

ارائه قطعه تست جدید دیسک شکاف مرکزی با هدف بررسی ضرایب شدت تنش در مواد اورتوتروپیک

مهدی فکور^{۱*} و زهرا حاجی^۲

*- استاد، دانشگاه تهران، گروه مهندسی هوافضا، دانشکده علوم و فنون نوین، mfakoor@ut.ac.ir

۲- دانشجوی دکتری، دانشگاه تهران، گروه مهندسی هوافضا، دانشکده علوم و فنون نوین، z.khaji.2011@ut.ac.ir

چکیده

در این پژوهش، قطعه تست جدیدی با عنوان دیسک شکاف مرکزی به منظور بررسی پارامترهای شکست در مواد اورتوتروپیک ارائه می‌شود. این قطعه قابلیت پوشش دهی ترکیبات مختلف مود از مود I خالص تا مود II خالص را دارد. مهم‌ترین ابزار تغییر از مود I خالص تا مود II خالص در وضعیت ترک در راستا و عمود بر الیاف، تغییر جهت بارگذاری تنها با چرخاندن قطعه در تست کشش است. چوب به عنوان ماده کامپوزیت طبیعی تقویت شده با الیاف در نظر گرفته می‌شود. در ابتدا، خواص شکست قطعات چوبی با استفاده از تست کششی استخراج می‌شود. سپس، قطعات دیسک در وضعیت ترک در راستا و عمود بر الیاف با تغییر جهت بارگذاری تست می‌شوند. پس از تست تجربی، بارهای بحرانی در هر وضعیت بارگذاری استخراج می‌شوند. سپس به کمک نرم افزار المان محدود، ضرایب شدت تنش دیسک مورد نظر در وضعیت‌های مختلف بارگذاری از مود I خالص تا مود II خالص بدست می‌آیند. همچنین برای موقعیت‌های ترک در راستا و عمود بر الیاف، وضعیت‌های بارگذاری که شرایط مود I و II در آن رخ می‌دهد، شناسایی می‌شوند. به این ترتیب، قطعه تست جدید قابلیت پوشش دهی ترکیبات مختلف مود از مود I خالص تا مود II خالص را داراست.

کلید واژه ها: ضرایب شدت تنش، ماده اورتوتروپیک، قطعات تست، تحلیل المان محدود.

۱- مقدمه

بررسی مکانیک شکست سازه‌های کامپوزیتی نقش مهمی در تحلیل و طراحی این سازه‌ها دارد. مکانیک شکست الاستیک خطی می‌تواند به عنوان یک ابزار مناسب برای ارزیابی رفتار رشد ترک در بارگذاری مود ترکیبی I/II به کار گرفته شود. بر مبنای اصول مکانیک شکست، ضرایب شدت تنش مهم‌ترین پارامتر برای توصیف میدان تنش اطراف نوک ترک هستند. این ترک‌ها جهت‌های مختلفی با الیاف می‌توانند داشته باشند و ضرایب شدت تنش مختلف ایجاد می‌شوند. در نتیجه سازه‌های کامپوزیتی شرایط مختلف بارگذاری از مود I خالص تا مود II خالص را تحمل می‌کنند. تغییرات ضرایب شدت تنش با استفاده از نرم افزارهای رایج المان محدود مورد مطالعه قرار می‌گیرد [۱]. این ضرایب به خواص مکانیکی ماده وابسته هستند. به علاوه، چقرمگی شکست به عنوان مقاومت جسم ترک‌دار در برابر شکست به علت بار اعمال شده است و جزئی از خواص ماده کامپوزیتی است.

توصیف میدان تنش اطراف نوک ترک مسئله بسیار مهم است، زیرا پیش‌بینی پارامترهای نوک ترک شامل ضرایب شدت تنش و ترم تنش T از شکست نمونه‌های مختلف جلوگیری می‌کند. تحقیقاتی در این زمینه برای بررسی رفتار شکست مواد ایزوتروپیک انجام شده است [۲، ۳]. مواد اورتوتروپیک ساختار پیچیده‌تری نسبت به مواد ایزوتروپیک دارند و تحقیقات محدودتری نیز بر روی پارامترهای نوک ترک این مواد تاکنون انجام شده است [۴، ۵].

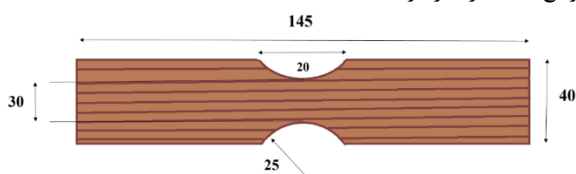
تنظیمات آزمایشگاهی مختلفی برای ارزیابی رفتار شکست مواد در بارگذاری مود ترکیبی I/II و مود II خالص تاکنون پیشنهاد شده است. دیسک برزلی با ترک مرکزی (Centrally Crack Brazilian Disk) یکی از قطعات شناخته شده است که برای بررسی رفتار شکست به کار گرفته می‌شود [۶-۹]. این قطعه هندسه‌ای ساده دارد و قابلیت اعمال مودهای بارگذاری مختلف با تغییر زاویه ترک نسبت به بار اعمالی را داراست. تغییرات طول ترک، زاویه ترک و زاویه بار سه پارامتری هستند که می‌توانند رفتار ترک را تحت تاثیر قرار دهند. روش‌های مختلفی برای تحلیل دیسک برزلی ایزوتروپیک با ترک زاویه‌دار برای تخمین مقادیر ضرایب شدت تنش مود I و II وجود دارد [۱۰-۱۴].

