



مشخصه‌سازی ابعادی ورق کامپوزیتی شیشه/اپوکسی با ترک لبه‌ای تحت سیکل‌های سرمايش/گرمایش مرطوب

محمد عابدی^۱، آسیه علی‌آبادی^۲، سید ابراهیم موسوی ترشیزی^{۳*} و روح‌اله سرفراز^۴

^۱دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

^۲کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

^۳دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

^۴استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

یادداشت پژوهشی، تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۴/۲۵، تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۰۳/۱۷، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۱۱

چکیده

انجماد آب در ترک‌های سطحی پره توربین بادی می‌تواند خواص مکانیکی آن را به‌طور قابل توجهی کاهش دهد. برای بررسی این پدیده، مدل اجزاء محدود به منظور شبیه‌سازی فرآیند یخ‌زدگی در تیر کامپوزیتی مقیاس کوچک تقویت شده با الیاف با ترک لبه‌ای ارائه شده و نیروی وارده بر تیر ناشی از یخ‌زدگی آب در دمای انجماد به کمک مدل محاسبه شده است. بر اساس این تکنیک، پارامتر جدیدی که اثر انبساط یخ نامیده می‌شود، معرفی و به کمک آن، تاثیر زاویه بازشوندگی ترک و ضخامت تیر بر توزیع تنش و کرنش در امتداد دهانه ترک بررسی شده است. با مصالحه بین مسئله واقعی، پره آسیب دیده ناشی از بهره‌برداری و استاندارد موجود که معمولاً برای توصیف رفتار شکست مواد کامپوزیتی استفاده می‌شود، یک هندسه بهینه برای تحقیقات آزمایشگاهی طراحی شده است. نتایج تجربی حاصل از تیر کامپوزیتی مقیاس کوچک بر اساس هندسه طراحی شده که تحت اثر همزمان رطوبت و دمای انجماد قرار دارد، اهمیت فاکتور انبساط یخ بر پاسخ مواد و سازه‌ها به ازای سیکل‌های مختلف سرمايش/گرمایش را نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: خواص مکانیکی؛ سرمايش/گرمایش سیکلی؛ کامپوزیت؛ ترک؛ یخ.

Dimensional Characteristic of Glass/Epoxy Composite Plate with Edge Crack under Wet Freeze-Thaw Cycles

M. Abedi¹, A. Aliabadi², S. E. Moussavi Torshizi^{3,*}, R. Sarfarz⁴

¹Ph.D. Mech. Eng., Shahid Beheshti Univ., Tehran, Iran.

²Masters Mech. Eng., Shahid Beheshti Univ., Tehran, Iran.

³Assoc. Prof., Mech. Eng., Shahid Beheshti Univ., Tehran, Iran.

⁴Assis. Prof., Mech. Eng., Shahid Beheshti Univ., Tehran, Iran.

Abstract

Freezing water in the surface cracks of wind turbine blades can remarkably deteriorate its mechanical properties. In order to investigate this phenomena, a finite element model is developed to simulate the icing process in a small scale fiber reinforced composite beam with a sharp crack. The load exerted from the ice onto the beam is calculated by using the model taking into account the expansion of water at freezing temperature. Based on this technique, a new parameter, called the ice expansion effect, is introduced and employed to study the influence of crack opening angle and the beam thickness on the distribution of stress and strain along the crack faces. Compromising between the actual problem, in-service damaged blades, and the existing standard which is commonly applied for characterization of fracture behavior of composite materials, an optimum geometry is designed for experimental investigations. The experimental results acquired from small scale composite beams based on the designed geometry and simultaneously imposed to humidity and freezing temperature demonstrate the significance of ice expansion factor on the monotonic response of the materials and structures conditioned at different number of freeze-thaw cycles.

Keywords: Mechanical Properties; Freeze-thaw Cycles; Composite; Crack; Ice.

۱- مقدمه

یکی از مهم‌ترین کاربردهای مواد کامپوزیتی، ساخت پره توربین بادی است. پارامترهای زیادی (نیروهای ناشی از بهره برداری، عوامل محیطی و ...) بر عملکرد پره توربین بادی موثر است. این سازه‌ها از یک سو، تحت نیروهای عظیم کششی، خمشی و پیچشی ناشی از وزن و بهره‌برداری قرار داشته و از سوی دیگر، در معرض عوامل محیطی مختلفی نظیر، صاعقه، رطوبت، سرما و ... قرار دارند. در طراحی و ساخت پره، نکات مربوط به تحمل وزن و نیروهای ناشی از کارکرد و همچنین تحمل عوامل مختلف محیطی در نظر گرفته می‌شود، اما نکته حائز اهمیت، وجود ترک‌های سطحی ناشی از عواملی نظیر، عدم رعایت نکات ایمنی در زمان حمل و نقل، سرویس‌های دوره‌ای و برخورد صاعقه است. در واقع، کارکرد در شرایط ترک سطحی، برای سازه‌هایی نظیر پره توربین‌های بادی امری اجتناب‌ناپذیر است [۱]. هم‌افزایی مخرب حضور ترک سطحی از یک سو و بارندگی و گرم و سرد شدن هوا و یخ زدن آب درون ترک‌ها از سویی دیگر، اهمیت بررسی این پدیده را در مطالعه و بررسی عمر کامپوزیت‌ها افزایش می‌دهد. این فاکتور بیشترین تاثیر را بر کامپوزیت‌های زمینه پلیمری به دلیل حساس بودن پلیمر به تغییرات دمایی و رطوبت خواهد داشت [۲ و ۳]. تاکنون، مطالعات بسیاری در مورد تغییر خواص انواع کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تحت شرایط مختلف محیطی نظیر، دمای پایین، حضور رطوبت و سیکل‌های سرمایش/گرمایش انجام شده است [۴-۶].

ترابی‌زاده [۲]، آنالیز آسیب پیوسته کامپوزیت تک‌جهته شیشه/اپوکسی در دماهای محیط و ۶۰- درجه در شرایط خشک را ارائه کرده است. شرایط محیطی نظیر، رطوبت و دما، می‌تواند عامل ایجاد اندرکنش بین مدهای واماندگی با تاثیر بر تخریب زمینه و فصل مشترک الیاف/زمینه شود [۷]. رطوبت از طریق مکانیزم‌هایی نظیر، جذب در زمینه، موبینگ فصل مشترک الیاف/زمینه، نفوذ در میکروتُرک‌ها، حباب‌ها و نقصان‌ها می‌تواند بر عملکرد کامپوزیت اثر بگذارد [۸ و ۹]. هم‌زمانی رطوبت و سرمایش/گرمایش سیکلی، تاثیری بیشتر از هر یک از این عوامل به تنهایی بر خواص مکانیکی کامپوزیت دارد [۳]. از یک سو، سرمایش/گرمایش عامل ایجاد میکرو ترک بوده و از سویی دیگر با افزایش چگالی میکروتُرک‌ها، نفوذ رطوبت در کامپوزیت بیشتر

می‌شود. القادر و همکاران [۳] نشان دادند که عموماً در کامپوزیت‌های با زمینه وینیل استر، سفتی و استحکام کامپوزیت با افزایش سیکل‌های سرمایش/گرمایش کاهش می‌یابد. قاسمی و همکاران [۱۰]، رفتار کامپوزیت شیشه/اپوکسی تحت سیکل‌های (حرارتی) سرمایش/گرمایش در دماهای مختلف، با درصد‌های حجمی و لایه‌چینی‌های متفاوت را مورد مطالعه قرار داده‌اند. آنها دریافتند، با افزایش دامنه تغییرات دمایی، میزان جدایش الیاف از زمینه افزایش و مدول الاستیسیته و مقاومت نهایی کاهش می‌یابد. کورمیر^۱ و همکاران [۱۱ و ۱۲]، تغییر خواص مکانیکی شیشه/اپوکسی تک‌جهته تحت دمای پایین، رطوبت و همچنین سرمایش/گرمایش سیکلی را مورد بررسی قرار دادند. آنها نشان دادند که الف) رطوبت به تنهایی بر خواص زمینه اثرات منفی دارد و باعث افت خواص آن می‌شود (ب) دمای پایین به تنهایی باعث بهبود رفتار کامپوزیت در نتیجه انقباض و سخت‌تر شدن زمینه می‌شود^۳ (ج) سیکل‌های سرمایش/گرمایش عامل پیدایش میکروتُرک در زمینه خواهد شد.

