

تعیین مدول الاستیسیته ماده مرکب الیاف طبیعی-ترموپلاستیک به روش بارگذاری-حذف بار

چکیده

به منظور استفاده از نرم افزارهای طراحی برای استفاده از مواد مرکب الیاف طبیعی-ترموپلاستیکها در مصارف ساختمانی، تعیین دقیق پارامترهای الاستیک این مواد از اهمیت بالایی برخوردار است. با توجه به ماهیت ویسکوالاستیک این مواد مرکب و غیرخطی بودن منحنیهای تنش-کرنش حتی در سطوح بار کم، تعیین پارامترهای الاستیک این مواد با آزمونهای رایج استاتیک امری دشوار است. در تحقیق حاضر از روش آزمون بارگذاری-حذف بار برای تعیین مدول الاستیسیته ماده مرکب الیاف طبیعی-پلی پروپیلن ساخته شده به روش اکستروژن استفاده گردید و نتایج با مدول تانژانت حاصل از آزمون فشاری استاتیک مورد مقایسه قرار گرفت. همچنین مدول دینامیک نیز از آزمون فراصوت به دست آمد و یک رابطه رگرسیونی بین مدول دینامیک و مدول استاتیک پیشنهاد گردید. نتایج نشان داد که این ماده مرکب از ماهیت ارتوتروپیک برخوردار است و مدول دینامیک حاصل از آزمون فراصوت از مقدار بیشتری در مقایسه با دو مدول دیگر برخوردار است. همچنین با افزایش مدول حاصل از آزمون حذف بار، درصد اختلاف بین مدول حذف بار و مدول دینامیک (از ۷۰ درصد به ۵۳ درصد) کاهش یافت. نتایج همچنین نشان داد که استفاده از روش رایج تعیین مدول (مدول تانژانت در ۱۰ تا ۴۰ درصد تنش نهایی) برای این ماده، سبب می شود مقدار مدول بسیار کمتر از مقدار واقعی (۷۴-۴۸ درصد) برآورد گردد.

واژگان کلیدی: مدول الاستیسیته، آزمون فراصوت، آزمون بارگذاری-حذف بار، مدول تانژانت.

فروغ دستوریان*

* استادیار دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

مسئول مکاتبات:

f.dastoorian@sanru.ac.ir
fdastoorian@alumni.ut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۱/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۲/۳۰

مقدمه

به مدت چندین دهه، مواد مرکب الیاف طبیعی-پلاستیک به دلیل مدول کم و تمایل بالای آنها به خزش، عمدتاً در مصارف غیر ساختمانی مورد استفاده قرار می گرفتند. در سالهای اخیر با توسعه و پیشرفت فناوریهای مربوطه، امکان افزودن مقادیر بیشتری الیاف لیگنوسولولزی به این مواد مرکب فراهم شده و محصولات با مدول الاستیسیته بالاتر تولید شده است که کاربرد این مواد را به مصارف نیمه ساختمانی مانند لمبه، پروفیل در و

پنجره، نرده و پوششهای سقف سوق داده است [۱]. در دهه اخیر پتانسیل استفاده از این مواد مرکب به عنوان صفحات باربر پی، زیرساختهای چوب عرشه و اجزای مورد استفاده در ساحل دریا، در چارچوب مطالعات امکان سنجی مورد بررسی قرار گرفته است [۲،۳]. محدودیتهای اعمال شده از سوی مجامع زیست محیطی مبنی بر عدم استفاده از الوار حفاظت شده با مواد حفاظتی

¹ Sill plates

شده در جسم ذخیره شده و قابل بازیابی است. برای بازیابی انرژی ذخیره شده، باید به جسم فرصت داده شود تا با برگشت دادن تغییر شکل ایجاد شده، انرژی پتانسیل خود را آزاد کند [۹]. این امکان به طور تجربی از طریق آزمون حذف بار فراهم می‌شود؛ بنابراین تعیین مدول از شیب منحنی حذف بار دقیق تر خواهد بود.

از سوی دیگر، به دلیل مشکلات موجود در تعیین پارامترهای الاستیک به روش آزمون‌های مخرب و به دلیل تنوع ترکیب بندی این محصولات و نیز شکل هندسی ذرات پرکننده و تقویت کننده، درصد وزنی اجزای تشکیل دهنده، نوع و میزان افزودنی‌ها و فرآیند تولید [۱۰] پارامترهای الاستیک به سادگی در اختیار طراحان سازه‌های مهندسی قرار نمی‌گیرد. همچنین مواد مرکبی که به روش اکستروژن ساخته می‌شوند از ماهیت ارتوتروپیک برخوردارند. در حین فرآیند اکستروژن الیاف تمایل به جهت گیری در راستای اکستروژن دارند [۱۱]. تعیین ضرایب الاستیک در جهات ارتوتروپیک نیز بر دشواری کار می‌افزاید؛ بنابراین ارائه یک روش قابل اعتماد، سریع و غیر مخرب برای اندازه گیری پارامترهای الاستیک این دسته از فرآورده‌های مرکب از اهمیت بالایی برخوردار است.

در بین آزمون‌های غیر مخرب، آزمون فراصوت برای اندازه گیری ویژگی‌های مواد مرکب متداول تر است [۱۲]. مطالعاتی که تاکنون در رابطه با استفاده از امواج فراصوت برای چوب و مواد مرکب چوبی انجام شده‌اند، بر این پیش فرض استوار هستند که قابلیت ذخیره و هدر رفت انرژی در چوب که با روش‌های غیر مخرب قابل اندازه گیری می‌باشند، توسط مکانیسم‌هایی مشابه مکانیسم‌هایی که رفتار استاتیک این مواد را سبب می‌شوند، کنترل می‌شوند. در سطح میکروسکوپی، قابلیت ذخیره انرژی متأثر از جهت گیری سلول‌ها و ترکیب بندی ساختاری است که در رفتار الاستیسیته استاتیک این مواد نیز نقش دارد. این خواص می‌توانند به صورت سرعت عبور صوت یا فرکانس ارتعاش نمایان شوند؛ بنابراین اندازه گیری نرخ تخریب ارتعاش و یا میرایی امواج صوتی برای ارزیابی قابلیت هدر رفت انرژی در چوب به کار می‌روند [۱۳].

