



بررسی اثر ناحیه غنی از رزین بر رشد ترک در هسته‌ی فومی پره کامپوزیتی توربین بادی به روش المان محدود

میلاذ سلیمانی^۱، مسود طهانی^{۲*} و پدram زمانی^۳

^۱ کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

^۲ استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

^۳ دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۳/۰۷؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۰۵/۱۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۹/۲۸

چکیده

ناحیه غنی از رزین یکی از عیوب رایج هنگام ساخت کامپوزیت‌های ساندویچی در روش تزریق رزین به کمک خلا است. شبیه‌سازی عددی گسترش ترک در نمونه‌های کامپوزیت ساندویچی از پره توربین بادی با استفاده از معیار بسته شدن مجازی ترک و روش اجزای محدود توسعه یافته انجام می‌شود. اثر ابعاد ناحیه غنی از رزین بر رفتار رشد ترک و واماندگی کامپوزیت ساندویچی بررسی می‌شود. نتایج حل عددی نشان داد که ترک از زیر غلنتک بارگذاری در فوم شروع، تا مرکز هسته فومی رشد کرده و در نهایت با کاهش زاویه، به سمت ناحیه شیب‌دار در نمونه گسترش یافته و به سطح تماس هسته و پوسته می‌رسد. با استخراج مقادیر فاکتور شدت تنش مشاهده شد که در شروع رشد ترک، مود دوم و در ادامه رشد ترک، مود اول به عنوان مودهای غالب شکست هستند. همچنین اضافه شدن ناحیه غنی از رزین کوچک و متوسط به نمونه‌های کامپوزیت ساندویچی، باعث ایجاد تأخیر در روند خرابی می‌شود و در صورت بزرگ بودن این ناحیه، فرآیند گسترش خرابی را شتاب می‌بخشد و نهایتاً منجر به فروپاشی سریع تر سازه می‌شود. در نهایت آزمون خمش چهار نقطه‌ای روی نمونه‌ها انجام شده و تطابق خوبی بین نتایج حل عددی و تجربی رشد ترک حاصل شد.

کلمات کلیدی: رشد ترک؛ پره توربین بادی؛ روش اجزای محدود توسعه یافته؛ معیار بسته شدن مجازی ترک؛ خمش چهار نقطه‌ای.

Investigation of Resin Pocket Area Effect on Crack Growth in Foam Core of Composite Wind Turbine Blade by the Finite Element Method

M. Soleimani¹, M. Tahani^{2,*}, P. Zamani³

¹ M.Sc., Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

² Professor, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

³ Ph.D. Student, Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

Abstract

Resin pocket area is a common defect in manufacturing of sandwich composites using vacuum infusion process (VIP). A numerical study is performed on crack growth behavior and failure modes of a sandwich composite wind turbine blade by means of extended finite element method (XFEM) and considering virtual crack closure technique (VCCT). The effect of resin pocket area on crack growth is investigated by considering different sizes for this area. Results of numerical analysis have shown that crack growth in the specimen initiates in foam core under loading nose and propagates through the middle of foam core and decreases its angle and grows towards the tapered area until it reaches to the core-face interface. Calculation of stress intensity factors has shown that first and second fracture modes are dominant modes in crack initiation and propagation steps, respectively. It is also observed that small and average sizes of resin pocket area in sandwich composite specimens delays the damage propagation and large resin pocket area accelerates damage progress. Finally, numerical and experimental results of crack growth path and load-displacement behavior of four-point bending test have shown a good accordance.

Keywords: Crack Growth; Wind Turbine Blade; Extended Finite Element Method; Virtual Crack Closure Technique; Four Point Bending.

۱- مقدمه

امروزه استفاده از انرژی‌های نو به عنوان منابع پاک برای تولید الکتریسیته حائز اهمیت است. توربین‌های بادی نقش مهمی در تامین انرژی پاک ایفا می‌کنند. یکی از بخش‌های سازه‌ای اصلی توربین‌های بادی، پره‌های آن است که باید سبک بوده، ممان اینرسی جرمی کمی داشته باشند. این پره‌ها باید قابلیت تحمل سرعت بادهای شدید را به منظور دستیابی به عمر بیست سال داشته باشند [۱]. برای نیل به این اهداف، کامپوزیت‌های ساندویچی به دلیل داشتن نسبت استحکام به وزن بالا برای استفاده به عنوان پره توربین بادی مناسب هستند.

ساختار کامپوزیت‌های ساندویچی شامل، دو پوسته کامپوزیتی تقویت شده با الیاف و یک هسته سبک و ضخیم از جنس فوم است. این سازه‌ها به دلیل برخورداری از نسبت بالای استحکام خمشی به وزن و نیز نسبت بالای سفتی به وزن، کاربرد گسترده‌ای در پره‌های توربین بادی و صنایع هوایی دارند [۲]. با توجه به چند قسمت بودن سازه‌های کامپوزیت‌های ساندویچی و نیز احتمال وجود نقص حین فرایند ساخت، بررسی وضعیت واماندگی، خرابی و شکست این سازه‌ها برای شناخت بهتر رفتار سازه‌ای و بهبود عملکرد آن بسیار مهم است. پژوهش‌های بسیاری در این زمینه انجام شده است. کوزما و ویزی [۳] روی توزیع بار و مدل‌های آسیب در کامپوزیت‌های ساندویچی مخروطی تحت بارهای فشاری، کششی و خمشی تحقیق کردند. مشاهدات آن‌ها نشان داد که شروع آسیب از زیر ناحیه مخروطی اتفاق افتاده و وضعیت واماندگی اصلی مربوط به جدایش هسته و پوسته است. وداک و کارلسون [۴]، مطالعه تجربی روی شناخت مکانیزم واماندگی در حضور یک عیب مصنوعی در راستای عمق و در موقعیت بین پوسته و هسته کامپوزیت ساندویچی انجام دادند؛ همچنین مطالعه عددی و تجربی برای یافتن مکانیزم‌های واماندگی در تیرهای کامپوزیتی ساندویچی در خمش سه نقطه، توسط استیوز و فلک انجام شد [۵]. آن‌ها یک نقشه برای مکانیزم واماندگی فراهم کردند و نشان دادند که مکانیزم واماندگی مستقل از هندسه تیر است. در پژوهشی دیگر، لیندبرگ [۶] آزمون خمشی چهار نقطه‌ای روی