در تحقیقات دیگری، کاهش مقاومت کامپوزیت و سفتی با کاهش دما توسط کیم^۴ و سانچز^۵ [۱۳ و ۱۴] گزارش شده است؛ همچنین کاهش خواص مکانیکی ماده به ازای کاهش دمای محیط توسط شیندو^۶ و همکاران [۱۵] گزارش شد. اسلامی و همکاران [۱۶ و ۱۷]، تغییر خواص خمشی FMLها را به ازای سیکل‌های مختلف سرمایشی بدون یخ‌زدگی مطالعه کردند. کمترین و بیشترین تغییر خواص مکانیکی ۱/۶ درصد و ۶ درصد به ازای آرایش‌های مختلف گزارش شده است.

به کمک شکست‌نگاری کامپوزیت‌ها [۱۸ و ۱۹]، تغییرات چقرمگی شکست [۲۰ و ۲۱] و محاسبه مقاومت باقیمانده [۲۲ و ۲۳]، تغییرات خواص کامپوزیت به ازای شرایط مختلف محیطی مطالعه شده است [۲۴]. طی این مطالعات،

¹ Cormier

² Stiffening

^۳ البته باید به کاهش چقرمگی شکست کامپوزیت ناشی از کاهش دما توجه ویژه کرد.

⁴ Kim

⁵ Sanchez

⁶ Shindo

با انجام مشخصه‌سازی ابعادی و تهیه نمونه‌های مناسب آزمون خمش سه‌نقطه‌ای، رفتار نمونه‌ها تحت بارگذاری شبه-استاتیکی و تاثیر شرایط محیطی بر خواص مکانیکی آنها مطالعه شده است.

۲- معرفی مسئله واقعی

بر اساس گزارش‌های مرجع [۱]، ترک‌های ایجاد شده در پره توربین بادی در طول پره^۱ و از فاصله $L/3$ از نوک پره (L طول پره) با عمق تقریبی ۵ تا ۱۰ میلی‌متر و با زاویه دهانه کمتر از ۵ درجه و عموماً در راستای طول پره گسترش یافته‌اند، که در این شرایط طول ترک بسیار بزرگتر از سایر ابعاد آن است؛ بنابراین برای تعیین پارامترهای مورد نیاز برای ساخت ورق کامپوزیتی از دو دسته شرایط حاکم، تبعیت شده است؛ دسته اول، بر اساس مسئله واقعی (شکل ۱-الف)، تعیین شده است که رعایت آنها الزامیست؛ دسته دوم، الزامات استاندارد ASTM D5045 [۲۹] برای تعیین خواص مکانیکی ورق کامپوزیتی دارای ترک لبه‌ای است؛ بنابراین لازمست مصالح‌های بین این دو شرایط برقرار گردد. بر اساس ترک موجود در پره توربین بادی، باید عرض نمونه (B) (شکل ۱-ب) به گونه‌ای اختیار شود تا شرایط کرنش صفحه‌ای در راس ترک حاکم باشد (طول ترک بسیار بزرگتر از سایر ابعاد آن)؛ یعنی بر اساس استاندارد، B باید نصف W باشد (جدول ۱).

عامل مهم دیگر، زاویه دهانه‌ی ترک است. در مسئله واقعی، ترک‌های با زاویه دهانه کمتر از ۵ درجه دیده شده است، از سوی دیگر طبق استاندارد زاویه دهانه نمی‌تواند خیلی بزرگ باشد، هرچند اشاره‌ای به اندازه زاویه نشده است، ولی طبق جدول ۱، زاویه دهانه ترک کوچکتر از ۵ درجه در نظر گرفته شد تا شرایط استاندارد رعایت شود.

همچنین در مسئله واقعی، ترک‌های با عمق ۵ تا ۱۰ میلی‌متر وجود دارد، در صورتی که طبق استاندارد، باید نسبت $0/45 \leq \frac{a}{W} \leq 0/55$ شود.

جدایش در فصل مشترک الیاف/زمینه عامل اصلی تخریب کامپوزیت‌های پایه پلیمری معرفی شده است.

علی‌رغم تحقیقات گسترده‌ای که در زمینه بررسی تغییرات خواص کامپوزیت‌های زمینه پلیمری ناشی از تغییر عوامل محیطی شده است، ولی تا کنون نقش و میزان تاثیر یخ بر رفتار کامپوزیت‌های زمینه پلیمری با حضور ترک کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به انبساط آب هنگام انجماد (از ۴ تا ۹ درصد، در بازه دمایی صفر تا ۶۰- درجه سانتیگراد) [۲۵]، صرف‌نظر کردن از اثر انبساط یخ می‌تواند تخمین نادرستی از عمر و عملکرد اجزای کامپوزیتی زمینه پلیمری بدست دهد. عابدی و همکاران [۲۶]، به کمک XFEM نشان دادند که یخ‌زدگی حجم مشخصی از آب در ترک لبه‌ای ورق کامپوزیتی به تنهایی (بدون بارگذاری خارجی) تا ۲/۵ برابر تمرکز تنش در دهانه ترک را افزایش می‌دهد.

در این مقاله اثر انبساط یخ تعریف شده بر توزیع تنش و کرنش در محل ترک و در ضخامت‌های مختلف ورق مطالعه شده است. با انجام این مطالعه، مشخصه‌سازی ابعادی ورق کامپوزیتی با ترک لبه‌ای طبق مسئله واقعی به کمک روش اجزاء محدود جهت تهیه نمونه‌های آزمون خمش سه‌نقطه‌ای انجام شده است. استاندارد برای آزمون چندلایه کامپوزیتی با ترک در راستای ضخامت وجود ندارد. استانداردها و پروتکل‌های موجود شامل، ترک بین لایه‌های [۲۰ و ۲۱] و یا ترک جانبی در برگیرنده تمام لایه‌ها [۲۷ و ۲۸] است؛ لذا، تغییر خواص ورق کامپوزیتی شیشه/اپوکسی با ترک لبه‌ای، تحت اثر سیکل‌های سرمایش/گرمایش طبق گام‌های زیر مطالعه شده است:

- الف) مدل‌سازی اجزاء محدود ورق کامپوزیتی جهت مشخصه‌سازی بر اساس مسئله واقعی رخ داده و تعیین ابعاد هندسی بهینه
- ب) ساخت ورق کامپوزیتی بافت ساده شیشه/اپوکسی و ایجاد ترک در ورق طبق مسئله واقعی
- ج) انجام آزمون سرمایش/گرمایش سیکلی در بازه دمایی ۱۸- و دمای محیط
- د) انجام آزمون خمش سه‌نقطه‌ای و استخراج نمودارهای نیرو-تغییر مکان نمونه‌ها.