Oliveira و همکاران (۲۰۰۲) استفاده از امواج فراصوت در کاج تدا را مورد مطالعه قرار دادند و با مدول

شیمیایی در ساختمان‌های چوبی، بر اهمیت استفاده از این مواد مرکب به عنوان جایگزین اعضای ساختمانی که در تماس دائم با پی و رطوبت است، می‌افزاید.

با توجه به افزایش روزافزون کاربرد ساختمانی این مواد مرکب و همچنین به منظور استفاده از نرم افزارهای طراحی تعیین دقیق پارامترهای الاستیک این مواد از اهمیت بالایی برخوردار است. با توجه به ماهیت ویسکوالاستیک این مواد مرکب و غیرخطی بودن منحنی‌های تنش-کرنش حتی در سطوح بار کم، تعیین پارامترهای الاستیک این مواد با آزمون‌های رایج استاتیک امری دشوار است [۴]. به طور معمول مدول الاستیک از شیب خطی ترین بخش منحنی تنش-کرنش (مدول تانژانت) [۵] یا پرشیب ترین بخش منحنی تنش-کرنش [۶] و یا شیب ناحیه خطی اولیه منحنی تنش-کرنش (مدول سکانت) [۷] به دست می‌آید. مطابق توصیه استاندارد ASTM D 7031 برای تعیین مدول به منظور کاربرد در کدهای ساختمانی، باید از مدول تانژانت در محدوده ۱۰ تا ۴۰ درصد تنش نهایی منحنی تنش-کرنش و یا مدول سکانت تا ۱ درصد کرنش استفاده شود. اگر ماده‌ای دارای رفتار الاستیک ایده‌آل باشد، همه روش‌های تعیین مدول باید به یک پاسخ ختم شود؛ اما اغلب مواد طبیعی چنانچه تحت بار استاتیک قرار گیرند، علاوه بر رفتار الاستیک، از خود رفتار پلاستیک نیز نشان می‌دهند. بیشتر رفتار پلاستیک پیرامون صفحات اعمال بار رخ می‌دهد که به دلیل اصطکاک و عدم تماس کامل صفحه اعمال بار با سطح نمونه، در محل تماس، تمرکز تنش رخ داده و موجب رفتار پلاستیک می‌شود. این امر سبب می‌شود ماده مدول کمتری از خود نشان دهد [۸].

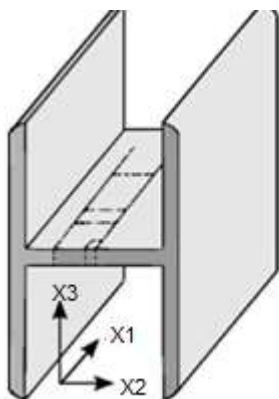
به منظور فائق آمدن بر مشکل تعیین دقیق مدول الاستیک این مواد مرکب که از ماهیت ویسکوالاستیک برخوردار هستند، می‌توان از شیب منحنی حذف بار استفاده کرد. از منظر انرژی، در مواد الاستیک کامل، تمام کار (انرژی) اعمال شده در حین اعمال بار، در ماده به صورت انرژی پتانسیل ذخیره می‌شود و در صورت حذف بار این انرژی به طور کامل قابل بازیابی است. در مواد ویسکوالاستیک بخشی از کار اعمال شده به صورت گرما به هدر می‌رود و قابل بازیابی نیست؛ اما بخشی از کار اعمال

داشتن دانش کافی در زمینه پارامترهای الاستیک این مواد با در نظر گرفتن ماهیت ارتوتروپیک آن، به منظور توسعه بخشیدن کاربردهای ساختمانی این مواد، امری ضروری است. هدف از پژوهش حاضر تعیین مقدار دقیق مدول الاستیسیته با استفاده از آزمون حذف بار و ارائه یک رابطه همبستگی بین مدول الاستیک و مدول دینامیک حاصل از آزمون فراصوت، به منظور دسترسی سریع طراحان ساختمانی به مدول الاستیک برای ترکیب‌بندی‌های مختلف مواد مرکب الیاف طبیعی-ترموپلاستیک در جهات ارتوتروپیک است.

مواد و روش‌ها

مواد

ماده مرکب الیاف طبیعی-پلی‌پروپیلن با دانسیته $1/1 \text{ g/cm}^3$ از شرکت دزچوپکس در جنوب ایران-دزفول تهیه گردید. این ماده شامل ۶۰ درصد وزنی الیاف باگاس (به ابعاد ۵۰ مش)، ۴۰ درصد وزنی پلی‌پروپیلن به‌عنوان ماده زمینه، ۴ درصد مالئیک انیدرید پلی‌پروپیلن به‌عنوان سازگار کننده و ۶ درصد افزودنی‌های دیگر (از قبیل مستریچ‌های رنگی، آنتی‌استیک، کربن بلک و دی‌اکسید تیتان) بوده است. مواد به‌صورت مذاب با یکدیگر مخلوط شده و با یک اکسترودر دو ماردرانه ناهمسوگرد مجهز به یک پروفیل I شکل اکستروژن شدند. نمونه‌های آزمون مطابق شکل ۱ از قسمت جان پروفیل I شکل برش داده شدند. جهات ارتوتروپیک نیز در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- تهیه نمونه‌های آزمون از پروفیل I شکل (با خط چین نشان داده شده است)؛ جهت X1 معرف جهت اکستروژن و جهات X2 و X3 معرف جهات عمود بر اکستروژن هستند.

