

فصلنامه علمی - پژوهشی تحقیقات علوم چوب و کاغذ ایران
جلد ۳۱، شماره ۴، صفحه ۶۸۳-۶۷۱، (۱۳۹۵)

رفتار گسیختگی خزش ماده مرکب الیاف باگاس- پلی پروپیلن

فروغ دستوریان^{۱*}، محمد لایقی^۲، قنبر ابراهیمی^۳، مهدی تجویدی^۴ و سید مجید ذبیح‌زاده^۵

*۱- نویسنده مسئول، استادیار، صنایع چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، پست الکترونیک: fdastoorian@alumni.ut.ac.ir

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

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

۴- استادیار، صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع جنگلی، دانشگاه مین- آمریکا

۵- دانشیار، صنایع چوب و کاغذ، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

تاریخ پذیرش: مهر ۱۳۹۵

تاریخ دریافت: خرداد ۱۳۹۵

چکیده

در این مطالعه رفتار گسیختگی خزش ماده مرکب الیاف باگاس- پلی پروپیلن بررسی شد. برای توصیف اثر دوام بار بر روی ماده مرکب مورد مطالعه، دو مدل تخریب تجمعی (EDRM و Wood) و یک مدل شکست بر پایه انرژی (R-W)، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. نتایج نشان داد که مدل EDRM در سطح تنش بسیار بالا، زمان شکست را کمتر از مقدار استاتیکی و مدل Wood، زمان شکست را بیشتر از مقدار حاصل از آزمون استاتیک برآورد می‌کند. علت این امر به تفاوت در نحوه اعمال بار در بارگذاری استاتیکی و بارگذاری خزشی نسبت داده شد. نتایج نشان داد که هر سه مدل قادر بودند رفتار گسیختگی خزش ماده مرکب مورد مطالعه را به خوبی توصیف کنند و در این میان مدل Wood از لحاظ آماری برازش بهتری را بر روی داده‌های تجربی نشان داده است. بر اساس یافته‌های این تحقیق می‌توان نتیجه گرفت که مدل R-W در پیش‌بینی زمان شکست، نسبت به دو مدل دیگر محافظه‌کارانه‌تر عمل می‌کند و علت این امر را می‌توان به تفاوت در معیار شکست در مدل‌های بر پایه انرژی یا معیار شکست در مدل‌های تخریب تجمعی نسبت داد. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش سطح تنش مرحله دوم خزش کوتاه‌تر می‌شود و در سطوح تنش بالا، مرحله سوم خزش غالب است.

واژه‌های کلیدی: ماده مرکب، گسیختگی خزش، مراحل سه‌گانه خزش، مدل‌های تخریب تجمعی، مدل‌های شکست بر پایه انرژی.

مقدمه

شده با مواد حفاظتی بسیار هزینه‌بر است. یک جایگزین برای چوب‌آلات ساختمانی اشباع شده با مواد حفاظتی، مواد مرکب چوب پلاستیک (WPCs) می‌باشد. این مواد مرکب، از دوام طبیعی به نسبت بالایی در برابر تخریب بیولوژیکی و

طی سالیان متمادی، مصالح چوبی ساختمانی به دلیل خواص الاستیک و ویژگی‌های جذب انرژی در مصارف سازه‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند. به منظور افزایش طول عمر و دوام مصالح چوبی از انواع تیمارهای حفاظتی استفاده می‌شود که البته جایگزینی و مدفون کردن چوب‌آلات اشباع

ارائه شده است. دو مدل تخریب تجمعی که برای چوب و مواد مرکب چوبی بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرند عبارتند از: مدل تخریب تجمعی Wood و مدل تخریب تجمعی EDMR.

Wood (۱۹۵۱) یک مدل هایپربولیک بر روی داده‌های زمان شکست نمونه‌های کوچک سالم چوب دوگلاس در بارگذاری خمشی از ۶۰ تا ۹۵ درصد به صورت تابعی از سطح تنش برآزش کرد، با فرض اینکه یک تنش آستانه‌ای وجود دارد که زیر آن شکست رخ نخواهد داد. وی مقدار این تنش آستانه را ۱۸/۳ درصد اعلام کرد. مدل هایپربولیک Wood را که به مدل منحنی مدیسون^۱ مشهور است، می‌توان به صورت مدل تخریب تجمعی ارائه داد:

$$\frac{d\tau}{dt} = A(SR - SR_0)^B \quad (1)$$

که A و B ثابت‌های مدل، SR نسبت تنش اعمال شده به مقاومت کوتاه‌مدت و SR_0 آستانه تنش است که زیر آن هیچ‌گونه تخریبی رخ نمی‌دهد.

Gerhards (۱۹۸۷) یک مدل تخریب تجمعی نمایی برای پیش‌بینی زمان شکست برای نمونه‌های کوچک سالم چوب دوگلاس ارائه داد. این مدل که میزان تخریب تجمعی را با یک تابع نمایی نزولی ارزیابی می‌کند به مدل EDMR^۲ معروف است:

$$\frac{d\alpha}{dt} = \exp(-A + B.SR) \quad (2)$$

که A و B ثابت‌های مدل و SR نسبت تنش به مقاومت کوتاه‌مدت می‌باشد. همچنین Γ متغیر حالت نشان‌دهنده تخریب از صفر (بدون تخریب) تا یک (شکست) می‌باشد. در تئوری‌های معیار انرژی شکست، فرض بر این است که نیروهای وارد بر یک ماده به دو بخش تبدیل می‌شوند: انرژی که در ماده به صورت انرژی قابلیت ذخیره می‌شود و انرژی که صرف تغییر شکل شده و به صورت گرما به هدر

مقاومت در برابر جذب رطوبت برخوردارند (Pendelton, 2002). به‌علاوه فناوری اکستروژن سبب شده که این مواد با مقاطع گوناگون از جمله سطح مقطع جعبه‌ای قابل تولید باشند که این امر به مصرف مؤثر مواد خام می‌انجامد.

در گذشته کاربرد مواد مرکب چوب پلاستیک به دلیل مدول کم و تمایل بالای آنها به خزش، تنها به مصارف غیر ساختمانی محدود بود. اما در حال حاضر با پیشرفت فناوری‌های مرتبط، امکان افزودن مقادیر بیشتر آرد چوب به عنوان پرکننده و متعاقباً افزایش مدول (Adcock, 2001)، کاربرد این مواد مرکب به مصارف نیمه سازه‌ای همانند لمبه و پرچین، پانل‌های داخلی اتومبیل و پروفیل در و پنجره توسعه یافته است (Clemons, 2002; Cai & Ross, 2011). البته طی دهه اخیر به دلیل محدودیت‌های استفاده از چوب‌آلات در ساختمان‌های چوبی، توجه زیادی به امکان استفاده از WPCها به جای چوب‌آلات اشباع شده با مواد حفاظتی در اجزای پی معطوف شده است (Dolan, 2010; O'Dell, 2008).