فکور و همکاران زاویه بحرانی بین جهت ترک و الیاف را در مواد اورتوتروپیک پیش‌بینی کردند و پارامترهای نوک ترک را با توسعه تنش و روش عددی استخراج کردند. آن‌ها تابع تغییرات این پارامترها را نسبت به زاویه بین ترک و الیاف در مود I و II ارائه کردند [۱۵]. فاید ضرایب شدت تنش مود ترکیبی I/II را در یک صفحه ترک‌دار با لبه کج [۱۶]، دیسک نیم دایره‌ای ترک‌دار [۱۷] و دیسک برزلی با ترک زاویه‌دار مرکزی [۱۸] با استفاده از روش المان محدود استخراج کرد. او تاثیر طول و زاویه ترک را بر روی ضرایب شدت تنش مود I و II را بررسی کرد. علیها و همکاران رفتار ترک را در مخلوط آسفالت در قطعات خمشی نیم دایره‌ای با ترک لبه‌ای بررسی کردند. آن‌ها تاثیر طول، زاویه و موقعیت نوک ترک را بر روی فاکتورهای شکلی برای مخلوط آسفالت مورد بررسی قرار دادند [۱۹]. کاویانی و همکاران با استفاده از تحلیل المان محدود ضرایب شدت تنش ترک‌های ترمیم یافته را محاسبه کردند. آن‌ها تاثیر هندسه و مشخصات مکانیکی را بر روی ضرایب شدت تنش مورد مطالعه قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که وجود تکه کامپوزیت منجر به کاهش شدید ضرایب شدت تنش در امتداد ترک می‌شود [۲۰]. میارکا و همکاران میدان جابجایی نوک ترک در یک دیسک برزلی با ناچ مرکزی را تحت بارگذاری مود ترکیبی I/II با استفاده از روش همبستگی تصویر دیجیتال (Digital Image Correlation) استخراج کردند و ضرایب شدت تنش و ترم تنش T را با استفاده از روش ترکیبی

۲۰ سانتیگراد و رطوبت نسبی ۶۵ درصد تا تعادل، باعث ایجاد ۱۲ درصد رطوبت در چوب می‌شود.

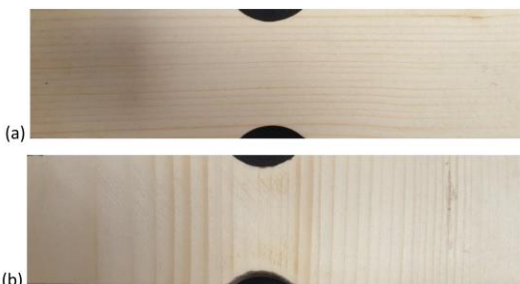
۳- استخراج خواص شکست قطعات چوبی

به منظور استخراج رفتار شکست مواد کامپوزیتی نیاز است که مشخصات مکانیکی این مواد استخراج شوند. مشخصات مکانیکی به کمک تست‌های آزمایشگاهی استاندارد بدست می‌آید. برای استخراج مدول الاستیک در جهت الیاف E_L و عمود بر الیاف E_T ، تست‌های کشش بر روی نمونه‌های شکل (۲) انجام می‌شوند. ابعاد، هندسه و بارگذاری قطعه مورد نظر مشابه مرجع [۱۵] در نظر گرفته شده است.



شکل ۲- هندسه قطعه مورد نظر برای تست کشش (ابعاد بر حسب میلی متر)

برای برطرف کردن پراکندگی نتایج آزمایشگاهی، سه نمونه برای وضعیت ترک در راستا و عمود بر الیاف ساخته می‌شود. قطعات تست در شکل (۳) نشان داده شده‌اند.



شکل ۳- مقاومت کششی قطعات تست در وضعیت (a) در راستای الیاف (b) عمود بر الیاف

تست کشش با هدف استخراج منحنی‌های تنش-کرنش، با استفاده از دستگاه تست کشش-فشار انجام می‌شود. قطعات تست شده به صورت شکل (۴) دچار شکست می‌شوند.



شکل ۴- قطعات شکسته شده در تست کشش از محل ناچ

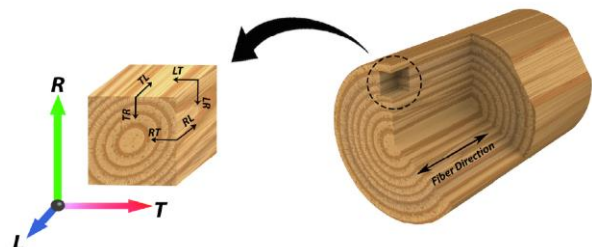
مدول الاستیک شیب بخش خطی نمودار تنش-کرنش یا نیرو-جابجایی است. برای افزایش دقت استخراج مدول‌های الاستیک، میانگین سه مدول

تخمین زدند [۲۱]. ژانگ و همکاران تاثیر عرض ترک پیش ساخته را بر ضرایب شدت تنش قطعه خمشی نیم دایره‌ای ناچ دار با استفاده از روش المان محدود به صورت عددی مورد بررسی قرار دادند و فرمول‌های جدید برای ضرایب شدت تنش ارائه کردند [۲۲].

