

## رفتار شکست چوب پلیمر راش - فوران تحت مد I

حمیده عبدالزاده<sup>۱</sup>، قنبر ابراهیمی<sup>۲</sup>، محمد لایقی<sup>۳\*</sup>، مهدی قاسمیه<sup>۴</sup>  
و سید احمد میرشکرایی<sup>۵</sup>

۱- دانشجوی دکتری، علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران

۲- استاد، علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران

۳- نویسنده مسئول، استادیار علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران

پست الکترونیک: mlayeghi@ut.ac.ir

۴- دانشیار، دانشکده فنی، دانشگاه تهران

۵- استاد، دانشگاه پیام نور، تهران

تاریخ پذیرش: مرداد ۱۳۹۳

تاریخ دریافت: مهر ۱۳۹۲

### چکیده

این تحقیق با کاربرد آزمون تیر یک سر گیردار دوتایی به بررسی ویژگی‌های شکست چوب-پلیمر در مد I می‌پردازد. در این راستا، این خواص در آزمون‌هایی با ۳ میزان متفاوت فورفوریل‌اسیون در سطوح ۲۰٪، ۳۰٪ و ۶۵٪ در دو سیستم TL و RL ارزیابی شدند. نتایج نشان دادند که فورفوریل‌اسیون تغییراتی را در نمودار نیرو-تغییر مکان مربوط به آزمون‌های شکست مد I ایجاد می‌کند، به طوری که در نمودارهای مربوط به سیستم TL این تغییر را می‌توان واضح‌تر تشخیص داد. این تغییر نه تنها شامل تغییر شیب منحنی در ناحیه الاستیک و حد تناسب است، بلکه ناحیه شکست و آغاز رشد ترک را نیز شامل می‌شود. به علاوه اینکه فورفوریل‌اسیون و افزایش میزان آن در هر دو سیستم، به ویژه سیستم TL موجب تغییر مقادیر فاکتور شدت تنش بحرانی،  $K_{IC}$  و میزان آزادسازی انرژی بحرانی و  $G_{IC}$  شد. با افزایش میزان فورفوریل‌اسیون  $G_{IC}$  در هر دو سیستم تا حد زیادی افزایش پیدا کرد. این معیار نشان می‌دهد، این چوب-پلیمر تحت مد I چقرمگی شکست بیشتری دارد. بعلاوه، روند تغییرات مقادیر به دست آمده برای  $K_{IC}$  در اثر فورفوریل‌اسیون در دو سیستم مختلف با  $G_{IC}$  متفاوت بوده است. معیار  $K_{IC}$  در سیستم RL مانند  $G_{IC}$  با افزایش فورفوریل‌اسیون تا حدی افزایش نشان داد ولی در سیستم TL با فورفوریل‌اسیون مقدار  $K_{IC}$  کاهش یافت و با افزایش پلیمر فوران در دیواره سلولی این معیار روند صعودی به خود گرفته است. به طور کلی نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که فرایند فورفوریل‌اسیون تأثیر بسزایی در افزایش چقرمگی شکست چوب دارد.

واژه‌های کلیدی: مکانیک شکست، چوب پلیمر، مد I، چقرمگی شکست، میزان آزادسازی انرژی

### مقدمه

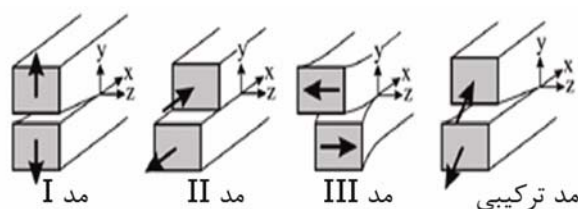
چوب در سطح جهان گسترش یافته است که اهمیت آن در کشورهایی همانند کشور ما که با کمبود شدید چوب مواجه هستیم، دوچندان می‌شود. فورفوریل الکل<sup>۱</sup> یک پلیمر شیمیایی، با منشأ گیاهی (زیست پلیمر<sup>۱</sup>) است که باعث واکنش چوب

چوب یکی از قدیمی‌ترین مواد مورد استفاده در سازه‌های مهندسی است. ماده‌ای که برای ساختمان‌ها، پل‌ها، برج‌ها و برای سازه‌های متعدد دیگری مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای بهینه‌سازی این ماده ارزشمند انواع روش‌های حفاظت و اصلاح

1- Furfuryl Alcohol

دو روش فاکتور شدت تنش و میزان آزادسازی انرژی است که برای کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف (و برای مقایسه چوب و کامپوزیت‌های چوبی) روش‌های میزان آزادسازی انرژی بسیار مفیدتر از روش‌های شدت تنش است (Anderson, 2005). در این روش انرژی مورد نیاز برای آغاز و انتشار ترک، چقرمگی شکست نامیده می‌شود و آن را در طول آزمون‌های مداوم رشد ترک می‌توان اندازه‌گیری کرد. یک جسم دارای ترک می‌تواند در سه مد مختلف تحت تنش قرار گیرد (شکل ۱). تنش‌های عمودی (نرمال) باعث باز شدن دهانه ترک یا مد I می‌گردند. تنش‌های برشی که در امتداد صفحه ترک اعمال می‌گردند باعث گسترش ترک در مد II و یا مد لغزشی می‌شوند. مد III یا مد پارگی، در اثر اعمال تنش‌های برشی خارج از صفحه به وجود می‌آید. جسم دارای ترک ممکن است در حالت کلی تحت ترکیبی از مدهای فوق قرار گیرد، ولی معمولاً مد I از اهمیت بیشتری برخوردار است.

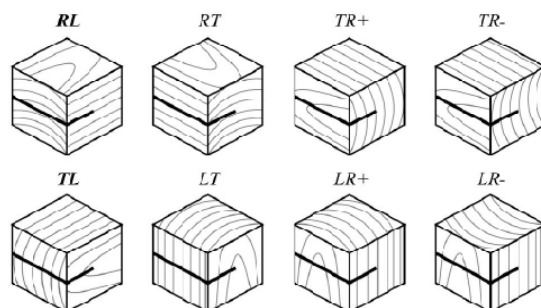
می‌شود و اغلب واکنش‌دهی به وسیله هوموپلیمریزاسیون به صورت پایدار باقی می‌ماند و می‌تواند ویژگی‌های چوب را به شکل یک چوب پلیمر دیواره‌ای با ثبات ابعادی خوب و مقاوم به اسید و باز بهبود دهند (Goldstein & Dreher, 1960). این سودمندی‌ها در کنار توسعه کمی اعتبار و کاربرد آن با کمک پیش‌بینی رفتار شکست سازه‌های چوبی افزایش می‌یابد. درک شکست چوب و کامپوزیت‌های چوبی از این نظر دارای اهمیت است که به علت معایب درونی (مانند ترک‌ها) سازه قبل از رسیدن به ظرفیت بارگذاری تخمین زده شده که توسط معیار تنش تعیین و دچار گسیختگی می‌شود (Anderson, 2005). این عامل، روش‌های طراحی تنش سنتی را به علت تخمین‌های ضعیف ظرفیت تحمل بار تحت تأثیر قرار می‌دهد (AFPA, 2007). البته سازه‌هایی که در معرض تنش کششی عمود بر الیاف قرار می‌گیرند نگران‌کننده‌تر هستند. راه چاره برای تحلیل این ترک‌ها استفاده از مکانیک شکست است. روش‌های مکانیک شکست مورد استفاده شامل



شکل ۱- چهار مد مختلف شکست در جسم دارای ترک

حروف می‌توان تشخیص داد (شکل ۲). در این نام دوحرفی، اولی صفحه نرمال ترک و دومی جهت انتشار ترک را نشان می‌دهد. متداول‌ترین سیستم‌های ترک RL و TL هستند که در این بررسی هر دو این سیستم‌ها مورد مطالعه قرار گرفتند.