خزش و گسیختگی خزش تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر عملکرد اعضای ساختمانی WPCها داشته و موضوع مهمی در مصارف تحمل بار محسوب می‌شوند (Sain et al., 2000). هرچند از منظر طراحی، رفتار گسیختگی خزش مواد به دلیل فروریزش و استنباط ایمنی از مطلوبیت بالاتری برخوردار است. رفتار خزش و گسیختگی خزش یا دوام بار چوب، مواد مرکب چوبی و سایر مواد ویسکوالاستیک توسط محققان بسیاری مورد بررسی قرار گرفته است و مدل‌های مختلفی برای پیش‌بینی زمان شکست ارائه شده است. این مدل‌ها شامل مدل‌های تجربی، مدل‌های آماری و مدل‌های تئوریک می‌باشند. مدل‌های تئوریک بر تئوری تخریب تجمعی، تئوری معیار انرژی شکست و یا بر تئوری مکانیک شکست تمرکز دارند.

در تئوری‌های تخریب تجمعی فرض بر این است که کل تخریب ایجاد شده در ماده که به شکست منتهی می‌شود، برابر با جمع تخریب‌های ناشی از بار وارده بر ماده است. مدل‌های تخریب تجمعی متعددی توسط محققان مختلف

1-Madison curve

2-Exponential Damage Rate Model

نحوی که هیچ انرژی قابلیتی در جسم ذخیره نشود، شکست هیچگاه رخ نخواهد داد. مدل ارائه شده توسط این دو محقق که به مدل R-W معروف شد، زمان شکست را به صورت تابعی از تنش اعمال شده (\dot{T}_0) و مقاومت تحت تنش آنی (\dot{T}_R) محاسبه می‌کند:

$$W_s(t) \leq \frac{D_0}{2} \dot{T}_R^2 \quad \text{معیار R-W با این فرض که}$$

$$\left(\frac{t_f}{t_0}\right) = \left(\frac{1}{2-2^n}\right)^{\frac{1}{n}} \left(\frac{D_0}{D_1}\right)^{\frac{1}{n}} \left(\frac{1}{X}-1\right)^{\frac{1}{n}} \quad (3)$$

که W_s انرژی ذخیره شده در جسم، $X = \dot{T}_0^2 / \dot{T}_R^2$ ، زمان تا شکست و t_0 واحد زمان (ثانیه، دقیقه، ساعت یا روز)

است. D_0 ، D_1 و n ثابت رابطه هستند.

وابسته به زمان در دماهای پایین، کمتر از خزش آنی تحت تأثیر دما قرار گرفت.

Xu و همکاران (۲۰۰۱) رفتار خزشی مخلوط پلی استایرن/HDPE پر شده با ۱۰ تا ۴۰ درصد وزنی آرد چوب را مورد بررسی قرار دادند. فرمولاسیون ماده مرکب مورد مطالعه شامل ۱۰٪ تا ۴۰٪ آرد چوب با مخلوطی از نسبت‌های مختلف PS/HDPE بود. آنان آزمون‌های خزش خمشی سه نقطه‌ای را بر نمونه‌هایی به ابعاد $60 \times 12 \times 2$ mm انجام دادند و دریافتند که با افزودن آرد چوب مدول الاستیسیته افزایش و میزان خزش کاهش می‌یابد.

Kazemi Najafi و همکاران (۲۰۰۸) رفتار خزشی مواد مرکب HDPE-الیاف بازیافتی را بعد از غوطه‌وری در آب مورد مطالعه قرار دادند و دریافتند که جذب آب تأثیر منفی بر رفتار خزشی داشته است و کرنش خزش با افزایش زمان غوطه‌وری افزایش یافته است. این امر به جدا شدن اتصال الیاف از ماده زمینه در اثر جذب آب نسبت داده شد.

می‌رود. در مدل‌های ارائه شده بر پایه این تئوری، یک مقدار حدی برای انرژی ذخیره شده تنش یا کرنش در نظر گرفته می‌شود که اگر تنش یا کرنش از این حد بیشتر شد، شکست رخ خواهد داد. این تئوری اول بار در سال ۱۹۳۹ توسط Reiner و Weisenberg مطرح شد. آنان بیان کردند که اگر کل انرژی کرنش به انرژی هدررفته تبدیل شود، به

Sain و همکاران (۲۰۰۰) رفتار خزش خمشی مواد مرکب با سه ماده زمینه PVC، PE و PP با مقدار ثابت ۳۰٪ وزنی الیاف چوب را در سطوح تنش از ۱۰ تا ۵۰ درصد تنش نهایی مورد مطالعه قرار دادند. تأثیر MAPE و MAPP به‌عنوان جفت‌کننده نیز مورد بررسی قرار گرفت. این محققان دریافتند که رفتار خزشی تابعی از شرایط بارگذاری و دماست. نتایج آنان نشان داد که مواد مرکب ساخته شده از PVC به تغییرات دمایی محیط بسیار حساس بوده و مواد مرکب با ماده زمینه PE با و بدون جفت‌کننده از مقاومت به خزش بسیار کمی برخوردار بودند. ماده مرکب PP با جفت‌کننده نسبت به خزش آنی در مقایسه با نمونه‌های جفت نشده مقاوم‌تر بودند، اگرچه رفتار خزشی ثانویه هر دو کمی بهتر از PP خالص بوده است. وی بیان کرد که کرنش آنی در سطوح تنش پایین بیشتر از کرنش ثانویه بوده است. درحالی‌که خزش وابسته به زمان با افزایش سطوح تنش بیشتر شد که علت این امر به لغزش مولکولی در ساختار ماده مرکب نسبت داده شد. به‌علاوه اینکه خزش

۳۰ درصد انجام داده و مدت زمان آزمون نیز یک ساعت بوده است.

Chang و همکاران (۲۰۱۳) و Dastoorian و همکاران (۲۰۱۰)، از اصل رویه‌گذاری تنش-زمان برای پیش‌بینی رفتار خزشی طولانی‌مدت مواد مرکب چوب پلاستیک استفاده کردند و دریافته‌اند که این ماده به لحاظ رئولوژیکی ساده بوده و می‌توان تنها با جابه‌جایی در محور افقی زمان، به یک منحنی مرجع نسبتاً خوب برای پیش‌بینی رفتار طولانی‌مدت این مواد دست یافت.

