام شده است. [۱۹،۲۰]. در شکل 1 ابعاد هندسی نمونه لبه موج دار مورد بررسی در این پژوهش به صورت شماتیک نشان داده شده است (ابعاد به میلی‌متر). قسمت موج دار به صورت موج سینوسی با دامنه 2 mm است.

2-2- انجام تست کشش

به منظور بررسی استحکام اتصال با لبه موجی دو هندسه مختلف اتصال موجی که در این مقاله اتصال مستقیم و معکوس نامیده شده اند مورد بررسی قرار گرفتند (شکل 2). این نمونه‌ها مطابق با شکل 3 آماده شدند و سپس با انجام آزمون تجربی استحکام کششی آنها با اتصال تخت مورد مقایسه قرار گرفت.

جدول 1 خواص رزین اپوکسی.

Table 1 Resin Epoxi properties

ویژگی (واحد)	مقدار
چگالی ترکیبی (gr/cm ³)	1/1
نسبت ترکیبی وزنی هاردنر	20%
استحکام کششی (MPa)	50
استحکام فشاری (MPa)	70

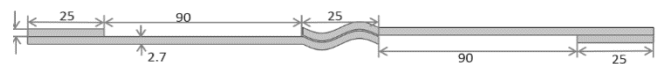


Fig. 1 Dimensions of wavy specimen (mm)

شکل 1 ابعاد نمونه موجی (میلی‌متر)

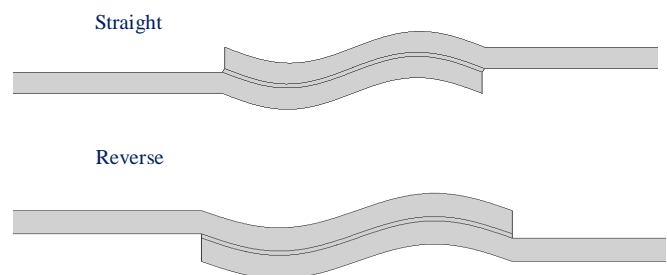


Fig. 2 Wavy specimen with straight and reverse geometry

شکل 2 نمونه اتصال موجی با هندسه مستقیم و معکوس

¹ Araldite 2015

صورت ارتوتروپ و چسب نیز به صورت المان های سالیید چسبی مدل شدند.

خواص کامپوزیت که از تست کششش بدست آمده در جدول 2 و خواص مدل ناحیه چسبنده مطابق با تست های استاندارد انجام شده در جدول 3 نشان داده شده است.

4- بحث و تحلیل نتایج

4-1- بررسی اثر شکل هندسی لبه موجی

شکل 6 نمودار نیرو-جابجایی حاصل از بررسی تجربی و شبیه سازی عددی را برای سه اتصال مستقیم، اتصال معکوس و نمونه تک لبه برای چسب آرال دیت 2015 نشان می دهد. خلاصه نتایج حاصل از تست کشش در نمودار شکل 6 جهت مقایسه ارائه شده اند. همانگونه که مشاهده می شود تطابق بسیار خوبی بین نتایج تجربی و عددی به ویژه تا قبل از رسیدن به نقطه بار ماکزیمم دیده می شود. نشان می دهد که برای اتصال معکوس استحکام اتصال حدود 40% در مقایسه با اتصال تخت افزایش داشته است. در اتصال مستقیم استحکام نه تنها افزایش نداشته است بلکه اندکی نیز کاهش داشته است. اما جابجایی تا نقطه شکست بیشتر از دو نوع دیگر اتصال است. جدول 4 نیروی ماکزیمم اتصال بدست آمده از تست تجربی و شبیه سازی و نسبت آن را نشان می دهد.

