

جنگل و فرآورده‌های چوب، مجله منابع طبیعی ایران
دوره ۶۸، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۴

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۱/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۱۱/۱۱

ص ۸۸۵-۸۷۳

بررسی آزمایشگاهی اثر فورفوریل‌اسیون بر مد ترکیبی

شکست چوب راش

- ❖ حمیده عبدالزاده*؛ فارغ‌التحصیل دکتری علوم و صنایع چوب و کاغذ دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، ایران
- ❖ محمد لایقی؛ استادیار گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، ایران
- ❖ قنبر ابراهیمی؛ استاد گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، ایران

چکیده

در این تحقیق شکست مد ترکیبی I/II چوب راش و چوب پلیمر آن به صورت آزمایشگاهی بررسی شد. از این رو، دو سیستم RL و TL انتخاب شدند که در آن‌ها صفحات ترک در طول الیاف چوب گسترش می‌یابند. این بررسی نشان داد آغاز رشد ترک در مد ترکیبی می‌تواند با معیار بسیار ساده شکست در این سیستم‌ها ارزیابی شود. نتایج نشان داد فورفوریل‌اسیون بر بار بحرانی شکست اثر می‌گذارد و باعث تغییر نمودارهای نیرو- تغییر مکان آزمون‌ها می‌شود. به دنبال تغییر مقدار نیروی بحرانی شکست، مقادیر چگرمگی شکست مد ترکیبی I/II تغییر می‌کند. با فورفوریل‌اسیون در هر دو سیستم ترک روند پراکنش K_{IC}/K_{IIC} تغییر کرد که نشان‌دهنده تغییر ماهیت ماده در اثر فورفوریل‌اسیون است. نتایج تحلیل تصاویر میکروسکوپ الکترونی نشان داد ایجاد میکروتُرک‌ها در ساختار چوب پلیمر احتمالاً یکی از عواملی است که باعث تغییر چگرمگی شکست چوب پلیمر می‌شود. این تغییرات هم‌زمان با تغییر ماهیت ماده و به دنبال آن افزایش مقاومت به برش موازی الیاف در اثر پلیمریزاسیون باعث تغییر چگرمگی شکست تحت مد ترکیبی می‌شود.

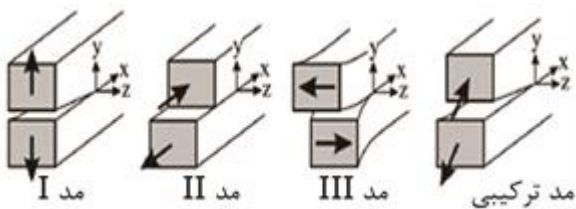
واژگان کلیدی: چگرمگی شکست، چوب پلیمر، فورفوریل‌اسیون، مد ترکیبی، مکانیک شکست.

مقدمه

کاربردهای سازه‌ای چوب در دهه‌های اخیر به سبب مسائل زیست‌محیطی و اکولوژیکی و حفظ منابع انرژی پیشرفتی قابل ملاحظه کرده است. در واقع، اعضای چوبی دارای معایب طبیعی رشد مانند گره‌ها و انحراف الیاف یا ترک‌ها و شکاف‌های ناشی از خشک کردن‌اند. برای بهینه‌سازی این ماده ارزشمند، انواع روش‌های حفاظت و اصلاح چوب در سطح جهان گسترش یافته است که اهمیت آن در کشورهایی همچون ایران، که با کمبود شدید چوب مواجه است، دوچندان می‌شود. فرایندهایی نظیر تولید چوب پلیمرها نیز نه تنها با اضافه کردن یک ماده به ساختار چوب موجب تغییر در ساختار آن و سپس تغییر در خواص مکانیکی و فیزیکی فرآورده حاصل می‌شوند، ممکن است طی فرایند ساخت معیایی را نیز در چوب به وجود آورند که کاربرد سازه‌ای آن را با محدودیت‌هایی همراه سازند. فورفوریل الکل^۱ یک پلیمر شیمیایی با منشأ گیاهی (زیست پلیمر)^۲ است که باعث واکنش‌پذیری چوب می‌شود و اغلب واکنش‌پذیری به وسیله هوموپلیمریزاسیون به صورت پایدار باقی می‌ماند و می‌تواند ویژگی‌های چوب را به شکل یک چوب پلیمر دیواره‌ای با ثبات ابعادی خوب و مقاوم به اسید و باز بهبود دهد [۱]. درک شکست چوب و چندسازه‌های چوبی از این نظر مهم است که سازه به علت معایب درونی، مانند ترک‌ها، قبل از رسیدن به ظرفیت بارگذاری پیش‌بینی شده، که معیار تنش آن را تعیین می‌کند، دچار گسیختگی می‌شود [۲]. این عامل روش‌های طراحی تنش سستی

را به علت تخمین‌های ضعیف ظرفیت تحمل بار تحت تأثیر قرار می‌دهد [۳]. راه چاره برای تحلیل این ترک‌ها استفاده از مکانیک شکست است.

اعضای چوبی در سازه‌ها دارای نواحی موضعی‌اند که در اثر بارهای وارده برش و کشش عمود بر الیاف زیادی را متحمل می‌شوند. مکانیک شکست رفتار ترک را در سه گروه طبقه‌بندی می‌کند (شکل ۱). شکست در مد I نشان‌دهنده جدایی متقارن تحت تنش کششی نرمال است. مد II شامل تنش‌های برشی در صفحه و مد III یا مد پارگی تنش‌های برشی خارج از صفحه است. شکاف‌ها و ترک‌ها در تیرهای چوبی سازه‌ها اغلب در معرض مد ترکیبی (مد I و II) هستند؛ یعنی ترکیبی از کشش و برش [۴ و ۵].