خمشی استاتیک مورد مقایسه قرار دادند. آن‌ها دریافتند که می‌توان از روش فراصوت غیر مخرب برای ارزیابی خواص مکانیکی الوار چوبی استفاده کرد هرچند مدول دینامیک ۲۰ درصد بیشتر از مدول استاتیک بود [۱۴]. Nzokou و همکاران (۲۰۰۶) دریافتند که مدول حاصل از آزمون غیر مخرب برای ماده مرکب آرد چوب-پلی‌وینیل کلراید ۳/۵ تا ۱۷/۶ درصد بیشتر از مدول استاتیک بوده است [۱۵]. Lourenco و همکاران (۲۰۰۷) یک همبستگی خطی خوب بین مدول دینامیک حاصل از آزمون فراصوت و مدول سکانت استاتیک در چوب شاه‌بلوط پیدا کردند [۱۶]. Kazemi Najafi و همکاران (۲۰۰۸) از امواج فراصوت برای ارزیابی سفتی ماده مرکب هیبرید آرد چوب/الیاف شیشه-پلی‌پروپیلن استفاده کردند و تأثیر میزان آرد چوب، جفت‌کننده، الیاف شیشه و طول نمونه را بر سرعت موج مورد بررسی قرار دادند [۱۷]. Kale و Chauhan (۲۰۱۷) از دو روش غیر مخرب ارتعاش خمشی و فراصوت برای تعیین مدول دینامیک ماده مرکب چوب پلیمر استفاده کردند و دریافتند با افزودن آرد چوب میزان مدول افزایش می‌یابد. آن‌ها همچنین دریافتند مدول حاصل از آزمون فراصوت از مقدار بیشتری نسبت به مدول حاصل از ارتعاش خمشی برخوردار است [۱۸]. Salmi و همکاران (۲۰۱۷) یک رابطه خطی بین ضرایب سفتی حاصل از آزمون فراصوت و مدول خمشی استاتیک برای چوب نوئل نروژ پیدا کردند. آن‌ها دریافتند که ضریب سفتی $1/49$ برابر بیشتر از مدول استاتیک است [۱۹]. نتایج مشابهی نیز توسط Wang و همکاران (۲۰۰۵) گزارش گردید [۲۰].

آزمون بارگذاری و حذف بار

در ابتدا آزمون بارگذاری فشاری مطابق استاندارد ASTM D7031 انجام شد و مدول تانژانت در محدوده ۱۰ تا ۴۰ درصد تنش نهایی در منحنی تنش-کرنش محاسبه گردید. سپس آزمون فشاری بارگذاری-حذف بار در سه جهت اصلی نمونه‌های آزمونی با استفاده از ماشین آزمایش Walter & Bai مدل DLV-250/DZ-10-D انجام شد. برای هر جهت، ۵ تکرار در نظر گرفته شد. چهار دوره بارگذاری-حذف بار در سه جهت X1، X2 و X3، تا سطوح بار ۰/۸، ۱/۶، ۲/۴ و ۳/۲ اعمال گردید. نرخ نمونه‌برداری داده‌های بار-تغییر مکان ۵۰ Hz بوده است. مقدار مدول یانگ (E) در سه جهت ارتوتروپیک از شیب خطی‌ترین ناحیه از منحنی حذف بار محاسبه گردید. به این صورت که منحنی حذف بار به چند نمو تقسیم گردید. بر روی هر نمو یک تابع خطی برازش داده شد و با در نظر گرفتن بالاترین ضریب تبیین (R^2)، خطی‌ترین ناحیه شناسایی گردید و شیب آن ناحیه به‌عنوان مدول الاستیک در نظر گرفته شد.

آزمون فراصوت

برای انجام آزمون فراصوت از ترانسدیوسر پالس (5077PR, Olympus NDT) با فرکانس ۱۰۰ کیلوهرتز استفاده شد. ۵ نمونه به ابعاد $51 \times 12.7 \times 13 \text{ mm}^3$ تحت امواج فراصوت طولی در سه جهت نمونه قرار گرفتند. از یک ماده واسطه (عسل خوراکی) برای برقراری تماس بهتر بین ترانسدیوسرها و نمونه استفاده گردید و به‌منظور

جلوگیری از نفوذ ماده واسطه به نمونه، دوسر نمونه با سلوفان پوشانیده شدند. سرعت عبور موج V (برحسب متر بر ثانیه) در نمونه مطابق رابطه (۱) محاسبه گردید.

$$V = \frac{l_s}{t} \quad (1)$$

که l_s طول نمونه در راستای عبور موج (برحسب متر) و t مدت‌زمان عبور موج از نمونه (برحسب ثانیه) است. مدول دینامیک $E(d)$ (برحسب $\frac{kg}{m.s^2}$) که معادل پاسکال است) با استفاده از رابطه ۲ محاسبه گردید.

$$E(d) = \rho \times V^2 \quad (2)$$

که S معرف زمان عبور موج (برحسب ثانیه) و ρ معرف دانسیته ماده (برحسب کیلوگرم بر مترمکعب) است.

نتایج و بحث

مقادیر میانگین مدول تانژانت حاصل از آزمون فشاری استاتیک، حاصل از شیب منحنی تنش کرنش در محدوده ۱۰ تا ۴۰ درصد تنش نهایی، در سه جهت ماده مرکب مورد مطالعه، در جدول ۱ آورده شده است. همچنین مقادیر میانگین مقاومت فشاری و کرنش فشاری حداکثر نیز در جدول ۱ آورده شده است. مقادیر موجود در پرانتز، معرف انحراف معیار است.