Brandt و Fridley (۲۰۰۳) با استفاده از مدل تخریب تجمعی EDRM ضرایب مدت زمان اعمال بار را برای WPC‌های با ماده زمینه HDPE و PVC ارائه داده و این ضرایب را با ضرایب مدت زمان اعمال بار چوب مقایسه کرده‌اند. آنان دریافته‌اند که ضرایب تنظیم مدت زمان چوب برای این دو چندسازه قابل استفاده نیست. هرچند این محققان از مدل EDRM برای تعمیم زمان شکست تا ۱۰ سال استفاده کردند اما میزان انحراف داده‌های واقعی با مدل مذکور را مورد بررسی آماری قرار نداده و اثر دما بر رفتار خزشی این مواد را نیز در مطالعه‌شان لحاظ نکرده‌اند.

در میان گزارش‌های علمی منتشر شده در رابطه با خواص کاربردی مواد مرکب چوب پلاستیک، به ویسکوالاستیک بودن آنها اشاره شده است ولی در زمینه چگونگی تأثیرپذیری رفتار وابسته به زمان تحت بار در مراحل سه‌گانه خزش، گزارشی ارائه نشده است. در این تحقیق سعی بر این است با مطالعه و بررسی اثر دوام بار بر یک ماده مرکب تجاری الیاف باگاس-پلی‌پروپیلن، به درک بهتری از اثر سطح تنش در مراحل سه‌گانه خزش و یافتن یک مدل مناسب برای پیش‌بینی زمان شکست این مواد مرکب دست یافت.

مواد و روش‌ها

ماده مرکب تجاری الیاف باگاس-پلی‌پروپیلن تولید شده توسط شرکت دز چوپیکس واقع در جنوب ایران برای این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. این ماده مرکب شامل ۶۰

همچنین زمان غوطه‌وری طولانی‌تر منجر به خیز خزشی غیرقابل بازگشت بیشتر گردید.

Najafi و Kazemi Najafi (۲۰۰۹) آزمون‌های خزش خمشی کوتاه‌مدت (۳۰ دقیقه) را بر روی مواد مرکب آرد چوب-HDPE در محدوده تنش ۱۰ تا ۴۰ درصد تنش نهایی انجام دادند. خیز خزش با افزایش سطح تنش افزایش یافت و مواد مرکب تولید شده با HDPE بازیافتی مقاومت در برابر خزش بالاتری نسبت به چندسازه‌های تولید شده با HDPE بکر داشت.

Alvarez (۲۰۱۰) قابلیت استفاده از مواد مرکب چوب پلاستیک به‌عنوان صفحات دیوارهای حائل و رفتار وابسته به زمان آنها را مورد مطالعه قرار داد. وی با انجام آزمون گسیختگی خزش ۹۰ روزه در سطح تنش ۵۵ درصد مقاومت خمشی، هیچ‌گونه شکستی را مشاهده نکرد و مقدار فاکتور خزش را در این آزمون ۲/۵۷ به‌دست آورد که بیشتر از فاکتور خزش چوب بود. این یافته نشان می‌دهد که میزان خزش مواد مرکب چوب پلاستیک بیشتر از چوب بوده و نمی‌توان از ضرایب چوب برای این مواد استفاده کرد.

Hamel (۲۰۱۰) رفتار وابسته به زمان دو WPC با ماده زمینه PP و HDPE در خمش، کشش و فشار را مورد مطالعه قرار داد. وی دریافت که میزان خیز با افزایش سطح تنش به‌طور خطی کاهش می‌یابد و پس از گذشت ۴۰۰ روز از زمان آزمون بیشتر نمونه‌ها در مرحله اولیه خزش باقی مانده و دچار شکست نمی‌شوند. البته سطوح تنش اعمالی در محدوده ۲۰ تا ۵۰ درصد تنش نهایی بود. به‌طوری‌که در این مطالعه نیز اثر دما و سطوح تنش بالای ۵۰ درصد مورد مطالعه قرار نگرفت.

Kazemi Najafi و همکاران (۲۰۱۲) رفتار خزشی کوتاه‌مدت ماده مرکب آرد چوب-پلی‌پروپیلن را با چوب ماسیو در سطح تنش ۳۰ درصد تنش نهایی مورد مقایسه قرار دادند و دریافته‌اند که مقدار خزش نسبی ماده مرکب مورد مطالعه بیشتر از چوب ماسیو بوده است اما مقدار میزان خزش ماده مرکب تقریباً برابر با چوب ماسیو بوده است. البته این محققان آزمون‌های خزش خمشی را در سطح تنش

مدت ۹۰ روز، یا تا زمان شکست و در پنج سطح تنش ۵۵، ۷۰، ۸۰، ۹۰ و ۹۵ درصد تنش نهایی، در پنج تکرار (در دمای ۲۱ درجه سانتی گراد)، تحت بار قرار گرفت. میزان خیز وسط دهانه توسط یک ترانسدیوسر خطی با خروجی آنالوگ (UniMeasure LX-PA 10) با محدوده اندازه‌گیری ۲۵۴mm با دقت ± 0.13 ، اندازه‌گیری شد. از یک ثبت کننده داده یا داده‌بردار با قابلیت ثبت یک داده در ثانیه و یک نرم‌افزار جمع‌آوری داده برای ثبت داده‌های خیز در واحد زمان استفاده گردید. در صورت شکست نمونه، زمان شکست نیز ثبت شد.

نتایج

برای مطالعه رفتار گسیختگی خزش، در ابتدا نتایج آزمون خمش استاتیکی (جدول ۱) برای تعیین مقادیر بار در هر سطح تنش به‌کار گرفته شد. آنگاه مقادیر باری که باید در هر سطح تنش اعمال شود، محاسبه شده و در جدول ۲ آورده شده است.

در شکل ۱ منحنی‌های میزان خزش (مشتق اول خزش نسبت به زمان) در مقیاس لگاریتمی، در برابر کرنش خزش به تصویر کشیده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود منحنی‌های میزان کرنش مربوط به سطوح تنش ۹۵، ۹۰، ۸۰ و ۷۰ درصد ابتدا کاهش یافته و بعد با زمان ثابت می‌شود و پس از آن میزان کرنش افزایش یافته تا به شکست منتهی شود. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش سطح تنش مرحله دوم خزش کوتاه‌تر می‌شود و در سطوح تنش بالا، مرحله سوم خزش غالب است و تنها میزان تغییر شکل فزاینده مشاهده می‌شود. البته تنها در منحنی مربوط به سطح تنش ۵۵ درصد که در آن شکست رخ نداده است، میزان کرنش با زمان ثابت است؛ اما مشاهده می‌شود که با کاهش سطح تنش، مرحله دوم خزش طولانی‌تر شده و میزان کرنش کاهش می‌یابد.