چوب سه محور تقارن شامل L (جهت طولی سلول‌ها)، R (جهت شعاعی سلول‌های پاراننشیم) و T (جهت مماس بر دواپر سالیانه) دارد. این محور تقارن باعث به وجود آمدن ۸ سیستم انتشار ترک می‌شود که هر کدام از آنها را با کمک یک جفت



شکل ۲- سیستم‌های ترک چوب

بررسی‌های بیشتر در زمینه مکانیک شکست این مواد ساختمانی باشد. علاوه بر آن به علت اینکه چوب پلیمرهای فورانی وارد مرحله تجاری شده‌اند و در ساخت سازه‌های چوبی مختلف استفاده می‌شود این فرآورده چوبی گزینه مناسبی برای این تحقیق به‌شمار می‌رود. بنابراین، این بررسی به مطالعه خواص مکانیک شکست چوب پلیمر راش - فورفوریل الکل تحت مد I پرداخته و مقادیر  $G_{IC}$  و  $K_{IC}$  این فرآورده را در سطوح مختلف فورفوریل‌اسیون (کم، متوسط و نسبتاً زیاد) ارزیابی کرده است.

### مواد و روش‌ها

در این تحقیق از چوب راست‌تار بدون عیب گونه راش استفاده شده است. شکل هندسی آزمونه‌های DCB در شکل ۳ نشان داده شده است. آزمونه‌ها در ابعاد  $h=20$  میلی‌متر،  $L=280$  میلی‌متر،  $B=20$  میلی‌متر و  $a_0=100$  میلی‌متر تهیه شدند. محورهای ۱، ۲ و ۳ در آزمونه‌ها به ترتیب منطبق (قریب به یقین) بر جهت‌های  $L$ ،  $R$  و  $T$  بودند؛ بنابراین در شکل ۳،  $R$  و  $T$  صفحات نرمال ترک و  $L$  جهت گسترش ترک را که مسئول سیستم انتشار ترک  $RL$  و  $TL$  در چوب است را می‌توان مشاهده کرد.

عملیات فورفوریل‌اسیون آزمونه‌ها بعد از برش ابعاد اولیه و قبل از ایجاد ترک مجازی، توسط منومر فورفوریل الکل در حضور اسیدسیتریک مطابق با روش تشریح شده در مقاله‌ای از مؤلفان انجام شد (Abdolzadeh et al., 2013). بر اساس این روش، آزمونه‌ها در سه سطح با ۳ مقدار متفاوت فورفوریل‌اسیون ۲۰٪، ۳۰٪ و ۶۵٪ که به ترتیب سطوح کم، متوسط و زیاد را تشکیل می‌دهند، آماده شدند.

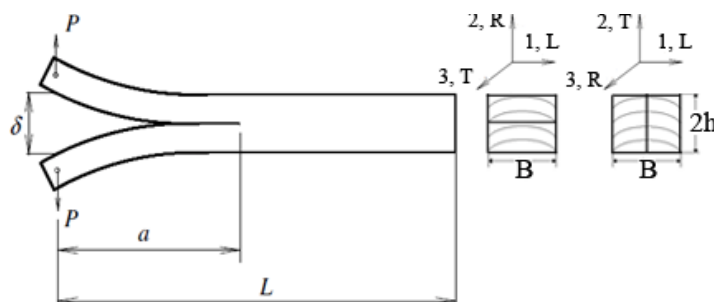
ترک ابتدایی آزمونه‌های DCB در ۲ مرحله دقیقاً قبل از آزمون شکست ایجاد شد. در آغاز با استفاده از اره‌ی مویی برقی شکاف ۱ میلی‌متر در آزمونه‌ها ایجاد شده و در ادامه با کمک تیغ اصلاح، برش ترک مد I با طولی بین ۱ تا ۳ میلی‌متر با بکار بردن بار ضربه‌ای اندک ایجاد شد (Moura et al., 2008).

۵ آزمونه تیمار شده برای هر سطح فورفوریل‌اسیون در هر کدام از سیستم‌های ترک به مدت ۲ هفته در شرایط رطوبت نسبی ۶۵٪ و دمای ۲۵ درجه سلسیوس مشروط-سازي شدند. مقدار میانگین دانسیته و درصد رطوبت تعیین شده آزمونه‌ها در جدول ۱ ارائه شدند.

بررسی از منظر مکانیک شکست تشریح بهتری برای گسیختگی مکانیکی در مقایسه با روش‌های سنتی مقاومت ماده فراهم می‌کند. اصولاً این علم نوین که مربوط به قرن بیستم است به تجزیه و تحلیل سازه‌ها بر مبنای وجود عیب و به خصوص ترک در آنها می‌پردازد. علم مکانیک شکست یکی از علوم مهندسی است که پدیده شکست قطعات را تحت بارهای استاتیکی و دینامیکی بررسی می‌کند. بر اساس شناخت دقیق این پدیده است که طراحی ایمن سازه امکان-پذیر هست (قاجار، ۱۳۸۸). اندازه‌گیری ویژگی‌های شکست چوب و چوب پلیمر تحت مد I با استفاده از آزمون‌های مختلف، آزمون‌های کشش متراکم<sup>۱</sup> (CT)، کشش تک شکافدار در لبه<sup>۲</sup> (SENT)، کشش دو شکافدار لبه<sup>۳</sup> (DENT) و خمش سه‌نقطه‌ای تک شکافدار در لبه<sup>۴</sup> (SENB) انجام می‌شود (Schniewind & Triboulot et al., Mall et al., 1983, Pozniak, 1971, King et al., Kretschmann & Green, 1996, 1984, 1999 و Dourado et al., 2007). در سیستم‌های  $RL$  و  $TL$  تیر یک سر گیردار دوتایی (DCB)، انتشار ترک را فراهم می‌سازد. فایده اصلی این آزمون به‌سادگی آن و این واقعیت که چقرمگی شکست  $G_{IC}$  را می‌توان به‌طور ریاضی بر اساس تئوری تیر به‌دست آورد، برمی‌گردد (Yoshihara, 2007). سازوکارهای متداول شکست در دهه سال ۱۹۶۰ در مورد چوب مورد استفاده قرار گرفت (Wu ۱۹۶۳ و Stanzl- و Vasic ۲۰۰۳) و توسط Smith و Navi و Tschegg (۲۰۰۹) مرور شد. محققان قدیمی مانند Centeno و Schniewind (۱۹۷۳)، مطالعاتی را با استفاده از شدت تنش و چقرمگی شکست در جهت‌های  $RL$  و  $TL$  انجام دادند.

