

## اثر افزایش دما بر رفتار خمشی ماده مرکب الیاف باگاس- پلی پروپیلن با روش تحلیل لنگر-انحناء

## چکیده

برای توسعه کاربرد ساختمانی فرآورده‌های مرکب الیاف طبیعی- پلی پروپیلن، به دست آوردن دانش کافی در زمینه رفتار مکانیکی آن‌ها، امری ضروری است. یکی از روش‌های بیان ویژگی‌های خمشی یک عضو خمشی، استفاده از منحنی لنگر-انحناء است که به‌عنوان جایگزین رابطه تنش- کرنش در بسیاری از تحلیل‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است. در این پژوهش به مطالعه اثر دما بر موقعیت تار خنثی و توزیع تنش خمشی در سطح مقطع آزمونه‌های خمشی ماده مرکب الیاف طبیعی باگاس- پلی پروپیلن با استفاده از روش تحلیل لنگر-انحناء پرداخته شده است. آزمون‌های خمش، کشش و فشار استاتیک در محدوده دمایی از دمای اتاق تا دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. از یک برنامه Fortran برای تحلیل لنگر-انحناء در سطح مقطع آزمونه‌های خمشی استفاده گردید. به‌منظور بررسی صحت نتایج حاصل از برنامه، داده‌های بار خیز و لنگر حداکثر حاصل از برنامه با داده‌های بار خیز و لنگر حداکثر واقعی مورد مقایسه قرار گرفت و نتایج نشان داد که برنامه حاصل به‌خوبی قادر به توصیف رفتار خمشی ماده مرکب مورد مطالعه بوده است. نتایج نشان داد که توزیع غیریکنواخت تنش خمشی منجر به بالا رفتن تار خنثی به سمت سطح فشاری شده است. همچنین با افزایش دما تنش فشاری بیشتر از تنش کششی کاهش یافته و توزیع تنش یکنواخت‌تر شده است. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش لنگر تعادل بین کرنش فشاری و کششی از طریق جابه‌جایی تار خنثی به سمت فشاری حفظ شده است که افزایش دما این جابه‌جایی را کاهش داده است.

**واژگان کلیدی:** تحلیل لنگر-انحناء، ماده مرکب، افزایش دما، تار خنثی، توزیع تنش.

فروغ دستوریان<sup>۱\*</sup>

محمد لایقی<sup>۲</sup>

قنبر ابراهیمی<sup>۳</sup>

مهدي تجویدی<sup>۴</sup>

سید مجید ذبیح‌زاده<sup>۵</sup>

<sup>۱</sup> استادیار، گروه صنایع چوب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

<sup>۲</sup> استادیار، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

<sup>۳</sup> استاد، گروه علوم و صنایع چوب و کاغذ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

<sup>۴</sup> استادیار، دانشکده منابع جنگلی، دانشگاه مین، آمریکا

<sup>۵</sup> دانشیار، گروه صنایع چوب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران

مسئول مکاتبات:

f.dastoorian@sanru.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۸/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۱/۲۰

جای می‌ماند. این فرآورده جانبی شامل ۴۰-۶۰ درصد سلولز، ۲۰-۳۰ درصد همی سلولز و ۲۰ درصد لیگنین است. اخیراً این ماده علاوه بر مصرف سنتی تولید انرژی

## مقدمه

باگاس به گروهی از الیاف لیگنوسلولزی اطلاق می‌شود که پس از عصاره‌گیری از نیشکر در حین تولید شکر بر

برای تولید تخته فیبر با دانسیته متوسط، کاغذ و مواد مرکب پلیمری مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در حال حاضر مواد مرکب پلیمری تقویت‌شده با الیاف طبیعی به دلیل دانش ناکافی در زمینه رفتار مکانیکی و تمایل آن‌ها به خزش، بیشتر در مصارف نیمه‌سازه‌ای مانند پروفیل در و پنجره، چوب عرشه و پانل‌های داخلی اتومبیل به کار می‌روند [۱،۲]. در سال‌های اخیر تحقیقاتی در زمینه استفاده از این مواد مرکب در مصارف سازه‌ای مانند اجزای پی و زیرساخت‌های چوب عرشه به‌عنوان جایگزینی برای چوب‌آلات تیمار شده در ساختمان‌های چوبی انجام شده است [۳-۵].