شکل ۱. چهار مد مختلف شکست در جسم دارای ترک

شرایط ترکیبی بیشتر در اعضای سازه‌هایی که در معرض بارگذاری خمشی‌اند ایجاد می‌شود و اغلب با خاصیت آنیزوتروپیک مواد چوبی بدتر می‌شود [۶]. نادیده گرفتن اثر برهم‌کنش مد ترکیبی در طراحی سازه‌های چوبی ممکن است به خطاهای معنادار در پیش‌بینی مقاومت و معیار شکست مد ترکیبی منتهی شود. بنابراین، پیش‌بینی گسیختگی اعضای چوبی شکاف‌دار از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. این معیارها اغلب به منزله سطوح شکست بر حسب

1. Furfuryl Alcohol
2. Bio Polymer

تحقیق می‌تواند سرآغازی برای بررسی‌های بیشتر در زمینه مکانیک شکست این مواد ساختمانی باشد. علاوه بر آن، به علت اینکه چوب پلیمرهای فورانی در کشورهای اروپایی وارد تولید تجاری شده‌اند و در ساخت سازه‌های چوبی مختلف استفاده می‌شوند، این فرآورده چوبی گزینه مناسبی برای این تحقیق به شمار می‌رود. بنابراین، در این بررسی خواص مکانیک شکست چوب پلیمر راش - فورفوریل الکلی تحت مد ترکیبی در سه سطح مختلف فورفوریلایسیون (کم، متوسط، نسبتاً زیاد) ارزیابی شد.

مواد و روش‌ها

روش آزمون و مواد

استاندارد یا روش آزمایشگاهی خاصی برای آزمون‌های شکست مد ترکیبی چوب و هر ماده دیگری تدوین نشده است و پژوهشگران آزمون‌های آزمایشگاهی مختلفی برای آزمون شکست مد ترکیبی چوب به کار برده‌اند. در مطالعات مکانیک شکست روش‌های مختلفی برای آزمون وجود دارد. گاهی برای ایجاد شرایط مد ترکیبی، با کمک گرفتن از تجهیزات خاص، خمش و کشش هم‌زمان به قطعه تحت آزمون اعمال می‌شود (روش MMB)^۱. آزمون‌های SENT روشی متداول‌تر است که به علت نیاز کمتر به تجهیزات خاص برای آزمون مکانیک شکست و تعیین چغرمگی شکست تحت مد ترکیبی به کار می‌رود و نتایج آن مانند آزمون‌های ترکیبی خمش و کشش ارزش مقایسه‌ای بسیار خوبی دارد. روش‌های مختلفی هم برای تفسیر نتایج بر حسب شدت‌های تنش مد I و II بحرانی به کار رفته است.

فاکتورهای شدت تنش مد I و II تعیین می‌شوند. به عبارت دیگر، به مثابه مکان هندسی که در اثر شکست به وجود می‌آید برای همه ترکیب‌های K_I و K_{II} تعیین می‌شود. معیارهای موجود بسیار تجربی‌اند و کاربردشان محدود به ترک‌هایی است که در طول الیاف چوبی گسترش می‌یابند [۷]. جهت ترک مهم است. زیرا تفاوت‌های زیادی در رفتار شکست بین ترک‌ها با جهت‌های مختلف در چوب وجود دارد. بر این اساس، بررسی از منظر مکانیک شکست برای گسیختگی مکانیکی در مقایسه با روش‌های سنتی مقاومت ماده تشریح بهتری ارائه می‌کند. وقتی جابه‌جایی در ضخامت صفحه به اندازه کافی مقید و محدود باشد، یعنی شرایط کرنش صفحه‌ای برقرار شود، مقدار صحیح K_C با آزمایش به دست می‌آید. K_C به عنوان کمیت مقاومت مواد در مقابل ترک به کار می‌رود. پارامتر K_C چغرمگی شکست کرنش صفحه‌ای نامیده می‌شود [۸].

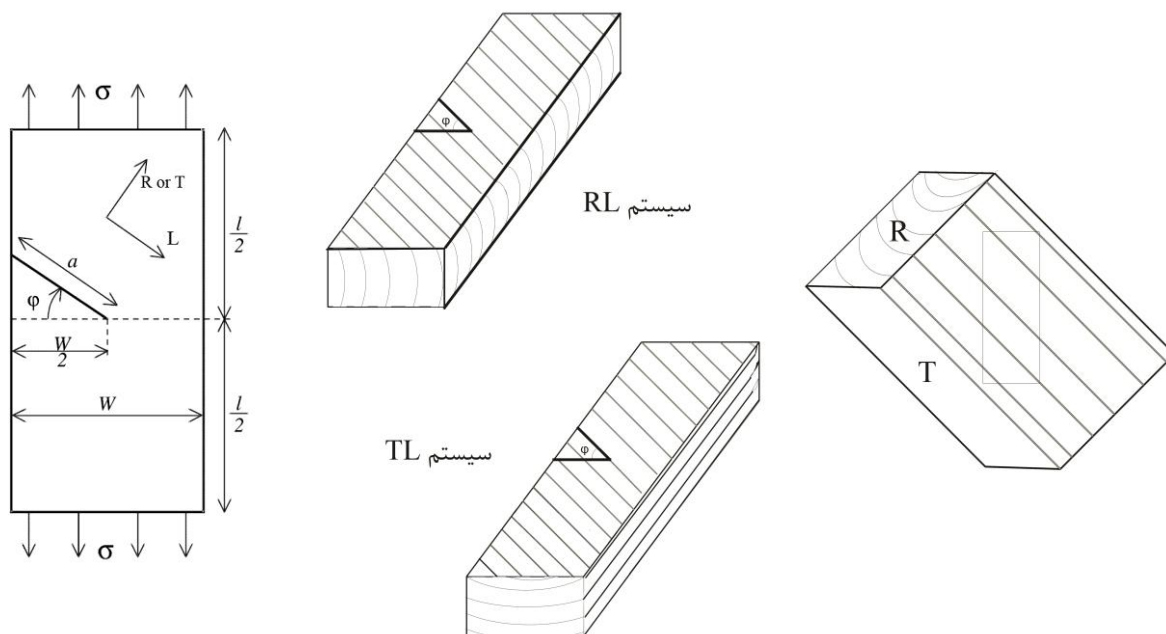
اخیراً تحقیقات قابل ملاحظه‌ای در زمینه ویژگی‌های شکست چوب با استفاده از روش‌های مکانیک شکست انجام شده است. اصلی‌ترین تحقیقات درباره ویژگی‌های شکست تحت مدهای خالص I و II بود. ولی لازم است، بر اساس شرایط واقعی اعضای تحت بار، سازه‌های چوبی و فرآورده‌های مرتبط با آن تحت مد ترکیبی نیز بررسی شوند. معمولاً از چوب فورفوریل‌دار شده در ساخت سازه‌های چوبی، اسکله‌های چوبی، پل‌ها، و در مبلمان پارک‌های شهری به منزله جزئی از سازه‌های چوبی استفاده می‌شود. با توجه به اینکه تاکنون در کشور تحقیقات جامعی در زمینه مکانیک شکست چوب و فرآورده‌های چوبی انجام نشده است، این