^۱ ترک لبه‌ای رخ داده در پره توربین بادی ۶۶۰ کیلووات نیروگاه بادی هرزیول که منجر به شکست پره شده است.

برای المان‌بندی (مش‌ریزی) راحت‌تر، ورق کامپوزیتی به دو قسمت (شامل ترک لبه‌ای و باقی ورق) تقسیم‌بندی^۲ شده است (شکل ۳). نحوه مش‌زنی مدل، Structured با اندازه مش ۰/۱۳ میلی‌متر با شرط همگرایی نتایج است؛ همچنین بارگذاری ناشی از انبساط گوه در ترک لبه‌ای، فشاری و در جهت بازشوندگی ترک (مود-I) است. از معیار فوون-میسز^۳ برای محاسبه تنش‌ها استفاده شده است.

در شبیه‌سازی، برای اعمال فشار داخلی (مود بازشوندگی)، طبق شرایطی که نزدیک به فشار اعمالی ناشی از انجماد یخ باشد، یک جزء مثلثی (گوه) با خواص مکانیکی یخ (جدول ۳) در ترک سطحی شبیه‌سازی شد. از آنجایی که افزایش حجم یخ در اثر کاهش دما، قابل اعمال در نرم‌افزار آباکوس نبوده، به جای اینکه تغییر دمای گوه کاهش‌ی باشد، به همان میزان، افزایشی در نظر گرفته شده است تا گوه در ترک منبسط شود. در این محاسبات انبساط یخ طبق رابطه ۱ خطی در نظر گرفته شده است که مقدار $\alpha = 0.00005 C^{-1}$ در نظر گرفته شده است [۲۵].

$$\Delta V = \alpha \times \Delta T \quad (1)$$

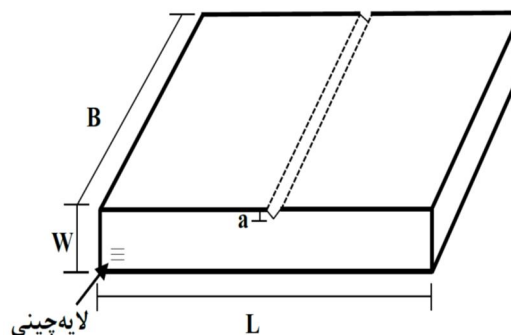
سطح داخلی ترک ایجاد شده به دلیل پارگی الیاف و زمینه، سطحی کاملاً زبر است. با یخ زدن آب در خلل و فرج لبه‌های ترک، اتصال کامل (قید^۴) بین یخ و سطوح ترک ایجاد می‌شود.^۵ بنابراین شرط مرزی، قید، برای انبساط یخ در نظر گرفته شده است.

۳-۱- نتایج مدل‌سازی اجزاء محدود

در شکل ۳ انبساط یخ و اثر آن بر ترک لبه‌ای ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، انبساط یخ لبه‌های ترک را در جهت بازشدگی (مود I) تحت تاثیر قرار داده است.



(الف)



(ب)

شکل ۱- هندسه الف) ترک سطحی در پره‌ی توربین بادی و ب) ورق کامپوزیتی با ترک لبه‌ای

۳-۲ مدل‌سازی اجزاء محدود

با توجه به جدول ۱ و قبل از آغاز فرآیند ساخت ورق کامپوزیتی، مدل‌سازی اجزاء محدود انجام شده است. مدل‌سازی ورق کامپوزیتی با ترک با زاویه راس متفاوت و در ضخامت‌های مختلف انجام شده است تا با توجه به شرایط جدول ۱، شرایط بهینه انتخاب شوند. هندسه ورق کامپوزیتی با الیاف شیشه/اپوکسی مطابق با شکل ۲ انتخاب و خواص مکانیکی^۱ آن مطابق با جدول ۲ در نظر گرفته شده است. از نرم‌افزار آباکوس و با المان‌های مکعبی نوع C3D8R در مدل‌سازی انبساط یخ استفاده شده است. در شکل ۲، ورق کامپوزیتی با هندسه دلخواه است که پس از تکمیل شبیه‌سازی و در نظر گرفتن شرایط جدول ۱، ابعاد ورق تعیین می‌شوند.

^۱ خواص مکانیکی انتخاب شده بر اساس لایه‌چینی پره توربین بادی در ناحیه آسیب‌دیده بوده که پس از انتخاب هندسه بهینه و ساخت ورق کامپوزیتی قابل به‌روزرسانی است.

^۲ Partition

^۳ Von Mises

^۴ Tie

^۵ در صورتی که این سطوح اتصال کامل منظور نشوند، به علت آنکه جزء مثلثی (یخ) پس از انبساط، افزایش حجم خواهد داشت و از طرفی هیچ شرط مرزی برای ممانعت از حرکت آن به سمت بیرون (قاعده ترک) وجود ندارد، بطور کامل به سمت بیرون حرکت خواهد کرد.

جدول ۱- مقایسه شرایط واقعی و استاندارد ASTM D5045

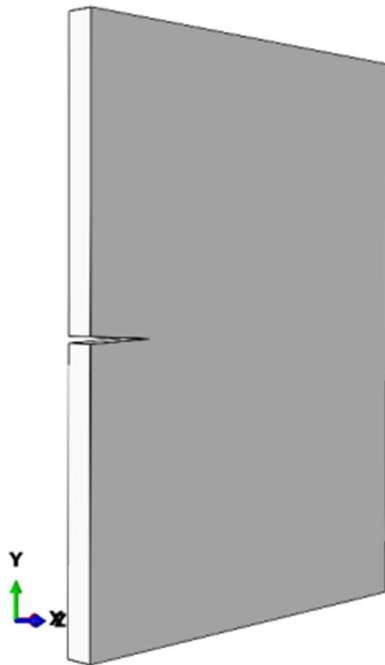
توضیحات	ASTM D5045	مسئله واقعی	پارامتر
نیاز به مصالحه بعلت عدم تطابق	$\frac{W}{2}$	شرایط کرنش صفحه‌ای	عرض نمونه (B)
	$0.45 \leq \frac{a}{W} \leq 0.55$	۵ تا ۱۰ میلی‌متر	عمق ترک (a)
ضخامت W عرض نمونه‌های بریده شده خواهد بود. این پارامتر با فرآیند ساخت محدود می‌شود.	-	-	ضخامت نمونه

جدول ۲- خواص مکانیکی شیشه/اپوکسی [۳۰]

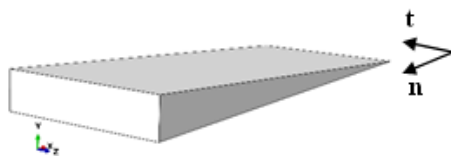
E_1 [GPa]	E_2 [GPa]	E_3 [GPa]	ν_{12}	G_{12} [GPa]	G_{13} [GPa]	G_{23} [GPa]
۱۸/۴۳	۱۸/۴۳	۳/۵۷	۰/۱۵	۲/۸۵	۲/۸۵	۲/۸۵

جدول ۳- خواص یخ تا دمای ۲۰- سانتی‌گراد [۲۵]

E_1 [GPa]	ρ [kg/m ³]	ν
۸/۷	۹۱۷	۰/۳۱



(الف)



(ب)

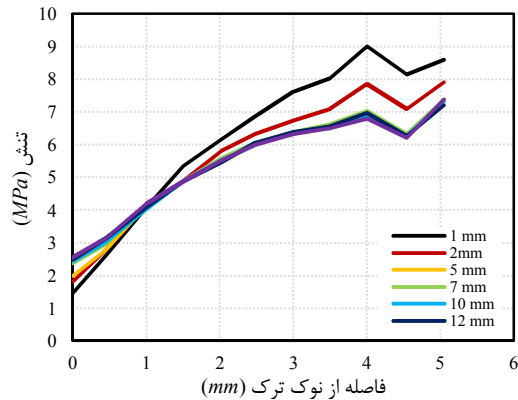
شکل ۲- طرحواره (الف) ورق کامپوزیتی با ترک لبه‌ای و (ب) جزء مثلثی (گوه)