با مرور مراجع فوق می‌توان نتیجه گرفت که تاکنون قطعه تست استاندارد ارائه نشده است که توانایی پوشش دهی ترکیبات مختلف مود از مود I خالص تا مود II خالص را داشته باشد. به این ترتیب، در این پژوهش با هدف بررسی پارامترهای شکست مواد اورتوتروپیک، قطعه دیسک شکاف مرکزی معرفی می‌شود. تنها با چرخاندن قطعه دیسک شکاف مرکزی در تست تجربی، ترکیبات مختلف مود از مود I خالص تا مود II خالص حاصل می‌شود. قطعه فوق در وضعیت ترک در راستا و عمود بر الیاف تست و بررسی می‌شود. پس از انجام تست، بارهای بحرانی در هر وضعیت بارگذاری استخراج می‌شوند و با کمک نرم افزار المان محدود، ضرایب شدت تنش در هر وضعیت بدست می‌آید. به این ترتیب، ترکیبات مختلف مود از مود I خالص تا مود II خالص بدست می‌آیند. همچنین، بر مبنای نتایج حاصل می‌توان وضعیت‌های بارگذاری که مود I و II خالص در آن رخ می‌دهد، بدست آورد.

۲- قطعات چوبی

مطالعه تجربی و انتخاب یک قطعه مناسب یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در زمینه مطالعه شکست قطعات اورتوتروپیک بوده است. قطعات چوبی انتخاب خوبی برای پیش‌بینی رفتار شکست مواد اورتوتروپیک بوده‌اند. این قطعات کامپوزیت‌های طبیعی هستند که به وسیله الیاف تقویت شده‌اند. چوب به عنوان یک ماده کارآمد در پژوهش‌ها به کار گرفته می‌شود. چوب یک ماده کامپوزیتی طبیعی غیرهمگن، متخلخل و وابسته به رطوبت است. در شرایط طبیعی چوب به طور قابل توجهی به میرایی بارهای خارجی واکنش نشان می‌دهد. عیوب طبیعی در چوب معادل با اندازه‌های مختلف ترک است. قطعات چوبی از یک تخته چوبی سالم ساخته شده‌اند. چوب یک ماده اورتوتروپیک استوانه‌ای است که دارای خواص مکانیکی مستقل در سه جهت است. جهت طولی موازی با فایبر (L)، جهت شعاعی عمود بر حلقه‌های رشد چوب (R) و جهت مماسی مماس بر حلقه‌های رشد (T) سه جهت عمود برهم هستند که به عنوان محورهای اصلی چوب تعریف می‌شوند. در شکل (۱) محورهای اصلی چوب نمایش داده شده‌اند.



شکل ۱- نمایش محورهای اصلی قطعه چوبی

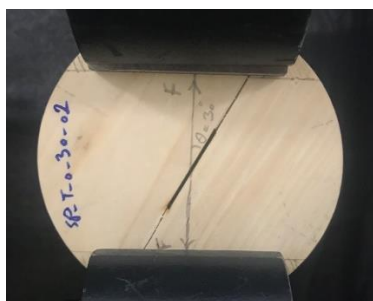
در این بخش، برای تست تجربی از قطعات چوبی کاج روسی استفاده می‌شود. دما و رطوبت دو عامل مهم هستند که بر روی خواص مکانیکی چوب تاثیر می‌گذارند. بنابراین، در تست چوب این عوامل باید براساس استاندارد ASTM D143-14 کنترل شود [۲۳]. قطعات کاج روسی در دمای

جدول (۱) مشخصات مکانیکی کاج روسی

	E_L	E_T	E_R	G_{LR}	G_{LT}	G_{RT}	ν_{12}
مشخصات مکانیکی	۹,۶	۰,۵	۰,۹	۰,۶۸	۰,۵۸	۰,۱۱	۰,۴
کاج روسی	۹	۴	۹	۷	۱	۶	۷

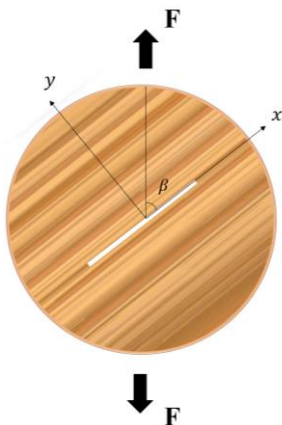
۴- تست شکست قطعات ترک دار

یکی از مهم ترین اهداف این پژوهش، ارائه قطعه تستی است که بتواند به راحتی ترکیبات مود ترکیبی را از مود I خالص تا مود II خالص پوشش دهد. تاکنون تست استاندارد برای آزمایش شکستگی نمونه‌های چوب ترک‌دار منتشر نشده است. نمونه‌ای که در این بخش پیشنهاد می‌شود، دیسک دایره‌ای چوبی است. یک دیسک ترک‌دار با عنوان نمونه کشش دیسک شکاف مرکزی ارائه شده است. شکل (۷) نمونه‌ای از این قطعه را نشان می‌دهد.