منومر فورفوریل الکل، در حضور کاتالیزور اسید سیتریک، مطابق روش تشریح شده مؤلفان انجام شد [۱۱]. بر اساس این روش، نمونه‌ها در سه سطح با سه مقدار متفاوت فورفوریل‌اسیون ۲۰ و ۳۰ و ۶۵ درصد، که به ترتیب سطوح کم و متوسط و زیاد را تشکیل می‌دادند، آماده شدند.

ترک مقدماتی نمونه‌ها در دو مرحله دقیقاً قبل از آزمون شکست ایجاد شد. در آغاز با استفاده از اژه مویی برقی شکافی به عرض ۱ میلی‌متر و در ادامه با کمک تیغ اصلاح برش ترک مد ترکیبی با طولی بین ۱ تا ۳ میلی‌متر با بار ضربه‌ای کم در نمونه‌ها ایجاد شد [۱۲]. مقدار میانگین دانسیته و درصد رطوبت نمونه‌ها در جدول ۱ می‌آید.

والنتین و کومز [۹] تحقیقات در زمینه مد ترکیبی را جمع‌بندی کرده‌اند.

در این تحقیق از چوب راست‌تار بدون عیب گونه راش استفاده شد. شکل هندسی نمونه‌های کشش یک لبه شکاف‌دار^۱ (SENT) در شکل ۲ می‌آید [۱۰]. نمونه‌ها با پهنای ۳۰ و طول ۶۰ و ضخامت ۲۰ میلی‌متر تهیه شدند. در این نمونه‌ها، که در دو سیستم RL و TL تهیه شدند، ترک‌هایی با زاویه ϕ ، که می‌تواند بین ۰ تا ۴۵ درجه متغیر باشد، ایجاد شد. این ترک‌های مجازی راه‌به‌در دقیقاً وسط قطعه ($\frac{l}{2}$ و $\frac{w}{2}$) با دو زاویه (۴۵ و $\phi=0$) ایجاد شدند. عملیات فورفوریل‌اسیون نمونه‌ها، بعد از برش ابعاد اولیه و قبل از ایجاد ترک مجازی، به کمک



شکل ۲. نمونه‌های SENT

جدول ۱. مقدار میانگین دانسیته و درصد رطوبت آزمون‌ها

آزمون‌ها	فورفوریلایسیون	میزان رطوبت (%)	دانسیته (gr/cm ³)
چوب راش	صفر (شاهد)	۹,۲۷ (۰,۳۲)	۰,۶۱ (۰,۰۵۹)
چوب پلیمر	کم	۶,۲۶ (۰,۴۳)	۰,۶۴ (۰,۰۴۱)
	متوسط	۴,۷۰ (۰,۷۲)	۰,۷۰ (۰,۰۹۰)
	زیاد	۴,۶۱ (۰,۵)	۰,۷۱ (۰,۰۷۵)

مقادیر داخل پرانتز نشان‌دهنده انحراف از استاندارد است.

آزمون‌های شکست مد ترکیبی با تعیین ترکیب بحرانی K_I و K_{II} از بارگذاری در آغاز شکست به دست می‌آیند. تعیین بار بحرانی به تفسیر نیاز دارد. زیرا مشخص شده است همیشه آغاز شکست را نمی‌توان با اندازه‌گیری‌های نمودار نیرو- تغییر مکان با دقت تعیین کرد. بنابراین، اکستانسیومتری در سر شکاف مقدماتی نصب می‌شود تا شکاف خوردگی ماده را در نوک ترک به راحتی رصد کند (شکل ۳). به طور معمول بار بحرانی باری است که در آستانه توسعه شکاف اندازه‌گیری و ثبت می‌شود. این مقدار اغلب به طور قابل ملاحظه‌ای کمتر از بار حداکثر در نمودار نیرو-تغییر مکان است. همه آزمون‌ها با بارگذاری ۶ میلی‌متر بر دقیقه انجام شدند.



شکل ۳. آزمون‌های SENT تحت آزمون

همان‌طور که در شکل ۲ ملاحظه می‌شود، در آزمون‌های SENT شکاف‌هایی با شیب φ از خط تقارن قطعه برای به دست آوردن شرایط بارگذاری مد ترکیبی ایجاد شد. شیب ترک (φ) ۰ و ۴۵ درجه برای دو سیستم RL و TL در نظر گرفته شد.

ضریب شدت تنش، که در بیشتر مواقع با واحد $kPa\sqrt{m}$ بیان می‌شود، به کمک روابط ۱ و ۲ تعیین می‌شوند:

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a}f_I(\varphi) \text{ and} \quad (1)$$

$$K_{II} = \sigma\sqrt{\pi a}f_{II}(\varphi), \quad (2)$$

توابع f_I و f_{II} به شکل هندسی آزمون‌ها و طبیعت ارتوتروپیکی ماده وابسته‌اند. برای شکل هندسی و ماده طبیعی، این توابع با استفاده از آنالیزهای عناصر محدود کرنش صفحه‌ای تعیین می‌شوند. جرنویست [۱۰] در تحقیقات خود با به کار بردن روش عناصر محدود برای شیب φ ترک‌های هر سیستم در دامنه ۰ تا ۴۵ درجه برای توابع f_I و f_{II} معادلات ۳ و ۴ را به دست آورد:

$$f_I(\varphi) = 3.028 - 3.22 \times 10^{-3}\varphi + \quad (3)$$

$$3.73 \times 10^{-4}\varphi^2 - 9.14 \times 10^{-6}\varphi^3, \quad (4)$$

$$f_{II}(\varphi) = \sin(2\varphi)(0.644 + 4.89 \times 10^{-3}\varphi).$$

بر حسب درجه است.