معمولاً از چوب فورفوریل‌دار شده در ساخت سازه‌های چوبی، اسکله‌های چوبی، پل‌ها و در مبلمان پارک‌های شهری به‌عنوان جزئی از سازه‌های چوبی استفاده می‌شود. با توجه به اینکه تاکنون تحقیقات جامعی بر روی مکانیک شکست چوب و فرآورده‌های چوبی مانند چوب پلیمرها انجام نشده است، این تحقیق می‌تواند سرآغازی برای

- 1-Compact tension
- 2-Single-edge notched tension
- 3-Double-edge notched tension
- 4-Single-edge notched three point bending



شکل ۳- آزمون‌های DCB

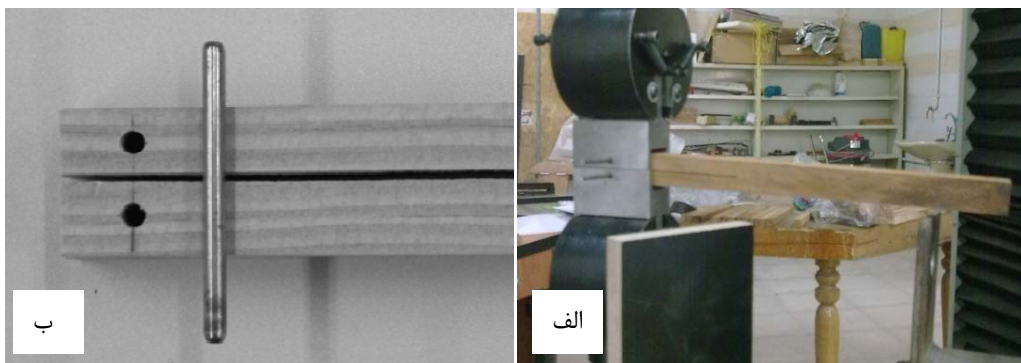
جدول ۱- مقدار میانگین دانسیته و درصد رطوبت آزمون‌ها

آزمون‌ها	سطح فورفوریل‌سیون	میزان رطوبت (%)	دانسیته (gr/cm <sup>3</sup> )
چوب رانش	صفر (شاهد)	۹/۲۷	۰/۶۱
		(۰/۳۲)	(۰/۰۵۹)
چوب پلیمر	متوسط	۶/۲۶	۰/۶۴
		(۰/۴۳)	(۰/۰۴۱)
		۴/۷۰	۰/۷۰
	زیاد	(۰/۷۲)	(۰/۰۹۰)
		۴/۶۱	۰/۷۱
		(۰/۵)	(۰/۰۷۵)

مقادیر داخل پرانتز مربوط به انحراف از استاندارد است.

انتهای هریک از بازوی آنها توسط دو میله فلزی هر یک به قطر ۳ میلی‌متر به تجهیزات بارگذاری متصل شدند. مقادیر بارگذاری و میزان تغییر مکان متناظر برای رسم منحنی P-δ (شکل ۶) ثبت شد.

آزمون‌های مکانیک شکست با قرار دادن میله‌هایی در آزمون‌های سوراخ شده (شکل ۴) با کمک ماشین آزمایش اینسترون مدل ۴۴۸۶ با سرعت بارگذاری ۵ میلی‌متر بر دقیقه انجام شده است. آزمون‌های DCB با تعبیه سوراخ در



شکل ۴- تنظیمات آزمون‌های DCB (الف) و میله فلزی و سوراخ‌های ایجاد شده در انتهای هریک از بازوهای آزمون‌ها (ب)

در صورتی که جسم دارای ترک تحت باری معادل بار بحرانی قرار گیرد مقدار  $K$  که برای آن تعیین می شود نشان دهند چقرمگی شکست بحرانی ( $K_{IC}$ ) است. برخلاف حالت کرنش صفحه ای که در آن  $K_{IC}$  و  $G_{IC}$  در محدوده خاصی ثابت ماده محسوب می شود، در حالت تنش صفحه ای  $K_{IC}$  و  $G_{IC}$  بستگی به طول ترک داشته و برای ترک های با طول بزرگ تر، مقادیر بیشتری دارند.

$$G = \frac{P^2}{2B} \frac{\partial C}{\partial a} = \frac{1}{B} \left( \frac{\partial U_t}{\partial a} \right) P = -\frac{1}{B} \left( \frac{\partial U_t}{\partial a} \right) V \quad (3)$$

بر اساس معادله ۳ که نشان دهنده رابطه بین میزان آزادسازی انرژی و نرمی است و با استفاده از رابطه بین  $G$  و  $K$  برای حالت تنش صفحه ای نتیجه می شود که:

$$K^2 = EG = \frac{EP^2}{2B} \frac{\partial C}{\partial a} \quad (4)$$

برای حالت کرنش صفحه ای ضریب  $(1-\nu^2)$  به معادله ۴ اضافه می شود. با استفاده از معادله ۴ می توان مقدار  $K$  و یا  $G$  را برای یک نمونه به روش محاسبه و یا آزمایش به دست آورد. باید توجه داشت که نرمی، عکس سختی بوده و می توان آن را با استفاده از تغییر شکل نقطه اثر بار به دست آورد:

$$C = \frac{\delta}{P} \quad (5)$$

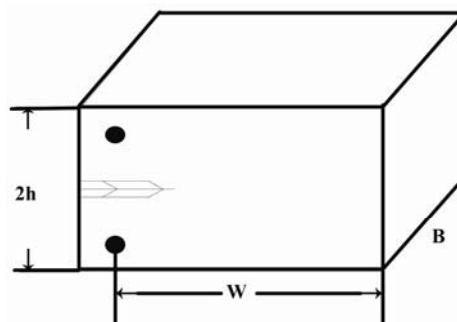
یک مثال کاربردی برای استفاده از معادله ۵ برای محاسبه  $G$  و  $K$  را می توان آزمون های DCB در نظر گرفت. در صورتی که طول ترک از محل اعمال بار محاسبه شود، با استفاده از تئوری ساده خمش تیرها، تغییر شکل  $\delta$  در محل اعمال بارها عبارت است از:

$$\delta = 2 \frac{Pa^3}{3EI} = \frac{8Pa^3}{Eh^3B} \quad (6)$$

از آنجا که نرمی عبارت است از:

محاسبات مربوط به چقرمگی شکست مد  $I(K_I)$ :

برای تحلیل ترک در قطعاتی با ابعاد محدود، به دلیل پیچیدگی مسئله در شرایط مرزی خاص تاکنون روش مشخصی ارائه نشده است. بنابراین می توان حل تقریبی را برای نواری با عرض محدود و تحت کشش که ترکی در لبه داشته باشد، به دست آورد.



شکل ۵- طرح شماتیکی از قطعه دارای ترک در لبه

برای آزمون کشش

علاوه بر معیار ضریب شدت تنش معیار دیگری که برای محاسبات مربوط به ترک مورد استفاده قرار می گیرد، میزان آزادسازی انرژی است. معیار انرژی گریفیث بیان می کند، رشد ترک هنگامی اتفاق می افتد که انرژی لازم برای افزایش طول ترک به اندازه  $da$  توسط سیستم فراهم شود. انرژی لازم برای رشد ترک باید به صورت آزاد شدن انرژی الاستیک انجام شود. مقدار  $G_I$  از نظر ایزوپن با مقدار  $K_I$  رابطه زیر را برقرار می کند:

در صورتی که حالت تنش صفحه ای برای رشد ترک حاکم باشد،

$$G_I = \frac{K_I^2}{E} \quad (1)$$

در حالت کرنش صفحه ای خواهیم داشت:

$$G_I = (1 - \nu^2) \frac{K_I^2}{E} \quad (2)$$

$$G = \frac{12P^2 a^2}{Eh^3 B^2} (1 - \nu^2) \quad (۱۰)$$

$$K = \frac{1}{\sqrt{1 - \nu^2}} \left( 2\sqrt{3} \frac{P}{\sqrt{h^3}} - \frac{a}{B} \right) \quad (۱۱)$$

در این معادلات منظور از  $E$  و  $\nu$  همان  $E_L$  و  $\nu_{LT}$  و  $\nu_{LR}$  برای دو سیستم ترک مختلف است.