محدودیت‌های زیست‌محیطی استفاده از چوب‌آلات تیمار شده در مناطق مسکونی نیز بر اهمیت گسترش کاربرد ساختمانی مواد مرکب چوب-پلاستیک افزوده است. علاوه بر این، چوب ماسیو دارای دو نقطه ضعف نسبتاً درخور توجه شامل مقاومت برشی موازی الیاف و مقاومت فشاری عمود بر الیاف پایین، است که در صورت استفاده از مواد مرکب پلیمری تقویت‌شده با الیاف طبیعی می‌توان علاوه بر فائق آمدن بر این دو نقطه ضعف چوب، به دلیل دوام طبیعی بالا در برابر رطوبت و عوامل بیولوژیکی، نیاز به حفاظت شیمیایی چوب‌آلات را مرتفع ساخت.

در مورد استفاده از الیاف طبیعی باگاس در مواد مرکب الیاف طبیعی-پلیمر تحقیقاتی انجام شده است [۶] و نتایج خوبی برای توسعه کاربرد ساختمانی این مواد به‌دست آمده است.

یکی از مهم‌ترین تحلیل‌هایی که در سطح مقطع اعضای خمشی انجام می‌شود، تحلیل لنگر-انحناء است. منحنی لنگر-انحناء برای بیان ویژگی‌های خمشی غیرخطی مقطع یک عضو خمشی به کار می‌رود. در واقع این منحنی نشان می‌دهد که برای یک سطح مقطع مشخص، به ازای یکی نیروی محوری خاص، مقطع در هر انحناء نسبت به وضعیت اولیه خود دارای چه لنگری خواهد بود. از این منحنی می‌توان به‌عنوان جایگزین منحنی تنش-کرنش در بسیاری از تحلیل‌ها، به‌ویژه تحلیل منطبق بر طراحی بر اساس عملکرد استفاده نمود. برای تعیین منحنی لنگر-انحناء، باید شکل هندسی مقطع، منحنی‌های تنش-کرنش فشاری و کششی ماده مرکب مورد مطالعه، نیروی محوری اعمال شده به سطح مقطع و

جهت لنگر معلوم باشد.

همانند سایر مواد مرکب ترموپلاستیک، انتظار می‌رود مواد مرکب پلی پروپیلن نیز خواص مکانیکی وابسته به دما داشته باشند که مطالعه آن برای طراحی ایمن اعضای ساختمانی امری ضروری است. تاکنون مطالعات اندکی در مورد اثر دما بر خواص مکانیکی این مواد انجام شده است. Schildmeyer و همکاران (۲۰۰۹) دریافتند که با افزایش دما، مقاومت‌های کششی و فشاری ماده مرکب آرد چوب-پلی پروپیلن و مدول الاستیسیته کاهش می‌یابد [۷]. Tajvidi و همکاران (۲۰۰۹) [۸]، و همکاران (۲۰۱۰) [۹] و Dastoorian و همکاران (۲۰۱۵) [۱۰] نیز به نتایج مشابهی دست‌یافته‌اند. برخی محققان روش‌هایی برای تعیین ضرایب اثر دما برای این مواد مرکب نیز ارائه کرده‌اند [۷، ۱۰].

در مورد استفاده از روش تحلیل لنگر-انحناء برای رفتار خمشی مواد مرکب چوب پلاستیک تنها دو گزارش یافت شده است هرچند در این پژوهش‌ها اثر دما بر رفتار مذکور لحاظ نشده است:

Haiar و همکاران (۲۰۰۰) از یک برنامه لنگر-انحناء برای تجزیه تحلیل مقطع تحت بار خمشی استفاده کردند و به این نتیجه رسیدند که برنامه قادر است به خوبی رفتار خمشی مواد مرکب WPC تقویت‌شده و تقویت نشده را پیش‌بینی کند [۵].