تیرهای کامپوزیتی مخروطی به منظور بررسی اثر تغییرات نسبت طول ناحیه مخروطی به ضخامت آن روی استحکام و واماندگی انجام داد. گیسون [۷] به تحلیل واماندگی برشی هسته پرداخت و اثر اندازه ترک در تیر کامپوزیتی ساندویچی را با استفاده از تئوری تیر لایه‌ای ابتدایی^۱ و مکانیک شکست الاستیک خطی مطالعه کرد. او نتیجه گرفت که جدایش هنگامی منجر به واماندگی می‌شود که ترک‌های اولیه‌ای در سطح بین پوسته و هسته موجود باشند. وی همچنین مشاهده کرد که انواع دیگر واماندگی مانند، برش در هسته در صورتی غالب خواهد بود که اندازه ترک در مقایسه با ضخامت هسته کوچک باشد. ملکی‌نژاد بهابادی و همکارانش [۸]، جدایش بین پوسته و هسته در کامپوزیت‌های ساندویچی متشکل از پوسته کامپوزیتی و هسته‌ای که مرکب از فوم پی-وی‌سی و چند لایه کامپوزیتی موج‌دار است، به واسطه ایجاد ترک اولیه مطالعه کردند. آن‌ها با بررسی اثر ضخامت پوسته در بارگذاری خمشی مشاهده کردند که شکست در پوسته بالایی در نمونه‌های با پوسته سه و شش لایه، زودتر از جدایش پوسته و هسته رخ می‌دهد. طاهری بهروز و منصور نیک [۹] اثر دو نوع لایه‌چینی برای پوسته‌ها را برای تیرهای ساندویچی کامپوزیتی با طول‌های مختلف به صورت تجربی و عددی مطالعه کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که نوع لایه‌چینی در پوسته به ازای طول یکسان در تیر، بر مقدار بار نهایی آن موثر نیست. کالیسکان و آپالاک [۱۰] اثر ضربه خمشی با سرعت پایین را روی کامپوزیت ساندویچی با هسته فومی پلی استیرن تقویت شده با صفحات آلومینیومی به صورت تجربی بررسی کردند. آزمون‌های ضربه خمشی برای چگالی‌های مختلف فوم و ضخامت‌های متفاوت فوم و پوسته و به ازای سه سطح انرژی ضربه انجام شدند. نتایج مشاهدات آن‌ها نشان داد که با کاهش چگالی فوم و افزایش ضخامت‌ها، قابلیت جذب انرژی افزایش می‌یابد.

با توجه به ابعاد بزرگ توربین‌های بادی و الزام در به حداقل رسانیدن عیوب حاصل از فرایند ساخت و در نتیجه دستیابی به کیفیت قابل قبول، روش تزریق رزین به کمک خلا برای تهیه نمونه‌های کامپوزیتی انتخاب شد. علاوه بر این، پره‌های کامپوزیتی توربین بادی ضخامت غیر یکنواخت

² Elementary Laminated Beam Theory¹ Tapered Sandwich Composites

۲-۱- معیار بسته شدن مجازی ترک

با توجه به پژوهش‌های انجام شده روی شکست فوم‌های پی-وی‌سی^۴ با مود مرکب، مشخص شده است که شرایط موجود در تئوری مکانیک شکست الاستیک خطی برای این فوم‌ها صادق است [۱۲]. از آنجایی که فوم و ناحیه غنی از رزین ایجاد شده حین فرایند ساخت پره کامپوزیتی توربین بادی رفتار ترد دارند، می‌توان از معیار بسته شدن مجازی ترک برای بررسی رشد ترک بهره گرفت. این معیار بر این اساس استوار است که انرژی آزاد شده برای رشد ترک تا یک طول معین، با انرژی مورد نیاز برای بسته شدن ترک با همان طول برابر است و قوانین مختلفی برای محاسبه این انرژی آزاد شده وجود دارد. مدل استفاده شده در این پژوهش، با فرض دو بعدی و کرنش صفحه‌ای در نظر گرفته شده است. با توجه به این مفروضات، به منظور تعیین رفتار مودهای ترکیبی از قانون BK^۵ استفاده شده است. علاوه بر این، برای پیش‌بینی زاویه پیمایش ترک در مدل‌سازی اجزای محدود، از تئوری حداکثر تنش مماسی استفاده شده است. در ادامه معرفی مختصری از تئوری‌های ذکر شده ارائه می‌شود.

۲-۲- قانون BK

این قانون در سال ۱۹۹۶ به صورت زیر ارائه شده است [۱۳]:

$$G_{eqc} = G_{Ic} + (G_{IIc} - G_{Ic}) \left(\frac{G_{II} + G_{III}}{G_I + G_{II} + G_{III}} \right)^\eta \quad (1)$$

پارامترهای G_I ، G_{II} ، G_{III} و η در معادله فوق به ترتیب معرف انرژی کرنشی آزاد شده در مودهای اول، دوم، سوم و توان این رابطه شکست هستند. پارامترهای G_{Ic} و G_{IIc} نیز، مقادیر بحرانی انرژی کرنشی آزاد شده در مودهای اول و دوم شکست هستند.

۲-۳- تئوری حداکثر تنش مماسی

با فرض اینکه وضعیت تنش توسط تکینگی میدان تنش الاستیک مشخص شود، رشد ترک به صورت شعاعی و در جهت $\varphi = \varphi_c$ رشد می‌کند که $\sigma_{\varphi\varphi}$ حداکثر شود. روابط مبین تئوری حداکثر تنش مماسی در رابطه ۲ ذکر شده‌اند

داشته و به دنبال وجود این تغییر در ضخامت، رزین در قسمتی از سازه بین پوسته‌های بالایی و پایینی به تله خواهد افتاد. به تله افتادن رزین بین پوسته‌های کامپوزیت ساندویچی، استحکام و رفتار گسترش ترک در این سازه‌ها را تحت تاثیر قرار می‌دهد. نمونه‌های کامپوزیت ساندویچی با ضخامت متغیر در دو انتها (بخش شیب‌دار)، نماینده مناسبی برای بخش‌های سازه‌ای در پره توربین بادی هستند. اثر ناحیه غنی از رزین در قسمت هسته فومی این کامپوزیت ساندویچی بر ایجاد ترک، رشد آن و واماندگی این نمونه‌ها در پژوهش‌های انجام شده، بررسی نشده است. در این مقاله، اثر حضور ناحیه غنی از رزین (رزین به تله افتاده) بر رفتار رشد ترک و واماندگی در نمونه کامپوزیت ساندویچی با ضخامت متغیر در دو انتها تحت بارگذاری خمش چهار نقطه‌ای با استفاده از روش اجزای محدود بررسی شده است. مدل‌سازی رشد ترک در ناحیه غنی از رزین با استفاده از روش اجزای محدود توسعه یافته^۱ برای پیش‌بینی وضعیت واماندگی با لحاظ کردن روش بسته‌شدن مجازی ترک^۲ و مکانیک شکست الاستیک خطی^۳ انجام شد. مقایسه رفتار رشد ترک و واماندگی در حل اجزای محدود، تطابق خوبی با نتایج آزمون‌های تجربی انجام شده در این پژوهش نشان داده است.