جدول 2 خواص کامپوزیت الیاف شیشه-اپوکسی

خواص	کامپوزیت شیشه اپوکسی
E1	12 GPa
E2	11.2 GPa
E3=0.6*E1	7.2 GPa
v12	0.16
v23=v13=0.6*v12	0.1
G12	2.3 GPa
G23=G13=0.6*G12	1.38 GPa

جدول 3 خواص چسب آرال دیت 2015

خواص	چسب Araldite 2015
استحکام نهایی در مد 1	35 MPa
استحکام نهایی در مد 2 و 3	18 MPa
نرخ آزاد سازی انرژی بحرانی در مد 1	4000 N/m
نرخ آزاد سازی انرژی بحرانی در مد 2 و 3	4700 N/m
مدول الاستیک	1/85 GPa
مدول برشی	0/56 GPa

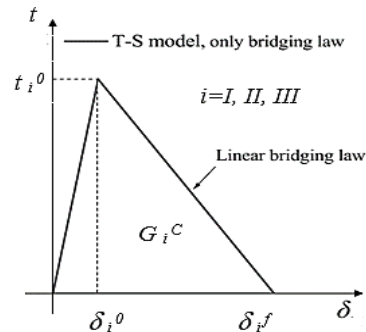


Fig. 4 Traction separation diagram

شکل 4 نمودار کشش- جدایش (TSL)

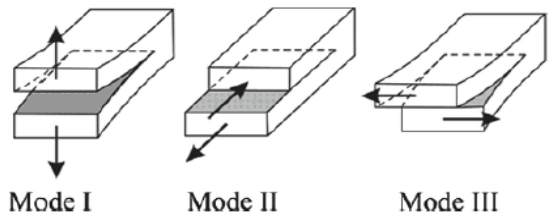


Fig. 5 Different crack growth modes

شکل 5 مدهای مختلف رشد ترک

در اغلب موارد شکست در اتصال، ترکیبی از مدهای سه گانه است. مشابه فرمول های کلاسیک تنش که تنش معادل ترکیبی از تنش های برشی و تنش های نرمال است در اینجا نیز لازم است تا اثر هر سه مد به صورت ترکیبی در نظر گرفته شود. بر این اساس شروع آسیب اغلب مطابق فرمول (2) در نظر گرفته می شود:

$$\left(\frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0}\right)^2 + \left(\frac{t_s}{t_s^0}\right)^2 + \left(\frac{t_t}{t_t^0}\right)^2 = 1 \quad (2)$$

علامت < > نمایانگر این است که تنش فشاری در مد یک تأثیری بر شروع آسیب ندارد. پس از آغاز آسیب، گسترش آسیب و افت خواص مکانیکی شروع می شود. در واقع وقتی مقدار سمت چپ رابطه 3 برابر یک شود خواص مکانیکی ماده مورد بررسی صفر می شود و ماده دیگر قادر به تحمل نیرو نیست که در اتصال چسبی می توان آن را به گسیختگی موضعی اتصال تعبیر کرد:

$$\left(\frac{G_n}{G_n^c}\right)^2 + \left(\frac{G_s}{G_s^c}\right)^2 + \left(\frac{G_t}{G_t^c}\right)^2 = 1 \quad (3)$$

3-2- شبیه سازی المان محدود

به منظور بررسی رفتار اتصال چسبی لبه موجی مدل المان محدود اتصال چسبی در نرم افزار آباکوس¹ به صورت سه بعدی مدل شد. در این مدل چسبنده ها از جنس کامپوزیت و به

1 ABAQUS

برشی در اتصال تخت کمتر است. در اتصال تخت تنش برشی بین 14-16 MPa، در اتصال مستقیم بین 0-12 MPa و در اتصال معکوس بین 4-12 MPa است. البته لازم به ذکر است که برای نمونه اتصال معکوس تنش برشی حداکثر در میانه اتصال چسبی مشاهده می‌شود که در آنجا تنش نرمال مقدار کمی دارد. در اتصال تخت، ماکزیمم تنش نرمال در لبه‌ها اتفاق افتاد. تنش نرمال ماکزیمم در اتصال تخت و اتصال معکوس برابر 13 MPa و اتصال مستقیم این مقدار برابر 22 MPa بود. در مقابل در اتصال Revers تنش نرمال در لبه‌ها فشاری بوده و برابر با 13 MPa می‌باشد. لذا از این منظر میزان استحکام سه نوع اتصال قابل توجه است که با توجه به بالاتر بودن میزان تنش نرمال در اتصال مستقیم در یک جابجایی یکسان نسبت به دو نوع اتصال دیگر، آغاز سریع‌تر گسیختگی در این اتصال را شاهد هستیم. در مقایسه اتصال معکوس و اتصال تخت باید گفت از آنجایی که تنش نرمال در نمونه معکوس در لبه‌ها فشاری هستند، این تنش‌ها نقشی در آغاز آسیب ندارند و همچنین میزان متوسط تنش برشی در اتصال تخت نسبت به اتصال معکوس بیشتر است لذا انتظار تحمل نیروی بیشتری از اتصال معکوس نسبت به اتصال تخت می‌رود.