درصد وزنی الیاف باگاس (به ابعاد ۵۰ مش) به‌عنوان پرکننده، ۴۰ درصد وزنی پلی‌پروپیلن به‌عنوان ماده زمینه پلیمری، ۴ درصد مالئیک‌انیدرید پلی‌پروپیلن به‌عنوان سازگارکننده و ۶ درصد سایر افزودنی‌ها از قبیل مسترچ‌های رنگی، آنتی‌استیک، کربن بلک و دی‌اکسید تیتان بوده است. مواد به‌صورت مذاب با یکدیگر مخلوط شده و با استفاده از یک اکسترودر دو ماردونه ناهم‌سوگرد مجهز به یک پروفیل I شکل اکسترود شدند. نمونه‌های آزمون خمشی و خزش از قسمت جان پروفیل I شکل در امتداد جهت اکسترورژن تهیه شدند.

مشروط‌سازی اولیه نمونه‌های آزمون به مدت دو هفته در دمای $23 \pm 2^\circ\text{C}$ و رطوبت نسبی 50 ± 5 درصد مطابق استاندارد ASTM D618 انجام شد.

به‌منظور تعیین مدول گسیختگی برای محاسبه سطوح اعمال تنش در آزمون گسیختگی خزش، آزمون خمش استاتیک چهار نقطه‌ای، مشابه شرایط آزمون گسیختگی خزش، از ماشین universal مدل DLV-250/DZ-10-D (آزمایشگاه دانشگاه صنعتی وین) بر روی نمونه‌های آزمون مطابق استاندارد ASTM D790 در سرعت بارگذاری $1/24 \text{ mm/min}$ ، در ده تکرار انجام شد.

ابعاد اسمی نمونه‌ها $12/7 \times 13 \times 495 \text{ mm}^3$ ، فاصله بین دو تکیه‌گاه 406 mm و فاصله بین دو رأس بارگذاری 135 mm بود. مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته به‌ترتیب به‌صورت مدول گسیختگی (MOR) و مدول خمشی (MOE) بیان شد.

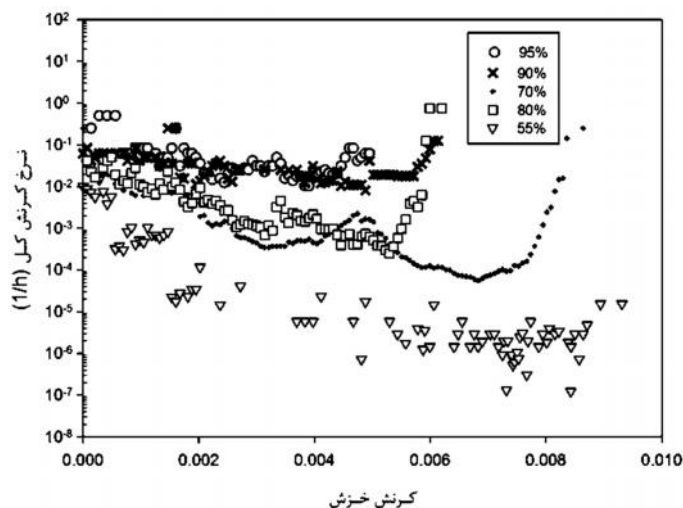
برای انجام آزمون‌های گسیختگی خزش، تکیه‌گاه‌ها و دو رأس بارگذاری مطابق تعریف استاندارد ASTM D790 و با در نظر گرفتن ضخامت نمونه به شکل استوانه‌ای و با شعاعی برابر با $1/5$ برابر ارتفاع نمونه ساخته شد. بار لازم توسط وزنه‌های فولادی اعمال گردید. ابعاد اسمی نمونه‌های آزمون گسیختگی خزش مشابه آزمون خمش استاتیکی چهار نقطه‌ای در نظر گرفته شد. مطابق استاندارد ASTM D6815، هر نمونه به

جدول ۱- نتایج آزمون خمش استاتیک چهارنقطه‌ای

MOR (MPa)	MOE (MPa)	بار حداکثر (KN)	تغییر مکان وسط دهانه (mm)
۳۳۴۴/۱۵	۰/۱۷۹	۰/۰۱۱	میانگین
۲۱۹/۱۲	۰/۰۰۶	۰/۰۰۰۶	انحراف معیار

جدول ۲- سطوح بار مورد نیاز برای آزمون گسیختگی خزش

مقدار بار (N) در سطح تنش					COV (%)	مقدار میانگین مقاومت خمشی (MPa)
%۹۵	%۹۰	%۸۰	%۷۰	%۵۵		
۱۷۰/۰۵	۱۶۱/۱۰	۱۴۴/۷۴	۱۲۵/۷۷	۹۸/۸۲	۰/۰۳۴	۳۵/۱۲



شکل ۱- منحنی میزان خزش (مشق اول خزش نسبت به زمان) در مقیاس لگاریتمی،

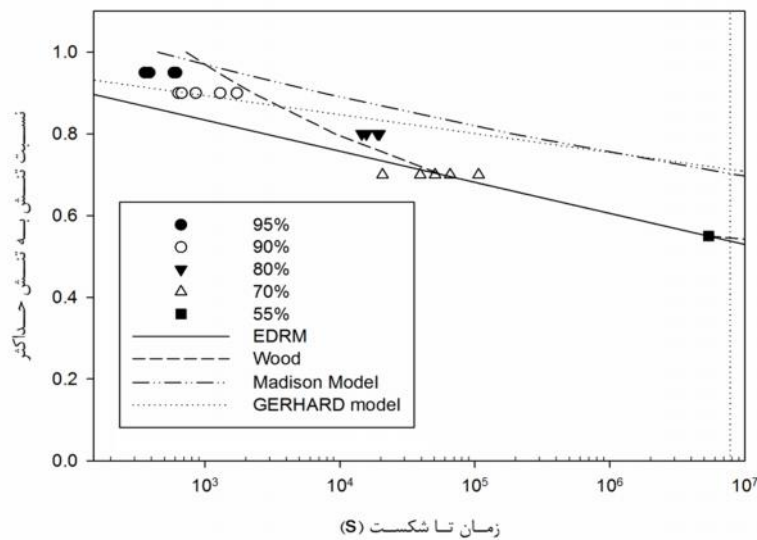
در برابر کرنش خزش برای سطوح تنش مختلف

امریکا به کار می‌رود و منحنی Gerhard که برای چوب دوگلاس به دست آمده است، نیز برای مقایسه آورده شده است. بنابراین ملاحظه می‌شود که در زمان حدود ۸ دقیقه مدل مدیسون برای چوب ماسیو از نسبت تنش یک فراتر می‌رود که این زمان تقریباً برابر زمانی است که چوب تحت بار استاتیکی دچار شکست می‌شود. مدل Gerhard این زمان را برای چوب ماسیو، تقریباً ۵ ثانیه برآورد کرده است. منحنی EDRM برازش شده روی داده‌های تجربی مقدار