۲- تئوری مکانیک شکست و رشد ترک

یکی از دلایل اصلی خرابی سازه‌ها را می‌توان ناشی از ناپیوستگی‌های هندسی و اثر تمرکز تنش در آن‌ها دانست. این ناپیوستگی‌ها می‌توانند به صورت تغییر شکل ناگهانی در هندسه سازه، یک سوراخ، شیار و ترک بروز کنند. فرض اساسی مکانیک شکست بر این مبنا استوار است که ترک‌ها درون مواد وجود دارند. در این میان، مهم‌ترین الزام مکانیک شکست الاستیک خطی، این است که اندازه ناحیه پلاستیک نزدیک نوک ترک در مقایسه با همه ابعاد مهم در مساله ترک ناچیز باشد. در چنین حالتی، فاکتور شدت تنش فرایند شکست در نزدیکی نوک ترک را کنترل می‌کند [۱۱].

¹ Extended Finite Element Method

² Virtual Crack Closure Technique

³ Linear Elastic Fracture Mechanics

⁴ PVC Foams

⁵ Benzeggagh And Kenane

رزین به سمت مجاری خروجی تمامی سطوح الیاف شیشه و هسته فومی آغشته شده و رزین اضافی نیز، از طریق مجراهای خروجی تخلیه می‌شود. در آخرین مرحله آماده-سازی، نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای اتاق و پس از آن به مدت ۲ ساعت در دمای ۴۵ درجه سانتی‌گراد و ۱۶ ساعت در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد پخت می‌شوند.

هسته فومی در کامپوزیت ساندویچی پره‌ی توربین بادی، از جنس پی‌وی‌سی (آیرکس^۲ C70.75) است. از جمله خواص این هسته فومی، می‌توان به این اشاره کرد که از نوع سلول بسته بوده و استحکام برشی در راستای ضخامت آن ثابت است [۱۶ و ۱۷]. پوسته کامپوزیتی از چیدن شش لایه ساخته شده که در هر لایه آن الیاف با جهات ۰، ۴۵، ۰، ۴۵+ در یکدیگر بافته شده‌اند. جنس الیاف از نوع شیشه S2 و ماده زمینه اپوکسی ۲۰۴۰ است. درصد رزین به الیاف در ساخت پوسته، ۴۰ به ۶۰ است. هسته فوم به صورت یک ماده‌ی همسانگرد [۱۷] و پوسته‌ها ارتوتروپیک تعریف شده‌اند. خواص مکانیکی فوم و کامپوزیت لایه‌ای واقع در پوسته در جدول ۱ معرفی شده‌اند [۱۸]. لازم به ذکر است که ثابت‌های انرژی شکست برای مود اول، دوم و سوم به ترتیب، از نتایج آزمون‌های DCB^۳، ENF^۴ و MMB^۵ در پژوهشکده‌ی هوا-خورشید واقع در دانشگاه فردوسی مشهد بدست آمده‌اند [۱۹].

جدول ۱- خواص مکانیکی فوم و پوسته

ماده	پوسته [۱۹]	هسته [۱۸]
مدول الاستیک (GPa)	$E_1=22, E_2=9, E_3=2$	$E=0.056$
نسبت پواسون	$\nu_{13}=0.27, \nu_{12}=0.27$ $\nu_{23}=0.4$	$\nu=0.32$
مدول برشی (GPa)	$G_{12}=14, G_{13}=5, G_{23}=5$	$G=0.026$
انرژی شکست (J/m^2)	$G_{IC}=15, G_{IIC}=13, G_{IIIC}=13$	-

² Airex C70.75

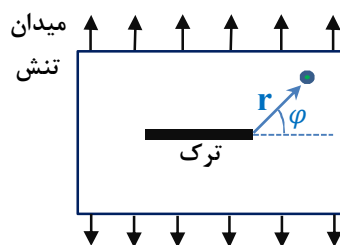
³ Double Cantilever Beam

⁴ End Notched Flexure

⁵ Mixed Mode Bending

[۱۲]. پارامترهای معرفی شده در رابطه ۲ برای یک نقطه فرضی در نزدیکی نوک یک ترک واقع در صفحه تخت، در شکل ۱ نشان داده شده‌اند. شعاع r فاصله از نوک ترک و زاویه‌ی φ بین امتداد ترک و موقعیت شعاع نقطه‌ی مورد نظر است.

$$\frac{\partial \sigma_{\varphi\varphi}}{\partial \varphi} = 0 \quad \text{و} \quad \frac{\partial^2 \sigma_{\varphi\varphi}}{\partial \varphi^2} < 0 \quad (۲)$$



شکل ۱- شماتیک پارامترهای تئوری حداکثر تنش مماسی

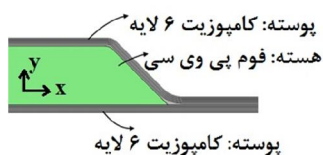
۳- شبیه‌سازی المان محدود گسترش یافته

در چند دهه گذشته مهم‌ترین روش عددی مورد استفاده در تحلیل مسائل مختلف از جمله مسائل مکانیک شکست، روش المان محدود است [۱۴]. در روش المان محدود استاندارد، به هر گره از یک المان، یک تابع شکل نسبت داده شده و در المان محدود گسترش یافته از همان توابع شکل المان محدود استاندارد استفاده می‌شود [۱۵] و تنها درجات آزادی گره‌های اطراف ترک افزایش پیدا می‌کند، که این کار بر اساس مفهوم تفکیک پیوستگی انجام می‌شود؛ یعنی با اعمال توابع خاص درجات آزادی که به واسطه ناپیوستگی در محل ترک درون المان به وجود می‌آید، به نقاط گره‌ای اطراف آن المان اختصاص پیدا می‌کند (غنی‌سازی خارجی).

در ساخت نمونه‌ها به روش تزریق رزین به کمک خلا، بر خلاف روش لایه‌گذاری دستی، ابتدا رزین اپوکسی ۲۰۴۰ با سخت‌کننده ۲۰۴۷ ترکیب شده و پس از گاز زدایی (با استفاده از دستگاه هم‌زن مجهز به پمپ خلا)، به مجراهای جایگذاری شده در الیاف شیشه و هسته فومی تعبیه شده در قالب با کمک فشار مکش ۰/۷ بار نفوذ می‌کند. با جریان