معمولاً برای موادی با استحکام شکست متوسط، منحنی بار-تغییر مکان (ضریب بازشدگی دهانه COD) غیرخطی است. این غیرخطی بودن نتیجه دو عامل است: ۱- تغییر شکل پلاستیکی ۲- ترک برداشتن تدریجی و جلو افتادن شکست.

$$C = \frac{\delta}{P} = \frac{8a^3}{Eh^3 B} \quad (۷)$$

به این ترتیب میزان آزادسازی انرژی برابر است با:

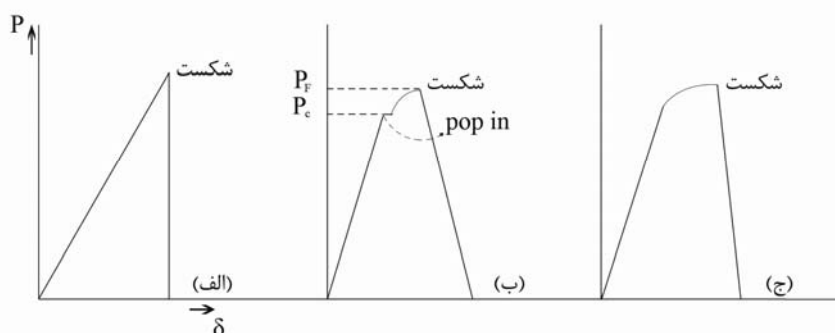
$$G = \frac{P^2}{2B} \frac{\partial C}{\partial a} = \frac{12P^2 a^2}{Eh^3 B^2} \quad (۸)$$

و ضریب شدت تنش عبارت است از:

$$K = 2\sqrt{3} \frac{P}{\sqrt{h^3}} - \frac{a}{B} \quad (۹)$$

معادله (۹) تقریب قابل قبولی برای ضریب شدت تنش است.

با جایگزینی معادله (۲) در معادله‌های (۸) و (۹) مقادیر میزان آزادسازی انرژی و ضریب شدت تنش در حالت کرنش صفحه‌ای به شکل زیر خواهد بود:

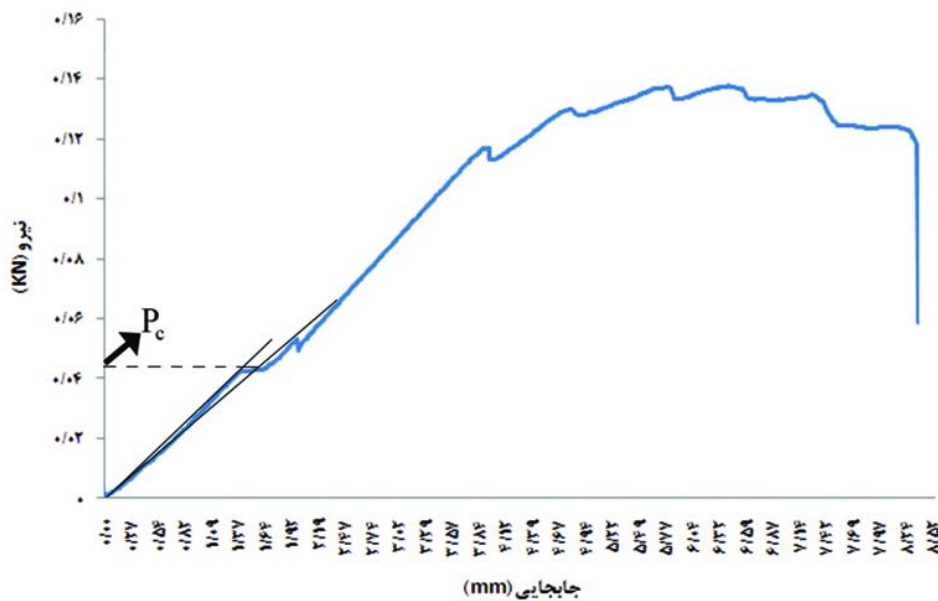
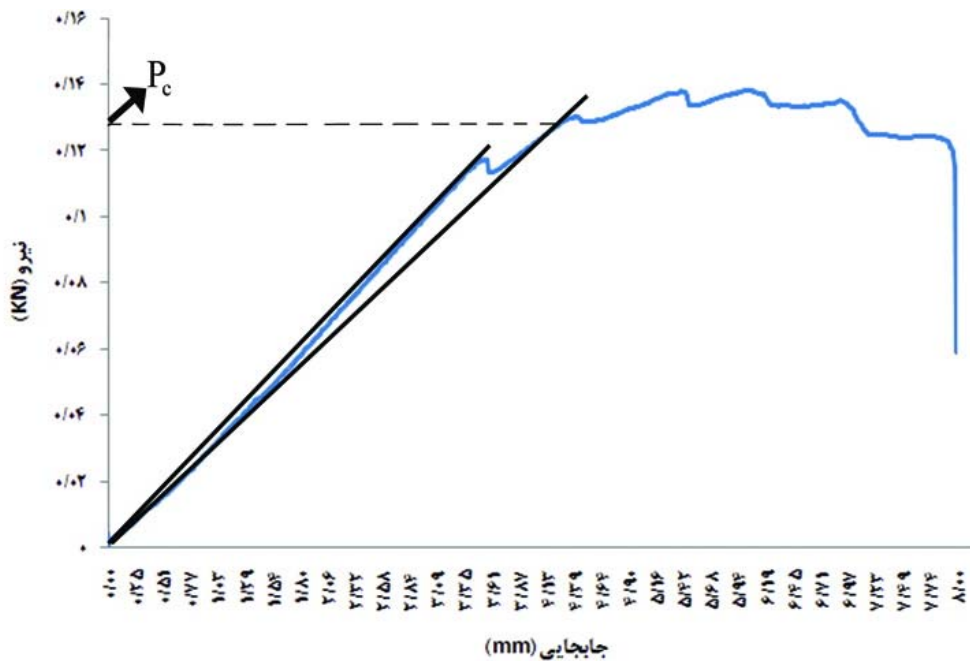


شکل ۶ - منحنی‌های آزمایشی بار بر حسب  $\delta$

$C_1$  عدد ثابتی است. بدیهی است که در دیاگرام خطی-P- $\delta$  شیب خط یعنی  $C_1 a/E$  متناسب با  $a$  است. برای به دست آوردن نقطه‌ای با ۲ درصد افزایش طول ترک کافی است از نقطه O (مرکز مختصات) خطی با شیب ۲ درصد کمتر از شیب  $C_1 a/E$  رسم کنیم (خط OB). محل تقاطع OB با منحنی بار  $P_c$  را می‌دهد (جمله نامفهوم است). البته در عمل غیرخطی بودن تا حدی به تغییر شکل پلاستیک بستگی دارد.