۳-۱-۱- رابطه ضخامت ورق با شرایط کرنش صفحه‌ای

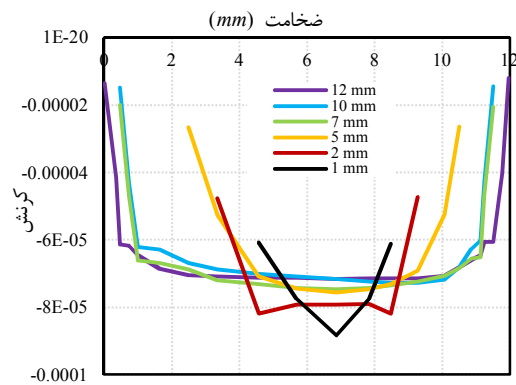
طبق جدول ۱ و دست‌یابی به شرط کرنش صفحه‌ای، ضخامت ورق باید به حدی بزرگ باشد که شرایط کرنش صفحه‌ای در ورق ایجاد شود. بدین منظور، توزیع تنش در راستای محور n و توزیع تنش و کرنش در راستای محور t برای ضخامت‌های مختلف بدست آمده است.

الف) توزیع تنش در راستای n (عمق ترک)

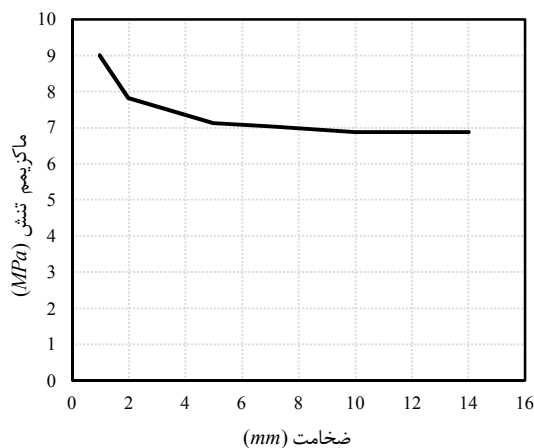
همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، تنش حداکثر (در جهت n) در طول لبه ترک با افزایش ضخامت ورق از ۱ تا ۵ میلی‌متر کاهش پیدا کرده و از آن پس تقریباً ثابت مانده است؛ همچنین با افزایش ضخامت ورق توزیع تنش یکنواخت‌تر شده است. از سویی، یک عدم یکنواختی (تکینگی) مشاهده می‌شود. دلیل این عدم یکنواختی در نمودارها، اثر لبه‌ای ناشی از انبساط و حرکت یخ به سمت لبه ترک (بیرون) است. در تمامی عمق‌های فوق و در فاصله‌ای حدود ۲۰٪ از کل عمق ترک از دهانه خارجی آن، اثر تکینگی ظاهر می‌شود.



شکل ۴- مقادیر تنش در عمق ۵ میلی‌متر ترک در ورق با ضخامت‌های مختلف (زاویه راس ۵ درجه)



شکل ۵- اثر تغییر ضخامت بر توزیع کرنش برای ضخامت‌های مختلف با زاویه راس ۵ درجه



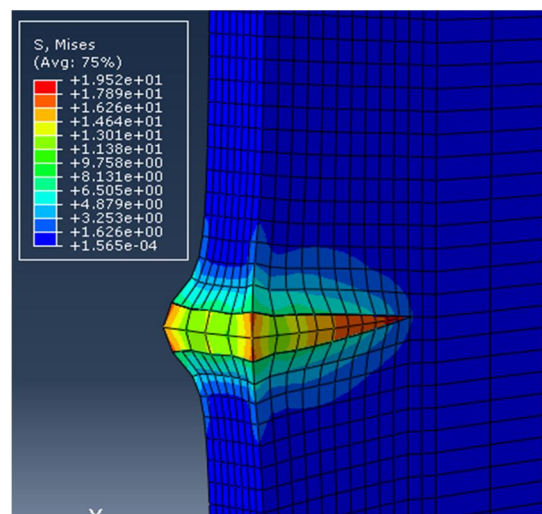
شکل ۶- نمودار ماکزیمم تنش در حالت حذف تاثیر لبه (در زاویه ۵ درجه)

ب) توزیع تنش و کرنش در راستای t

در شکل ۵ مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت ورق از ۱ تا ۱۲ میلی‌متر، توزیع کرنش (در راستای t) یکنواخت‌تر شده و ناحیه کرنش ماکزیمم ثابت، توسعه یافته است. هر چه ناحیه کرنش ماکزیمم در راستای ضخامت وسیع‌تر باشد، فرض کرنش صفحه‌ای صحیح‌تر است؛ همچنین مشاهده می‌شود، با افزایش ضخامت از ۱۰ تا ۱۲ میلی‌متر، توسعه ناحیه کرنش ماکزیمم، کمتر از ۵ درصد تغییر کرده است؛ بنابراین ضخامت بهینه ۱۰ میلی‌متر است. طبق شکل ۵، در ورق با ضخامت یک میلی‌متر، فقط یک نقطه با کرنش حداکثر در وسط ضخامت وجود دارد.

۳-۱-۲- تغییرات ماکزیمم تنش در راس ترک

یکی از فاکتورهای تاثیرگذار در میزان نیروی اعمالی ناشی از انبساط یخ، ضخامت ورق کامپوزیتی است. با توجه به شکل ۶، با افزایش ضخامت ورق، ماکزیمم تنش رخ داده، کاهش می‌یابد. چنانکه مشاهده می‌شود، این پارامتر تا ضخامت ۱۰ میلی‌متر کاهش یافته و پس از آن با تغییر از حالت تنش صفحه‌ای به کرنش صفحه‌ای، تقریباً ثابت می‌ماند. همانطور که از شکل ۶ مشخص است، در انتخاب پارامتر B (شکل ۱-ب) باید دقت شود تا شرط کرنش صفحه‌ای به درستی اعمال شود.



شکل ۳- نتیجه شبیه‌سازی ترک سطحی در ورق کامپوزیتی با زاویه راس ۵ درجه (کل جسم)

ایجاد ترک در سه مرحله به ترتیب از ازه مکانیکی، کاتر با ضخامت ۰/۲ میلی‌متر و نهایتاً تیغ ریش تراش با ضخامت ۰/۱ میلی‌متر استفاده شده است.

۴-۲- آزمون سرمایش/گرمایش سیکلی همراه با رطوبت

ورق کامپوزیتی ترکدار به کمک فریزر، به تعداد ۲۵ و ۱۰۰ سیکل تحت سرمایش/گرمایش متناوب همراه با تزریق آب در محل ترک بین دماهای ۱۸- و دمای محیط طبق شکل ۸، قرار گرفت. پس از طی تعداد سیکل‌های از پیش تعیین شده، تعداد ۳ نمونه، مطابق شکل ۹، از ورق بریده شده و در ادامه، آزمون سرمایش/گرمایش انجام شد. با این کار شرط کرنش صفحه‌ای در آزمون سرمایش/گرمایش به خوبی رعایت شده است. شکل ۱۰ ورق کامپوزیتی ترکدار همراه با یخ پس از آزمون سرمایش را نشان می‌دهد.