جدول 4 بار ماکزیمم برای هر نوع اتصال

Table 4 Maximum load for each joint type

$F_{Max}^{Sim} / F_{Max}^{Exp}$			نمونه
1.03	6.51	6.73	Flat joint
0.99	6.35	6.34	Wavy-Straight
0.98	9.12	8.94	Wavy-Reverse

2-4- بررسی اثر تعداد موج در لبه اتصال

در این بخش به منظور بررسی تأثیر تعداد موج در طول لبه اتصال مدل المان محدود دو نمونه با یک و یک و نیم موج سینوسی مطابق شکل 9 ایجاد شد. با توجه به عملکرد بهتر نمونه موجی معکوس نسبت به نمونه موجی مستقیم، برای مقایسه از نمونه موجی معکوس استفاده شد.

شکل 10 نمودار نیرو جابجایی برای سه نوع اتصال تخت، اتصال لبه موجی با یک موج و اتصال لبه موجی با یک و نیم موج را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود با افزایش تعداد موج از یک به یک و نیم موج، باربری اتصال حدود 3% افزایش داشته که این افزایش در مقایسه با دشواری ساخت اتصال با یک و نیم موج چندان قابل توجه نمی‌باشد. شکل 11 نمودار تنش نرمال و تنش برشی را در طول لبه اتصال در چسب نشان می‌دهد.

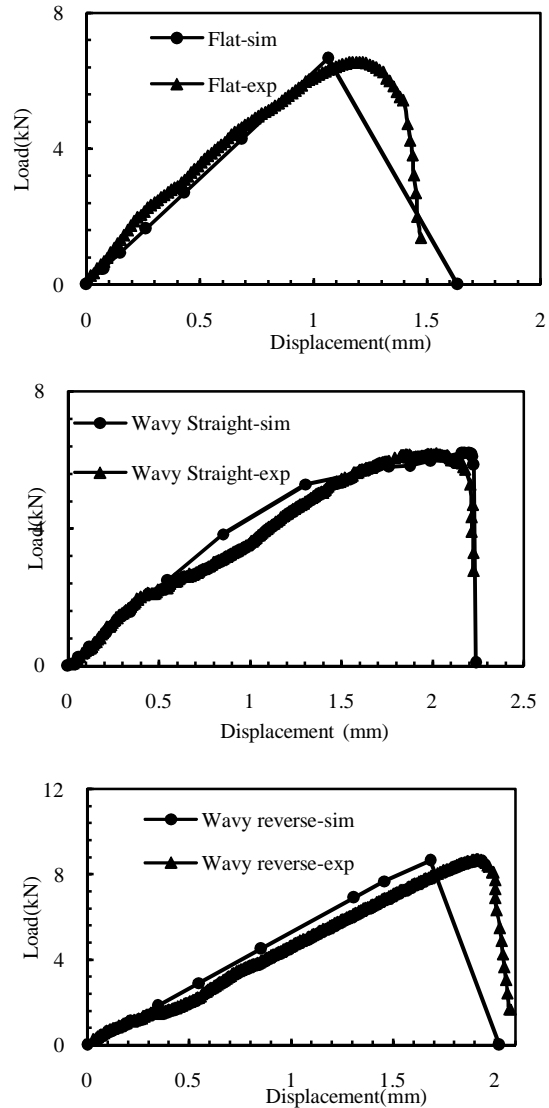


Fig. 6 Load-Displacement curve for three joint types

شکل 6 نمودار نیرو جابجایی برای سه نوع اتصال

همانطور که در جدول 4 دیده می‌شود، حداکثر اختلاف مشاهده شده بین نتایج تجربی و نتایج تحلیل عددی حدود 3% می‌باشد که این مساله دقت بالای مدل عددی را اثبات می‌نماید. در ادامه در شکل 7 کانتورهای توزیع تنش‌های طولی و نرمال و تنش برشی در اتصال تخت برای چسب و چسبده نشان داده شده است. مطابق با شکل تنش در لبه‌های چسب ماکزیمم است و به همین دلیل گسیختگی از این نقطه آغاز می‌شود.