جدول ۱- مقادیر میانگین مدول تانژانت، مقاومت فشاری و کرنش فشاری حداکثر

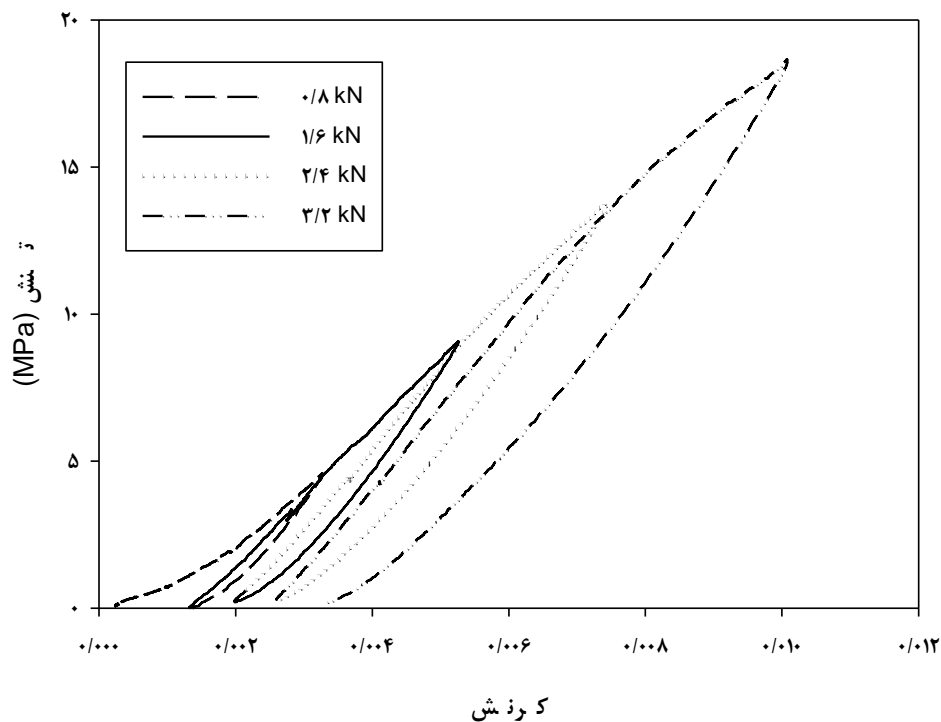
جهت	مقاومت فشاری (MPa)	کرنش فشاری حداکثر (%)	مدول تانژانت (GPa)
X1	۳۴/۷۰ (۱/۵۹)	۰/۳۴ (۰/۰۸)	۲/۳۱ (۰/۱۵)
X2	۴۱/۰۸ (۱/۰۳)	۰/۲۲ (۰/۰۶)	۱/۵۹ (۰/۰۷)
X3	۵۰/۰۲ (۱/۸۵)	۰/۰۷ (۰/۰۳)	۰/۶۷ (۰/۰۹)

ماده زمینه پلیمری نسبت داد. بیشترین و کمترین مقاومت فشاری و کرنش فشاری حداکثر، برعکس مدول تانژانت، به ترتیب مربوط به جهت X3 و X1 بوده است. در جهت X1 به دلیل اینکه الیاف عمدتاً در جهت اکستروژن

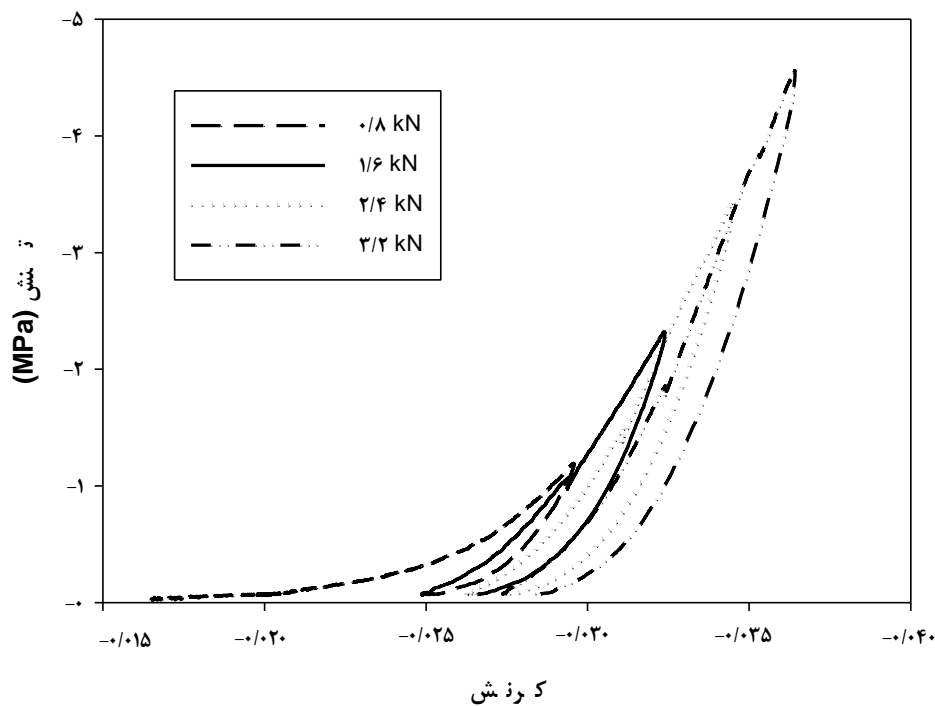
از جدول ۱ مشاهده می‌شود که بیشترین مدول تانژانت در جهت اکستروژن و کمترین مقدار مدول تانژانت مربوط به جهت X3 بوده است. بیشتر بودن مدول تانژانت در جهت X1 را می‌توان به قرارگیری بیشتر الیاف در این جهت و بالاتر بودن مدول الیاف لیگنوسلولزی در مقایسه با

نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تفاوت در مقادیر مقاومت در سه جهت اصلی نشان‌دهنده ماهیت ارتوتروپیک این ماده است.

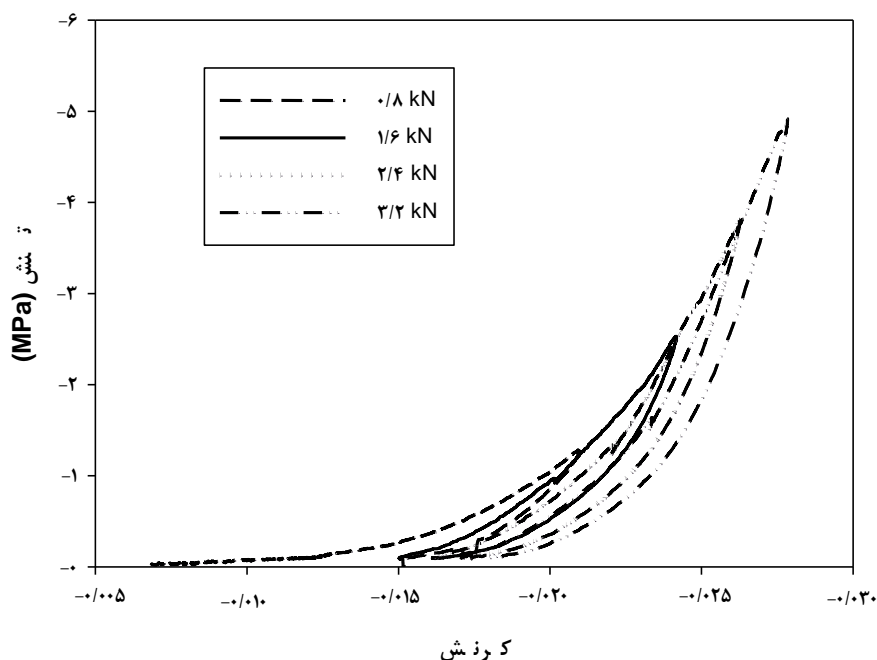
قرارگرفته‌اند، کمانش الیاف در اثر بار فشاری به کاهش مقاومت و متعاقباً افزایش کرنش انجامیده است. منحنی‌های تنش-کرنش حاصل از آزمون بارگذاری-حذف بار برای سه جهت ارتوتروپیک در شکل‌های ۲-۴