¹ Shape Function

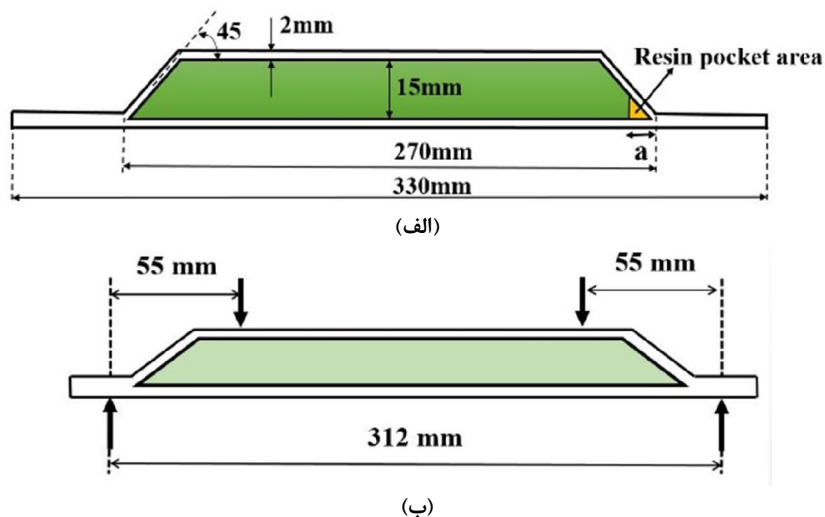
تعداد تکرارهای مجاز برای حل مسئله در مدول step تا ۲۰ گام افزایش داده شده است. علاوه بر این، حالت مربوط به تحلیل ناپیوستگی برای ایجاد همگرایی در این مدول فعال شده است. به دلیل وجود رفتارهای تماسی بین پوسته و هسته مدل، گام نمو ابتدایی به اندازه کافی کوچک لحاظ شده است. اندازه اولیه نمو، کمینه و بیشینه مقدار نمو به ترتیب $0/0001$ ، 1×10^{-8} و $0/1$ در نظر گرفته شده‌اند. فرایند حل در نرم افزار اجزای محدود آباکوس با اندازه نمو اولیه آغاز می‌شود. در صورت همگرا شدن حل در این نمو، مقدار نمو بعدی می‌تواند تا اندازه بیشینه افزایش یافته و در صورت واگرا شدن حل در این نمو، آباکوس می‌تواند مقدار نمو بعدی را برای ایجاد همگرایی تا مقدار کمینه در نظر گرفته شده کاهش دهد.



شکل ۲- شماتیک مدل متقارن کامپوزیت ساندویچی

به دلیل ترد بودن رفتار مکانیکی و واماندگی فوم [۱۷]، ۲۰ و [۲۱] از معیار حداکثر تنش اصلی به عنوان معیار شروع خرابی استفاده شده است. به دلیل وجود تقارن در راستای محور افقی، نصف نمونه مدل شده است (شکل ۲). همان طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، ابعاد هندسی به همراه طول مشخصه ناحیه غنی از رزین معرفی شده است. در این مقاله، اثر چهار طول مختلف برای ناحیه غنی از رزین به منظور بررسی اثر اندازه این ناحیه در رشد ترک بررسی شده است. بدین ترتیب مقادیر ۰ (بدون ناحیه غنی از رزین)، ۵، ۸ و ۱۱ میلی‌متر برای طول مشخصه در نظر گرفته شده‌اند. برای مدل‌سازی ناحیه غنی از رزین نیز، با پارتیشن‌بندی و اختصاص خواص رزین ($E = 2 \text{ GPa}$, $\nu = 0.3$) این ناحیه تعریف می‌شود. مطابق شکل ۳، کوپل خمشی در فاصله بین دو غلتک بارگذاری ثابت است و مقدار این کوپل از غلتک تکیه‌گاهی تا بارگذاری افزایش می‌یابد.

لازم به ذکر است که در تحلیل‌های مربوط به رشد ترک، مسئله ناپایداری در حل یکی از چالش‌های عمده است. به همین دلیل باید راهکارهایی جهت پایدار شدن مسئله در نظر گرفته شود. یکی از موارد ناپایداری در مسئله رشد ترک به صورت عددی، تکرار مداوم نمونه‌های حل است. به همین دلیل



شکل ۳- شماتیک هندسی نمونه کامپوزیت ساندویچی با ضخامت متغیر در دو انتها، (الف) ابعاد هندسی نمونه و (ب) فواصل بارگذاری نیرویی و تکیه‌گاهی

۴- بحث و نتایج

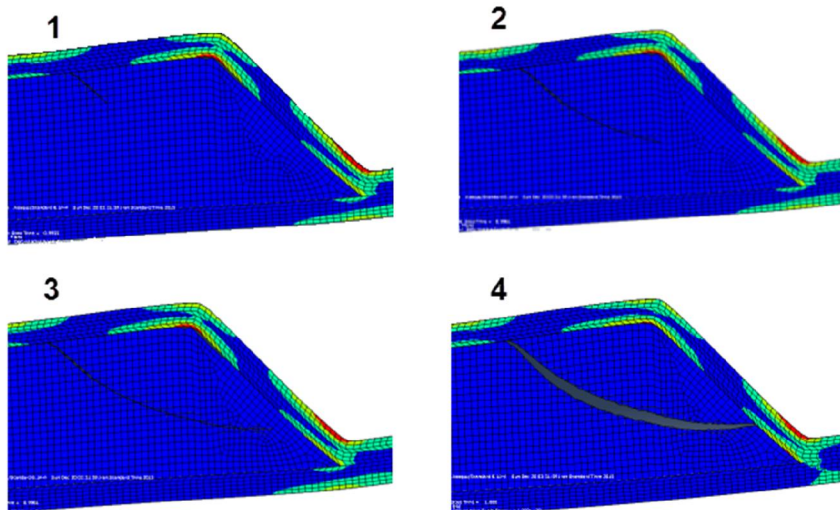
به دلیل ترد بودن فوم، از معیار بیشینه تنش اصلی به عنوان معیار شروع خرابی استفاده شده است. طبق این معیار، آغاز خرابی زمانی است که تنش‌های اصلی از مقدار استحکام کششی بیشینه در ماده بیشتر شوند. بیشینه استحکام کششی برای هسته فومی از طرف شرکت سازنده آن ۱/۶ مگا پاسکال معرفی شده است [۱۶]؛ در نتیجه المانی که مقدار تنش در آن از مقدار بیشینه معرفی شده تجاوز کند، محل شروع خرابی و ترک خواهد بود (شکل ۵). که موقعیت آن دقیقاً زیر غلتک‌های اعمال نیرو است که مطابق نتایج گیبسون [۷] است. همان طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، ترک در هسته فومی بدون حضور ناحیه غنی از رزین رشد کرده است. این ترک در نزدیک محل اعمال بار شروع شده و با زاویه نزدیک به ۴۵ درجه شروع به رشد می‌کند. زاویه رشد ترک در حین رشد به آرامی کاهش پیدا می‌کند و تا مرکز فوم به همین صورت است (مرحله ۲ از شکل ۴). با رسیدن ترک به ناحیه با ضخامت متغیر، این کاهش زاویه بیشتر می‌شود (مرحله ۳ از شکل ۴). لازم به ذکر است که در ناحیه با ضخامت متغیر، کوپل خمش - برش فعال می‌شود. از طرفی در ناحیه با ضخامت یکنواخت، تنش‌های برشی ناشی از بارگذاری باعث به وجود آمدن تنش‌های کششی اصلی در جهت ۴۵ درجه می‌شوند که عامل اصلی رشد ترک با این زاویه می‌باشند. فعال شدن کوپل خمش - برش در ناحیه با ضخامت متغیر، باعث تغییر جهت تنش‌های کششی اصلی می‌شود که همین عامل، باعث تغییر زاویه رشد ترک هنگام رسیدن به ناحیه با ضخامت متغیر است. نهایتاً با رسیدن ترک به پوسته بالایی، زاویه ترک نزدیک به صفر درجه است (مرحله ۴ از شکل ۴). در نمونه‌های بدون ناحیه غنی از رزین، زاویه شروع ترک ابتدا حدود ۴۵ درجه است و با رشد به سمت مرکز هسته زاویه تا نزدیک به ۲۵ درجه کاهش می‌یابد. بعد از رسیدن ترک به مرکز هسته و رشد به سمت ناحیه با ضخامت متغیر (ناحیه‌ی شیب‌دار در نمونه کامپوزیت ساندویچی)، زاویه رشد ترک دوباره شروع به کاهش کرده و نهایتاً به سطح تماس هسته و پوسته می‌رسد. دلیل این کاهش زاویه فعال شدن کوپل خمش - برش در ناحیه با ضخامت متغیر (ناحیه شیب‌دار در نمونه کامپوزیت ساندویچی) است.