نمونه‌های آماده شده برای آزمون خمش سه‌نقطه‌ای بدون اعمال سیکل‌های سرمایش/گرمایش و رطوبت با کد TS-x و نمونه‌های قرار گرفته تحت شرایط سیکلی با کد WFTyy-z نامگذاری شدند که yy تعداد سیکل اعمالی و x و z شماره نمونه در هر گروه را نشان می‌دهد.

۴-۳- آزمون خمش سه نقطه‌ای و استخراج نمودارهای نیرو-تغییر مکان

آزمون خمش سه‌نقطه‌ای نمونه‌ها طبق استاندارد ASTM D5045 و با استفاده از دستگاه سرو-الکترو-مکانیکال^۷ مدل



شکل ۷- فرآیند ساخت ورق کامپوزیتی به روش VARTM

^۷ Servo-Electro-Mechanical

۴- مواد و آزمون‌ها

۴-۱- ساخت ورق کامپوزیتی

همانطور که در مدل‌سازی اجزاء محدود مشاهده شد، ضخامت B شکل ۱ باید حداقل ۱۰ میلی‌متر انتخاب شود تا شرایط کرنش صفحه‌ای در سیکل‌های سرمایش/گرمایش ایجاد شود.

از سویی، بر اساس استاندارد ASTM D5045 پارامتر W باید دو برابر B یعنی، ۲۰ میلی‌متر باشد؛ اما با توجه به شرایط آزمایشگاهی، ساخت ورق با ضخامت ۲۰ میلی‌متر دارای محدودیت‌هایی نظیر، قدرت کم پمپ خلاء، ویسکوزیته بالای رزین و همچنین ساختار پارچه بافته الیاف است و از سوی دیگر برای نمونه‌های با ضخامت ۱۰ میلی‌متر، اجرای سیکل‌های سرمایش/گرمایش که باید حاوی آب باشند، به دلیل کم بودن ضخامت نمونه‌ها با مشکلاتی همراه است. به همین دلیل ورق کامپوزیتی با ابعاد بزرگتر ساخته شد تا پس از انجام هر مرحله از آزمون سرمایش/گرمایش سیکلی و بردن نمونه‌ها با ضخامت مشخص، مرحله بعدی آزمون انجام شود. به این منظور، ورق کامپوزیتی با ابعاد ۱۲۰*۲۴۰ و ضخامت ۶ میلی‌متر^۱ (۳۱ لایه) از الیاف پارچه‌بافته شده شیشه ۲۰۰g/m^۲ (ساخت شرکت جوشی^۲ چین) با ضخامت تقریبی ۰/۲ میلی‌متر و رزین LR620 ترکیب شده با سخت‌کننده^۳ H620 (ساخت شرکت بایتکس^۴ ترکیه) به نسبت ۱۰۰ به ۲۰ استفاده شده است. در شکل ۷ نمای کلی ساخت ورق کامپوزیتی به روش VARTM نشان داده شده است.

ورق کامپوزیتی ساخته شده به روش VARTM^۵ و با آرایش^۶ $\left[\pm 45/0/\pm 45/90 \right]_g$ است. ترک لبه‌ای ایجاد شده در ورق کامپوزیتی جهت رعایت هندسه معرفی شده در استاندارد ASTM D5045 در سه مرحله ایجاد شد. برای

^۱ حداکثر ضخامت ورق قابل دستیابی بر اساس سه پارامتر تاثیرگذار قدرت پمپ، ویسکوزیته رزین و ساختار الیاف

^۲ Jishi

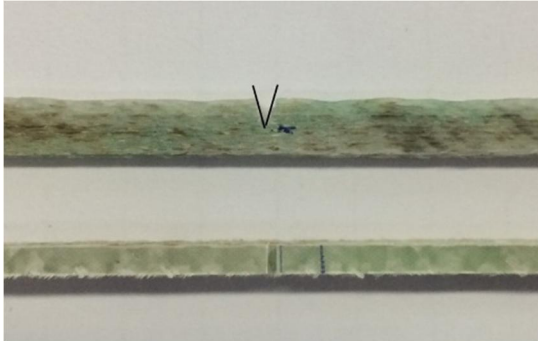
^۳ Hardener

^۴ Bitex Composite

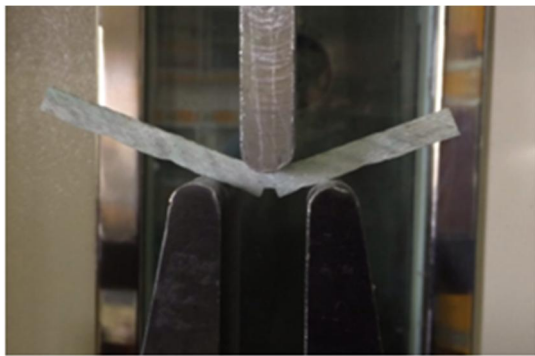
^۵ Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (VARTM)

^۶ این آرایش طبق لایه‌چینی پره توربین بادی در موقعیت ترک لبه‌ای انتخاب شده است.

شامل افت ناگهانی نیروی قابل تحمل و نهایتاً فاز سوم آسیب پیش‌رونده شامل، قسمت دندان‌دندانه تا تسلیم نهایی است.



(الف)

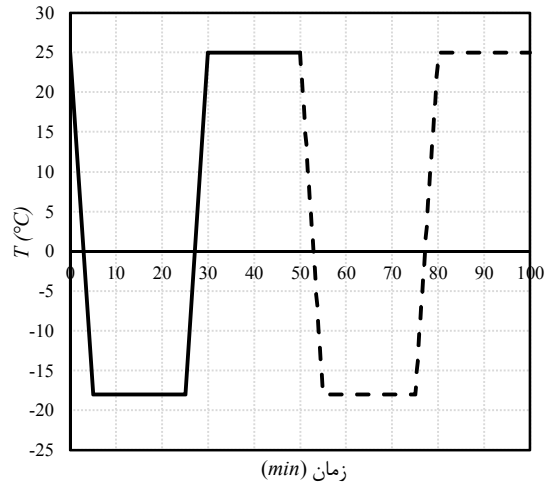


(ب)

شکل ۹- هندسه‌ی نمونه‌های آماده شده بر اساس آزمون خمش سه‌نقطه‌ای الف) نمونه با ترک لبه‌ای و ب) آزمون خمش سه‌نقطه‌ای



شکل ۱۰- ورق کامپوزیتی همراه با یخ بعد از سیکل سرمایش (کادر مستطیلی قرمز رنگ)



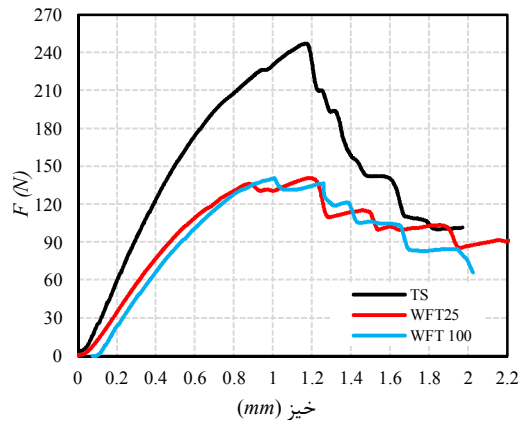
شکل ۸- دیاگرام سرمایش/گرمایش سیکلی

۱۰ mm/min با سرعت جابجایی فک Santam STM-150 آزمایش شدند. مقدار جابجایی به کمک نیروسنج ۲ kN در موقعیت فک بالایی با حداکثر خطای ۰/۵٪ و نرم‌افزار STM Controller اندازه‌گیری شده و به‌صورت خروجی اکسل ثبت شده است؛ همچنین آزمایش‌ها در دمای تقریبی ۲۵ درجه سانتی‌گراد انجام شده است. ابعاد نمونه‌ها طبق جدول ۴ بوده و فاصله بین فک‌ها در شکل ۹، ۲۶/۵ میلی‌متر است. در شکل ۹، یک نمونه تحت خمش سه‌نقطه‌ای در حین و پس از آزمون نشان داده شده است.