شکل ۲- منحنی بارگذاری-حذف بار در جهت X1



شکل ۳- منحنی بارگذاری-حذف بار در جهت X2

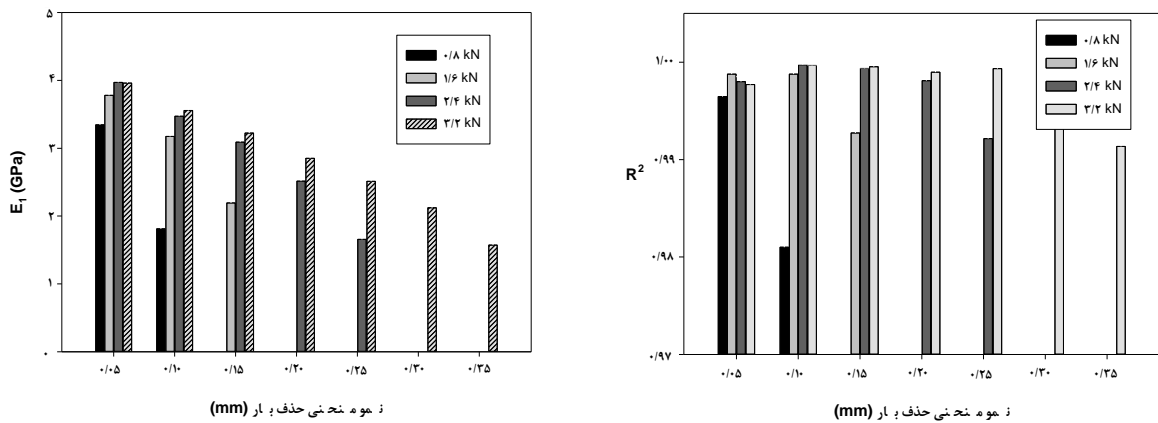


شکل ۴- منحنی بارگذاری-حذف بار در جهت X3

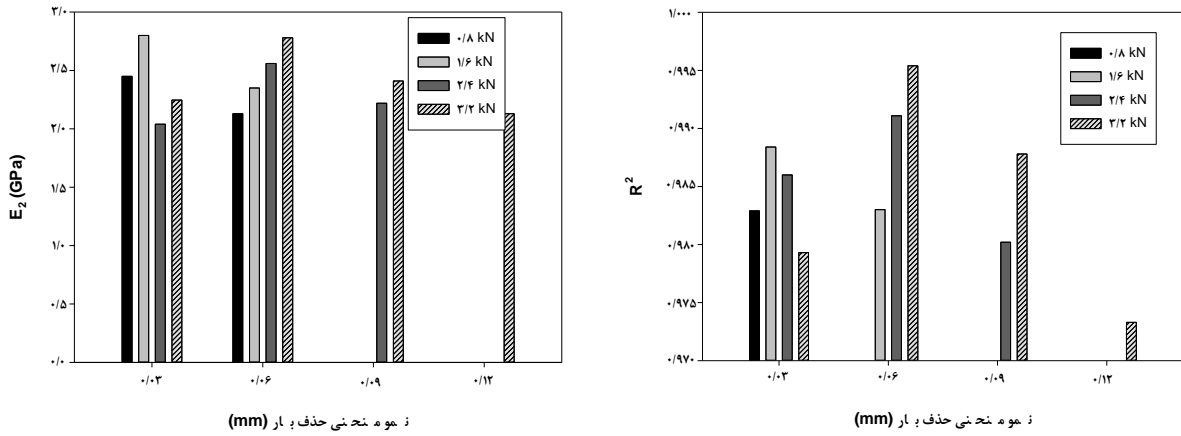
(R^2) مشخص می‌شود که برازش مناسب تابع خطی بر منحنی حذف بار را دلالت می‌کند.

بنابراین منحنی حذف بار در چهار سطح بار به نمودارهای مساوی تقسیم گردید و مدول الاستیسیته از شیب خطی‌ترین نمودار با در نظر گرفتن بالاترین ضریب رگرسیون (R^2) حاصل از برازش تابع خطی محاسبه گردید. شکل‌های ۵ تا ۷ مقادیر متوسط مدول الاستیسیته برای سه جهت ارتوتروپیک اصلی در نمودارهای مختلف به همراه ضرایب رگرسیون حاصل از برازش تابع خطی رو هر نمودار را نشان می‌دهد.