Kobbe (۲۰۰۵) از روش تجزیه و تحلیل لنگر-انحناء برای پیش‌بینی رفتار خمشی ماده مرکب آرد چوب پلی-پروپیلن پرداخت. وی دریافت که توزیع تنش فشاری و کششی در سطح مقطع خمشی این ماده یکنواخت نیست. وی همچنین گزارش کرد که با افزایش لنگر، به دلیل اختلاف بین مقاومت کششی و فشاری، تار خنثی به سمت سطح فشاری جابه‌جا می‌شود [۱۱].

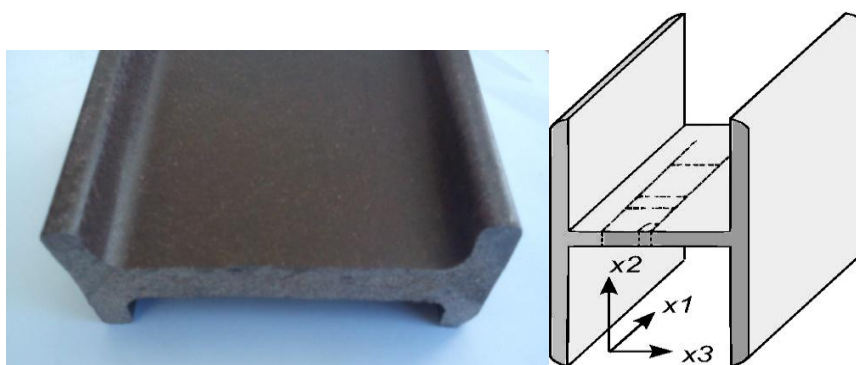
در تحقیق حاضر اثر دما و افزایش آن بر موقعیت تار خنثی و اثر آن بر توزیع تنش به روش تحلیل لنگر-انحناء مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج تحقیق حاضر می‌تواند راهگشای خوبی برای مهندسانی باشد که به طراحی سطح مقطع اعضای خمشی می‌پردازند.

افزودنی‌ها از قبیل مستربچ‌های رنگی، آنتی استیک، 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. شکل ۱ سطح مقطع پروفیل اکسترود شده را نشان می‌دهد. نمونه‌های آزمون خمشی، فشاری و کششی از قسمت جان پروفیل I شکل در امتداد جهت اکستروژن تهیه شدند. ابعاد نمونه‌های آزمونی با یک کولیس دیجیتال اندازه‌گیری شد و در محاسبات مورد استفاده قرار گرفت.

## مواد و روش‌ها

### تهیه ماده مرکب

ماده مرکب تجاری الیاف باگاس- پلی‌پروپیلن تولیدشده توسط شرکت دز چوپکس واقع در جنوب ایران (Dez Choopex Co.) برای این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. این ماده مرکب شامل ۶۰ درصد وزنی الیاف باگاس (به ابعاد ۵۰ مش) به‌عنوان پرکننده، ۳۰ درصد وزنی پلی‌پروپیلن به‌عنوان ماده زمینه پلیمری، ۴ درصد مالئیک انیدرید پلی‌پروپیلن به‌عنوان سازگارکننده و ۶ درصد سایر



شکل ۱- سطح مقطع پروفیل اکسترود شده. محل تهیه نمونه‌های آزمونی از پروفیل I شکل با خط‌چین نشان داده شده است؛ جهت  $x_1$  معرف جهت اکستروژن و جهت  $x_2$  و  $x_3$  معرف جهات عمود بر اکستروژن می‌باشند.

آزمون‌های کشش، فشار و خمش استاتیک در پنج سطح دمای ۲۱، ۳۰، ۴۰، ۶۵ و ۸۰ درجه سانتی‌گراد در ده تکرار انجام شدند.