شکل ۷- نمونه دیسک شکاف مرکزی تحت زاویه $\beta = 30$

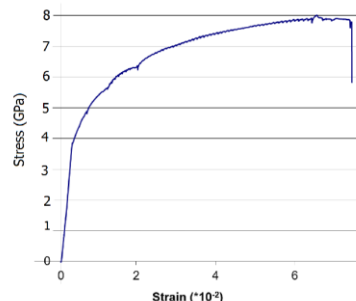
در این پژوهش، زاویه بین بار-ترک به صورت شکل زیر نمایش داده می‌شوند:



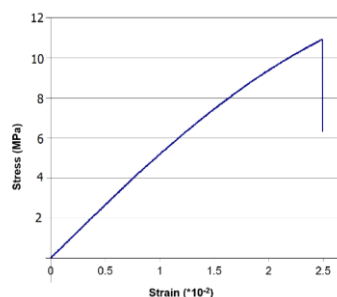
شکل ۸- نمایش زاویه بار-ترک در قطعه دیسک ترک دار چوبی تحت بارگذاری کششی

در این بخش، به تست قطعات چوبی پرداخته می‌شود، تا در نهایت بتوان به کمک بار بحرانی در بارگذاری مود ترکیبی I/II ضرایب شدت تنش را استخراج کرد. داده‌های تجربی انتشار ترک در این بخش مورد بحث قرار می‌گیرند، تا در نهایت منحنی‌های حد شکست مواد استخراج شوند. در گام نخست قطعات تست باید ساخته شوند. به این ترتیب، کنده‌های چوبی به صورت ورق‌هایی با ضخامت ۵ میلی‌متر بریده می‌شوند. برای ایجاد دیسک‌هایی با قطر ۱۰۰ میلی‌متر، دایره‌هایی روی ورق‌ها کشیده می‌شوند، سپس به کمک آرّه برقی برش داده می‌شوند. سپس ورق‌ها به صورت

الاستیک در وضعیت ترک در راستای الیاف و عمود بر الیاف به عنوان مدول الاستیک نهایی در نظر گرفته می‌شود. شکل‌های (۵) و (۶) نمودارهای تنش- کرنش برای تست کشش در راستا و عمود بر الیاف را نشان می‌دهد.



شکل ۵- نمودار تنش بر حسب کرنش برای تست کشش در راستای الیاف



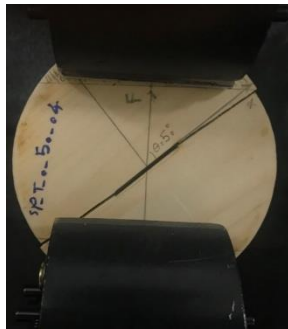
شکل ۶- نمودار تنش بر حسب کرنش برای تست کشش در راستای عمود بر الیاف

در شکل (۵) شکست نمونه‌ها در امتداد الیاف با رفتار غیرخطی قابل توجهی دیده می‌شود. در این وضعیت فایبر شکسته می‌شود و این اصلی‌ترین دلیل رفتار غیرخطی منحنی تنش-کرنش در حالت ترک در راستای الیاف است. در شکل (۶) شکست قطعات در راستای عمود بر الیاف به صورت ناگهانی مانند شکست قطعات ترد اتفاق می‌افتد. در این حالت مود واماندگی ماتریس به عنوان مود تخریب غالب شناخته می‌شود. مقدار میانگین مدول الاستیک به کمک نمودار تنش-کرنش، در جدول (۱) استخراج شده است.

جدول (۱) استخراج مدول الاستیک در راستای الیاف و عمود بر الیاف

شماره قطعه	1	2	3	مقدار میانگین
E_L	۱۰,۲۹	۹,۱۴	۹,۷۲	۹,۶۹
E_T	۰,۴۹	۰,۶۱	۰,۵۳	۰,۵۴

به کمک نسبت بین E_T و E_L می‌توان دیگر مشخصات مکانیکی را با استفاده از مرجع [۲۴]، استخراج کرد. در این مرجع، همه مشخصات مکانیکی تابعی از E_L هستند. در جدول (۲)، همه مشخصات مکانیکی کاج روسی استخراج شده است.



شکل ۱۱- رشد ترک در نمونه چوبی در راستای الیاف

۵- محاسبه ضرایب شدت تنش به روش تحلیل المان محدود

از آنجا که رابطه تحلیلی برای استخراج چقرمگی شکست قطعات تست وجود ندارد، از نرم افزار المان محدود برای تخمین ضرایب شدت تنش استفاده می‌شود. ضرایب چقرمگی شکست ماده اورتوتروپیک به کمک بار بحرانی در آزمایشات تجربی قطعات تست به دست می‌آید.