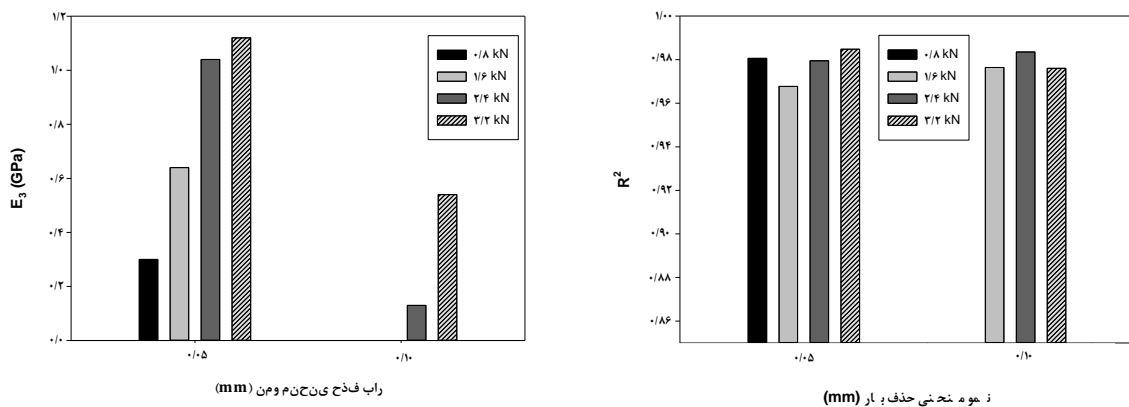
غیرخطی بودن منحنی‌های بارگذاری در سه جهت ارتوتروپیک (شکل‌های ۲-۴) نشان‌دهنده رفتار ویسکوالاستیک این ماده است. همچنین کرنش باقیمانده پس از هر مرحله حذف بار نیز نمایانگر رفتار پلاستیک این ماده است؛ بنابراین مطابق مطالعات پیشین، برای موادی که خاصیت ویسکوالاستیک و رفتار غیرخطی دارند، پارامترهای الاستیک این ماده را می‌توان با فرض رفتار الاستیک خطی پس از حذف بار تعیین نمود [۸]. انتهای منحنی حذف بار اندکی غیرخطی می‌شود که علت آن را می‌توان به کاهش سطح تماس جسم با صفحه بار نسبت داد. خطی بودن منحنی حذف بار توسط ضریب تبیین



شکل ۵- مقادیر مدول الاستیسته محاسبه شده برای هر نمو در سطوح حذف بار متفاوت در جهت X1 (چپ)؛ مقادیر ضرایب رگرسیون محاسبه شده برای هر نمو (راست)



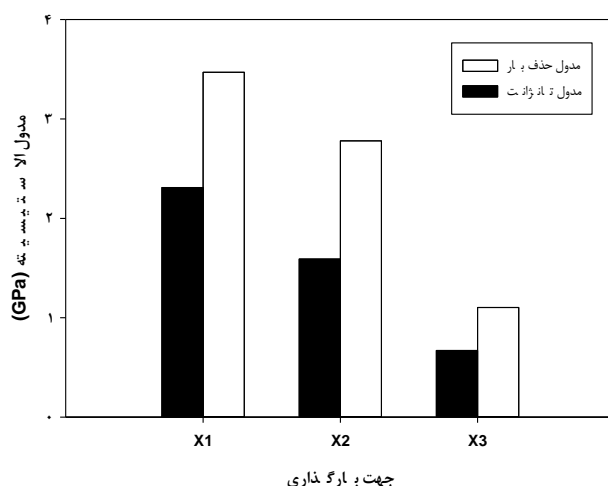
شکل ۶- مقادیر مدول الاستیسته محاسبه شده برای هر نمو در سطوح حذف بار متفاوت در جهت X2 (چپ)؛ مقادیر ضرایب رگرسیون محاسبه شده برای هر نمو (راست)



شکل ۷- مقادیر مدول الاستیسته محاسبه شده برای هر نمو در سطوح حذف بار متفاوت در جهت X3 (چپ)؛ مقادیر ضرایب رگرسیون محاسبه شده برای هر نمو (راست)

X3 بوده است که علت این امر را می‌توان به احتمال قرارگیری بیشتر الیاف در جهت X2 نسبت به جهت X3 که عمود بر صفحه اکستروژن است، نسبت داد. در شکل ۸ مقادیر مدول تانژانت حاصل از آزمون استاتیک و مدول حذف بار نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار مدول تانژانت از مدول حذف بار کمتر بوده است. تمرکز تنش در محل تماس صفحات اعمال بار و سطح نمونه سبب بروز رفتار پلاستیک و کمتر شدن مدول تانژانت می‌شود [۸]؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت استفاده از مدول تانژانت برای مواد مرکبی که از خاصیت ویسکوالاستیسته بالایی دارند، منجر به بروز خطا در محاسبات طراحی ساختمانی، می‌شود.

همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود بالاترین مقدار ضریب تبیین مربوط به دومین نمو در سطح بار kN ۲/۴ است که متناظر با مدول ۳/۴۷ GPa در جهت X1 است. در شکل ۶ مشاهده می‌شود که بالاترین ضریب تبیین مربوط به دومین نمو در سطح بار ۳/۲kN است و مدول متناظر آن، یعنی مدول در جهت X2، ۲/۷۸ GPa است. در شکل ۷ مشاهده می‌شود که بالاترین ضریب تبیین مربوط به اولین نمو در سطح بار ۳/۲kN است و مدول متناظر آن در جهت X3، ۱/۱۰ GPa است. همان‌طور که انتظار می‌رفت به دلیل قرارگیری عمده الیاف در جهت اکستروژن و با توجه به سفتی بالاتر الیاف باگاس نسبت به پلی‌پروپیلن، بیشترین مدول در جهت X1 بوده است. مدول الاستیسیته در جهت X2، بیشتر از جهت



شکل ۸- مقادیر مدول حذف بار و مدول تانژانت برای سه جهت ارتوتروپیک

تفاوت سرعت عبور امواج در سه جهت، دلیل دیگری بر ماهیت ارتوتروپیک ماده است.

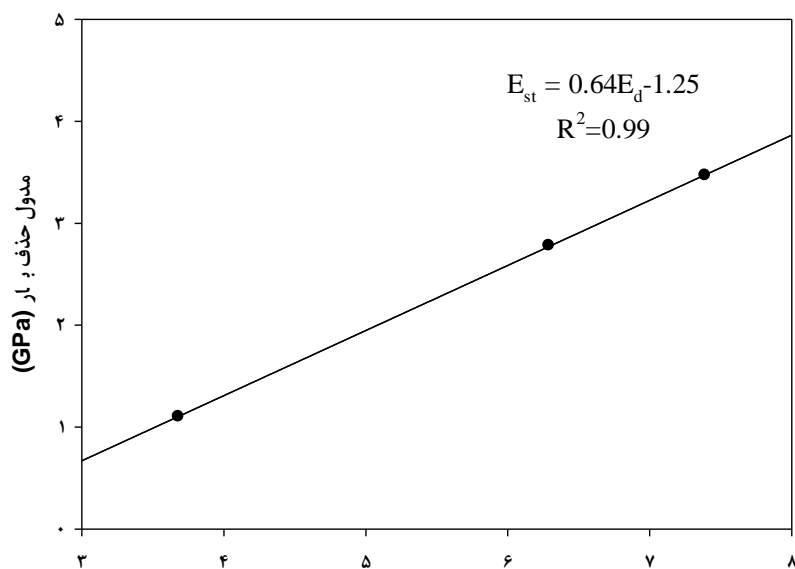
سرعت متوسط عبور امواج فراصوت و مدول دینامیک محاسبه شده در جهات مختلف، در جدول ۲ آورده شده است. مقادیر موجود در پرانتز معرف انحراف معیار است.