نمونه‌های مورد استفاده برای آزمون کشش از نوع dog bone نوع III مطابق استاندارد ASTM D638 بود [۱۳]. نمونه‌های کششی در نرخ کرنش ۰/۱/min (سرعت بارگذاری ۵ mm/min) تحت بار کششی قرار گرفت. تغییر طول به‌وسیله یک اکستنسومتر Zwick با محدوده اندازه‌گیری ۱۰۰ mm اندازه‌گیری شد.

آزمون فشار در جهت اکستروژن مطابق استاندارد ASTM آی‌این‌نامه D695 در سرعت بارگذاری ۱/۳ mm/min انجام شد [۱۴]. ابعاد اسمی نمونه‌های آزمون فشار ۵۰/۸ mm<sup>3</sup> × ۱۲/۷ × ۱۲/۷ بود.

آزمون خمش استاتیکی سه‌نقطه‌ای مطابق استاندارد ASTM آی‌این‌نامه D790 در سرعت بارگذاری ۵/۳ mm/min انجام شد [۱۵]. ابعاد اسمی نمونه‌های

مشروط‌سازی اولیه نمونه‌های آزمونی به مدت دو هفته در دمای ۲۳±۲°C و رطوبت نسبی ۵۰±۵ درصد مطابق دستورالعمل A استاندارد ASTM D618 انجام شد [۱۲]. در آزمون‌های استاتیک در دماهای بالاتر از دمای اتاق، علاوه بر انجام مشروط‌سازی در شرایط مذکور، هر نمونه آزمونی به مدت حداقل یک ساعت قبل از انجام آزمون، در دمای مشخص در یک آون آزمایشگاهی قرار گرفت تا دمای موردنظر در کل ضخامت نمونه یکنواخت شود.

### اثر دما بر مقاومت‌های استاتیکی

آزمون خمش سه‌نقطه‌ای، کشش و فشار در محدوده دمای اتاق تا دمای ۸۰°C با استفاده از ماشین آزمایش (Zwick/Roell Z020, Ulm, Germany) مجهز به یک رأس بارگذاری ۲۰ کیلو نیوتن و سیستم جمع‌آوری کامپیوتری داده در مرکز تحقیقات صنعتی Transfer Center Kunststoff Technik انجام شد.

را نشان می‌دهد. مفروضات این برنامه عبارت‌اند از:

- سطح مقطع تیر حالت صفحه‌ای خود را حفظ می‌کند (در حین اعمال بار دچار اعوجاج نمی‌شود).
  - تنها تنش‌ها و کرنش‌های محوری در تیر تحت خمش وجود دارند (خمش خالص است) و بین الیاف تقویت‌کننده تیر هیچ‌گونه لغزشی رخ نمی‌دهد و تغییر شکل برشی وجود ندارد.
- با در نظر گرفتن این مفروضات، داده‌های خیز-بار با استفاده از روش لنگر-سطح محاسبه می‌شود. برنامه مورد استفاده برای دستیابی به منحنی لنگر-انحناء شامل مراحل زیر است:
۱. تقسیم مقطع به لایه‌های (سطوح) عمود بر محور بارگذاری (خصوصیات هر لایه مانند تنش و مدول الاستیسیته در هر لایه، ثابت فرض شده و بر حسب مقدار کرنش سنترئوئید هر لایه محاسبه می‌شود).
  ۲. نمودی کرنش به مقطع وارد می‌شود و سپس به کمک شرایط سازگاری و معادلات تعادل، الگوی توزیع کرنش در کل مقطع محاسبه می‌شود.
  ۳. بر حسب کرنش در سنترئوئید هر لایه و با استفاده از منحنی تنش-کرنش مواد، مقدار تنش در هر لایه محاسبه می‌شود.
  ۴. با انتگرال‌گیری از تنش‌ها در لایه‌های مجزای تشکیل‌دهنده مقطع بر روی کل مقطع، می‌توان نیروهای داخلی مقطع را نیز محاسبه کرد.
  ۵. بررسی تعادل نیروی محوری و در صورت لزوم اصلاح محل تار خنثی جهت برقراری تعادل (با توجه به اینکه رابطه تنش-کرنش چندسازه‌های چوب پلاستیک از نوع غیرخطی است و نمودی کرنش محوری مقطع  $(d\varepsilon)$  به صورت مستقیم از نیروهای داخلی قابل محاسبه نیستند، به فرآیند تکراری برای آنالیز لنگر-انحناء نیاز است).
  ۶. محاسبه لنگر و انحناء؛ بار، نیروی برش و لنگر از طریق روابط دیفرانسیلی زیر با خیز در ارتباط هستند (روابط ۱-۳):