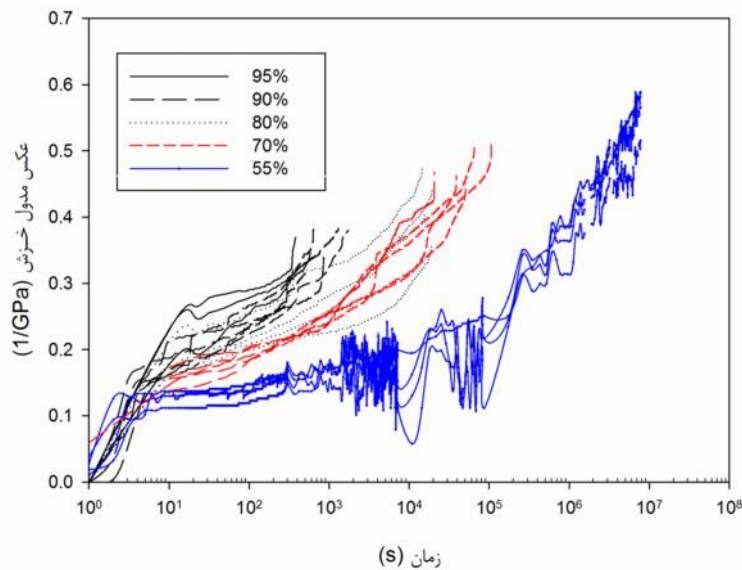
منحنی‌های نسبت تنش در برابر زمان شکست، در شکل ۲ نشان داده شده است. در این شکل‌ها علاوه بر منحنی‌های تجربی، دو منحنی دیگر حاصل از برازش داده‌های تجربی به روش رگرسیون حداقل مربعات با مدل‌های Wood و EDRM نیز مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است که تنها داده‌های حاصل از شکست در تحلیل رگرسیون مورد استفاده قرار گرفته‌اند. به علاوه، منحنی مدیسون که برای تعیین ضرایب اثر زمان چوب ماسیو در مقرارت طراحی ملی

بیشتر از مقدار حاصل از آزمون استاتیکی برآورد می‌کند. منحنی‌های Madison و Gerhard نشان می‌دهند که شکست چوب ماسیو در یک سطح تنش مشخص، در زمان بیشتری نسبت به چوب پلاستیک رخ می‌دهد. مطابق منحنی Madison در سطح تنش ۵۵٪، زمان شکست چوب ماسیو برابر با تقریباً ۴۴۶ سال می‌باشد.

زمان شکست را برای نسبت تنش یک، در حدود ۶ ثانیه و منحنی برازش شده Wood، این زمان را در حدود ۱۲ دقیقه برآورد می‌کند. البته متوسط زمان شکست برای مقاومت خمشی استاتیکی ماده مرکب مورد مطالعه، در حدود ۱/۲۵ دقیقه بوده است که نشان می‌دهد مدل EDRM در سطح تنش بسیار بالا زمان شکست را کمتر از زمان شکست استاندارد بار استاتیکی و مدل Wood، و زمان شکست را



شکل ۲- منحنی زمان تا شکست به صورت تابعی از نسبت تنش (خط چین عمودی، زمان ۹۰ روز را نشان می‌دهد)



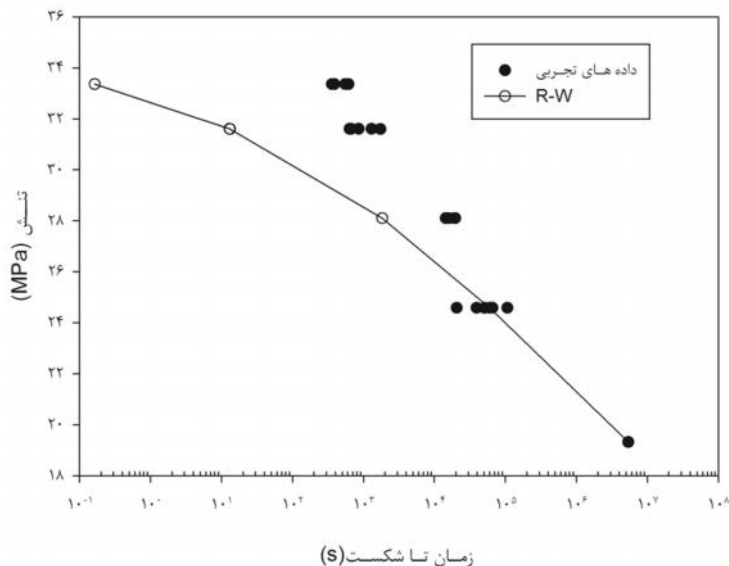
شکل ۳- منحنی‌های عکس مدول خزش در سطوح تنش مختلف به صورت تابعی از لگاریتم زمان

مرکب پلیمری و نیز چوب موفق بوده‌اند. در شکل ۴ منحنی حاصل از برازش مدل Reiner-weissenberg (R-W) روی داده‌های تجربی نشان داده شده است. مقادیر ثابت مدل‌ها به همراه ضرایب تبیین و RMSE و SSE مربوطه در جدول ۳ آورده شده است. برای برازش این مدل بر روی داده‌های تجربی، ابتدا مقادیر D_0 و D_1 که به ترتیب ثابت‌های مربوط به عکس مدول مستقل از زمان (عکس مدول آنی) و عکس مدول وابسته به زمان هستند، از داده‌های تجربی (شکل ۴) به دست آمدند ($D_0=0/4$ و $D_1=0/12$).