اگر غیرخطی بودن فقط در اثر رشد باشد، دیاگرام P- $\delta$  کم و بیش شبیه حالت (شکل ۶-ب) خواهد بود. نیرو در مرحله شکست ( $P_c$ ) را می‌توان باری تعریف کرد که ۲ تا ۵ درصد رشد ترک را ایجاد می‌کند. اگر پلاستیسیته وجود نداشته باشد دیاگرام P- $\delta$  خط مستقیم است. در حالت الاستیک  $\delta$  متناسب با اندازه ترک است، یعنی:

$$\delta = C_1 \frac{P}{E} a \quad (۱۲)$$



شکل ۷- طرح شماتیکی از ارتباط نیرو و تغییر مکان تحت آزمون مکانیک شکست (در هر دو منحنی خط سمت چپ نشان دهنده شیب آغازین در ناحیه الاستیک و خط دوم، خطی با شیب ۹۵٪ شیب آغازین است)

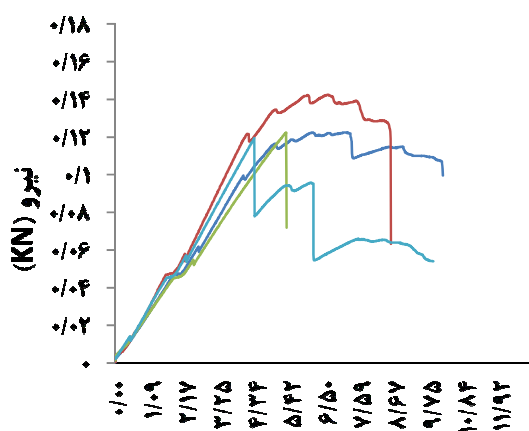
### نتایج

در مرحله شکست تفاوت دارند بلکه آغاز رشد ترک در سیستم‌های مختلف در مراحل متفاوتی اتفاق می‌افتد. در هر دو سیستم قبل از رسیدن به حداکثر بار ( $P_{Max}$ ) و مرحله بارگذاری در حد تناسب، آغاز رشد ترک اتفاق می‌افتد. از طرف دیگر ترک‌ها تقریباً در همه تکرارها قبل از بارگذاری

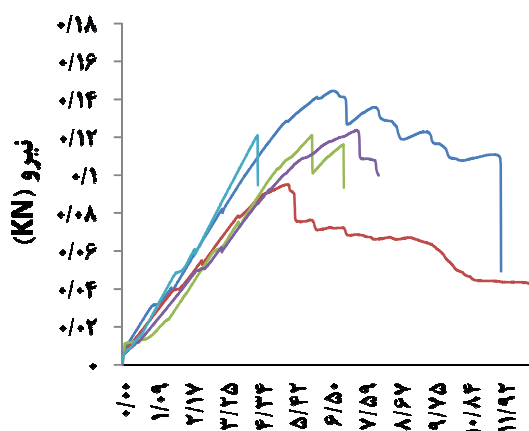
شکل‌های ۸ و ۹ به ترتیب نمودارهای نیرو- تغییر مکان سیستم TL و RL را در آزمون‌های چوب راش و چوب پلیمرهایی با سطوح مختلف فورفوریل‌اسیون نشان می‌دهد. نمودارهای دو سیستم نه تنها در مقادیر نیرو حداکثر

شکست و آغاز رشد ترک از نقطه غیرخطی منحنی نیرو جابجایی آغاز می‌شود. روند تغییر شکل الاستیک به پلاستیک در آزمون‌های شاهد سیستم ترک TL مشهودتر است. در آزمون‌های چوب پلیمر در طی گسترش ترک میزان بارگذاری حداکثر تمایل به افزایش دارد، اما انتشار حالت بی‌ثباتی را طی می‌کند. به دلیل پیشرفت ترک نیرو به‌طور ناگهانی افت می‌کند و به دنبال آن به آرامی به حالت اول بارگذاری برمی‌گردد.

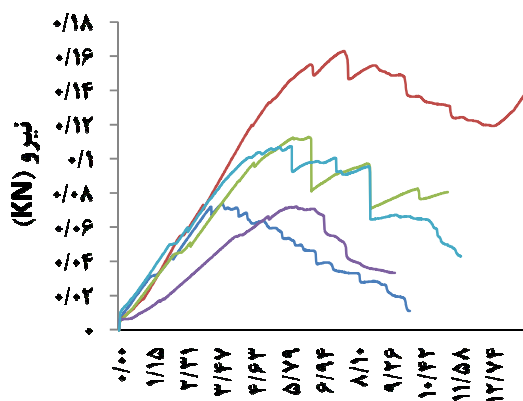
در حد تناسب با افت کوچکی در مقدار بار همراهند؛ بنابراین نیروی مربوط به آغاز رشد ترک ( $P_c$ ) در منحنی  $P-\delta$  بر اساس محل تلاقی خط ۵٪ شیب منحنی  $P-\delta$  با این منحنی و از مقادیر محور عمودی مربوط به بار به دست می‌آید. مقادیر چقرمگی شکست و میزان آزادسازی انرژی هر دو سیستم بر اساس این نمودارها محاسبه می‌شوند. علاوه بر آن از این نمودارها نتایج دیگری در رابطه با نحوه شکست در هر دو سیستم می‌توان به‌دست آورد. در آزمون‌های شاهد مربوط به هر دو سیستم مرحله



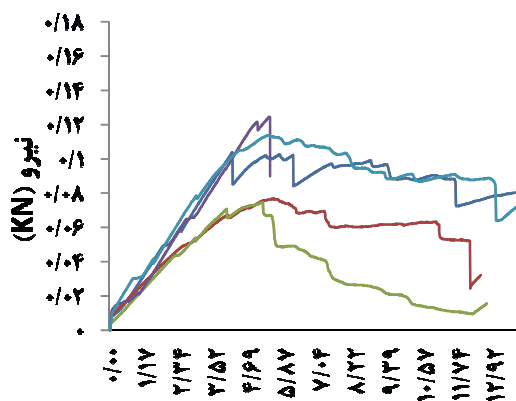
(ب) جابجایی (mm)



(الف) جابجایی (mm)



(د) جابجایی (mm)



(ج) جابجایی (mm)

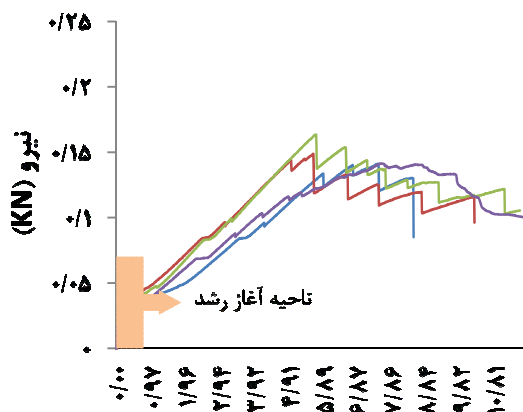
شکل ۸- نمودار نیرو-تغییر مکان ( $P-\delta$ ) سیستم RL آزمون‌های DCB در الف) آزمون شاهد و

ب) تا د) چوب پلیمر فورفوریل دار شده به ترتیب دارای سطوح کم، متوسط و زیاد

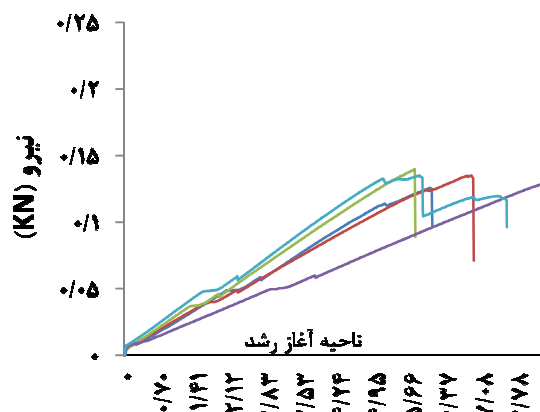


ناگهانی به اثرات پل زنی<sup>۱</sup> که به علت الگوی فیری ایجاد می-شود، مربوط است. Trabelsi و همکاران (۲۰۱۰) در تحقیق خود به نتایج مشابهی درباره منحنی P- $\delta$  دست یافتند.