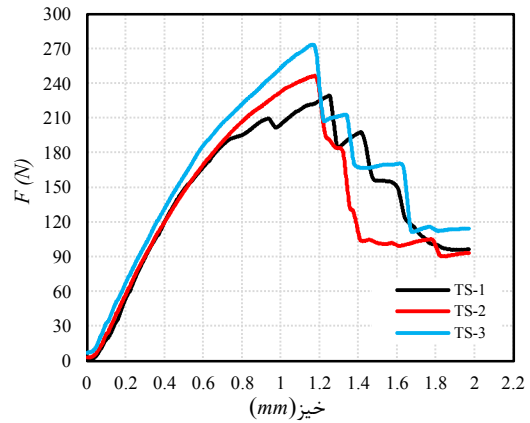
۵- نتایج آزمون خمش سه‌نقطه‌ای

منحنی نیرو-تغییر مکان مستخرج از آزمون خمش سه‌نقطه‌ای برای نمونه‌های بدون سیکل، با ۲۵ سیکل و ۱۰۰ سیکل در شکل‌های ۱۱، ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است. این منحنی‌ها از منظر رفتار کلی، شیب قسمت خطی نمودارها، نقطه شروع غیرخطی شدن نمودار، میزان غیرخطی شدن، رفتار نمونه در شکست اولیه و پس از شکست اولیه قابل بررسی هستند. برای بررسی و مقایسه بهتر تغییر خواص، از هر دسته از منحنی‌ها، یک منحنی استخراج و در شکل ۱۴ رسم شده است.

در کلیه نمودارهای نیرو-تغییر مکان شکل‌های ۱۱ تا ۱۳، سه فاز مجزا قابل تشخیص است؛ فاز اول تا حداکثر نیروی قابل تحمل در آزمون خمش سه‌نقطه‌ای که خود شامل دو قسمت خطی و غیر خطی است، فاز دوم



شکل ۱۴- منحنی نیرو-تغییر مکان خمش سه نقطه‌ای به ازای سیکل‌های مختلف

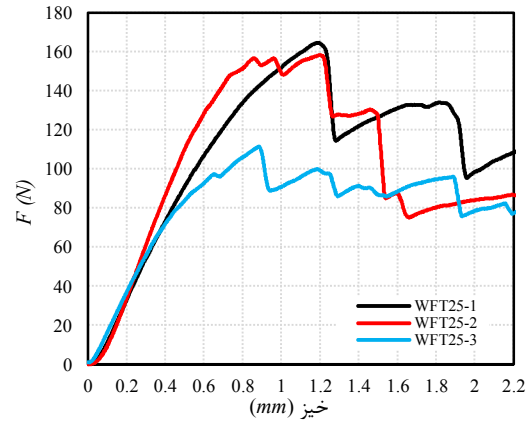


شکل ۱۱- منحنی نیرو-تغییر مکان خمش سه نقطه‌ای نمونه بدون سیکل سرمایه‌ش/گرمایش

۵-۱- فاز اول: تا شکست اولیه

۵-۱-۱- قسمت خطی نمودار

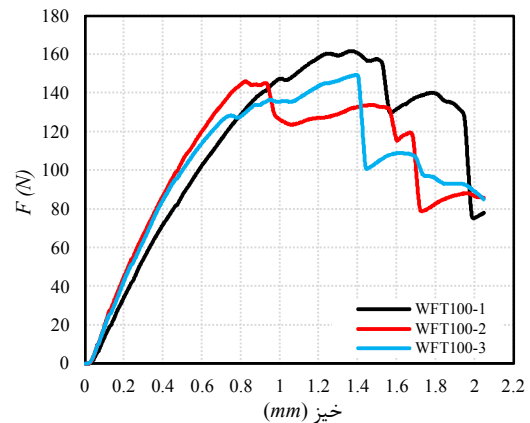
طبق شکل ۱۴، در بازه ۰/۲ تا ۰/۸ میلی‌متر خیز، با افزایش سیکل‌های سرمایه‌ش/گرمایش، شیب قسمت خطی منحنی نیرو-تغییر مکان کاهش می‌یابد که معرف خواص الاستیک ورق کامپوزیتی ساخته شده است. بعد از ۱۰۰ سیکل سرمایه‌ش/گرمایش شیب خط مماس تقریباً ۳۲٪ افت کرده است؛ همچنین میزان خطی بودن در خیز مشخص از ۲۵٪ برای نمونه بدون سیکل سرمایه‌ش/گرمایش تا ۱۰٪ برای نمونه با ۱۰۰ سیکل کاهش یافته است. مقادیر مختلف شیب در جدول ۴ ارائه شده است. در شکل ۱۵، نحوه تغییر شیب قسمت خطی به ازای سیکل‌های مختلف سرمایه‌ش/گرمایش نشان داده شده است. طبق این شکل، شیب قسمت خطی به ازای سیکل‌های سرمایه‌ش/گرمایش غیر از ۲۵ و ۱۰۰ سیکل، قابل پیش‌بینی است.



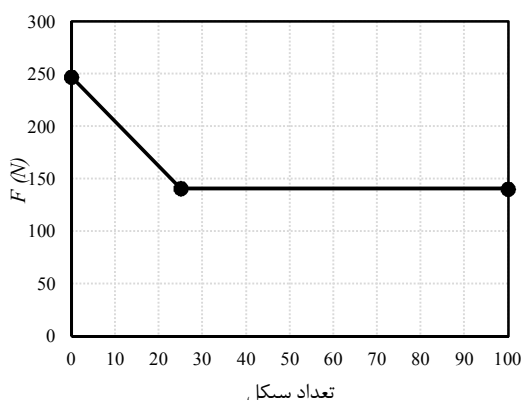
شکل ۱۲- منحنی نیرو-تغییر مکان خمش سه نقطه‌ای نمونه با ۲۵ سیکل سرمایه‌ش/گرمایش

۵-۱-۲- نقطه شروع و میزان غیرخطی شدن نمودار

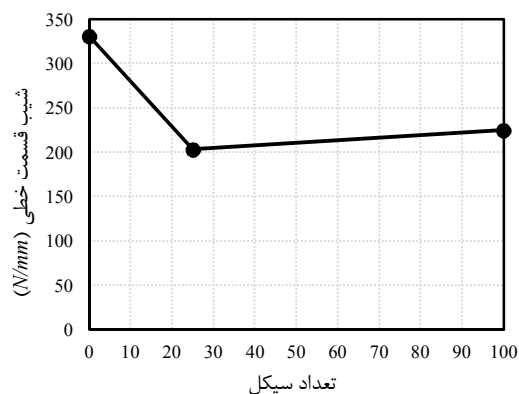
نمونه‌های کامپوزیتی تحت نیروی خمش سه نقطه‌ای در ابتدا تا خیز مشخصی رفتار خطی دارند و پس از آن تا شکست نهایی، به دلیل رشد ترک در محل نوک ترک و کاهش سختی، نمودار از حالت خطی خارج می‌شود. میزان خارج شدن از حالت خطی نمودار، نشان دهنده نقش کمتر شکست ترد در شکست نهایی است؛ بنابراین با افزایش سیکل‌های سرمایه‌ش/گرمایش، ظرفیت بار قابل تحمل نمونه کاهش پیدا



شکل ۱۳- منحنی نیرو-تغییر مکان خمش سه نقطه‌ای نمونه با ۱۰۰ سیکل سرمایه‌ش/گرمایش



شکل ۱۶- تغییرات حداکثر نیروی قابل تحمل به ازای سیکل‌های مختلف



شکل ۱۵- تغییرات شیب قسمت خطی منحنی نیرو-تغییر مکان به ازای سیکل‌های مختلف

نکته حائز اهمیت آن است که بیشترین افت تا ۲۵ سیکل اول رخ داده و پس از آن افت چندانی مشاهده نمی‌شود. در واقع از ۲۵ تا ۱۰۰ سیکل خواص مکانیکی تا سطح جدیدی کاهش یافته (رفتار مجانبی) و از آن پس تغییر چندانی نخواهند کرد.