یافته‌ها و بحث

در آغاز شکست در نوک ترک (شکل ۴) محاسبه می‌شود. علاوه بر آن، از این نمودارها نتایج دیگری درباره اثر فورفوریل‌اسیون در نحوه شکست در هر دو سیستم می‌توان به دست آورد.

زمانی که $\phi=45$ است، در هر دو سیستم مقدار بار بحرانی در آغاز شکست با فورفوریل‌اسیون کاهش می‌یابد. ولی در ادامه با افزایش سطح فورفوریل‌اسیون این مقدار حالت صعودی پیدا می‌کند و در سطح فورفوریل‌اسیون زیاد از آزمون‌های شاهد نیز پیشی می‌گیرد. در این حالت آزمون‌ها به طور هم‌زمان متأثر از مد I/II هستند. در چنین حالتی، برش و کشش هم‌زمان در آزمون‌ها اتفاق می‌افتد. بررسی مقاومت‌های مکانیکی چوب پلیمر راش- فورفوریل الکل با روش‌های استاندارد مقاومت مصالح نیز نشان داد فورفوریل‌اسیون بر خواص مقاومتی فرآورده مؤثر است [۱۱]. خلاصه‌ای از نتایج در جدول ۲ می‌آید.

بررسی آزمون‌ها بعد از شکست نشان می‌دهد شکست در جهت الیاف آغاز و در طول الیاف در هر دو سیستم و با هر شیئی که داشته باشد ادامه می‌یابد. شکل ۴ خلاصه‌ای از نتایج نمودارهای نیرو- تغییر مکان ($P-\delta$) سیستم TL و RL را در دو زاویه مختلف انحراف ترک از خط تقارن ماده ($\phi=0$) و ($\phi=45$) نشان می‌دهد.

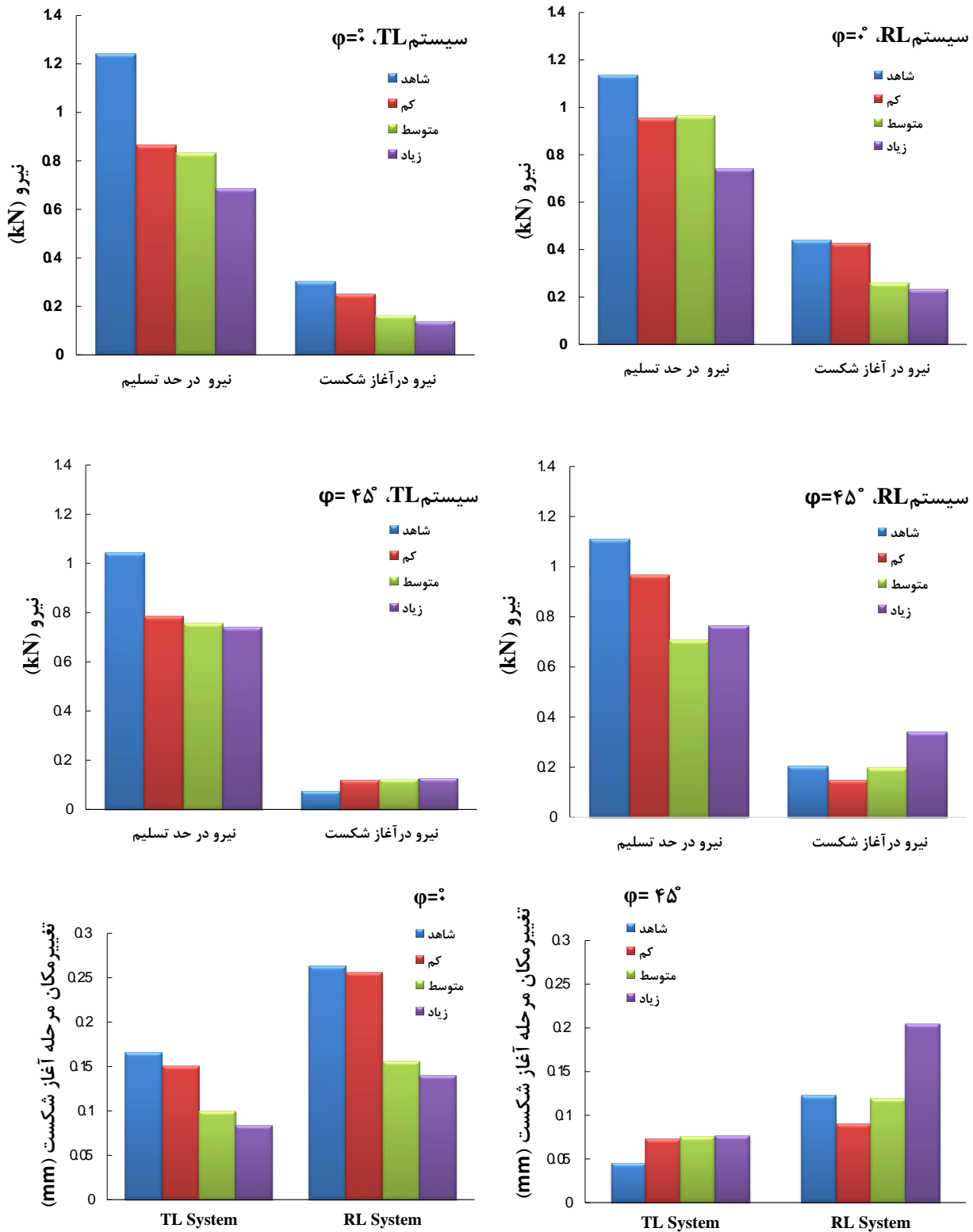
نمودارهای دو سیستم نه تنها در مقادیر نیرو حداکثر در مرحله شکست تفاوت دارند، بلکه آغاز رشد ترک در سیستم‌های مختلف در مراحل متفاوت اتفاق می‌افتد. در هر دو سیستم قبل از رسیدن بار به حداکثر (P_{Max}) و مقدار آن در حد تناسب آغاز رشد ترک اتفاق می‌افتد.