جدول ۲- مقادیر متوسط سرعت عبور امواج فراصوت در جهات مختلف

جهت	سرعت عبور امواج (Km/s)	مدول دینامیک (GPa)
X1	۲/۵۹ (±۰/۰۶)	۷/۳۹ (±۰/۳۷)
X2	۲/۳۹ (±۰/۱۴)	۶/۲۸ (±۰/۷۳)
X3	۱/۸۳ (±۰/۱۱)	۳/۶۸ (±۰/۲۶)

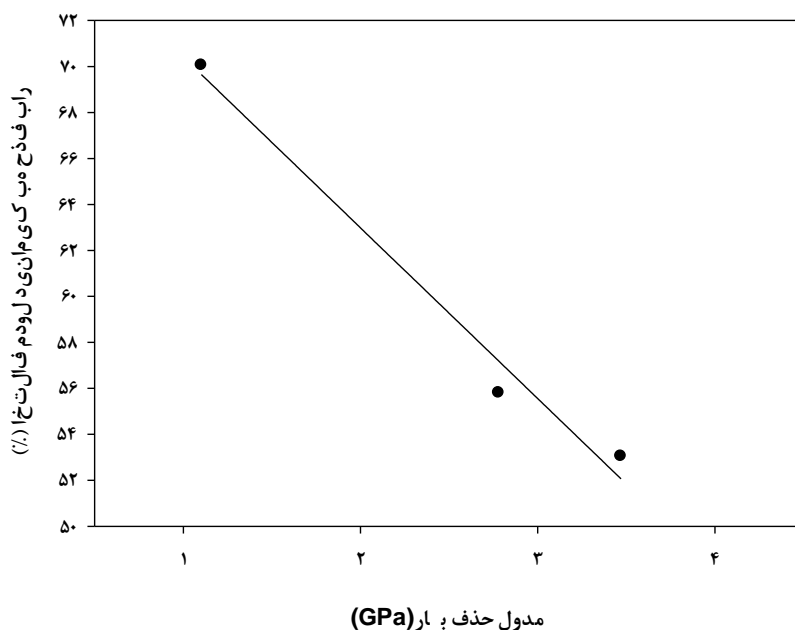
حذف بار، یک تابع خطی روی داده‌ها برازش داده شد و همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود می‌توان با یک رابطه خطی با ضریب تبیین بالا ($R^2=0.99$)، با پیدا کردن مقادیر مدول دینامیک (E_d)، مقدار مدول الاستیک (E_{st}) این مواد مرکب را تخمین زد.

در شکل ۹ مقادیر مدول حذف بار به صورت تابعی از مدول دینامیک حاصل از آزمون فراصوت نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقادیر مدول دینامیک حاصل از آزمون فراصوت از حذف بار بیشتر بوده است که مطابق با یافته‌های محققان پیشین است [۱۹، ۲۰]. برای پیدا کردن رابطه بین مدول دینامیک و مدول



مدول دینامیک (GPa)

شکل ۹- مقادیر مدول حذف بار به صورت تابعی از مدول دینامیک



مدول حذف بار (GPa)

شکل ۱۰- درصد اختلاف بین مدول دینامیک و مدول حذف بار به صورت تابعی از مدول حذف بار

ویسکوالاستیک این ماده و همچنین کرنش باقیمانده پس از هر مرحله حذف بار نیز نمایانگر رفتار پلاستیک این ماده بود؛ بنابراین شیب خطی ترین قسمت منحنی حذف بار به عنوان مدول در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که بیشترین مدول (GPa) $E(X1) = ۳/۴۷$ مربوط به جهت اکستروژن بوده است. مقادیر مدول دینامیک حاصل از آزمون فراصوت از مدول حذف بار بیشتر بوده است و با افزایش مدول حذف بار، درصد اختلاف بین مدول حذف بار و مدول دینامیک کاهش یافت. همچنین نتایج نشان داد تعیین مدول تانژانت به روش متداول و مطابق استاندارد ASTM D7031، سبب می شود مقدار مدول بسیار کمتر از مقدار واقعی (۴۸-۷۴ درصد) برآورد گردد.

سپاسگزاری

مقاله حاضر برگرفته از طرح تحقیقاتی به شماره ۰۴-۱۳۹۶-۰۸ مصوب دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری است. نویسنده بدین وسیله مراتب تقدیر و تشکر خود را از معاونت پژوهشی دانشگاه بابت تأمین مالی طرح اعلام می دارد.

در شکل ۱۰ درصد اختلاف بین مدول حذف بار و دینامیک به صورت تابعی از مدول حذف بار نشان داده شده است و مشاهده می شود که با افزایش مدول حذف بار، درصد اختلاف بین مدول حذف بار و مدول دینامیک کاهش می یابد. علت این امر را می توان به قرارگیری عمده الیاف در راستای اکستروژن ($X1$) و بیشتر بودن ماده لیگنو سلولزی و پس از آن در جهت $X2$ نسبت داد که سبب می شود رفتار الاستیک ماده بیشتر شده و متعاقباً اختلاف بین مدول استاتیک و دینامیک کاهش یابد. نتیجه مشابه توسط Chauhan (۲۰۰۹) گزارش شده است [۲۱].