با افزایش چگالی میکروتُرک‌ها در مقابل سیکل‌های سرمایش/گرمایش، مقاومت تک‌لایه‌ها افت کرده و در سطح انرژی پایین‌تری تسلیم اتفاق می‌افتد. نمونه اولیه تحت اثر سیکل‌های سرمایش/گرمایش نبوده و تسلیم در سطح انرژی بالاتری اتفاق افتاده و شکست آن نیز ناگهانی‌تر است.

هر چه تعداد سیکل‌های سرمایش/گرمایش افزایش یابد، از شدت شکست اولیه کاسته شده و نمودار مسطح‌تر خواهد بود. این پدیده را نیز می‌توان به افزایش تعداد مکانیزم‌های خرابی و آمادگی بیشتر نوک ترک برای توسعه، در اثر افزایش چگالی میکرو ترک مرتبط دانست.

۵-۳- فاز سوم: پس از شکست اولیه

فاز سوم معرف مد واماندگی پیوسته^۱ نمونه است. این فاز دقیقاً بعد از افت اولیه و ناگهانی نیروی قابل تحمل رخ داده و تا تسلیم شدن آخرین تک‌لایه ادامه می‌یابد. همانطور که مشاهده می‌شود، در شروع فاز سوم، نمودار دندان‌دندانه شده و در قبال تغییر شکل زیاد، افت نیروی ناچیزی اتفاق افتاده

کرده و شکست ترد زودتر اتفاق خواهد افتاد. این موضوع در شکل‌های ۱۱، ۱۲ و ۱۳ قابل مشاهده است.

در توضیح این پدیده، دمای پایین به تنهایی باعث تردتر شدن زمینه شده است و از سویی دیگر، سیکل‌های سرمایش/گرمایش عامل ایجاد میکروتُرک و افزایش چگالی آن در زمینه می‌شود [۹]. با کاهش عمومی خواص زمینه همزمان با ایجاد تنش مضاعف ناشی از جذب آب توسط زمینه، اندرکنش بین مدهای واماندگی در فصل مشترک زمینه و الیاف رخ خواهد داد [۲، ۸، ۱۱ و ۱۲]؛ بنابراین با افزایش چگالی میکروتُرک‌ها با افزایش سیکل‌ها در زمینه، مکانیزم‌های خرابی بیشتر نظیر جدایش الیاف و زمینه و تورق، در سطح انرژی پایین‌تری فعال شده و از خواص خطی و غیرخطی نمودارها بطور کلی خواهد کاست.

۵-۲- فاز دوم: شکست اولیه

طی شکست اولیه، تسلیم ناگهانی بدون هیچگونه هشدار آغاز می‌شود (شکست ترد). بیشترین افت نیروی قابل تحمل متعلق به نمونه اولیه (TS) به میزان تقریبی ۲۵٪ است (شکل ۱۱) و هرچه تعداد سیکل‌های سرمایش/گرمایش مرطوب افزایش می‌یابد، میزان افت کمتر شده که کمترین افت نیرو مربوط به نمونه WFT-100 با ۵٪ است (شکل ۱۳).

در شکل ۱۶، تغییرات حداکثر نیروی قابل تحمل در شکست با افزایش سیکل‌های سرمایش/گرمایش نشان داده شده است. مشاهده می‌شود، با افزایش سیکل‌ها تا ۱۰۰ سیکل، میزان نیروی قابل تحمل تا ۴۳٪ افت خواهد کرد.

¹ Progressive Damage

انجام ۱۰۰ سیکل سرمایش/گرمایش، شیب قسمت خطی نمودار نیرو-تغییر مکان تا ۳۲٪ و حداکثر بار قابل تحمل در شکست اولیه نمونه تا ۴۳٪ افت کرده است. از سوی دیگر، شکل پذیری ورق کامپوزیتی (رفتار غیر خطی نمونه‌ها) با افزایش سیکل‌های سرمایش/گرمایش کاهش چشم‌گیری داشته و رفته رفته از شدت شکست ناگهانی ورق کامپوزیتی کاسته شده است؛ همچنین افزایش سیکل‌ها بر رفتار ورق کامپوزیتی پس از تسلیم نیز تاثیر مستقیم داشته و ناحیه آسیب پیوسته بطور یکنواخت‌تر اتفاق افتاده است.

- کاهش خواص مربوط به شیب قسمت خطی و حداکثر بار قابل تحمل تا ۲۵ سیکل اول اتفاق افتاده است و پس از آن کاهش خواص زیادی مشاهده نمی‌شود. این موضوع در تعمیر و نگهداری پره توربین بادی نصب شده در مناطق کوهستانی حائز اهمیت است.

است. طی فاز سوم، مکانیزم آسیب غالب، ورقه‌ورقه شدن و شکست زمینه است [۳]. در این فاز نیز با افزایش سیکل‌های سرمایش/گرمایش، قسمت دندان‌دندانه نمودار مسطح‌تر است.

۶- نتیجه‌گیری

هدف از مقاله حاضر، مطالعه چگونگی تاثیر و میزان سیکل‌های سرمایش/گرمایش در حضور رطوبت بر تغییر خواص ورق کامپوزیتی شیشه/اپوکسی است. در ابتدا، با توجه به محدودیت تهیه نمونه از پره توربین بادی شکسته شده در نیروگاه بادی هرزویل، به کمک مدل‌سازی اجزاء محدود، ابعاد نمونه مورد نیاز جهت ساخت برای آزمون خمش سه‌نقطه‌ای طبق شرایط واقعی مسئله (کرنش صفحه‌ای) استخراج شد. طبق نتایج آزمایشگاهی:

- با افزایش سیکل‌های سرمایش/گرمایش، خواص ورق کامپوزیتی نظیر شیب قسمت خطی نمودار نیرو-تغییر مکان، حداکثر بار قابل تحمل ورق در بارگذاری خمشی و رفتار نمونه تا شکست دستخوش تغییر زیادی شده است. به‌گونه‌ای که با

جدول ۴- مشخصات هندسی و خواص ورق کامپوزیتی

نمونه	عرض (W) cm	ضخامت (B) cm	طول ترک (a) cm	شیب قسمت خطی (N/mm)	حداکثر بار قابل تحمل (N)	انحراف معیار
TS-1	۰/۵۷۱	۰/۳۴۱	۰/۲۸۱			
TS-2	۰/۵۶۰	۰/۳۴۰	۰/۲۸۳	۳۳۰/۹	۲۴۷/۳	۰/۹۰
TS-3	۰/۵۷۳	۰/۳۴۱	۰/۲۸۰			
WFT25-1	۰/۵۵۸	۰/۲۸۱	۰/۲۸۰			
WFT25-2	۰/۵۴۵	۰/۲۹۳	۰/۲۸۱	۲۰۳/۵	۱۴۰/۹	۱/۴۸
WFT25-3	۰/۵۶۰	۰/۲۸۶	۰/۲۸۵			
WFT100-1	۰/۵۶۱	۰/۳۵۶	۰/۲۷۹			
WFT100-2	۰/۵۵۲	۰/۳۵۲	۰/۲۸۰	۲۲۵/۱	۱۴۰/۷	۰/۱۸
WFT100-3	۰/۵۴۰	۰/۳۵۶	۰/۲۸۰			