با توجه به جدول ۳ و شکل ۲، می‌توان نتیجه گرفت هر دو مدل EDRM و مدل هایپربولیک Wood، برازش بسیار مناسبی را بر داده‌های تجربی حاصل از ماده مرکب مورد مطالعه نشان دادند ($R^2=0.9998$). بر اساس این ضریب تقریباً همه تغییرات در مقادیر وابسته توسط مقادیر مستقل تبیین می‌گردد. به منظور مقایسه کارایی مدل‌های برازش شده، از معیار ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شد (رابطه ۴).

در شکل ۳ ملاحظه می‌شود که در سطح تنش ۹۵٪ میزان افزایش عکس مدول (افزایش تخریب) با زمان تقریباً خطی و ثابت است و حتی در زمان اعمال بار نیز تخریب وجود دارد. البته این تخریب با روند ثابت افزایش می‌یابد تا در نهایت به شکست منتهی شود. برای سطوح تنش پایین‌تر حتی تا سطح تنش ۷۰ درصد نیز، روند ثابت افزایش خطی عکس مدول با زمان قابل مشاهده است. در سطح تنش ۵۵ درصد، مقدار عکس مدول اولیه، پایین‌تر از بقیه سطوح تنش بوده ($0/12 \text{ GPa}^{-1}$) و با روندی کند (به صورت نمایی) عکس مدول افزایش می‌یابد تا نزدیک مرحله شکست که میزان افزایش عکس مدول (میزان تخریب) افزایش می‌یابد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش سطح تنش، میزان تخریب افزایش می‌یابد ولی بیشترین مقدار تخریب مربوط به سطح تنش ۵۵ درصد است.

علاوه بر مدل‌های تخریب تجمعی، مدل‌های شکست بر پایه انرژی هم در پیش‌بینی زمان شکست پلیمرها و مواد



شکل ۴- مقایسه بین منحنی گسیختگی خزش حاصل از داده‌های تجربی و

منحنی Reiner-Weissenberg

در جدول ۳ مقادیر ثابت‌های مدل‌های برازش شده و ضرایب رگرسیون مربوطه آورده شده است.

جدول ۳- مقادیر ضریب تبیین، RMSE SSE و ثابت‌های مدل برازش شده روی داده‌های تجربی

ثابت‌های مدل			RMSE	SSE	R ²	مدل
t ₀	b	a				
-----	۳۰/۲۶	۳۲/۱۴	۱۶۷۷۰	۵/۰۶۴×۱۰۹	۰/۹۹۹۸	EDRM
۰/۴۱۵	۶/۰۸۷	۰/۰۳۵۸۷	۱۵۸۰۰	۴/۴۹۴×۱۰۹	۰/۹۹۹۸	Wood
-----	-----	-----	۱۶۶۰۰	۵/۲۳۵×۱۰۹	۰/۹۹۹۸	R-W

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(O_i - E_i)^2}{n}} \quad (4)$$

SPSS انجام شد. نتایج آزمون مقایسه زوجی (جدول ۴) نشان داد که بین داده‌های برآوردی حاصل از هر سه مدل و داده‌های واقعی همبستگی بالایی وجود داشته (R=1) و اختلاف معنی‌داری بین این مقادیر مشاهده نشد و به عبارتی دیگر داده‌های برآوردی و تجربی تطابق خوبی باهم دارند. همچنین مقدار معیار تصمیمی (P value) بالاتر بین داده‌های برآوردی حاصل از مدل Wood و داده‌های مشاهده‌ای و بعد مدل R-W، می‌تواند دلیلی دیگر برای برتری این دو مدل نسبت به مدل EDRM باشد.

که در آن O_i ، E_i و n به ترتیب داده‌های تجربی، برآوردی و تعداد داده‌ها می‌باشند. مقادیر RMSE نیز در جدول ۳ آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود مدل Wood از RMSE کمتر است، از این رو می‌توان گفت از اعتبار بالاتری نسبت به مدل EDRM و مدل R-W برخوردار است.

در مرحله بعد، به منظور بررسی معنی‌داری اختلاف بین داده‌های برآوردی حاصل از سه مدل و نیز داده‌های تجربی، آزمون مقایسه زوجی در سطح ۵٪ در محیط نرم‌افزاری

جدول ۴- مقایسه زوجی بین مقادیر برآوردی زمان-شکست حاصل از مدل‌های

Wood و EDRM و مقادیر تجربی (واقعی)

P value	d _f	t	سطح اعتماد ۹۵ درصد		مقایسه زوجی
			حد بالا	حد پایین	
۰/۸۷	۱۹	-۰/۱۶۹	۶۶۳۴/۷۶	-۷۸۰۴	مدل Wood و تجربی
۰/۳۸	۱۹	۰/۹۰	۴۲۷۶/۰۵	-۱۰۷۲۱	مدل EDRM و تجربی
۰/۶۲	۱۹	-۰/۵۰۴	۵۹۵۶/۹۷	-۹۷۴۰/۶۷	مدل R-W و تجربی

بحث

اول و دوم خزش، شروع مرحله سوم دیده شد که نشان می‌دهد نمونه‌ها وارد مرحله سوم خزش شده‌اند و احتمال شکست پس از پایان ۹۰ روز برای چهار نمونه دیگر نیز وجود دارد. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش سطح تنش مرحله دوم خزش کوتاه‌تر می‌شود و در سطوح تنش بالا، مرحله سوم خزش غالب است و تنها میزان تغییر شکل

مطالعه رفتار وابسته به زمان چندسازه الیاف باگاس- پلی پروپیلن نشان داد که در سطوح تنش ۹۵، ۸۰، ۹۰ و ۷۰ درصد همه نمونه‌ها قبل از ۹۰ روز دچار شکست شدند. در سطح تنش ۵۵ درصد یک نمونه پس از تقریباً ۶۲ روز دچار شکست شد. در چهار نمونه دیگر نیز علاوه بر مرحله

روند ثابت افزایش می یابد تا در نهایت به شکست منتهی شود. برای سطوح تنش پایین تر حتی تا سطح تنش ۷۰ درصد نیز، روند ثابت افزایش خطی عکس مدول با زمان قابل مشاهده است. در سطح تنش ۵۵ درصد، مقدار عکس مدول اولیه، پایین تر از بقیه سطوح تنش بوده (0.12 GPa^{-1}) و با روندی کند (به صورت نمایی) عکس مدول افزایش می یابد تا نزدیک مرحله شکست که میزان افزایش عکس مدول (میزان تخریب) افزایش می یابد. همان طور که مشاهده می شود با افزایش سطح تنش، میزان تخریب افزایش می یابد ولی بیشترین مقدار تخریب مربوط به سطح تنش ۵۵ درصد است. از طرف دیگر در آزمون های استاتیکی، اعمال بار به صورت فزاینده بوده و تخریب به صورت نمایی با تنش افزایش می یابد، به طوری که از صفر شروع شده و تا قبل از شکست مقدار کمی دارد، اما نزدیک شکست میزان تخریب افزایش می یابد. بنابراین می توان انتظار داشت که در آزمون های گسیختگی خزش، در سطوح تنش بالا، شکست در زمان کمتری نسبت به آزمون های استاتیکی استاندارد رخ دهد؛ مگر اینکه آزمون های استاتیکی در سرعت بارگذاری بسیار بالا انجام شود. بنابراین می توان نتیجه گرفت که مدل EDRM هر چند برای پیش بینی زمان شکست آزمون های استاتیکی مناسب نیست ولی برای پیش بینی زمان شکست آزمون گسیختگی خزش مناسب می باشد.