با توجه به مرکب بودن وضعیت شکست در هسته فومی بر اساس آزمایش‌های تجربی انجام شده، استفاده از یک معیار مناسب برای محاسبه انرژی کرنشی آزاد شده الزامی است. با توجه به آزمایش‌های انجام شده در پژوهشکده هوا- خورشید واقع در دانشگاه فردوسی مشهد، مقادیر انرژی‌های شکست بحرانی تعریف شده‌اند (جدول ۱). پس از ایجاد خواص مناسب برای رشد ترک، نوع تحلیل ترک به صورت اجزای محدود گسترش یافته معرفی شده و هسته فومی به عنوان ناحیه رشد ترک انتخاب شده است. در عین حال، یک برهم کنش از نوع رشد ترک گسترش یافته^۱ برای ایجاد امکان رشد در گام‌های بعدی فراهم شده است. ضمن فعال کردن پارامترهای وضعیت برای رشد ترک^۲، پارامترهای خروجی PSILM و PHILSM برای خروجی نیز فعال شده‌اند. ضمناً نرخ انرژی کرنشی آزاد شده، یکی از متغیرهای مهم در روش بسته شدن مجازی ترک است که از مقایسه این پارامتر با مقدار بحرانی برای رشد ترک استفاده می‌شود. مقدار نرخ انرژی کرنشی آزاد شده در حین رشد ترک را می‌توان با استفاده از پارامتر ENTER XFEM و اسکریپت^۳ نویسی دستور آن در نرم افزار معرفی کرد. مش‌بندی سازه‌ای با استفاده از ۷۰۸۳ المان از نوع کرنش صفحه‌ای چهار نقطه‌ای مرتبه اول کاهش یافته (CPE4R) برای هسته و پوسته اعمال شده است. لازم به ذکر است که غلتک‌های بارگذاری و تکیه-گاهی صلب فرض شده‌اند. این غلتک‌ها از جنس فولاد CK45 با شعاع ۵ میلی‌متر می‌باشند. غلتک‌ها در راستای طولی و عرضی نمونه مقید بوده، تنها دارای حرکت دورانی حول محور خود می‌باشند؛ بنابراین، با توجه به ایجاد حرکت غلتشی بین نمونه و سطح غلتک، ضریب اصطکاک به حداقل می‌رسد. در صورت عدم وجود دوران غلتک حول محور خود، ایجاد حرکت لغزشی بین نمونه و غلتک، باعث افزایش ضریب اصطکاک و ایجاد تنش برشی در راستای طولی نمونه می‌شود.

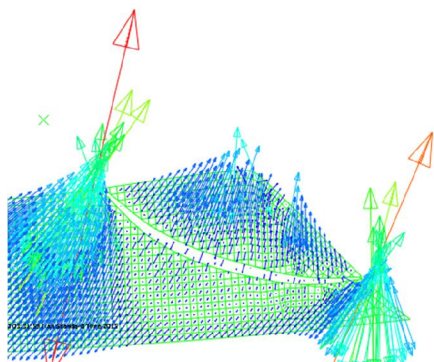
¹ XFEM crack growth

² STATUS XFEM

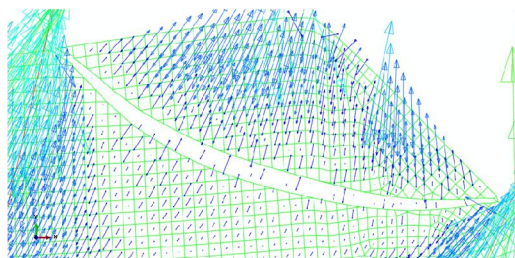
³ Script



شکل ۴- مراحل رشد ترک در هسته‌ی فومی بدون حضور ناحیه غنی از رزین



شکل ۵- تنش‌های اصلی در هسته‌ی فومی که عامل شکست هستند

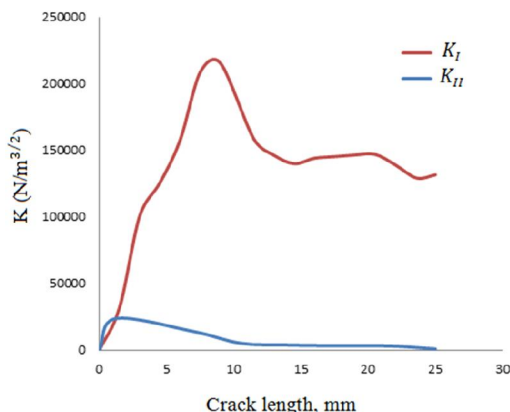


شکل ۶- چرخش جهت تنش‌های اصلی در ناحیه رشد ترک که منجر به گسترش آن می‌شوند

جهت اصلی در مسیر رشد ترک نشان می‌دهند که در مسیر رشد ترک، تنش کششی ایجاد شده همواره بر سطح ترک عمود می‌باشند و همین عامل سبب ایجاد ترک با این مسیر شده است (شکل ۵).

همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، به دلیل فعال شدن کوپل خمش - برش در ناحیه با ضخامت متغیر، جهات اصلی دچار تغییر جهت می‌شوند. این تغییر جهت در تنش‌های اصلی به دلیل تغییر جهت تنش برشی در هسته است که ناشی از فعال شدن کوپل خمش - برش است؛ یعنی در ناحیه با ضخامت متغیر، تنش‌های برشی ایجاد شده ناشی از این کوپل بر تنش‌های برشی موجود در ناحیه با ضخامت یکسان افزوده شده، باعث تغییر جهت آن می‌گردد و نهایتاً این تغییر جهت در تنش‌های برشی منجر به تغییر جهت در تنش‌های اصلی می‌شود و منجر به شکست هسته با این مسیر می‌گردد.