نتیجه گیری

در تحقیق حاضر مدول الاستیک ماده مرکب الیاف باگاس-پلی پروپیلن توسط روش آزمون بارگذاری-حذف بار اندازه گیری شد و نتایج با مدول تانژانت مقایسه گردید. همچنین با استفاده از آزمون فراصوت، مدول دینامیک به دست آمد و یک رابطه رگرسیونی بین مدول استاتیک و مدول دینامیک پیشنهاد گردید. غیرخطی بودن منحنی بارگذاری در سه جهت ارتوتروپیک نشان دهنده رفتار

منابع

- [1] Cai, Z.h. and Ross, R.J., 2011. Mechanical properties of wood-based composite materials. In: Wood handbook, Forest Products Laboratory, pp.12.1-12.12.
- [2] 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.
- [3] du Chateau, K., Dolan, J. and Wolcott, M., 2006. Performance of bracing panel wall segments utilizing wood plastic composite sill plates, 9th World Conference on Timber Engineering (WCTE 2006). Portland, Oregon, USA, 2: 1178-1185.
- [4] Tucker, B., Bender, D. and Pollock, D., 1998. Predicting flexural strength of wood plastic composites using nondestructive evaluation. In: proceeding of the 11th international symposium on nondestructive testing of wood, Madison, WI. PP 33-41.
- [5] Vuola, J., Taurio, R., Goransson, H. and Asko-Seljavaara, S., 1998. Compressive strength of calcium carbonate and hydroxyapatite implants after bone-marrow-induced osteogenesis. Biomaterials, 19:223-227.

- [6] Chu, T.M.G., Orton, D.G., Hollister, S.J., Feinberg, S.E. and Halloran, J.W., 2002. Mechanical and in vivo performance of hydroxyapatite implants with controlled architectures. *Biomaterials*, 23:1283–1293.
- [7] Charles-Harris, M., del Valle, S., Hentges, E., Bleut, P., Lacroix, D. and Planell, J.A., 2007. Mechanical and structural characterization of completely degradable polylactic acid/calcium phosphate glass scaffolds. *Biomaterials*, 28:4429–4438.
- [8] Luczynski, K.W., Brynk, T., Ostrowska, B., Swieszkowski, W., Reihnsner, R. and Hellmich, C., 2013. Consistent quasistatic and acoustic elasticity determination of Poly-L-lactide-based rapid-prototyped tissue engineering scaffolds. *Journal of biomedical materials research*, 101(1): 138-144.
- [9] Bodig, J. and Jane, B. A., 1982. *Mechanics of wood and wood composites*, Van Nostrand Reinhold company, N. Y. 712P.
- [10] Stark, N.M. and Rowlands, R.E., 2003. Effects of wood fiber characteristics on mechanical properties of wood/polypropylene composites. *Wood and Fiber Science*, 35(2): 167-174.
- [11] Prapathanssiou, T.D. and Guell, D.C., 1997. *Flow Induced Alignment in Composite Materials*, Woodhead Publishing Ltd., England, 384p.
- [12] Kapadia, A., 1983. *Non-Destructive Testing of Composite Materials*, London: TWI Ltd.
- [13] Jayne, B.A., 1959. Vibrational properties of wood as indices of quality. *Forest Products Journal*, 9:413-416.
- [14] Oliveira, F.G.R., Pletz, E. and Sales, A., 2002. Nondestructive evaluation of wood using ultrasonic technique, *Maderas. Ciencia y tecnología*, 4(2): 133-139.
- [15] Nzokou, P., Freed, j. and Kamdem, D.P., 2006. Relationship between non-destructive and static modulus of elasticity of commercial wood plastic composites, *Holz als Roh- und Werkstoff*, 64:90-93.
- [16] Lourenco, P.B., Feio, A.O. and Machado, J.S., 2007. Chestnut wood in compression perpendicular to the grain: Non-destructive correlations for test results in new and old wood. *Construction and Building Materials*, 21: 1617-1627.
- [17] Kazemi Najafi, S., Ebrahimi, G.H. and Behjati, S., 2008. Nondestructive evaluation of wood plastic composites using ultrasonic technique, *mezinárodní konference DEFECTOSKOPIE*. Brno: University of Technology, 87-94.
- [18] Kale, A. and Chauhan, S., 2017. Non-destructive estimation of modulus of elasticity of wood polymer composite. *Journal of Indian Academy of Wood Science*, 14(1): 18-23.
- [19] Salmi, A., Karppinen, T., Montonen, R. and Saranpaa, P., 2017. Ultrasonic estimate of modulus of rupture and quantification of the frequency dependent dynamic modulus in Norway Spruce. *journal of applied physics*, 113, 024904.
- [20] Wang, S.Y., Lin, C.J., Chiu, C.M., Chen, J.H. and yang, T.H., 2005. Dynamic modulus of elasticity and bending properties of young Taiwania trees grown with different thinning and pruning treatments. *Journal of wood science*, 51(1):1-6.
- [21] Chauhan, S., Karmarkar, A. and Aggarwal, P., 2009. Damping behavior of wood filled polypropylene composites. *Journal of applied polymer science*, 114:2421-2426.

Determination of elastic modulus of a natural fiber- thermoplastic composite with loading-unloading test

Abstract

In order to use the design softwares for natural fibers-thermoplastic composites in structural applications, precise determination of elastic parameters is of importance. Regarding the viscoelastic properties of these materials and their nonlinear stress-strain curves, even at low loading levels, determination of precise elastic parameters by common static tests is not simple. In the present study, methods of loading-unloading test was used to determine the elastic modulus of a natural fiber-thermoplastic composite and the results were compared with the tangent modulus obtained from static compression test. Dynamic modulus was also obtained from ultrasonic test, and a regression relationship was proposed between dynamic modulus and the static one. Results showed that the composite had orthotropic nature and the dynamic modulus from ultrasonic test showed higher values compared with the two others. Also, with increasing modulus resulted from unloading test, the difference between dynamic and unloading modulus decreased linearly. Results also showed that using prevalent method of modulus determination for this material (*i.e.* tangent modulus at 10-40% of ultimate stress) leads to the elastic modulus estimated much lower than the real value.

Keywords: elastic modulus, ultrasonic test, loading-unloading test, tangent modulus.

F. Dastoorian*

* Assistant Prof., Sari agricultural sciences and natural resources university, Sari, Iran

Corresponding author:
f.dastoorian@sanru.ac.ir

Received: 2018/02/05
Accepted: 2018/05/20