نتایج نشان داد که هر سه مدل EDRM، مدل هایپربولیک Wood و مدل R-W برآزش بسیار مناسبی را بر داده های تجربی حاصل از ماده مرکب مورد مطالعه نشان دادند. مقادیر RMSE نشان داد که مدل های Wood و R-W در پیش بینی زمان شکست ماده مرکب مورد مطالعه، بر مدل EDRM برتری داشته است.

تنها مطالعه موجود در زمینه کاربرد این دو مدل تخریب جمعی برای چندسازه چوب پلاستیک، تحقیق انجام شده توسط Brandt و Friedley (۲۰۰۳) بود. آنان در مطالعات خود بر روی ترکیبات مختلف مواد مرکب چوب پلاستیک گزارش کردند که مدل EDRM بهتر از مدل Wood زمان شکست این مواد را پیش بینی می کند. هر چند آنان تنها

فزاینده مشاهده می شود. البته تنها در منحنی مربوط به سطح تنش ۵۵ درصد که در آن شکست رخ نداده است، میزان کرنش با زمان ثابت است.

برای پیش بینی رفتار وابسته به زمان ماده مرکب مورد مطالعه، دو مدل تخریب جمعی Wood و EDRM روی داده های زمان تا شکست به صورت تابعی از نسبت تنش، برآزش داده شد. نتایج نشان داد که مدل EDRM در سطح تنش بسیار بالا، زمان شکست را کمتر از مقدار استاتیکی و مدل Wood، زمان شکست را بیشتر از مقدار حاصل از آزمون استاتیک برآورد می کند. همچنین نتایج نشان داد که مدل R-W نیز برای پیش بینی زمان شکست در سطوح تنش بالا و دوره زمانی کوتاه مناسب نبوده و زمان شکست را برای سطوح تنش بالا کمتر از مقدار تجربی برآورد کردند.

البته باید این نکته را مورد توجه قرار داد که در آزمون های استاتیکی بار به صورت تدریجی اعمال می شود، در حالی که در آزمون های گسیختگی خزش، بار ثابت در یک لحظه اعمال می شود. Friedly (۱۹۹۲) نیز در تحقیق خود با این مشکل مواجه شده و دریافته است که مدل تخریب جمعی EDRM به خوبی قادر به پیش بینی زمان شکست برای سطوح تنش بالا نیست. البته وی بیان کرد که این مشکل زیاد جدی نبوده و روش های دیگری نیز برای ارزیابی رفتار کوتاه مدت وجود دارد و این مدل ها اساساً برای ارزیابی رفتار کوتاه مدت به کار نمی روند.

Rosowski و Friedly (۱۹۹۵) به بحث در مورد این پدیده پرداخته اند و بیان کرده اند که در آزمون های دوام بار، که بار ثابت به صورت آنی اعمال می شود، میزان تخریب جمعی ثابت بوده و تخریب بلافاصله پس از اعمال بار شروع می شود. در آزمون های دوام بار، به ویژه اگر سطح تنش بالا باشد، مقدار تخریب تجمع یافته در یک بازه زمانی کوتاه، در مقایسه با تخریب لازم برای شکست، به نسبت زیاد است. در شکل ۳ این ادعا به خوبی تأیید می شود؛ بنابراین ملاحظه می شود که در سطح تنش ۹۵٪ میزان افزایش عکس مدول (افزایش تخریب) با زمان تقریباً خطی و ثابت است و حتی در زمان اعمال بار نیز تخریب وجود دارد. این تخریب با

- Evaluate Extruded Materials. Washington State University. Pullman, Washington.
- Alvarez-Valencia, D., Dagher H. j., Davids, W.G. and Lopez-Anido, R. A., 2010. Structural performance of wood plastic composite sheet piling, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(12): 1235-1243.
- ASTM D618-00, Standard Practice for Conditioning Plastics for Testing, American society for testing materials.
- ASTM D6815, Standard Specification for Evaluation of Duration of Load and Creep Effects of Wood and Wood-Based Products.
- Brandt, C.W. and Fridley, K.J., 2003. Load-Duration Behavior of Wood-Plastic Composites. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15(6):524-536.
- Cai, Zh. and Ross R.J., 2011. Mechanical properties of wood-based composite materials. In: *Wood handbook*, Forest Products Laboratory, pp.12.1-12.12.
- Chang, F.C., Lam, F. and Kadla, J.F., 2013. Application of time-temperature-stress superposition on creep of wood-plastic composites, *Mechanics of time dependent materials*, 17: 427-435.
- Clemons, C., 2002. Wood-plastic composites in the United States; The interfacing of two industries. *Forest Product Journal*, 52 (6): 10-18.
- Dolan, J.D., DuChateau, K.A., O'Dell, J., Wolcott, M.P. and Johnson, S., 2010. Effect of form change in sill plates on shear wall performance, 11th World Conference on Timber Engineering, WCTE 2010. □2: 1160-1168.
- Dastoorian, F., Tajvidi, M. and Ebrahimi, G., 2010. Evaluation of time dependent behavior of a wood flour/high density polyethylene composites, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 29 (1):132-143.
- Fridley, K. J., 1992. Creep rupture behavior of wood. Department of Forestry and Natural Resources Agricultural Experiment Station, Bulletin No. 637. Purdue University.
- Gerhards, C.C. and Link, C.L., 1987. A cumulative damage model to predict load duration characteristics of lumber. *Wood and Fiber Science*. 19(2): 147-164
- Hamel, S.E., Bechle, N.J., Hermanson J.C. and Cramer, S. M., 2010. Characterizing macroscopic creep behavior of wood plastic composites in tension and compression, in 10th international conference on wood & biofiber plastic composites and cellulose nanocomposites symposium: May 2009, Madison, WI: Forest Product society, 289P.