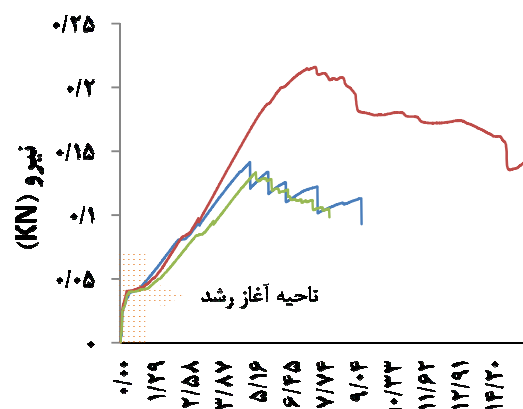
تفاوت آزمون‌های شاهد و چوب پلیمر در سیستم TL مربوط به مقدار این افزایش دوباره نیرو در منحنی P- $\delta$  و روند آن است. به طور چشمی مشاهده شده است که چنین رشد ترک



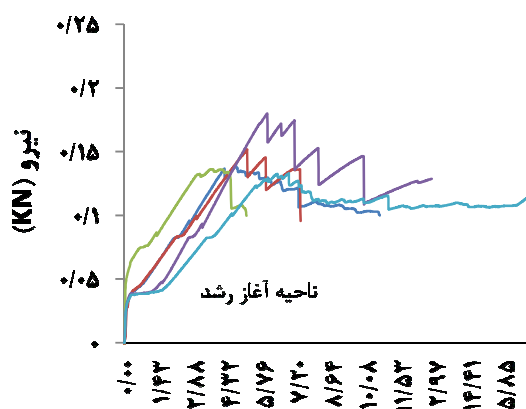
ب) جابجایی (mm) نیرو (KN)



الف) جابجایی (mm) نیرو (KN)



د) جابجایی (mm) نیرو (KN)



ج) جابجایی (mm) نیرو (KN)

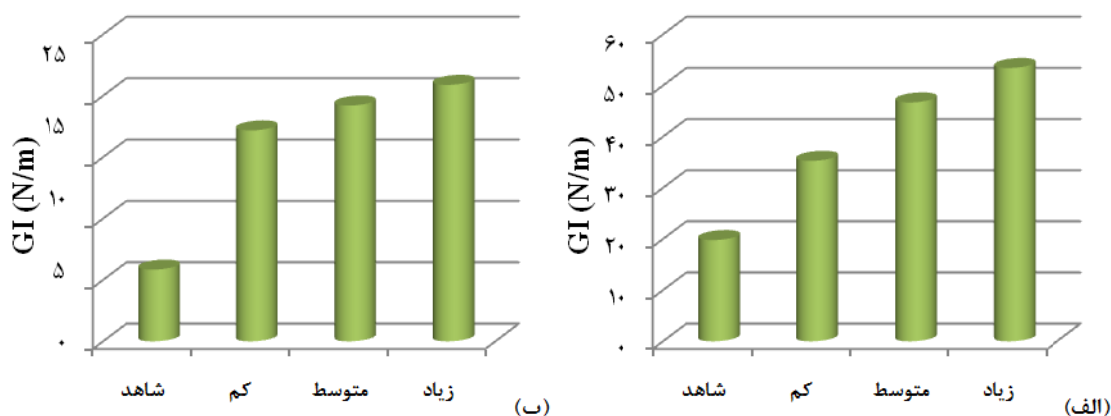
شکل ۹- نمودار نیرو- تغییر مکان (P- $\delta$ ) سیستم TL آزمون‌های DCB در الف) آزمون شاهد و ب) تا د)

چوب پلیمر فورفوریل دار شده به ترتیب دارای سطوح کم، متوسط و زیاد

می‌گیرد. مقادیر تغییر میزان آزادسازی انرژی و فاکتور شدت تنش نسبت به آزمون‌های شاهد در دو سیستم مختلف در جدول ۳ آمده است.

مقایسه مقدار میزان آزادسازی انرژی در دو سیستم مختلف نشان می‌دهد که سیستم RL دارای مقادیر بالاتری است.

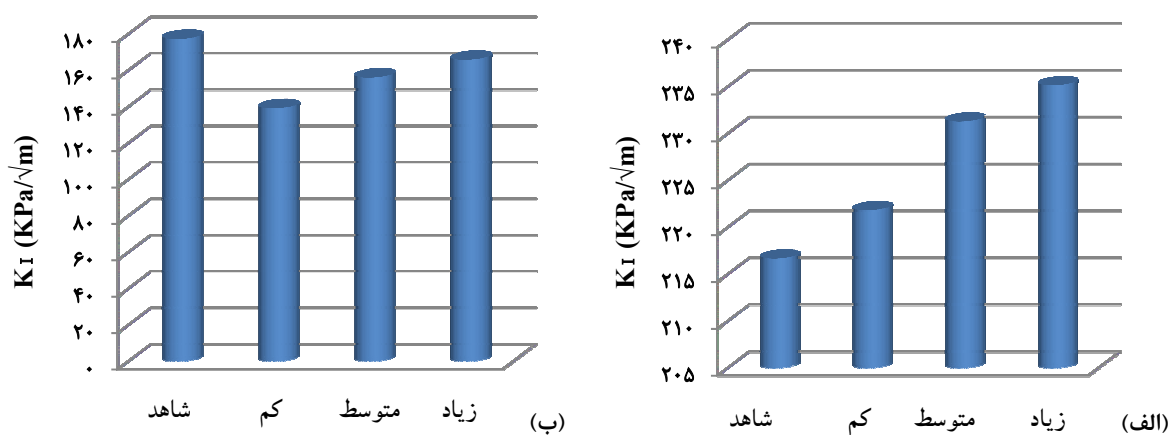
در آزمون‌های شاهد سیستم TL ترک به طور ناپایداری ادامه یافته و منتهی به یک افت شدید بارگذاری می‌شود. شکل ۱۰، مقایسه مقادیر میزان آزادسازی انرژی را در دو سیستم مختلف نشان می‌دهد. نتایج آزمون DCB در چوب راش و چوب پلیمر فورانی حاصل از آن نشان داد با فورفوریل دار کردن، مقادیر میزان آزادسازی انرژی در چوب پلیمرهای حاصل افزایش چشمگیری داشته و با افزایش سطح فورفوریل‌سیون این تغییرات روند صعودی به خود



شکل ۱۰- میزان آزادسازی انرژی در سیستم RL (الف) و TL (ب)

می‌دهد. مقدار  $K_{IC}$  در این سیستم با اعمال فورفوریل‌اسیون اندکی کاهش یافته ولی با افزایش سطح فورفوریل‌اسیون دوباره افزایش می‌یابد تا جایی که مقدار کاهش  $K_{IC}$  آزمونه‌هایی با سطح زیاد نسبت به شاهد به حدود ۶ درصد می‌رسد.