۵-۱- هندسه و مش بندی قطعات

در این بخش به کمک نرم افزار آباکوس از المان پوسته برای تحلیل قطعات تست استفاده می‌شود. رفتار پوسته را می‌توان به کمک تئوری خمشی پوسته توصیف کرد. به علت ضخامت کم قطعات در مقایسه با دیگر ابعاد، مدل المان محدود تحت شرایط تنش صفحه‌ای تحلیل می‌شود. المان‌های پوسته برای مدل‌سازی سازه‌هایی استفاده می‌شوند که در آن یک بعد ضخامت از سایر ابعاد بسیار کوچکتر باشد. استفاده از المان پوسته به علت کاهش تعداد المان‌ها، منجر به ذخیره زمان و کاهش معادلات حل می‌شود. المان پوسته رایج S8R با شش درجه آزادی در روند مش‌بندی برای تحلیل کامپوزیت و پوسته‌های ساندویچی به کار گرفته می‌شود. تغییر شکل‌های داخل صفحه و انعطاف پذیری برشی در فرمول‌های المان پوسته امکان نمایش پاسخ غیرخطی مواد را فراهم می‌کند.

ضرایب شدت تنش با مش‌بندی و انتخاب المان‌های نزدیک نوک ترک استخراج می‌شوند. تعدادی کانتور دایره‌ای با مرکز نوک ترک تعریف می‌شوند. ضرایب شدت تنش با میانگین‌گیری از مقادیر K_I و K_{II} به دست آمده از همه کانتورها استخراج می‌شوند. کاهش شعاع دایره‌های کمکی تاثیری بر روی ضرایب شدت تنش ندارد. در این مدل دو دایره‌ی کمکی اطراف نوک ترک برای استخراج ضرایب شدت تنش تعریف می‌شوند. دایره‌های کمکی با شعاع یک هشتم طول ترک مدل می‌شوند. تنش اطراف نوک ترک متناسب با $1/\sqrt{r}$ است که r فاصله شعاعی از نوک ترک است. در صورتی که r به صورت حدی به صفر نزدیک شود (نزدیک شدن به نوک ترک) تنش به سمت بی‌نهایت می‌رود. این پدیده تکنیکی در نوک ترک نامیده می‌شود. در المان‌های تکین، سه گره تحت فشار هستند و گره‌های میانی از دو المان مثلثی به یک چهارم طول ترک منتقل می‌شوند تا پیش‌بینی دقیق‌تری از توابع تنش و کرنش به دست بیاید. به علت پدیده تکنیکی و تمرکز بالای تنش در اطراف ترک، اندازه المان برای ارزیابی پارامترهای شکست کاهش می‌یابد. اندازه المان‌ها در حدود 0.005 میلی‌متر است که منجر به همگرایی سریع‌تر و دقیق‌تر نتایج عددی می‌شود. چند تحلیل با تعداد مختلف المان انجام می‌شود تا حداقل تعداد المان‌های مورد

کمترین ضخامت ممکن ترک با استفاده از آرّه برقی با ضخامت 5 میلی‌متر بریده می‌شوند. این ضخامت طبق استانداردهای مربوطه می‌باشد تا شکاف به صورت ترک در نظر گرفته شود، زیرا در مقایسه با سایر ابعاد نمونه، عرض برش ناچیز است. ترک به طول 30 میلی‌متر در راستای فایبر در مرکز دیسک ایجاد می‌شود. محل بالا و پایین قطعه به کمک گریپ گرفته می‌شود. در این دیسک دایره‌ای بار می‌چرخد و زاویه بین ترک و الیاف ثابت است (برای دو وضعیت ترک در راستای الیاف و عمود بر الیاف قطعات تست می‌شوند). بار از طریق فیکسچرها بر قطعات چوبی اعمال می‌شود. در اینجا زاویه بین بارگذاری و ترک با β نشان داده می‌شود. به منظور تست قطعه، 9 قطعه با مشخصات ثابت و زاویه‌های مختلف β به کار گرفته می‌شود. با تغییر زاویه β از 12 تا 90 ، می‌توان به راحتی مود ترکیبی را از مود I خالص تا مود II خالص پوشش داد. به منظور ایجاد داده‌های کافی سه نمونه قطعه برای هر جهت گیری بار و ترک تست می‌شوند.

نمونه‌های ترک در راستای الیاف در شکل (۹) مشاهده می‌شوند. همانطور که در شکل مشخص است، در زاویه‌های $\beta = 12, 20$ (که به شرایط مود II نزدیک است) به دلیل اینکه نمونه‌ها از فک سر نخورند از واشر استفاده شده است.



شکل ۹- قطعات تست در جهات مختلف زاویه بار-ترک در وضعیت ترک در راستای الیاف

به علاوه، در شکل (۱۰) برای ترک‌های عمود بر الیاف در زاویه‌های مختلف بار-ترک، تست تجربی برای 9 وضعیت بارگذاری انجام می‌شود.



شکل ۱۰- قطعات تست در جهات مختلف زاویه بار-ترک در وضعیت ترک در راستای عمود بر الیاف

در شکل (۱۱) نمایی از نمونه‌ای که توسط فیکسچرها نگه داشته شده است، دیده می‌شود. هم‌چنین، در این شکل قطعه بعد از اعمال بار در جهت الیاف شکسته شده است. در همه قطعات ترک‌داری که مورد تست قرار گرفتند (در وضعیت ترک در راستای الیاف و عمود بر الیاف)، ترک در راستای الیاف شروع به رشد می‌کند.