ضریب تبیین را در مطالعه خود مورد توجه قرار دادند و دو مدل دیگر را به لحاظ آماری مورد مقایسه قرار ندادند. در مورد کاربرد مدل R-W برای پیش‌بینی زمان شکست نیز گزارشی یافت نشد.

یک مشکل مدل Wood این است که در آن فرض می‌شود تنش آستانه‌ای وجود دارد که زیر آن هیچ شکستی رخ نمی‌دهد. اما با توجه به اینکه در این تحقیق آزمون‌های گسیختگی خزش در سطح تنش بالا انجام شده است، تعیین تنش آستانه به صورت تجربی امکان‌پذیر نبود. هرچند با روش حداقل مجموع مربعات خطا (جدول ۳) مقدار تنش آستانه در حدود ۴۱ درصد تنش نهایی برآورد شد. Pooler (۲۰۰۴) دریافت که برای چندسازه آرد چوب-پلی اتیلن سنگین، مقدار این تنش تقریباً ۴۳٪ است. Rangaraj و همکاران (۱۹۹۹) مقدار تنش آستانه را ۴۵ درصد تنش نهایی گزارش کرده‌اند. Wood (۱۹۵۱) مقدار تنش آستانه را برای نمونه‌های کوچک دوگلاس ۱۸/۳ درصد گزارش کرد. از شکل‌های ۲ و ۴ مشاهده می‌شود که مدل R-W نسبت به مدل‌های تخریب تجمعی محافظه‌کارانه‌تر عمل می‌کند. البته باید این نکته را مورد توجه قرار داد که معیار شکست در مدل‌های بر پایه انرژی، با معیار شکست در مدل‌های تخریب تجمعی متفاوت است. در مدل‌های تخریب تجمعی، شکست به صورت فروریزش کلی یک عضو و از دست دادن کل قابلیت تحمل بار تعریف می‌شود، درحالی‌که در مدل‌های بر پایه انرژی، شکست به صورت افزایش انرژی کرنش از یک حد بحرانی تعریف می‌شود که با شروع شکست نهایی عضو مرتبط است؛ بنابراین مدل‌های انرژی، شکست قریب‌الوقوع را پیش‌بینی می‌کنند، درحالی‌که مدل‌های تخریب تجمعی، شکست کل را پیش‌بینی می‌کنند.

منابع مورد استفاده

- Adcock, T., Wolcott, M.P. and Hermanson, J.C., 2001. The influence of wood plastic composite formulation: Studies on mechanical and physical properties. Project End Report: Engineered Wood Composites for Navy Waterfronts. Task 1D-1

- including temperature effects. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 17:427-439.
- Rangaraj, Sudarshan V., and Smith Lloyd, V., 1999. The Nonlinear viscoelastic response of a wood-thermoplastic composite, *Mechanics of Time Dependent Materials*, 3:125-139.
- Reiner, M. and Weissenberg, K.A., 1939. Thermodynamic theory of the strength of the materials, *Rheological leaflet* 10(1):12-20.
- Rosowsky, D.V. and Fridley, K.J., 1995. Directions for duration-of-load research. *Forest Products Journal*, 45(3), 85-88.
- Sain, M.M., Balatinecz, J. and Law, S., 2000. Creep fatigue in engineered wood fiber and plastic compositions. *Journal of Applied Polymer Science*, 77(2): 260-268.
- Wood, L.W., 1951. Relation of strength of wood to duration-of-load. Report No. 1916, U.S.D.A Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, WI.
- Xu, B., Simonsen, J. and Rochefort, W.E., 2001. Creep resistance of wood-filled polystyrene/high-density polyethylene blends. *Journal of Applied Polymer Science*, 79(3):418-425.
- Kazemi Najafi, S., Nikray, S.J. and Ebrahimi, GH., 2012. A comparison study on creep behavior of wood-plastic composite, solid wood, and polypropylene, *Journal of Composite Materials*, 46(7): 801-808.
- Kazemi Najafi, S., Sharifnia, H. and Tajvidi, M., 2008. Effects of water absorption on creep behavior of wood-plastic composites. *Journal of Composite Materials*, 42(10): 993-1002.
- Najafi, A. and Najafi, S.K., 2009. Effect of load levels and plastic type on creep behavior of wood sawdust/HDPE composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 28(21): 2645-2653.
- Odell, J., 2008. Wood plastic composite sill plate for continuous anchorage of shear walls in light frame wood structures. MSc thesis, Washington State University.
- Pendleton, D., Hofford, T.A., Adcock, T., Woodward, B. and Wolcott, M.P., 2002. Durability of an Extruded HDPE/Wood Composite. *Forest Products Journal*, 52(6), 21-27.
- Pooler, D.J. and Smith L.V., 2004. Non-linear Viscoelstic response of a wood plastic composite,

Creep ruptures behavior of a bagasse fiber-polypropylene composite

F. Dastoorian^{1*}, M. Layeghi², Gh. Ebrahimi³, M. Tajvidi⁴
and S.M. Zabihzadeh⁵

1*-Assistant professor, Department of Wood and Paper Science and Technology, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran, Email: fdastoorian@alumni.ut.ac.ir

2- Assistant professor, Department of Wood and Paper Science and Technology, University of Tehran, Iran

3- Professor, Department of Wood and Paper Science and Technology, University of Tehran, Iran

4- Assistant professor, Department of Wood and Paper Science and Technology, University of Maine, USA

5 -Associate professor, Department of Wood and Paper Science and Technology, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

Received: May, 2016

Accepted: Sep., 2016

Abstract

In the present study, creep rupture behavior of a bagasse fiber- polypropylene composite was investigated. Two accumulated damage model (EDRM and Wood) and an energy based failure model (R-W) were adopted to describe the load duration influence on the studied composite. Results have shown that at very high stress levels, the EDRM and Wood models underestimated and overestimated the time to failure than static value respectively. This was attributed to the difference between application of static loading and creep loading. Findings indicated that the all three models were able to describe the creep rupture behavior of the studied composite and among this; the Wood model has shown a better fitting with experimental data, statistically. Based on findings in the present research, it can be concluded that the R-W model was more conservative in predicting time to failure in comparison with the two other models, and the reason can be attributed to the difference between failure criteria in energy based models and accumulated damage models. Results also showed that with increasing stress levels, the secondary stage of creep will shorten and at high stress level, the tertiary stage of creep will be more dominant

Key words: Composites, creep rupture, three stages of creep, accumulated damage models, energy based failure models.