شکل ۱۱ ارتباط بین  $K_{IC}$  و سطوح فورفوریل‌اسیون را در دو سیستم مختلف نشان می‌دهد. نتایج مربوط به سیستم RL نشان می‌دهد، مقدار  $K_{IC}$  با افزایش سطح فورفوریل‌اسیون افزایش می‌یابد. شکل ۱۱ (ب) ارتباط بین  $K_{IC}$  و سطوح فورفوریل‌اسیون را در سیستم TL نشان



شکل ۱۱- فاکتور شدت تنش در سیستم RL (الف) و TL (ب)

جدول ۲- درصد تغییر میزان  $G_{IC}$  و  $K_{IC}$  سطوح فورفوریل‌اسیون نسبت به نمونه شاهد در سیستم‌های مختلف

تغییرات میزان معیارهای مختلف نسبت به آزمونه شاهد (%)			سیستم	معیار
نسبتاً زیاد	متوسط	کم		
۱۷۰/۱	۱۳۵/۹۷	۷۸/۳	RL	$G_{IC}$
۲۵۷/۴۸	۲۲۸/۶۷	۱۹۳/۹۷	TL	
۸/۵۲	۶/۷۵	۲/۳۸	RL	$K_{IC}$
-۶/۴۶	-۱۱/۹۷	-۲۱/۵۲	TL	

## بحث

فورفوریلایسیون باعث افزایش دانسیته می‌شود و علاوه بر آن تحقیقات نشان داده که پلیمریزاسیون مونومر فورفوریل الکل در دیواره باعث باز و کشیده شدن دیواره و افزایش ضخامت آن می‌گردد (Buchelt و همکاران ۲۰۱۲)، در نتیجه با تغییر مد ریزشکست<sup>۴</sup> در اثر فورفوریلایسیون مقادیر چقرمگی شکست نیز افزایش می‌یابد.

Smith و همکاران (۲۰۰۳) بیان کرده‌اند که دو عامل رطوبت و پیشنه خشک شدن از جمله عوامل بسیار مؤثر در چقرمگی شکستند. Smith و Chui (۱۹۹۴) اثر میزان رطوبت را بر انرژی شکست چوب کاج برآورد نمودند. آنها در تحقیق خود به این نتیجه رسیدند که مقادیر انرژی شکست با کاهش رطوبت چوب تر تا رطوبت ۱۸٪ افزایش می‌یابد ولی از این مقدار به بعد با کاهش رطوبت مقدار انرژی نیز کاهش می‌یابد؛ که علت آن به شکست ترد مواد مختلف در رطوبت‌های پایین تر برمی‌گردد. بر اساس جدول ۱ مقدار رطوبت تعادل چوب پلیمر با افزایش مقدار پلیمریزاسیون کاهش می‌یابد و احتمال دارد در سطوح پایین چقرمگی شکست متأثر از رطوبت فرآورده نیز باشد. چون مقدار پلیمر در دیواره اندک است، اثر مؤثری در پلاستیته چوب نداشته و باعث کاهش مقدار  $K_{IC}$  در سیستم TL می‌گردد. علاوه بر آن، خشک کردن نیز باعث هم‌کشیدگی در دیواره شده و باعث تمرکز تنش در چوب می‌شود و به دنبال آن ترک‌هایی در مقیاس میکروسکوپی در چوب به وجود می‌آید. Atack و همکاران (۱۹۶۱) دریافتند که برای نوئل در دمای اتاق مدهای ریزشکست داخل دیواره‌ای و عبور از جداره و حفره اتفاق می‌افتد و در نتیجه سطح شکست کاملاً زبر است؛ اما در دمای ۱۰۰ درجه سلسیوس ریزشکست‌ها دامنه‌ای از شکست بین سلولی را شامل می‌شود که سطح شکست صافی حاصل می‌کند. این تغییر به پلاستیکی شدن لیگنین در دیواره بین سلولی مربوط می‌شود. Reiterer (۲۰۰۱) میزان  $G_{IC}$  و  $K_{IC}$  چوب راش و نوئل را در دمای ۲۰ تا ۸۰ درجه سلسیوس بررسی کرده و دریافت که بالاترین افت در  $K_{IC}$  در دامنه ۲۰ تا ۴۰ درجه سلسیوس و  $G_{IC}$  در ۶۰ تا ۸۰ درجه سلسیوس

مقایسه مقدار میزان آزادسازی انرژی در دو سیستم مختلف نشان می‌دهد که سیستم RL دارای مقادیر بالاتری است. Smith و همکاران (۲۰۰۳) در تحقیقات خود به نتیجه مشابهی درباره  $G_{IC}$  و  $K_{IC}$  در دو سیستم RL و TL رسیدند. آنها علت این تفاوت را چنین تشریح می‌کنند که در سیستم TL در هنگام انتشار ترک‌ها در جهت مسیر طولی، اشعه‌ها کمترین مقاومت را در برابر انتشار ترک دارند. در نتیجه همان اشعه‌ها می‌توانند قابلیت جلوگیری یا پلی (مانع) در جهت انتشار ترک‌ها در جهت RL را داشته باشند و چقرمگی را افزایش دهند.

Thuvander و Berglund (۲۰۰۰) در بررسی‌های خود به این نتیجه رسیدند که ترک‌های TR چقرمگی شکست بالاتری از ترک‌های TL دارند و چقرمگی‌های شکست متفاوتی بین سیستم‌های مختلف در تحقیقات دیگر نیز دیده شده است که به روش‌های آزمایش، گونه‌های استفاده شده و تعیین مقدار  $P_c$  (نیروی ترک) بستگی دارد. Watanabe و همکاران (۲۰۱۱) نیز به نتیجه مشابهی در این زمینه دست یافتند.

در مقیاس میکروسکوپی سه نوع مختلف شکست را می‌توان تشخیص داد، بین سلولی<sup>۱</sup>، داخل دیواره‌ای<sup>۲</sup> و عبور از جداره و حفره<sup>۳</sup>. گسیختگی بین سلولی (IC) در لایه بین سلولی اتفاق می‌افتد و جدا شدن سلول‌ها را نشان می‌دهد. گسیختگی داخل دیواره‌ای منتهی به گسیختگی در دیواره ثانویه شده و اغلب در سطح مشترک دیواره  $S_2/S_1$  دیده می‌شود. در پهن‌برگان، گسیختگی بسیار پیچیده‌ای در سطح شکست که با گسیختگی جداره و حفره به دنبال زاویه میکروفیبریل‌های  $S_2$ ، در سلول‌ها به وجود می‌آید. از نظر چقرمگی شکست، مشاهدات مربوط به شکست در مقیاس میکرو نشان داد که ضخامت دیواره تأثیر بسیار زیادی در چقرمگی شکست سلول‌ها دارد؛ بنابراین شکست در چوب دانسیته کم تمایل به عبور از جداره و حفره دارد، درحالی‌که در دانسیته بالاتر، به‌طور همزمان شکست عبور از جداره و حفره و هم بین سلولی مشاهده شده است. بر اساس جدول ۱