در این بسته شدن مجازی ترک، انرژی کرنشی آزاد شده با انرژی آزاد شده بحرانی مقایسه شده و در صورت بیشتر بودن، ترک شروع به رشد می‌کند. کانتور توزیع انرژی کرنشی آزاد شده در مسیر رشد ترک برای مود اول و دوم شکست به ترتیب، در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است. با توجه به ترد بودن فوم، تنش‌های ماکزیمم عامل اصلی رشد

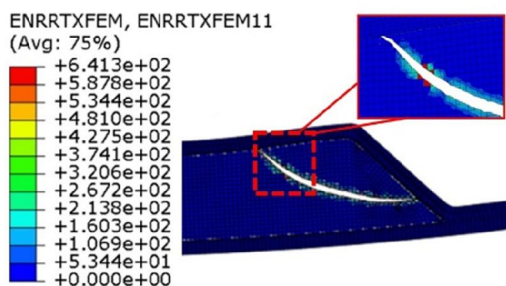


شکل ۹- نمودار فاکتور شدت تنش بر حسب طول ترک برای موده‌های اول و دوم شکست

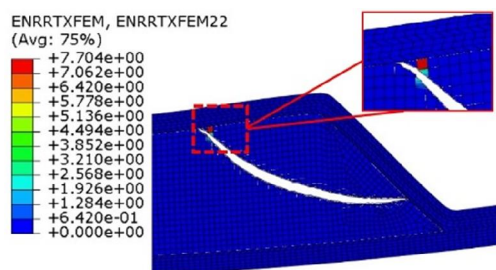
در شکل ۱۰ نشان داده شده است، برای نمونه با $a=5$ میلی‌متر، ترک با رسیدن به ناحیه غنی از رزین متوقف شده است. برای نمونه‌های سوم و چهارم نیز، همین مطلب صادق است (شکل‌های ۱۱ و ۱۲). در نمونه‌ی با ناحیه غنی از رزین ۵ میلی‌متری، مراحل شروع خرابی و مسیر رشد مشابه نمونه فاقد ناحیه غنی از رزین است، اما با رسیدن ترک به ناحیه غنی از رزین، ترک متوقف شده و برای مدتی بدون رشد باقی می‌ماند. بعد از افزایش مجدد نیرو، ترک دوباره شروع به رشد کرده، اما از سمت مخالف مسیر اولیه شروع به رشد می‌کند. در این نمونه فرآیند شروع و گسترش خرابی نسبت به نمونه بدون ناحیه غنی از رزین دچار تأخیر شده است. به صورتی که در نمونه فاقد ناحیه غنی از رزین، گسترش خرابی به سمت ناحیه باضخامت متغیر بود که ناحیه‌ای آسیب‌پذیر است و گسترش خرابی در این ناحیه خیلی سریع رخ می‌دهد و می‌تواند فروپاشی نمونه را در پی داشته باشد؛ اما در نمونه با ناحیه غنی از رزین ۵ میلی‌متری ترک از سمتی شروع به رشد می‌کند که نمونه هنوز توانایی تحمل نیروی زیادی را دارد. در نمونه با ناحیه غنی از رزین ۱۱ میلی‌متری، شروع خرابی و مسیر رشد مشابه نمونه‌های قبلی است، با این تفاوت که مرحله سوم رشد، یعنی رشد در نزدیکی سطح تماس هسته و پوسته سریع‌تر رخ داد و شتاب بیشتری به خرابی داد. به این صورت در این نمونه، توانایی تحمل بار کاهش یافته است.

ترک می‌باشند و همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، چرخش مسیر ترک هم به دلیل چرخش جهت تنش اصلی کششی است؛ بنابراین قسمت اعظم شکست، مربوط به مود اول شکست، یعنی مود بازشدگی است که کانتور توزیع انرژی کرنشی آزاد شده برای مود اول در شکل ۶ نیز، این موضوع را تایید می‌کند. البته در شروع ترک، مود دوم شکست غالب است (شکل ۸) که این نتیجه با مشاهدات تجربی در این زمینه تطابق دارد [۲۲]. نمودار فاکتور شدت تنش بر حسب طول ترک برای موده‌های اول و دوم شکست (شکل ۹) نیز، به گونه‌ای دیگر غالب بودن مود دوم در ابتدای رشد ترک و غالب بودن مود اول در ادامه رشد ترک تا انتهای مسیر آن را تایید می‌کند.

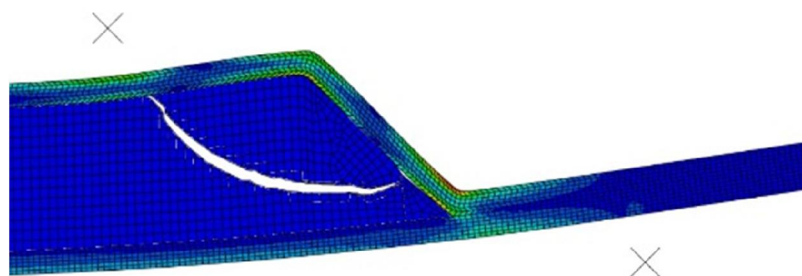
در نمونه‌های دارای نواحی غنی از رزین، ترک به محض رسیدن به ناحیه غنی از رزین، متوقف شده و دیگر قادر به رشد نمی‌باشد. در مدل‌های ارائه شده با روش المان محدود نیز، همین روند دنبال می‌شود و مسیر پیشروی ترک با استفاده از این روش به‌خوبی پیش‌بینی می‌شود. همان‌طور که



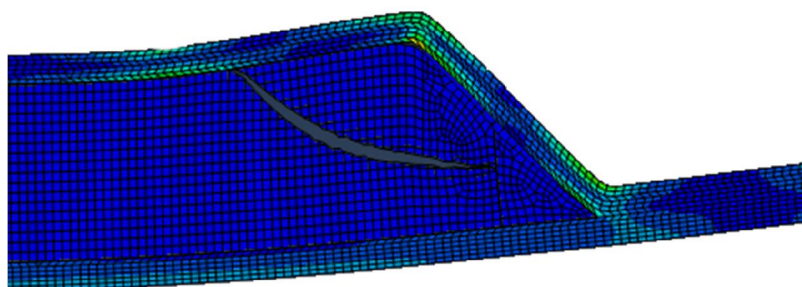
شکل ۷- وضعیت نرخ انرژی کرنشی آزاد شده برای مود اول شکست در امتداد مسیر رشد ترک



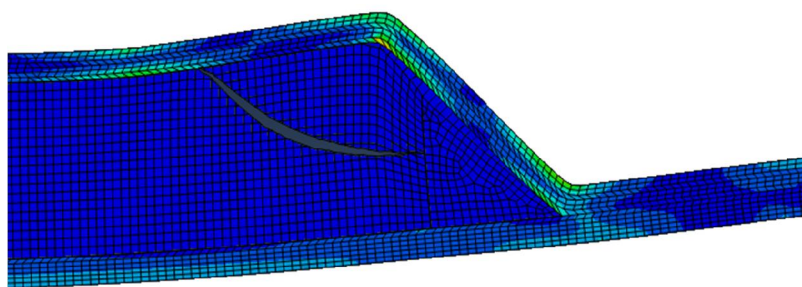
شکل ۸- وضعیت نرخ انرژی کرنشی آزاد شده برای مود دوم شکست در امتداد مسیر رشد ترک