همانگونه که در نمودار تنش برشی در شکل 8 برای اتصال معکوس نیز نشان داده شده است ماکزیمم تنش برشی در این اتصال بر خلاف اتصال مستقیم و اتصال تخت در مرکز اتصال و برابر 12 MPa است که حدود 25 درصد از ماکزیمم تنش

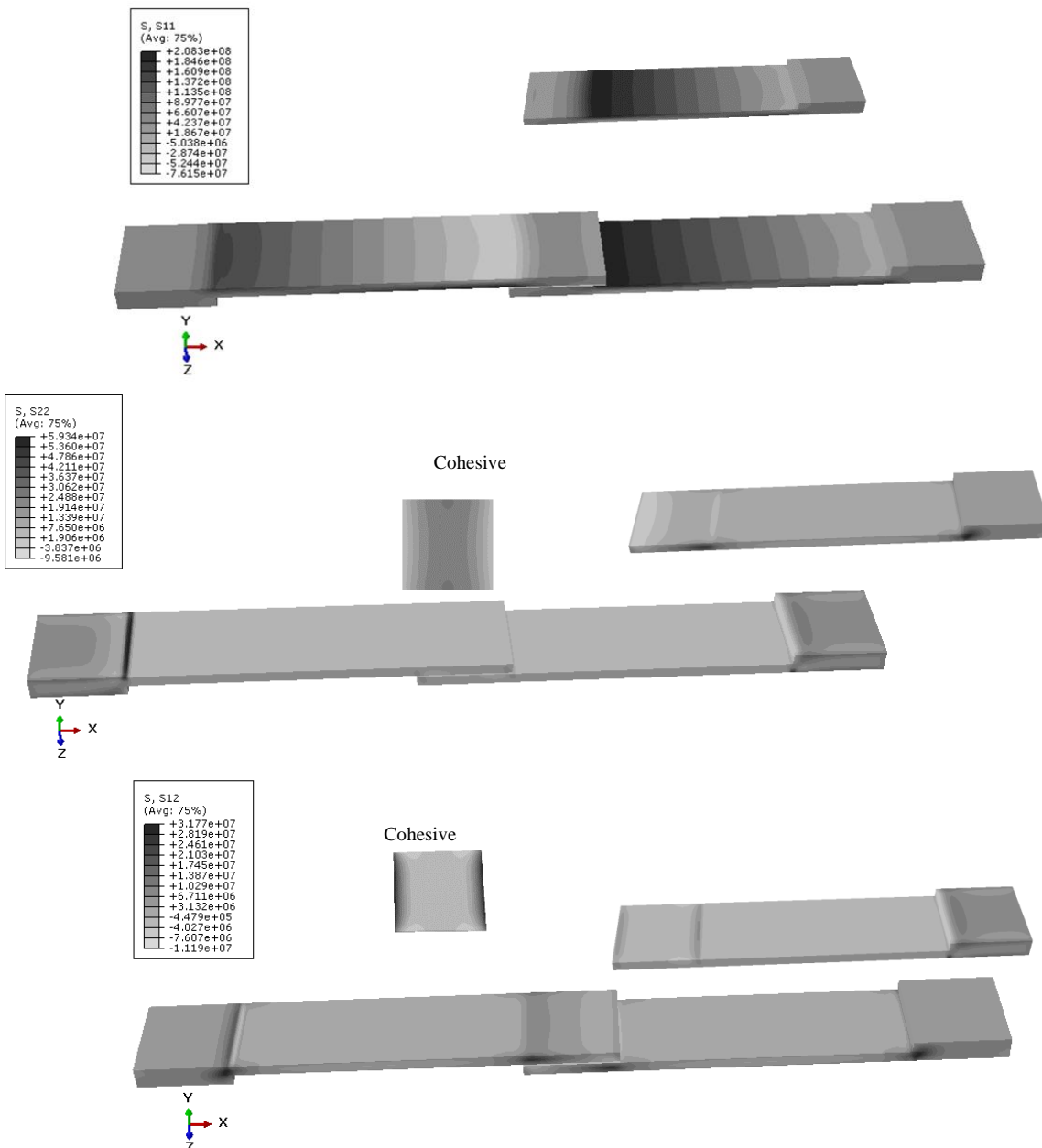


Fig. 7 Distribution of longitudinal, normal and shear stress in the adhesive joint.