۷- مراجع

- [13] Kim MG, Kang SG, Kim CG, Kong CW (2007) Tensile response of graphite/epoxy composites at low temperatures. *Compos Struct* 79(1): 84-89.
- [14] Sanchez-Saez TGRS, Barbero E, Zaera R, Navarro C (2002) Static behavior of GFRPs at low temperatures. *Compos Struct* 33(5): 383-390.
- [15] Kumagai S, Shindo Y, Inamoto A (2005) Tension-tension fatigue behavior of GFRP woven laminates at low temperatures. *Cryogenics* 45(2): 123-128.
- [16] Abdollahi Azghan M, Asghari Arpatappeh F, Eslami-Farsani R (2017) Experimental study of the effect of cryogenic cycling and metal surface treatment on flexural properties of aluminum-epoxy/basalt fibers laminate composite. *Iranian J Manufact Eng* 4(1): 15-24. (in Persian)
- [17] Asghari Arpatappeh F, Abdollahi Azghn M, Eslami Farsani R (2020) Effect of cryogenic environmental condition upon flexural properties of aluminum- epoxy/ basalt fibers- glass fibers laminates. *J Sci Technol* In press. (in Persian)
- [۱۸] عابدی م، موسوی ترشیزی س ا، سرفراز ر (۲۰۱۹) بررسی میکروساختاری آسیب ناشی از یخ‌زدگی و سیکل‌های سرمایش/گرمایش بر کامپوزیت شیشه/اپوکسی با شیار لبه‌ای. ۲۷امین کنفرانس مهندسی مکانیک، ۱۰ تا ۱۲ اردیبهشت، تهران، ایران.
- [19] Franco LAL, Grac MLA, Silva FS (2008) Fractography analysis and fatigue of thermoplastic composite laminates at different environmental conditions. *Mater Sci Eng A* 488(1): 505-513.
- [20] Asp LE (1998) The effects of moister and temperature on the interlaminar delamination toughness of a carbon/epoxy composite. *Compos Sci Technol* 58(6): 967-977.
- [21] Todo M, Nakamura T, Takahashi K (2000) Effects of moister absorption on the dynamic interlaminar fracture toughness of carbon/epoxy composites. *J Compos Mater* 34(8): 630-648.
- [22] Russell SG (2016) A residual strength prediction methodology for composite laminates with surface damage under tensile loading. in 57th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 4-8 January, San Diego, USA.
- [23] Caous D, Bois C, Wahl JC, Palin-Luc T, Valette J (2017) A method to determine composite material residual tensile strength in the fiber direction as a function of the matrix damage state after fatigue loading. *Compos B Eng* 127(32): 15-25.
- [24] Abedi M, Moussavi Torshizi SE, Sarfarz R (2020) Damage mechanisms in glass/epoxy composites subjected to simultaneous humidity and freeze-thaw cycles. *J Eng Fail Anal* (In Press) <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.105041>.
- [۱] صبا نیرو (۱۳۸۷) بررسی علل ترک‌خوردگی پره توربین بادی ۶۶۰ کیلوواتی نیروگاه هرزویل، گزارش درون‌سازمانی.
- [۲] ترابی‌زاده م ا (۱۳۹۰) تحلیل رفتار مکانیکی صفحات کامپوزیتی با استفاده از روش تخریب پیش‌رونده در دماهای پایین. پایان‌نامه دکتری، دانشگاه علم و صنعت.
- [3] Alkhader M, Zhai X, Chiang FP (2017) Experimental investigation of the synergistic effects of moisture and freeze-thaw cycles on carbon fiber vinyl-ester composites. *J Compos Mater* 52(7): 919-930.
- [4] Hancox NL (1998) Thermal effects on polymer matrix composites: Part 1. Thermal cycling. *Mater Design* 19(3): 85-91.
- [5] Rinaldi G, Maura G (1993) Durable glass-epoxy composites cured at low temperatures—Effects of thermal cycling, UV irradiation and wet environment. *Polym Int* 31(4): 339-345.
- [6] Sousa JM, Correia JR, Cabral-Fonseca S, Diogo AC (2014) Effects of thermal cycles on the mechanical response of pultruded GFRP profiles used in civil engineering applications. *Compos Struct* 116(1): 720-731.
- [7] Marín L, Gonzalez EV, Maimí P, Trias D, Camanho PP (2016) Hygrothermal effects on the translaminar fracture toughness of crossply carbon/epoxy laminates: Failure mechanisms. *Compos Sci Technol* 122(3): 130-139.
- [8] Sugiman S, Gozali M, Setyawan PD (2017) Hygrothermal effects of glass fiber reinforced unsaturated polyester resin composites aged in steady and fluctuating consitions. *Adv Compos Mater* 28(1): 87-102.
- [9] Hodzic A, Kim JK, Lowe AE (2004) The effects of water aging on the interphase region and interlaminar fracture toughness in polymer-glass composites. *Compos Sci Technol* 64(13): 2185-2195.
- [10] Ghasemi AR, Moradi M (2016) Low thermal cycling effects on mechanical properties of laminated composite materials. *Mech Mater* 96(3): 126-137.
- [11] Cormier L, Joncas S (2010) Effects of cold temperature, moisture and freeze-thaw cycles on the mechanical properties of unidirectional glass fiber-epoxy composites. 51st AIAA SDM Student Symposium, Orlando, Florida.
- [12] Cormier L, Joncas S, Nijssen RPL (2016) Effects of low temoerature on the mechanical properties of glass fiber-epoxy composites: static tension, compression, R=0.1 and R=-1 fatigue of $\pm 45^\circ$ laminates. *Wind Energy* 19(6): 1023-1041.

- [28] Almansour FA, Dhakal HN, Zhang ZY (2018) Investigation into Mode II interlaminar fracture toughness characteristics of flax/basalt reinforced vinyl ester hybrid composites. *Compo Sci Technol* 154: 117-127.
- [29] ASTM D5045-99 (2007) Standard Test Methods for Plane-Strain Fracture Toughness and Strain Energy Release Rate of Plastic Materials. ASTM International, www.astm.org.
- [30] Moslemi M, Khoshnavan M (2015) Cohesive zone parameters selection for mode-I prediction of interfacial delamination. *J Mech Eng* 61(9): 507-516.
- [25] Voitkovskii KF (1960) The mechanical properties of Ice. Translated by the American Meteorological Society.
- [۲۶] عابدی م، موسوی ترشیزی س ا، علی‌آبادی آ، سرفراز ر (۲۰۱۹) مشخصه‌سازی اجزاء محدود توسعه یافته اثر انبساط یخ در ورق کامپوزیتی با شیار لبه‌ای. ۲۷امین کنفرانس مهندسی مکانیک، ۱۰ تا ۱۲ اردیبهشت، تهران، ایران.
- [27] Pimenta S, Pinho ST (2014) An analytical model for the translaminar fracture toughness of fiber composites with stochastic quasi-fractal fracture surfaces. *J Mech Phys Solids* 66(1):78-102.