شکل ۱۰- پیش بینی مسیر رشد ترک برای طول مشخصه ۵ میلی متری ناحیه غنی از رزین



شکل ۱۱- پیش بینی مسیر رشد ترک برای طول مشخصه ۸ میلی متری ناحیه غنی از رزین



شکل ۱۲- پیش بینی مسیر رشد ترک برای طول مشخصه ۱۱ میلی متری ناحیه غنی از رزین

عددی نشان داده شده برای این طول از ناحیه غنی از رزین در شکل ۱۰ است. بدین ترتیب می توان نتیجه گرفت که حل عددی بر مبنای روش اجزای محدود توسعه یافته و بسته شدن مجازی ترک به خوبی مسیر رشد ترک را پیش بینی می کند. علاوه بر این، نمودار نیرو- جابجایی حین انجام آزمون خمش چهار نقطه ای برای حل عددی و آزمون تجربی از انطباق خوبی برخوردار است (شکل ۱۴). ذکر این نکته لازم است که خطای اتفاق افتاده در ابتدای نمودار بیشترین مقدار را نسبت به نقاط دیگر داشته و علت وقوع این خطا مربوط به فشردگی بالشتک لاستیکی در زیر غلتک اعمال بار

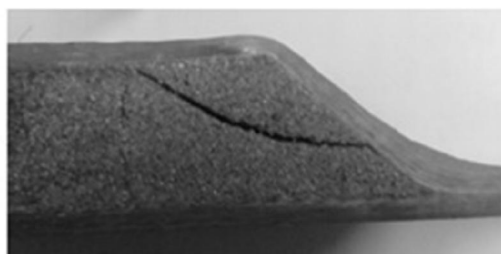
آزمون خمش چهار نقطه ای بر اساس استاندارد ASTM C393-06 [۲۳] و با نرخ بارگذاری ۶ میلی متر بر دقیقه توسط دستگاه تست Zwick/Z250 واقع در آزمایشگاه خواص مکانیکی دانشگاه فردوسی مشهد برای صحت گذاری بر نتایج حل عددی انجام شده است. بر اساس شکل ۱۳، نتیجه آزمون های تجربی خمش چهار نقطه ای روی نمونه های ساخته شده بدون حضور ناحیه غنی از رزین مسیر رشد ترک حاصل از حل عددی (شکل ۴) را به خوبی تایید می کند. علاوه بر این، رشد ترک در شکل ۱۳ برای نمونه شامل ناحیه غنی از رزین با طول ۵ میلی متر، تاییدی بر گسترش ترک

۴- نتیجه گیری

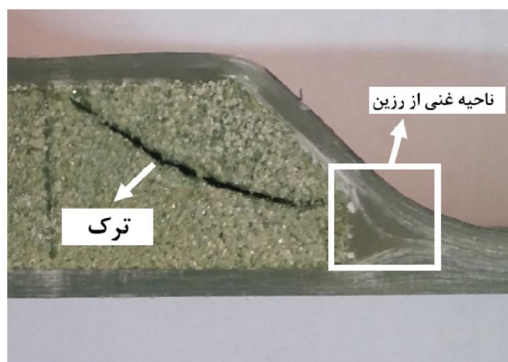
در این مقاله رفتار رشد ترک در کامپوزیت ساندویچی مورد استفاده در پره توربین بادی با استفاده از روش اجزای محدود توسعه یافته و بهره‌گیری از معیار بسته شدن مجازی ترک شبیه‌سازی شد؛ همچنین به بررسی اثر حضور ناحیه غنی از رزین به عنوان یکی از چالش‌های ساخت پره‌های توربین بادی با روش تزریق به کمک خلا، اثر این عیب بر رشد ترک مورد مطالعه قرار گرفت. علاوه بر این، مقایسه نتایج عددی و تجربی رشد ترک و نمودار نیرو-جابجایی تطابق خوبی را نشان داده‌اند. در نهایت، نتایج اخذ شده از این پژوهش عبارتند از:

- در نمونه‌های بدون ناحیه غنی از رزین، زاویه شروع ترک ابتدا حدود ۴۵ درجه است و با رشد به سمت مرکز هسته زاویه تا نزدیک به ۲۵ درجه کاهش می‌یابد. بعد از رسیدن ترک به مرکز هسته و رشد به سمت ناحیه با ضخامت متغیر (ناحیه‌ی شیب‌دار در نمونه کامپوزیت ساندویچی)، زاویه رشد ترک دوباره شروع به کاهش کرده و نهایتاً به سطح تماس هسته و پوسته می‌رسد. دلیل این کاهش زاویه، فعال شدن کوپل خمش - برش در ناحیه با ضخامت متغیر (ناحیه‌ی شیب‌دار در نمونه کامپوزیت ساندویچی) است.
- در نمونه با ناحیه غنی از رزین ۵ میلی‌متری، مراحل شروع خرابی و مسیر رشد مشابه نمونه‌ی فاقد ناحیه غنی از رزین است، اما با رسیدن ترک به ناحیه غنی از رزین، ترک متوقف شده و برای مدتی بدون رشد باقی می‌ماند. بعد از افزایش مجدد نیرو، ترک دوباره شروع به رشد کرده، اما از سمت مخالف مسیر اولیه شروع به رشد می‌کند. در این نمونه فرآیند شروع و گسترش خرابی نسبت به نمونه بدون ناحیه غنی از رزین دچار تأخیر شده است. به صورتی که در نمونه فاقد ناحیه غنی از رزین، گسترش خرابی به سمت ناحیه با ضخامت متغیر بود که ناحیه‌ای آسیب‌پذیر است و گسترش خرابی در این ناحیه خیلی سریع رخ می‌دهد و می‌تواند فروپاشی نمونه را در پی داشته باشد؛ اما در نمونه با ناحیه غنی از رزین ۵

و سرخوردن غلتک‌ها است. مشاهده می‌شود که با افزایش نیرو درصد خطا کاهش یافته و در لحظه شکست خطا به کمترین مقدار خود می‌رسد.