مقادیر چغرمگی شکست مد ترکیبی، که دارای مقادیری برای مد I و II است، در هر دو سیستم بر اساس مقادیر بار بحرانی به دست آمده از اکستانسیومتر

جدول ۲. خواص مکانیکی چوب راش و چوب پلیمر راش- فوران با سطوح مختلف

سختی (KN)	S_{II}	C_{\perp}	T_{\perp}	خمش استاتیکی		C_{II}		نوع آزمون
				MOR	MOE	E_L	σ_{Max}	
۴,۴۴	۱۷,۴۳	۹,۵	۴,۶۲	۹۴,۲۱	۱۱۰۴۵,۲	۳۶۶۶,۲۵	۳۶,۴۵	شاهد
۷,۷۲	۲۷,۸۵	۱۱,۸۴	۳,۶۳	۱۱۶,۴۵	۱۲۹۷۱,۵	۵۳۶۹,۲	۴۴,۵۱	کم
۹,۱۳	۳۲,۳۸	۱۲,۹۶	۲,۹۵	۱۲۸,۳۹	۱۳۸۹۶	۶۳۱۰,۱۷	۵۸,۸۴	متوسط
۹,۱۵	۳۲,۴۳	۱۴,۵۴	۲,۲۳	۱۴۰,۴۵	۱۵۵۷۵	۶۳۷۴,۷۵	۵۹,۱۹	زیاد

T: کشش؛ C: فشار؛ S: برش؛ A: موازی الیاف؛ \perp : عمود بر الیاف
واحد بر اساس MPa



شکل ۴. اثر زاویه ترک بر نیرو و تغییر مکان به‌دست‌آمده از آزمون شکست SENT

چغرمگی‌های شکست متفاوت بین سیستم‌های مختلف می‌تواند متأثر از روش‌های آزمایش، گونه‌های استفاده‌شده، و تعیین مقدار P_c (نیروی ترک) باشد [۱۳ و ۱۴].

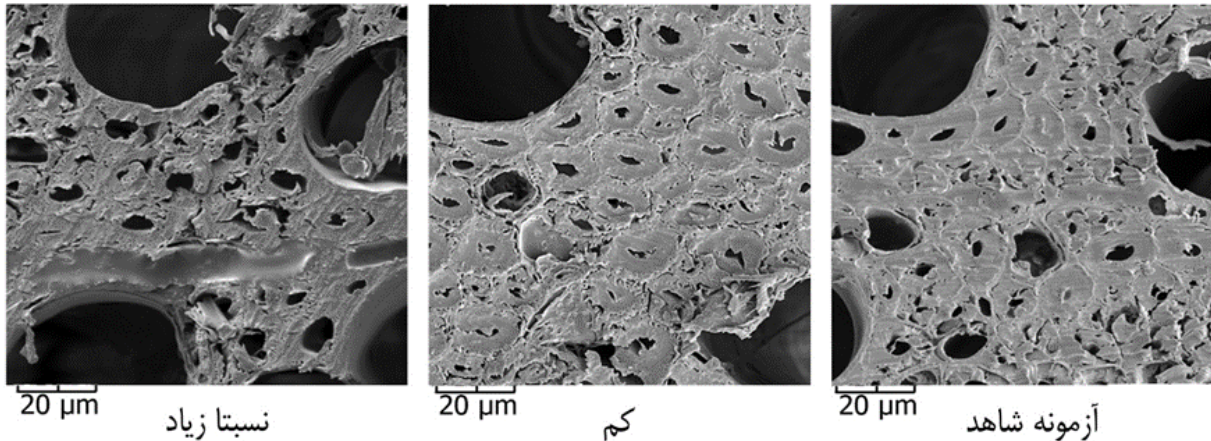
بر اساس جدول ۱ فورفوریل‌اسیون باعث افزایش دانسیته می‌شود. علاوه بر آن، تحقیقات نشان می‌دهد پلیمریزاسیون منومر فورفوریل الکل در دیواره باعث باز و کشیده شدن و افزایش ضخامت آن می‌شود [۱۵]. پهن‌برگان گسیختگی بسیار پیچیده‌ای در سطح شکست دارند که شامل گسیختگی جداره و حفره است و به دنبال زاویه میکروفیبریل‌های S_2 به وجود می‌آید. شکست در چوب با دانسیته کم به عبور از جداره و حفره تمایل دارد؛ در حالی که در دانسیته بالاتر به طور هم‌زمان شکست عبور از جداره و حفره و بین سلولی مشاهده شده است [۴]. در نتیجه با تغییر مد ریزشکست^۲ در اثر فورفوریل‌اسیون مقادیر چغرمگی شکست نیز تغییر می‌کند.

بر اساس جدول ۱ مقدار رطوبت تعادل چوب پلیمر با افزایش مقدار پلیمریزاسیون کاهش می‌یابد. دو عامل رطوبت و پیشینه خشک شدن از عوامل بسیار مؤثر در چغرمگی شکست‌اند [۴] و احتمال دارد در سطوح پایین فورفوریل‌اسیون، چغرمگی شکست متأثر از رطوبت فرآورده نیز باشد. چون مقدار پلیمر در دیواره اندک است، اثری در خاصیت چغرمگی چوب ندارد و باعث کاهش مقدار K_{IC} در سیستم TL می‌شود. علاوه بر آن، خشک کردن نیز باعث هم‌کشیدگی در دیواره و تمرکز تنش در چوب می‌شود و به دنبال آن ترک‌هایی در مقیاس میکروسکوپی در چوب به وجود می‌آید.