جدول ۳- بار بحرانی و ضرایب شدت در زاویه‌های مختلف بار-ترک در وضعیت ترک در راستای الیاف

β (deg)	F_c (N)	K_I (MPa \sqrt{m})	K_{II} (MPa \sqrt{m})
۱۲	۱۵۵۴	-۰,۰۲۳	۰,۶۸۶
۲۰	۱۴۰۱	۰,۰۸۹۸	۰,۷۰۷
۳۰	۱۲۳۹	۰,۱۹۵	۰,۶۵۹
۴۰	۹۷۳	۰,۲۵۷	۰,۴۸۶
۵۰	۷۰۹	۰,۲۶۴	۰,۳۱۹
۶۰	۶۰۰	۰,۲۸۴	۰,۲۲۱
۷۰	۵۶۵	۰,۳۱۸	۰,۱۵
۸۰	۵۳۰	۰,۳۲۴	۰,۰۷۲
۹۰	۴۵۲	۰,۳۴۳	۰

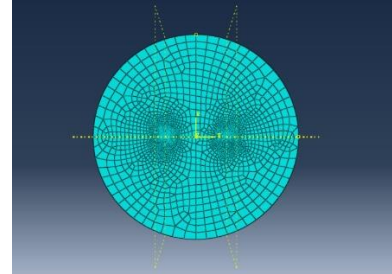
در حقیقت، در این بار بحرانی ترک شروع به انتشار می‌کند. بنابراین مقادیر نیروی که در جدول (۳) گزارش شده است، نیرویی است که باید در ناحیه فرآوری شکست بر مکانیزم‌های سخت شوندگی غلبه کند. با توجه به این که ضرایب شدت تنش به کمک این بار بحرانی استخراج می‌شوند، پس ضرایب شدت تنش مربوط به فرآیند انتشار ترک است.

با افزایش زاویه β از ۱۲ تا ۹۰، شرایط بارگذاری درون صفحه مختلفی از مود I خالص تا مود II خالص بدست می‌آید. شرایط مود I خالص در $\beta = 90$ ایجاد می‌شود. بنابراین، وقتی ترک در راستای الیاف است و شرایط مرزی دیسک متقارن است، مودهای مختلفی با تغییر جهت بارگذاری ایجاد می‌شود. بنابراین برای برقراری شرایط مود I خالص، نه تنها شرایط مرزی و هندسه قطعه باید متقارن باشد، بلکه باید بارگذاری هم عمود بر فایبر باشد. براساس جدول (۳)، در وضعیت ترک در راستای الیاف مقدار چقرمگی شکست $K_{Ic} = 0.343$ در زاویه $\beta = 90$ استخراج می‌شود.

در مود II خالص، $K_{IIc} = 0.686$ است. این داده یک داده غیرقابل قبول است. زیرا مقدار K_I منفی است و مقدار منفی ضریب شدت تنش بی‌معناست. این داده خارج از محدوده است. تخمین چقرمگی شکست مود II همواره یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در مورد مواد کامپوزیتی است. داده‌های پراکنده در مراجع مختلف مکانیک شکست برای این مقدار گزارش شده است که شاهدهی از این ادعاست [۲۵-۲۷]. برقراری کامل شرایط مود II خالص برای استخراج ضریب شدت تنش مود II بسیار سخت است. بنابراین خطا در مقادیر چقرمگی شکست مود II امکان پذیر است. البته این تست برای هر شرایط بارگذاری سه مرتبه انجام شده است و مقدار میانگین برای ضریب شدت تنش بحرانی گزارش شده است. به این ترتیب، وضعیت مود II خالص، در زاویه ای بین ۱۲ تا ۲۰ درجه رخ می‌دهد.

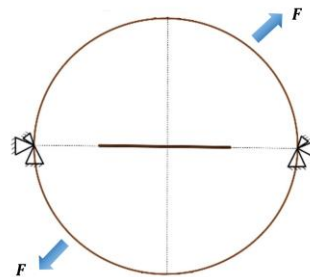
به علاوه، برای وضعیت ترک‌های عمود بر الیاف بعد از انجام تست کشش، نیروهای بحرانی و ضرایب شدت تنش مود I و II در هر زاویه بار-ترک به شرح زیر است:

نیاز برای همگرایی نتایج به دست آید. شکل (۱۲)، نمایی از مش‌بندی قطعات تست را نشان می‌دهد. به علاوه، از روش J-integral برای محاسبه K_{Ic} استفاده شده است.



شکل ۱۲- مش بندی قطعه چوبی

اعمال شرایط مرزی و بارگذاری در این مدل از اهمیت بالایی برخوردار است. با توجه به این که در این مدل، وضعیت ترک و الیاف ثابت است و بارگذاری پیوسته تغییر می‌کند، خطی که در امتداد ترک وجود دارد که هیچ تنشی را تحمل نمی‌کند. پس طبق شکل (۱۳)، تکیه گاه ثابت در امتداد ترک در نظر گرفته می‌شود، تا جابجایی در جهت افقی دیسک را محدود کند. با توجه به این که بار در زاویه‌های مختلف بر دیسک اعمال می‌شود، در شکل (۱۳)، نمایی از اعمال بار در زاویه‌ای دلخواه نسبت به ترک مشاهده می‌شود.