1-Intercell

2-Interwall

3-Transwall

4-Microfracture

- alcohol. *Journal of Wood and Paper Science and Technology*. Volume 2, Number 4, 143-156
- AFPA, 2007. National design specification for wood construction. American Forest and Paper Association, Washington, DC
- Anderson, T.L., 2005. Fracture mechanics, fundamentals and applications. CRC Press: Taylor and Frances Group, Boca Raton, FL, pp 122-125, 310-311
- Attack, D., May, W.D., Morris, E.L. and Sproule, R.N., 1961. The energy of tensile and cleavage fracture of black spruce. *Tappi*, 44 (8): 555-567.
- Buchelt, B., Dietrich, T. and Wagenfuhr, A., 2012. Macroscopic and microscopic monitoring of swelling of beech wood after impregnation with furfuryl alcohol. *European Journal Wood Product*, DOI 10.1007/s00107-012-0631-x
- Dourado, N., Morel, S., de Moura, M.F.S.F., Valentin, G. and Morais, J., 2007. Comparison of fracture properties of two wood species through cohesive crack simulations. *Composites Part A*. 39:415-427.
- Ghajar, R., 1388. Fracture Mechanics and Fatigue. Press K.N. Toosi University of Technology, Tehran, page 482.
- Goldstein, I.S. and Dreher, W.A., 1960. Stable furfuryl alcohol impregnating solution. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 52(1): 57-58.
- King, M.J., Sutherland, I.J. and Le-Ngoc, L., 1999. Fracture toughness of wet and dry Pinus radiata. *European Journal of wood and Wood Product*. 57: 235-40.
- Kretschmann, D.E. and Green, D.W., 1996. Modeling moisture content-mechanical property relationships for clear southern pine. *Wood Fiber Science*. 28:320-37.
- Moura, M.F.S.F. de., 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.
- Mall, S., Murphy, J.F. and Shottafer, J.E., 1983. Criterion for mixed mode fracture in wood. *Journal of Engineering Mechanics*. 109:680-90.
- Reiterer, A., 2001. The influence of temperature on the mode I fracture behaviour of wood. *Journal of Material Science Letters*. 20: 1905-1907
- Schniewind, A.P. and Pozniak, R.A., 1971. On the fracture toughness of Douglas-fir wood. *Engineering Fracture Mechanics*. 2: 223-33.
- Schniewind, A.P. and Centeno, J.C., 1973. Fracture toughness and duration of load factor. I. Six principle systems of crack propagation and the duration factor for cracks propagating parallel to the grain. *Wood Fiber*. 5(2): 152-158.
- Smith, I. and Chui, Y.H., 1994. Factor affecting mode I fracture energy of plantation-grown red pin. *Wood Science and Technology*. 28: 147-157.
- Smith, I., Landis, E. and Gong, M., 2003. Fracture and fatigue in wood. Wiley, 234p.
- Smith, I. and Vasic, S., 2003. Fracture behaviour of softwood. *Mechanics of Material Journal*. 35: 803-815.

اتفاق می‌افتد. از آنجاکه چوب راش جزء گونه‌های حساس به خشک شدن است، بنابراین احتمال ایجاد ترک‌های میکروسکوپی در چوب در طی عملیات ساخت چوب پلیمر با کاتالیزور حرارت موضوع اجتناب‌ناپذیری به نظر می‌رسد. این ترک‌ها هم عرض با سیستم TL ایجاد شده و در طی بارگذاری به هم پیوسته و شکست در طی بارگذاری در سیستم TL را تسریع کرده و مقدار چقرمگی شکست 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 فورفوریل‌سیون افزوده شدن خاصیت پلاستیک فرآورده تا حد زیادی بر اثر منفی حرارت در طی پلیمریزاسیون و رطوبت تعادل کمتر فرآورده غلبه می‌کند.

روند تغییر معیارهای مختلف (میزان  $G_{IC}$  و  $K_{IC}$ ) تحت تأثیر سطوح مختلف فورفوریل‌سیون باهم متفاوت است، علت این تفاوت می‌تواند به این دلیل باشد که پارامتر  $G$  میزان انرژی ارتجاعی رها شده برای یک نوک ترک نام‌گذاری شده است. میزان آزادسازی انرژی  $G$ ، تغییرات انرژی پتانسیل را به ازای افزایش طول ترک نشان می‌دهد و رفتار موضعی کلی را توصیف می‌کند. در حالی که  $K_I$  ضریب شدت تنش، کرنش‌ها و جابجایی‌های اطراف ترک را تعیین می‌کند و یک پارامتر محلی است. البته برای کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف (و برای مقایسه چوب و کامپوزیت‌های چوبی) روش‌های میزان آزادسازی انرژی بسیار مفیدتر از روش‌های شدت تنش است (Anderson, 2005).

اگر  $K_{IC}$  جزء خواص مواد باشد، چنانچه صفحه دیگری از همان جنس ولی حاوی ترکی به طول متفاوت از طول ترک قبلی را تا شکست تحت کشش قرار دهیم مقدار  $K_{IC}$  برای هر دو حالت باید مساوی باشد. با داشتن  $K_{IC}$  می‌توان پیش‌بینی کرد که ترک با چه طولی می‌تواند در سازه وجود داشته باشد، مشروط به اینکه مقدار تنش اعمالی بر سازه معین باشد.

#### منابع مورد استفاده

- Abdlzadeh, H., Ebrahimi, S., Layeghi, M., Qasimiyah, M. and Mirshokraei, S.A., 2013. The mechanical properties of the polymer beech wood - Furfuryl

- 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
- Wu, E.M., 1963. Application of fracture mechanics to orthotropic plates. T&AM Report No. 248. department of theoretical and applied mechanics, University of Illinois, Urbana, Illinois
- Wu, E.M., 1967. Application of fracture mechanics to anisotropic plates. *Journal applied Mechanics*. 34(4):967–974
- Yoshihara, H., 2007. Simple estimation of critical stress intensity factors of wood by tests with double cantilever beam and three-point endnotched flexure. *Holz*. 61:182–9.
- Stanzl-Tschegg, S.E. and Navi, P., 2009. Fracture behaviour of wood and its composites. A review COST Action E35 2004-2008 Wood machining-micromechanics and fracture. *Holzforschung*. 63(2): 139-149.
- 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
- Trabelsi, W., Michel, L. and Othomene, R., 2010. Effects of Stitching on Delamination of Satin Weave Carbon-Epoxy Laminates Under Mode I, Mode II and Mixed-Mode I/II Loadings. *applied Composite Material*. 17:575–595
- Triboulot, P., Jodin, P. and Pluvinage, G., 1984. Validity of fracture mechanics concepts applied to wood by finite element calculation. *Wood Science and Technology*. 18:51–8.

## Fracture behavior of beech-furan wood/polymer under mode I

H. Abdolzadeh<sup>1</sup>, Gh. Ebrahimi<sup>2</sup>, M. Layeghi<sup>3\*</sup>,  
M. Ghassemieh<sup>4</sup> and S.A. Mirshokraie<sup>5</sup>

1- PhD. student, Wood science & Technology Department, Natural Resources Faculty, University of Tehran, Karaj, Iran

2- Professor, Wood science & Technology Department, Natural Resources Faculty, University of Tehran, Karaj, Iran

3\*- Corresponding author, Assistant Professor, Wood science & Technology Department, Natural Resources Faculty, University of Tehran, Karaj, Iran, Email: mlayeghi@ut.ac.ir

4-Associate Professor, Civil Engineering Faculty, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

5-Professor, Payame Noor University, Tehran, Iran

Received: Oct, 2013

Accepted: Sep., 2014

### Abstract

In this study, fracture characteristics of wood-polymer under mode I were investigated by double cantilever beam. In this regard, the properties of furfurylated wood specimens with three different levels of furfuryl (20%, 30% and 65%) were evaluated in both RL and TL systems. Results indicated that load-displacement curves from mode I fracture specimens were changed by furfurylation so that it was much clear on curves of TL system. These changes not only included curve slope in elastic and proportional limit zones, but also fracture zone and initiation of crack growth were also affected. Furthermore furfurylation and raising its content on both systems and especially on TL one, caused to change in stress intensity factor,  $K_{IC}$ , and critical energy release rate,  $G_{IC}$ . In both systems,  $G_{IC}$  were severely increased by increasing the furfuryl contents. This criterion demonstrated that the wood- polymer showed much toughness under mode I fracture. Moreover, variation of  $K_{IC}$  values due to furfurylation at both systems was different with that of  $G_{IC}$ . At the RL system, ascending trend was observed at  $K_{IC}$  and  $G_{IC}$  values by increasing furfurylation levels. But at TL system,  $K_{IC}$  was decreased by furfurylation and this criterion enhanced by increasing of furan polymer in the cell wall. Generally, results of this research show that fracture toughness of wood is highly affected by furfurylation.

**Keyword:** Fracture mechanics, wood-polymer, mode I, fracture toughness, energy release rate.