$$\frac{M}{EI} = \frac{d^2 x_2}{dx_1^2} \quad (1)$$

آزمون خمش استاتیکی سه نقطه‌ای  $12/7 \times 13 \times 250 \text{ mm}^3$  و طول دهانه  $200 \text{ mm}$  بود.

### کاربرد تحلیل لنگر-انحناء

برای درک بهتر رفتار خمشی این چندسازه‌ها، یک برنامه FORTRAN که قبلاً برای تجزیه و تحلیل لنگر-انحناء توسط Haiar در سال ۲۰۰۰ توسعه یافته بود [۵] برای ماده مرکب مورد مطالعه با توجه به شرایط بارگذاری و رفتار تنش-کرنش فشاری و کششی این ماده، ویرایش شد و برای تعیین توزیع تنش در امتداد ارتفاع تیر و تعیین موقعیت تار خنثی با افزایش لنگر خمشی مورد استفاده قرار گرفت. این برنامه قادر است رفتار غیرخطی مواد مرکب WPC و تفاوت بین مدول و مقاومت در کشش و فشار را لحاظ کند.

این برنامه از روابط بنیادی منحنی تنش کرنش کششی و فشاری برای توسعه نقاط لنگر-انحناء به عنوان تابعی از کرنش خمشی در مقطع WPC استفاده می‌کند. فرمولاسیون‌های مختلف WPC، بسته به نوع پلیمر و شکل الیاف تقویت‌کننده، رفتار تنش-کرنش متفاوت دارند [۱۶، ۱۷]. وجه مشترک ترکیب‌بندی‌های مختلف، رفتار غیرخطی آن‌ها و وابستگی خواص مکانیکی به مدول بارگذاری است [۱۸]. در مدل سازی، اشتقاق روابط بنیادی ریاضی دقیق برای تنش و کرنش ضروری است.

این برنامه توزیع تنش در امتداد ارتفاع تیر را تعیین می‌کند. این مدل مهندس طراح را قادر می‌سازد تا با داشتن مقاومت‌های کششی و فشاری اولیه به تعیین ابعاد و طراحی مقطع بپردازد.

این برنامه، داده‌های لنگر-انحناء را به صورت تابعی از کرنش خمشی در سطح مقطع تیر می‌یابد. سپس داده‌های لنگر-انحناء برای تعیین رفتار بار-خیز به کار می‌رود. این برنامه سطح کرنش فشاری را بر اساس تعداد نمونه‌های<sup>۱</sup> تعیین شده توسط کاربر، فزونی می‌دهد و برای هر سطح کرنش، مقادیر لنگر-انحناء را پیدا می‌کند. برای هر نمونه، شیب توزیع کرنش در امتداد ارتفاع مقطع تیر تنظیم می‌شود تا نیروهای کششی و فشاری محوری در مقطع تیر به تعادل برسند. زمانی که ظرفیت کرنش فشاری محوری و یا ظرفیت کرنش کششی محوری به مقدار حداکثر برسد، برنامه شکست

<sup>1</sup> Increments

برنامه داده شد. یکی دیگر از ورودی‌های برنامه، شکل سطح مقطع است. مقطع تیر باید به لایه‌هایی تقسیم شود و شکل و پهنای هر لایه و نیز فاصله هر لایه تا سطح خنثی باید به برنامه داده شود. در این تحقیق با توجه به اینکه سطح مقطع، مستطیلی و تو پر بوده است، سطح مقطع به سه لایه با ابعاد مساوی تقسیم شده است.