شکل ۱۳- بار و تکیه گاه در دیسک چوبی

در قطعات تست زاویه بین بارگذاری و ترک از زاویه ۱۲ درجه شروع می‌شود، زیرا اگر زاویه بین بارگذاری و ترک کمتر از این مقدار باشد، فک دستگاه بر روی انتشار رشد ترک تاثیر می‌گذارد. در هر زاویه بار-ترک، با قرار دادن بار بحرانی و استفاده از کانتورهای انتگرال، ضرایب شدت تنش بحرانی محاسبه می‌شوند. در جدول (۳) بار بحرانی و ضرایب شدت تنش برای زاویه‌های مختلف بار-ترک (β) نشان داده شده است.

- Journal of Engineering Sciences* _ ISSN, vol. 2278, p. 947.2, 2013.
- [۲] A. A. Griffith, "VI. The phenomena of rupture and flow in solids," *Philosophical transactions of the royal society of london. Series A, containing papers of a mathematical or physical character*, vol. 221, no. 582-593, pp. 163-198, 1921.
- [۳] G. C. Sih, "Strain-energy-density factor applied to mixed mode crack problems," *International Journal of fracture*, vol. 10, no. 3, pp. 305-321, 1974.
- [۴] C. C. Poe Jr, J. R. Reeder, and F. G. Yuan, "Fracture behavior of a stitched warp-knit carbon fabric composite," 2001.
- [۵] J. Williams and M. Birch, "Mixed mode fracture in anisotropic media," in *Cracks and Fracture*: ASTM International, 1976.
- [۶] M. Ayatollahi, A. Torabi, and A. Rahimi, "Brittle fracture assessment of engineering components in the presence of notches: a review," *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, vol. 39, no. 3, pp. 267-291, 2016.
- [۷] A. Elghazel, R. Taktak, and J. Bouaziz, "Combined numerical and experimental mechanical characterization of a calcium phosphate ceramic using modified Brazilian disc and SCB specimen," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 670, pp. 240-251, 2016.
- [۸] C. Hou, Z. Wang, W. Liang, J. Li, and Z. Wang, "Determination of fracture parameters in center cracked circular discs of concrete under diametral loading: A numerical analysis and experimental results," *Theoretical and applied fracture mechanics*, vol. 85, pp. 355-366, 2016.
- [۹] W. Hua, S. Dong, X. Pan, and Q. Wang, "Mixed mode fracture analysis of CCBBD specimens based on the extended maximum tangential strain criterion," *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, vol. 40, no. 12, pp. 2118-2127, 2017.
- [۱۰] C.-S. Chen, E. Pan, and B. Amadei, "Fracture mechanics analysis of cracked discs of anisotropic rock using the boundary element method," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 35, no. 2, pp. 195-218, 1998.
- [۱۱] S. Dong, Y. Wang, and Y. Xia, "Stress intensity factors for central cracked circular disk subjected to compression," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 71, no. 7-8, pp. 1135-1148, 2004.
- [۱۲] M. Ayatollahi and M. Aliha, "Wide range data for crack tip parameters in two disc-type specimens under mixed mode loading," *Computational materials science*, vol. 38, no. 4, pp. 660-670, 2007.
- [۱۳] S. Tang, "Stress intensity factors for a Brazilian disc with a central crack subjected to compression," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 93, pp. 38-45, 2017.
- [۱۴] M. Eftekhari, A. Baghbanan, and H. Hashemolhosseini, "Determining stress intensity factor for cracked brazilian disc using extended finite element method," *International Journal of Scientific Engineering and Technology*, vol. 3, no. 7, pp. 890-893, 2014.
- [۱۵] M. Fakoor, R. Rafiee, and M. Sheikhsari, "The influence of fiber-crack angle on the crack tip parameters in orthotropic materials," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C*:

جدول ۴- بار بحرانی و ضرایب شدت تنش در زاویه‌های مختلف بار-ترک در وضعیت ترک عمود بر الیاف

β (deg)	F_c (N)	K_I (MPa \sqrt{m})	K_{II} (MPa \sqrt{m})
۱۲	۱۳۶۲	۰.۶۱۲	-۰.۲۳۹
۲۰	۸۱۸	۰.۵۷۶	-۰.۱۱۳
۳۰	۷۳۰	۰.۶۸۷	-۰.۰۳۶
۴۰	۴۴۳	۰.۴۸	۰.۰۳۶
۵۰	۳۸۶	۰.۳۲۶	۰.۰۵۶
۶۰	۹۵۲	۱.۰۴۴	۰.۴۷۷
۷۰	۱۸۸۴	۱.۶۵۶	۱.۶۴۸
۸۰	۲۲۰۲	۰.۷۹۹	۲.۵۷۶
۹۰	۲۳۹۹	۰	۲.۸۴۲

با استفاده از نرم افزار المان محدود و استفاده از نیروی بحرانی، ضرایب شدت تنش مود I و II به صورت زیر استخراج می‌شوند. طبق جدول (۴)، قطعه پیش رو در وضعیت ترک عمود بر الیاف در زاویه‌ای حدود $\beta = 35$ تحت شرایط مود II خالص و در زاویه‌ای حدود $\beta = 90$ تحت شرایط مود I خالص قرار می‌گیرد. با افزایش زاویه β از مقدار ۳۵ تا ۹۰ درجه، شرایط بارگذاری از مود II خالص تا مود I خالص تغییر می‌کند. به علاوه، با توجه به این که ضریب شدت تنش منفی غیرقابل قبول است، داده‌هایی که در شرایط $\beta < 35$ قرار دارند، خارج از محدوده هستند.