بر اساس نتایج، با افزایش فورفوریل‌اسیون، مقدار مقاومت برشی موازی الیاف در آزمون‌ها افزایش و مقاومت کششی عمود بر الیاف کاهش می‌یابد. این دستاوردها نتایج تحقیق حاضر را تا حدی تشریح می‌کند و به نظر می‌رسد افزایش مقدار بار بحرانی شکست و به دنبال آن افزایش K_{IIC} در آزمون‌هایی با $\phi=45^\circ$ چندان دور از انتظار نباشد.

در حالی که در آزمون‌هایی که مقدار $\phi=0^\circ$ است با فورفوریل‌اسیون و افزایش سطح آن مقدار بار بحرانی مؤثر در تعیین چغرمگی کاهش می‌یابد. در چنین حالتی مد ترکیبی فقط مقادیری برای K_{IC} دارد و مد مؤثر شکست مد I است.

تعیین مقدار چغرمگی شکست بحرانی در آزمون‌های تیر یک‌سر گیردار دولنگه^۱ (DCB) تحت مد I نتیجه مشابهی مانند اثر فورفوریل‌اسیون بر مقدار فاکتور شدت تنش بحرانی نشان داد. البته نتایج جدول ۲ و کاهش مقاومت کششی عمود بر الیاف در اثر فورفوریل‌اسیون نیز نتایج این قسمت از تحقیق را تأیید می‌کند. مقایسه مقدار چغرمگی شکست بحرانی در دو سیستم مختلف نشان می‌دهد سیستم RL دارای مقادیر بالاتری است. اسمیت و همکاران [۴] در تحقیقات خود به نتیجه‌ای مشابه دست یافتند. ایشان علت این تفاوت را اثر پل‌زنی اشعه‌ها دانستند. در سیستم TL هنگام انتشار ترک‌ها در جهت مسیر طولی اشعه‌ها کمترین مقاومت را در برابر انتشار ترک دارند. در نتیجه، همان اشعه‌ها می‌توانند مانعی در جهت انتشار ترک‌ها در جهت RL باشند و چغرمگی را افزایش دهند [۴]. علاوه بر این فورفوریل‌اسیون باعث تقویت دیواره اشعه‌ها و تقویت اثر پل‌زنی می‌شود.



شکل ۵. اثر فورفوریل‌اسیون در سطح میکروسکوپی و مشاهده ریزترک‌های مؤثر در گسیختگی بین سلولی

چوب راش و چوب پلیمر حاصل از آن را در دو سیستم مختلف مقایسه می‌کند.

چغرمگی شکست جزء خواص مواد است [۸]. با بررسی پراکنش مقادیر K_{IC} و K_{IIC} به دست آمده از مد ترکیبی می‌توان به نتایج خوبی درباره خواص ماده رسید. همان‌طور که در شکل‌های ۶ و ۷ می‌توان دید، پراکنش این مقادیر در آزمون‌های شاهد هر دو سیستم تقریباً یک‌شکل است که می‌توان مشابه آن را در نتایج سایر محققان نیز به وضوح دید [۱۰].

با فورفوریل‌اسیون (سطح کم) این پراکنش قدری تغییر می‌کند. ولی خط برازش شده تقریباً روندی مانند آزمون‌های شاهد را طی می‌کند. با بالا رفتن سطح فورفوریل‌اسیون این روند کاملاً تغییر می‌کند. نتایج نشان می‌دهد ماهیت ماده اولیه در اثر فورفوریل‌اسیون کاملاً قابل تغییر است و این تغییرات را بر اساس سطح فورفوریل‌اسیون می‌توان کنترل کرد. چنانچه صفحه دیگری را از همان جنس، ولی حاوی ترکی با طول متفاوت از طول ترک قبلی، تا شکست تحت کشش قرار دهیم، مقدار K بحرانی آن برای هر دو حالت باید مساوی

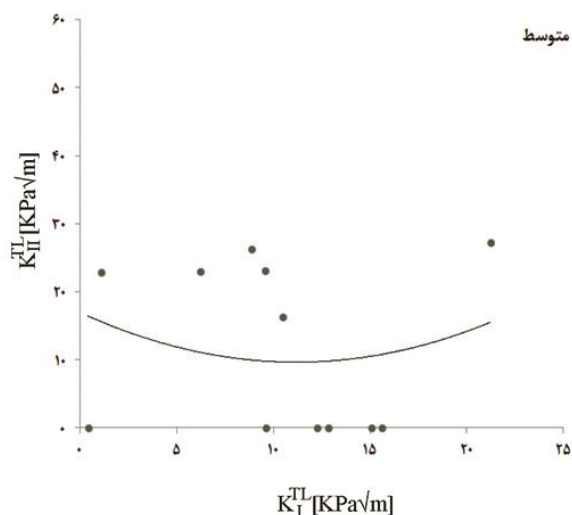
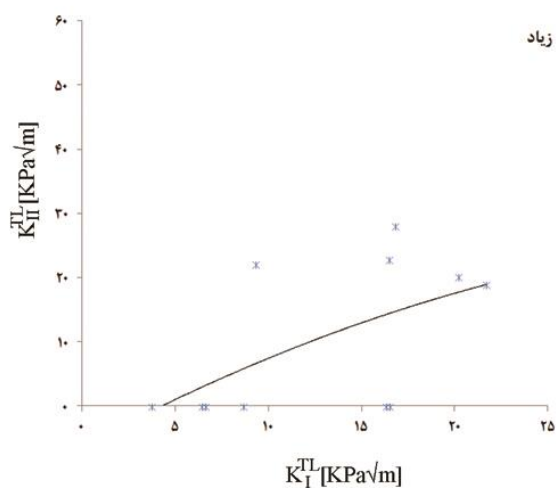
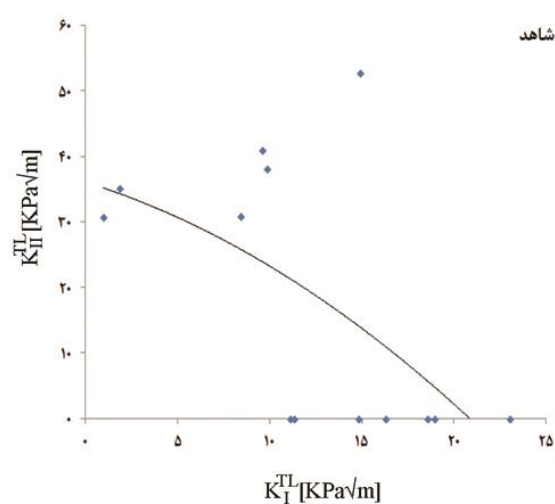
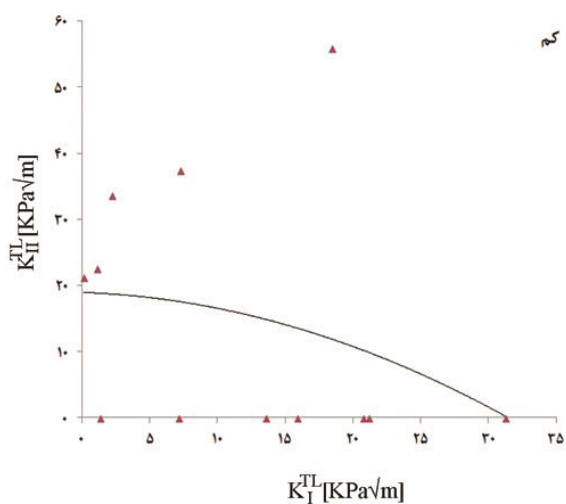
به منظور بررسی اثر فورفوریل‌اسیون بر دیواره سلول‌ها و بررسی تغییرات به وجود آمده در دیواره چوب پلیمرها از مقاطع عرضی آزمون‌های شاهد و چوب پلیمر عکس‌های میکروسکوپ الکترونی (SEM) تهیه شد که در شکل ۵ می‌آید.