شکل 7 توزیع تنش‌های طولی، نرمال و تنش برشی در اتصال چسبی

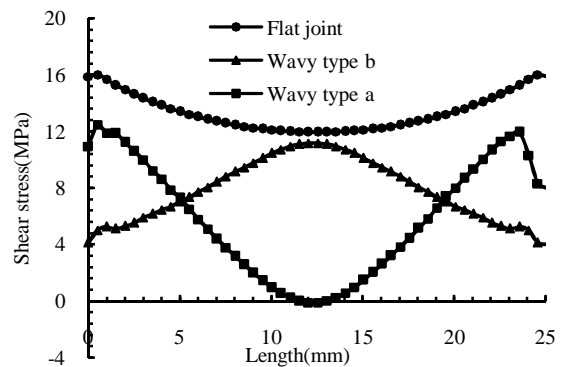
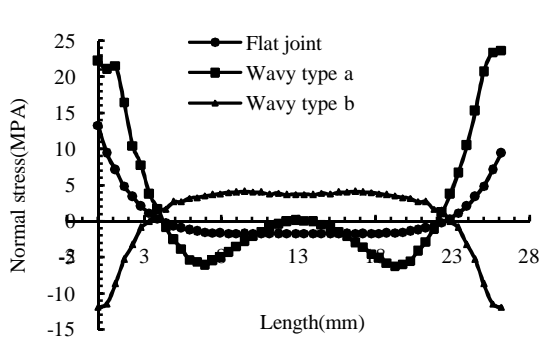


Fig. 8 Normal and shear stress for three joint type

شکل 8 نمودارهای تنش نرمال و برشی برای سه نوع اتصال

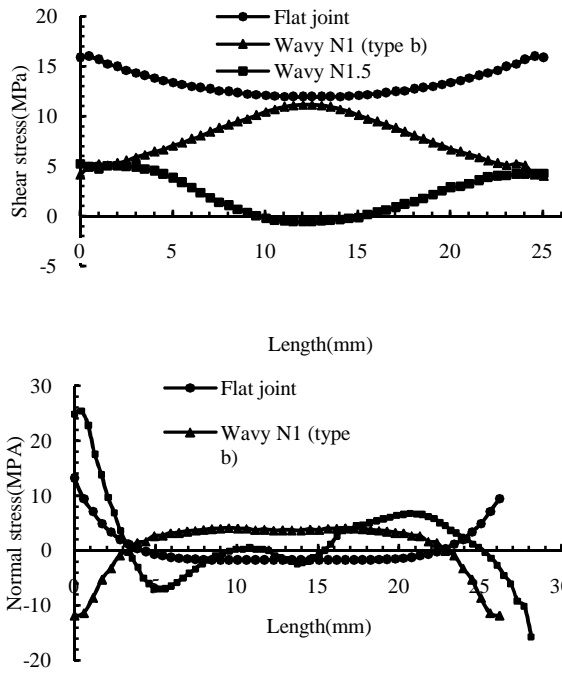


Fig. 11 Normal and shear stress for Flat, 1.0 wave and 1.5 wave edges
 شکل 11 تنش نرمال و برشی برای سه اتصال تخت، یک موج و یک و نیم موج