۶- نتیجه گیری و جمع بندی

در این پژوهش، به منظور بررسی ضرایب شدت تنش در مواد اورتوتروپیک تحت بارگذاری مود ترکیبی I/II، قطعه تست جدیدی با عنوان دیسک شکاف مرکزی ارائه شد. مهم ترین ویژگی دیسک فوق، توانایی پوشش دهی ترکیبات مختلف مود از مود I خالص تا مود II خالص تنها با چرخاندن قطعه در تست کششی است. به منظور بررسی ضرایب شدت تنش، در گام نخست خواص شکست قطعات چوبی استخراج شد. در گام دوم، قطعات فوق تحت تست کششی با هدف استخراج بارهای بحرانی در هر وضعیت بارگذاری برای ترک‌های در راستا و عمود بر الیاف قرار گرفت. در گام سوم، با استفاده از نرم افزار المان محدود، ضرایب شدت تنش در وضعیت های مختلف بارگذاری بدست آمد. به این ترتیب، دو دستاورد مهم این پژوهش به صورت زیر است:

(۱) ارائه قطعه تستی که توانایی پوشش دهی ترکیبات مختلف مود از مود I خالص تا مود II خالص را دارد. به این ترتیب، در وضعیت‌های مختلف بارگذاری ضرایب شدت تنش بدست آمدند.

(۲) استخراج وضعیت های بارگذاری که شرایط مود I و II خالص برای ترک‌های در راستا و عمود بر الیاف در آن رخ می‌دهد.

۷- مراجع

- [۱] G. Chaitanya, K. Srinivas, and J. S. Kumar, "Effect of fiber orientation on mode I crack opening stress intensity of an orthotropic laminate," *Research*

- Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 231, no. 3, pp. 418-431, 2017.
- [۱۶] A. Fayed, "Numerical analysis of mixed mode I/II stress intensity factors of edge slant cracked plates," *Engineering Solid Mechanics*, vol. 5, no. 1, pp. 61-70, 2017.
- [۱۷] A. Fayed, "Numerical evaluation of mode I/II SIF of quasi-brittle materials using cracked semi-circular bend specimen," *Engineering Solid Mechanics*, vol. 6, no. 2, pp. 175-186, 2018.
- [۱۸] M. Hammouda and A. Fayed, "Modes I/II SIF of a diametrically compressed Brazilian disc having a central inclined crack with frictional surfaces," *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, vol. 41, no. 4, pp. 856-868, 2018.
- [۱۹] M. Aliha, H. Ziari, B. Mojaradi, and M. J. Sarbijan, "Modes I and II stress intensity factors of semi-circular bend specimen computed for two-phase aggregate/mastic asphalt mixtures," *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 106, p. 102437, 2020.
- [۲۰] A. Rahbar Ranji and A. Kaviani, "Analysis of stress intensity factor along semi-elliptical surface crack reinforced by composite patching," *Strength, Fracture and Complexity*, vol. 11, no. 1, pp. 51-61, 2018.
- [۲۱] P. Miarka, A. S. Cruces, S. Seitzl, L. Malikova, and P. Lopez-Crespo, "Evaluation of the SIF and T-stress values of the Brazilian disc with a central notch by hybrid method," *International Journal of Fatigue*, vol. 135, p. 105562, 2020.
- [۲۲] S. Zhang, L. Wang, and M. Gao, "Numerical simulation of the influence of width of a prefabricated crack on the dimensionless stress intensity factor of notched semi-circular bend specimens," *Shock and Vibration*, vol. 2019, 2019.
- [۲۳] I. ASTM, "Standard test methods for plane-strain fracture toughness and strain energy release rate of plastic materials," *ASTM D5045-99*, 2007.
- [۲۴] F. P. Laboratory, *Wood handbook: Wood as an engineering material*. The Laboratory, 1987.
- [۲۵] M. Fakoor and N. M. Khansari, "A new approach for investigation of mode II fracture toughness in orthotropic materials," *Latin American Journal of Solids and Structures*, vol. 15, no. 3, 2018.
- [۲۶] N. Khansari, A. Farrokhi, and A. Mosavi, "Orthotropic mode II shear test fixture: Iosipescu modification," *Engineering Solid Mechanics*, vol. 7, no. 2, pp. 93-108, 2019.
- [۲۷] G. Catalanotti and J. Xavier, "Measurement of the mode II intralaminar fracture toughness and R-curve of polymer composites using a modified Iosipescu specimen and the size effect law," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 138, pp. 202-214, 2015.