از آنجا که چوب راش جزء گونه‌های حساس به خشک شدن است، احتمال ایجاد ترک‌های میکروسکوپی در چوب، طی عملیات ساخت چوب پلیمر با کاتالیزور حرارت، اجتناب‌ناپذیر به نظر می‌رسد. این ترک‌ها طی بارگذاری به هم می‌پیوندند و شکست در طی بارگذاری را تسریع می‌کنند و مقدار K_{IC} را در این سیستم در آزمون‌های چوب پلیمر کاهش می‌دهند. از طرف دیگر، استفاده از پلیمر در ساختار چوب خاصیت پلاستیک چوب را افزایش می‌دهد و متناسب با افزایش سطح فورفوریل‌اسیون افزوده شدن خاصیت پلاستیک فرآورده تا حد زیادی بر اثر منفی حرارت طی پلیمریزاسیون و رطوبت تعادل کمتر فرآورده غلبه می‌کند.

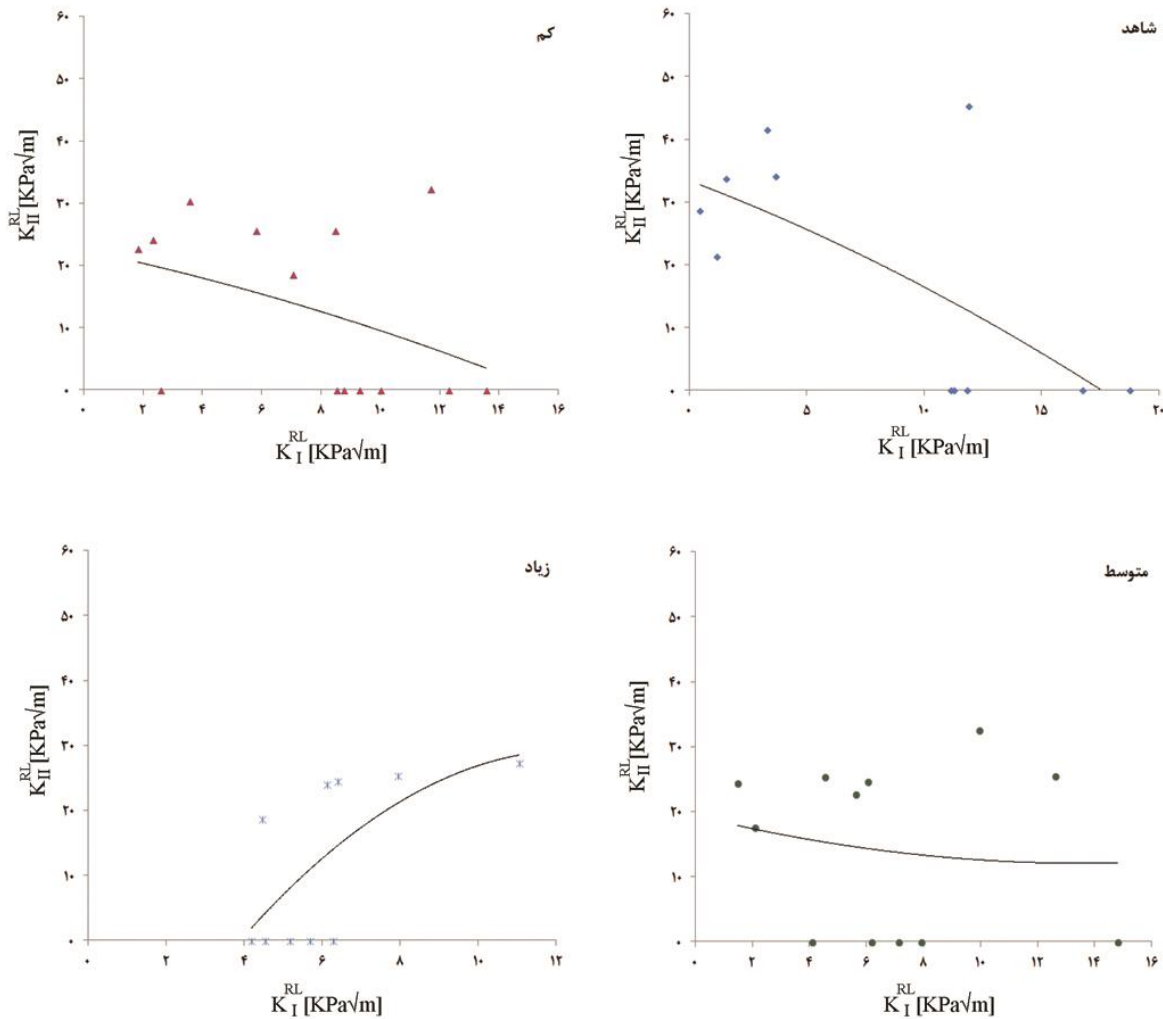
شکل‌های ۶ و ۷ سطوح شکست مد ترکیبی

است. ولی روند به‌دست آمده مشابه نتایج قبلی است. مهم‌ترین علت تفاوت مقادیر نحوه تعیین مقدار بار بحرانی در شکست است. علاوه بر آن، روش‌های آزمایش، گونه‌های استفاده‌شده، شرایط خشک شدن، و نوع رویشگاه نیز در این زمینه مؤثرند [۱۴].