خروجی‌های برنامه حاصل از تحلیل لنگر-انحناء برای هر نمو کرنش شامل لنگر، انحناء، ارتفاع تار خنثی در سطح مقطع، کرنش فشاری و کششی در بالا و پایین مقطع (دورترین فاصله از تار خنثی) است. توزیع تنش خمشی و منحنی بار-خیز نیز از خروجی‌های این برنامه است. به‌منظور بررسی صحت نتایج برنامه، داده‌های بار-خیز حاصل از برنامه با داده‌های بار-خیز تجربی مورد مقایسه قرار گرفت.

### نتایج و بحث

ثابت‌های مدل تانزانست هایپربولیک،  $\sigma = a \cdot \tanh(b \cdot \varepsilon)$  با روش به حداقل رساندن مجموع مربعات باقیمانده در نرم‌افزار MATLAB (MathWork) برای هر سطح دما محاسبه شد. در جدول ۱ مقادیر ثابت‌های  $a$  و  $b$  مدل تانزانست هایپربولیک در کشش و فشار برای منحنی‌های تنش-کرنش میانگین، به همراه ضرایب تبیین مربوطه آورده شده است.

جدول ۱- مقادیر ثابت‌های تابع  $\tanh$  برای کشش و فشار در دماهای مختلف

دما	بارگذاری	$a$	$B$	$R^2$
۲۱	کشش	۱۹/۳۰	۱۹۰	۰/۹۸
	فشار	۴۵/۵	۹۱/۸	۰/۹۸
۳۰	کشش	۱۷/۵	۱۷۹	۰/۹۸
	فشار	۳۷/۳۱۷	۸۰/۶۷	۰/۹۷
۴۰	کشش	۱۵/۸۲	۱۷۵/۴	۰/۹۹
	فشار	۳۳/۹۹۲	۷۳/۶۴	۰/۹۸
۶۵	کشش	۱۱/۳۲۶	۱۶۷/۶	۰/۹۹
	فشار	۲۶/۳۷۶	۶۲/۸۸	۰/۹۹
۸۰	کشش	۹/۲۸۹	۱۵۷/۴	۰/۹۹
	فشار	۲۰/۹۷۲	۵۸/۰۷	۰/۹۹

$$\frac{-V}{EI} = \frac{d^3 x_2}{dx_1^3} \quad (2)$$

$$\frac{w}{EI} = \frac{d^4 x_2}{dx_1^4} \quad (3)$$

که  $EI$  = سفتی خمشی،  $x_2$  = خیز تار خنثی،  $W$ : بار گسترده،  $V$ : نیروی برشی،  $M$ : لنگر خمشی،  $\frac{dv}{dx}$ : شیب محور تیر و  $\frac{d^2 x_2}{dx_1^2}$  عکس شعاع انحناء است [۱۹].

برای انجام این تجزیه و تحلیل، برنامه به ورودی‌هایی نیاز دارد که عبارت‌اند از: متغیرهای منحنی تنش و کرنش، شکل سطح مقطع و شرایط بارگذاری.

تحقیقاتی که قبلاً در زمینه مطالعه خواص مکانیکی مواد مرکب با ماده زمینه PVC و PP انجام شده بود نشان داد که می‌توان از یک مدل تانزانست هایپربولیک (رابطه ۴) برای توصیف منحنی تنش-کرنش این مواد مرکب استفاده کرد [۲۰، ۲۱].

$$\sigma = a \cdot \tanh(b \cdot \varepsilon) \quad (4)$$

که  $\sigma$  تنش،  $\varepsilon$  کرنش و  $a$  و  $b$  ثابت‌های مدل منحنی تنش و کرنش هستند.