Fig. 9 Adhesive joint with 1.5 waves

شکل 9 اتصال چسبی با یک و نیم موج

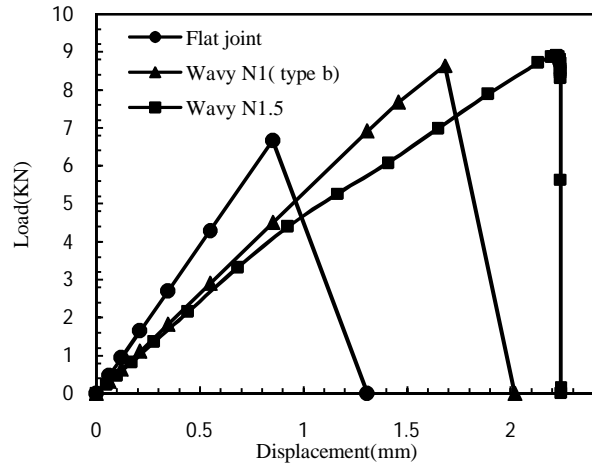


Fig. 10 Load displacement curves for Flat, 1.0 wave and 1.5 wave edges

شکل 10 نمودار نیرو جابجایی برای سه اتصال تخت، یک موج و یک و نیم موج

در ادامه برای بررسی تأثیر تعداد موج بر استحکام اتصال سه نمونه اتصال شامل اتصال تخت، اتصال با یک موج (اتصال معکوس) و اتصال با یک و نیم موج نیز مورد بررسی قرار گرفتند. خلاصه نتایج این تحقیق عبارتند از:

- مدل المان محدود ایجاد شده در این پژوهش با استفاده از تئوری مدل ناحیه چسبنده می‌تواند با دقت 3% بار ماکزیم شکست در نمونه های اتصال چسبی را پیش‌بینی نماید.

- بررسی تجربی و عددی نشان داد که در لبه موجی با هندسه معکوس که لبه های اتصال تحت فشار قرار می‌گیرند، استحکام اتصال تا 32% نسبت به استحکام اتصال تخت افزایش می‌یابد.

- بررسی توزیع تنش در طول اتصال نشان داد که ایجاد تنش های نرمال فشاری و کاهش تنش های برشی در لبه های اتصال معکوس، عامل اصلی افزایش استحکام در این اتصال نسبت به اتصال تخت است.

- در بررسی تجربی، استحکام اتصال موجی از نوع مستقیم کمتر از استحکام نمونه تخت دیده شد. بررسی‌های عددی نشان داد که ایجاد تنش های نرمال کششی بالاتر از نمونه های لبه تخت، عامل کاهش استحکام در این نوع اتصال است.

- نتایج بررسی‌های عددی نشان می‌دهد که با افزایش تعداد موج در لبه اتصال از یک به یک و نیم موج، استحکام اتصال تنها

نکته قابل توجه در اتصال با یک و نیم موج تمرکز تنش شدید حول لبه اتصال به دلیل تغییر فرم شدید پروفیل اتصال است. گسیختگی در این اتصال از طرف چپ اتصال که تنش‌های نرمال، کششی هستند آغاز می‌شود. نمودار تنش نرمال در شکل 11 نشان می‌دهد که تنش در سمت چپ اتصال یک و نیم موج بسیار بیشتر از تنش نرمال در موقعیت مشابه در دو نوع اتصال دیگر است. توزیع نامتقارن تنش و تنش کششی بزرگ در طرف چپ اتصال باعث آغاز آسیب زودهنگام در این اتصال شده است. با افزایش تعداد موج در لبه اتصال انتظار افزایش استحکام اتصال می‌رود اما همانگونه که مشاهده می‌شود افزایش تمرکز تنش در اتصال منجر می‌شود که هندسه با یک و نیم موج علیرغم پیچیدگی بیشتر لبه از منظر ساخت، اثر افزایش چشم‌گیری بر روی استحکام اتصال نداشته باشد.

5- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی عددی و تجربی استحکام بخشی اتصالات چسبی با ایجاد لبه موج‌دار پرداخته شده است. بدین منظور چسبنده‌هایی از جنس کامپوزیت شیشه-اپوکسی با استفاده از چسب آرالدیت 2015 به هم متصل شدند. استحکام کششی دو هندسه اتصال لبه موجی پیشنهادی با استحکام اتصال نمونه تخت به صورت تجربی و عددی مقایسه شد.

- Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 55, pp. 114-122, 2014.
- [10] S. Akpınar, The strength of the adhesively bonded step-lap joints for different step numbers, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 67, pp. 170-178, 2014.
- [11] H. Nakano, Y. Omiya, Y. Sekiguchi, and T. Sawa, Three-dimensional FEM stress analysis and strength prediction of scarf adhesive joints with similar adherends subjected to static tensile loadings, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 54, pp. 40-50, 2014.
- [12] L. Liao, T. Sawa, and C. Huang, Numerical analysis on load-bearing capacity and damage of double scarf adhesive joints subjected to combined loadings of tension and bending, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 53, pp. 65-71, 2014.
- [13] Q.-G. Zeng and C. Sun, Novel design of a bonded lap joint, *AIAA journal*, Vol. 39, pp. 1991-1996, 2001.
- [14] Q. Zeng and C. Sun, Fatigue performance of a bonded wavy composite lap joint, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 27, pp. 413-422, 2004.
- [15] A. F. Avila and P. n. d. O. Bueno, An experimental and numerical study on adhesive joints for composites, *Composite structures*, Vol. 64, pp. 531-537, 2004.
- [16] G. Fessel, J. Broughton, N. Fellows, J. Durodola, and A. Hutchinson, Evaluation of different lap-shear joint geometries for automotive applications, *International journal of adhesion and adhesives*, Vol. 27, pp. 574-583, 2007.
- [17] B. Haghpanah, S. Chiu, and A. Vaziri, Adhesively bonded lap joints with extreme interface geometry, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 48, pp. 130-138, 2014.
- [18] M. Ashrafi, A. Ajdari, N. Rahbar, J. Papadopoulos, H. Nayeb-Hashemi, and A. Vaziri, Adhesively bonded single lap joints with non-flat interfaces, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 32, pp. 46-52, 2012.
- [19] ASTM, Standard Test Method for Lap Shear Adhesion for Fiber Reinforced Plastic (FRP) Bonding, Vol. 15.06 Adhesives, D5868, ed, 2012.
- [20] ASTM, Standard Practice for Preparation of Surfaces of Plastics Prior to Adhesive Bonding1, Vol. 15.06 Adhesives, D2093, ed, 2012.
- [21] Konstantinos Anyfantis, *Analysis and Design of Composite-to-Metal Adhesively Bonded Joints*, PhD Thesis, School of Naval Engineering, University of Athens, Athens, Greece, 2010.
- 3% افزایش پیدا می‌کند. این میزان اندک افزایش استحکام درحالیست که ساخت این نمونه‌ها به مراتب مشکل‌تر از نمونه‌های با یک موج در لبه می‌باشد.
- بزرگی ماکزیمم تنش برشی در نمونه با یک و نیم موج حدودا برابر با اتصال با یک موج می‌باشد. این درحالیست که در یک سمت اتصال چسبی، تنش نرمال در اتصال با یک و نیم موج به مراتب بالاتر از تنش در اتصال یک موج و اتصال تخت است. توزیع نامتقارن تنش در این اتصال باعث گسیختگی زودهنگام اتصال از یک طرف می‌شود.

6- مراجع

- [1] O. Volkersen, Rivet strength distribution in tensile-stressed rivet joints with constant cross-section, *Luftfahrtforschung*, Vol. 15, pp. 41-47, 1938.
- [2] M. Goland and E. Reissner, The stresses in cemented joints, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 11, pp. A17-A27, 1944.
- [3] J. Harris and R. Adams, Strength prediction of bonded single lap joints by non-linear finite element methods, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 4, pp. 65-78, 1984.
- [4] P. P. Camanho and C. G. Dávila, Mixed-mode decohesion finite elements for the simulation of delamination in composite materials, *NASA-Technical Paper*, Vol. 211737, p. 33, 2002.
- [5] K. N. Anyfantis and N. G. Tsouvalis, A novel traction-separation law for the prediction of the mixed mode response of ductile adhesive joints, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 49, pp. 213-226, 2012.
- [6] R. Campilho, M. D. Banea, J. Neto, and L. F. da Silva, Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 44, pp. 48-56, 2013.
- [7] R. Kahraman, M. Sunar, and B. Yilbas, Influence of adhesive thickness and filler content on the mechanical performance of aluminum single-lap joints bonded with aluminum powder filled epoxy adhesive, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 205, pp. 183-189, 2008.
- [8] S. Yu, M. N. Tong, and G. Critchlow, Use of carbon nanotubes reinforced epoxy as adhesives to join aluminum plates, *Materials & Design*, Vol. 31, pp. S126-S129, 2010.
- [9] H. Khoramishad and S. Razavi, Metallic fiber-reinforced adhesively bonded joints, *International*