باشد. با داشتن K بحرانی مد ترکیبی می‌توان پیش‌بینی کرد که ترک با چه طولی و در چه موقعیتی (تحت چه زاویه‌ای) می‌تواند در سازه وجود داشته باشد؛ مشروط بر اینکه مقدار تنش اعمالی بر سازه معین باشد. مقادیر چغرمگی شکست به‌دست‌آمده در این تحقیق با تحقیق‌های دیگر از نظر مقدار متفاوت



شکل ۶. سطوح شکست مد ترکیبی در چوب راش و چوب پلیمر آن در سیستم ترک TL



شکل ۷. سطوح شکست مد ترکیبی در چوب راش و چوب پلیمر آن در سیستم ترک RL

ریزنکارهای میکروسکوپ الکترونی نشان می‌دهند هم‌زمانی حضور میکروتُرک‌ها در ساختار چوب پلیمر و تغییر ماهیت ماده و افزایش مقاومت به برش موازی الیاف آن در اثر پلیمریزاسیون احتمالاً یکی از عوامل مهم تغییر در چگرمگی شکست چوب پلیمر راش— فوران است. البته باید به این نکته توجه کرد که راش از گونه‌های بسیار حساس به حرارت است و ممکن است تحقیق با گونه‌های چوبی دیگر و با کنترل بیشتر شرایط حرارت‌دهی در پروسه پلیمریزاسیون نتایج بهتری به دست دهد.

نتیجه‌گیری

نتایج نشان می‌دهند فورفوریل‌اسیون بر بار بحرانی شکست آزمون‌های SENT اثر می‌گذارد. همچنین باعث تغییراتی در نمودارهای نیرو— تغییرمکان می‌شود. با تغییر مقدار نیروی بحرانی شکست مقادیر چگرمگی شکست مد ترکیبی I/II تغییر می‌کند. با فورفوریل‌اسیون در هر دو سیستم ترک روند پراکنش K_{IC}/K_{IIc} تغییر می‌کند که نشان‌دهنده تغییر ماهیت چوب در اثر فورفوریل‌اسیون است. همچنین بررسی

۰ تا ۴۵ درجه انجام و با سایر روش‌های آزمایشگاهی
مد شکست ترکیبی مقایسه شود.

نتایج این تحقیق فقط با بررسی دو شیب ۰ و ۴۵
درجه به دست آمدند. مؤلفان پیشنهاد می‌کنند
آزمونه‌های مکانیک شکست در دامنه‌ای از زاویه‌های

References

- [1]. Goldstein, I. S. and Dreher, W. A. (1960). Stable furfuryl alcohol impregnating solution. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 52(1): 57–58.
- [2]. Anderson, T. L. (2005). *Fracture mechanics, fundamentals and applications*, CRC Press: Taylor and Frances Group, Boca Raton, FL.
- [3]. AFPA, (2007). *National design specification for wood construction*, American Forest and Paper, Association, Washington, DC.
- [4]. Smith, I., Landis, E., and Gong, M. (2003). *Fracture and Fatigue in Wood*, Wiley.
- [5]. Bodig, J. and Jayne, B. A. (1982). *Mechanics of Wood and Wood Composites*, Translated by Ebrahimi, Gh., University of Tehran Press, Tehran.
- [6]. Rathkjen, A. (1993). *Fracture Criteria for Wood*, J.P. Boehler (ed), Rotterdam.
- [7]. Mall, S., Murphy, J. F., and Shottafer, J. E. (1983). Criterion for mixed mode fracture in wood. *Journal of Engineering Mechanics*, 109: 680–90.
- [8]. Broek, d. (1982). *Elementary Engineering Fracture Mechanics*, martinus nijhoff, London.
- [9]. Valentin, G. and Caumes, P. (1989). Crack propagation in mixed mode in wood: a new specimen. *Wood Science and Technology*, 23: 43–53.
- [10]. Jernkvist, L. O. (2001). Fracture of wood under mixed mode loading II. Experimental investigation of *Picea abies*. *Engineering Fracture Mechanics*, 68: 565-576.
- [11]. Abdolzadeh, H., Ebrahimi, Gh., Layeghi, M., Ghassemieh, M., and Mirshokraei, S.A. (2013). Mechanical properties of Beech-Furfuryl alcohol wood polymer. *Iranian Journal of Wood and Paper Industries*, 4(2):143-156.
- [12]. de-Moura, M. F. S. F., Morais, J. J. L., and Dourado, N. (2008). A new data reduction scheme for mode I wood fracture characterization using the double cantilever beam test. *Engineering Fracture Mechanics*, 75: 3852–3865.
- [13]. Thuvander, F. and Berglund, L. A. (2000). In situ observations of fracture mechanisms for radial cracks in wood. *Journal of Material Science*, 35:6277–6283.
- [14]. Watanabe, K., Shida, S., and Ohta, M. (2011). Evaluation of end-check propagation based on mode I fracture toughness of sugi (*Cryptomeria japonica*). *Journal of Wood Science*, 57:371–376.
- [15]. Buchelt, B., Dietrich, T., and Wagenfuhr, A. (2012). Macroscopic and microscopic monitoring of swelling of beech wood after impregnation with furfuryl alcohol. *European Journal of Wood and Wood Products*, 70(6): 865-869.