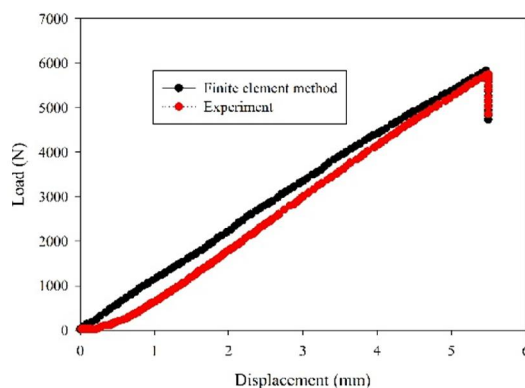


(الف)



(ب)

شکل ۱۳- مسیر رشد ترک در هسته‌ی فومی در آزمون خمش چهار نقطه‌ای، (الف) بدون حضور ناحیه‌ی غنی از رزین و (ب) با حضور ناحیه غنی از رزین ۵ میلی‌متری



شکل ۱۴- نمودار نیرو-جابجایی بدون حضور ناحیه غنی از رزین در آزمون خمش چهار نقطه‌ای

۶- مراجع

- [1] Zenkert D (1997) An introduction to sandwich construction. Engineering Materials Advisory Services.
- [2] Chen C, Kam T (2011) Failure analysis of small composite sandwich turbine blade subjected to extreme wind load. *Procedia Engineer* 14: 1973-1981.
- [3] Kuczma SK, Vizzini AJ (1999) Failure of sandwich to laminate tapered composite structures. *AIAA J* 37: 227-231.
- [4] Vadakke V, Carlsson LA (2004) Experimental investigation of compression failure of sandwich specimens with face/core debond. *Compos Part B-Eng* 35: 583-590.
- [5] Steeves CA, Fleck NA (2004) Collapse mechanisms of sandwich beams with composite faces and a foam core loaded in three-point bending. Part II: Experimental investigation and numerical modelling. *Int J Mech Sci* 46: 585-608.
- [6] Lindberg J (2007) Transition from sandwich to solid skin composites-An investigation of the optimal design. MS. Thesis, KTH School of Engineering Sciences University, KTH Royal Institute of technology.
- [7] Gibson RF (2011) A mechanics of materials/fracture mechanics analysis of core shear failure in foam core composite sandwich beams. *J Sandw Struct Mater* 13(1): 83-95.
- [۸] ملکی‌نژاد بهابادی ح، رحیمی غ، فرخ آبادی ا (۱۳۹۵) مطالعه عددی و تجربی جدایش رویه از هسته در سازه‌های ساندویچی کامپوزیتی با هسته موج‌دار ترکیبی تحت بار خمشی. *مجله مهندسی مکانیک مدرس* ۲۲-۵۲: ۱۶(۶).
- [۹] طاهری بهروز ف، منصوری نیک م (۱۳۹۶) بررسی تجربی و عددی رفتار تیرهای ساندویچی کامپوزیتی تحت خمش چهار نقطه. *مجله مهندسی مکانیک مدرس* ۲۵۲-۲۴۱: ۱۷(۱).
- [10] Caliskan U, Apalak MK (2017) Low velocity bending impact behavior of foam core sandwich beams: Experimental. *Compos Part B-Eng* 112: 158-175.
- [۱۱] راستگو ع، بهاء‌لو هوره ح (مترجمین)، (۱۳۸۹) آزمون و تحلیل خستگی (نظریه و کاربرد)، چاپ اول، انتشارات دانشگاه تهران، صفحه ۳۲۱.
- [12] Noury P, Shenoi R, Sinclair I (1998) On mixed-mode fracture of pvc foam. *international journal of fracture* 92: 131-151.
- [13] ABAQUS (2014) ABAQUS Documentation Dassault Systems, Providence, RI, USA.
- [14] Zamani P, Jaamialahmadi A, Shariati M (2016) Ductile failure and safety optimization of gas pipeline. *Journal of Solid Mechanics* 8(4): 744-755.

میلی‌متری ترک از سمتی شروع به رشد می‌کند که نمونه هنوز توانایی تحمل نیروی زیادی را دارد؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که ناحیه غنی از رزین می‌تواند گسترش خرابی را با تاخیر مواجه کند و زمان بیشتری برای تحمل بار به نمونه دهد. در نمونه با ناحیه غنی از رزین ۸ میلی‌متری نیز، رفتار خرابی به همین صورت است و نتایج مشابهی مشاهده شده است.

- اضافه شدن ناحیه غنی از رزین با اندازه‌های کم (۵ میلی‌متر) و متوسط (۸ میلی‌متر) به نمونه‌های کامپوزیت ساندویچی، باعث ایجاد تأخیر در روند خرابی می‌شوند؛ پس ناحیه غنی از رزین با اندازه متوسط به عنوان طول بحرانی شناخته می‌شود بطوری‌که رشد ترک در ناحیه فومی برای مقادیر غنی از رزین بزرگتر از مقدار بحرانی تسریع می‌گردد؛ اما در صورت زیاد بودن این ناحیه، فرآیند گسترش خرابی را شتاب می‌بخشد و نهایتاً منجر به فروپاشی سریع‌تر سازه می‌شود؛ بنابراین، ایجاد شدن نواحی غنی از رزین با اندازه‌های کم و نه‌چندان زیاد که در حین ساخت کامپوزیت‌های ساندویچی با استفاده از روش تزریق به کمک خلأ ایجاد می‌شود، جای هیچ‌گونه نگرانی را ندارد.
- حضور ناحیه غنی از رزین باعث متوقف شده رشد ترک در قسمت با ضخامت متغیر (شیب‌دار) در نمونه می‌شود و بدین ترتیب باعث جلوگیری از رسیدن ترک به ناحیه بین پوسته و هسته در قسمت با ضخامت متغیر (شیب‌دار) می‌شود.
- انرژی کرنشی آزاد شده و فاکتور شدت تنش برای موده‌های اول و دوم شکست نشان دادند که در ابتدای شروع رشد ترک مود دوم شکست غالب است، اما در طول مسیر رشد ترک مود اول یا همان مود بازشدگی غالب است.

۵- تقدیر و تشکر

از پژوهشکده‌ی هوا-خورشید دانشگاه فردوسی مشهد بخاطر تامین مواد اولیه، ساخت نمونه‌ها و داده‌های آزمون‌های تجربی این پژوهش تشکر و قدردانی می‌شود.

- [20] Saenz EE, Carlsson L.A. Karlsson A. (2011) Characterization Of Fracture Toughness G (Sub c) of PVC and PES foams. J Mater Sci 46(9): 3207-3215.
- [21] Poapongsakorn P, Carlsson LA (2013) Fracture toughness of closed-cell PVC foam: Effects of loading configuration and cell size. Compos Struct 102: 1-8.
- [22] Soni SM, Gibson RF, Ayorinde EO (2009) The influence of subzero temperatures on fatigue behavior of composite sandwich structures. Compos Sci Technol 69: 829-838.
- [23] ASTM C393-06 (2006) Standard test method for core shear properties of sandwich constructions by beam flexure.
- [15] Mohammadi S (2008) Extended finite element method: For fracture analysis of structures. John Wiley & Sons.
- [16] Data Sheet, Airex Baltek Banova, Airex C70 Universal Structural Foam, Baltec Inc., USA.
- [17] Viana GA, Carlsson LA, (2002) Mechanical properties and fracture characterization of cross-linked PVC foams. J Sandw Struct Mater 4: 99-113.
- [18] Aviles F (2005) Local buckling and debond propagation in sandwich columns and panels. Ph.D Dissertation, Department of Mechanical Engineering, Florida Atlantic University.
- [۱۹] فرجادفر ر، حسینی ف (ارديبهشت ۱۳۹۵) آزمون خواص مکانیکی کامپوزیت‌های گلس/اپوکسی با الیاف سه جهته. اسناد پژوهشکده هوا-خورشید، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.