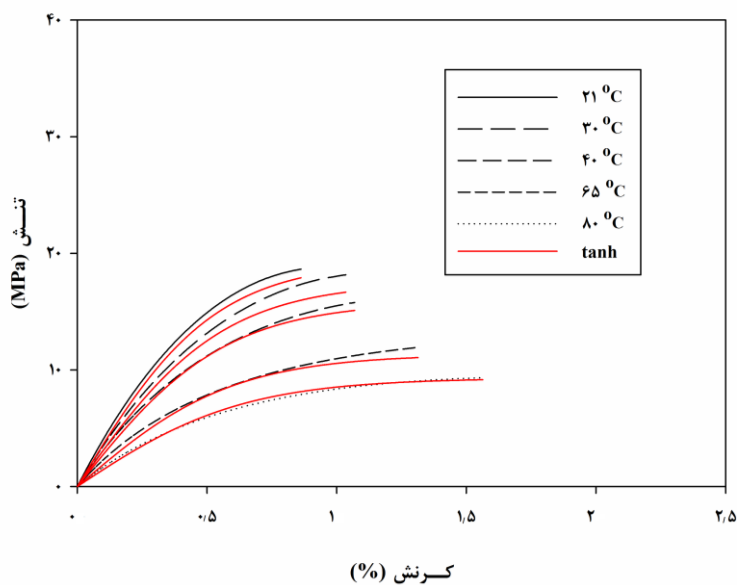
قبل از استفاده از این برنامه، رابطه تانزانست هایپربولیک بر روی منحنی‌های تنش-کرنش فشاری و کششی برآزش شد و ثابت‌های رابطه به‌عنوان ورودی به برنامه داده شد. همچنین کرنش حداکثر در کشش و فشار نیز به

اثر افزایش دما بر رفتار خمشی ماده مرکب الیاف باگاس - پلی پروپیلن ...

بارگذاری محاسبه و رسم شده‌اند. در این شکل‌ها علاوه بر منحنی‌های تنش- کرنش تجربی، منحنی  $\tanh$  برازش شده روی منحنی‌های تجربی نیز برای مد بارگذاری فشار و کشش مشاهده می‌شود. مشاهده می‌شود که تابع تانژانت هایپربولیک به خوبی قادر است به توصیف رفتار غیرخطی این مواد بپردازد.

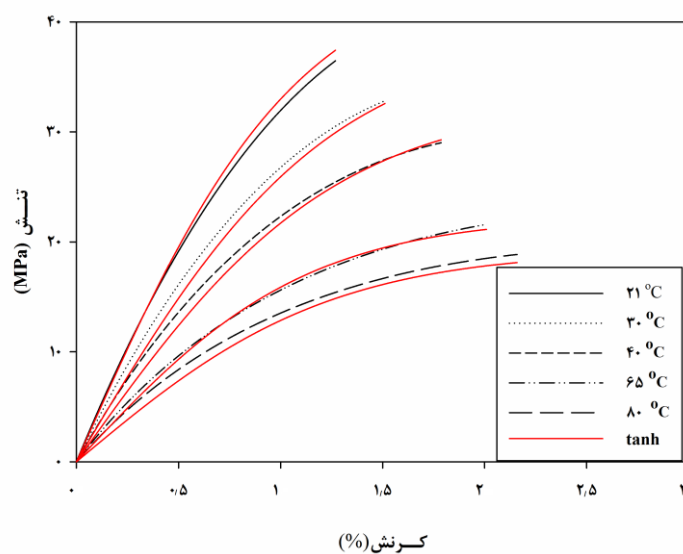
همان‌طور که از جدول ۱ برآورد می‌شود ثابت‌های  $a$  و  $b$  با افزایش دما کاهش می‌یابند که به نوعی مبین کاهش مدول با افزایش دما نیز است.

منحنی‌های تنش-کرنش برای آزمون‌های کشش، فشار و خمش در دماهای مختلف در شکل‌های ۲ تا ۴ نشان داده شده است. این منحنی‌ها با میانگین‌گیری مقادیر تنش در سطوح مشابه کرنش برای ۱۰ تکرار در هر نوع

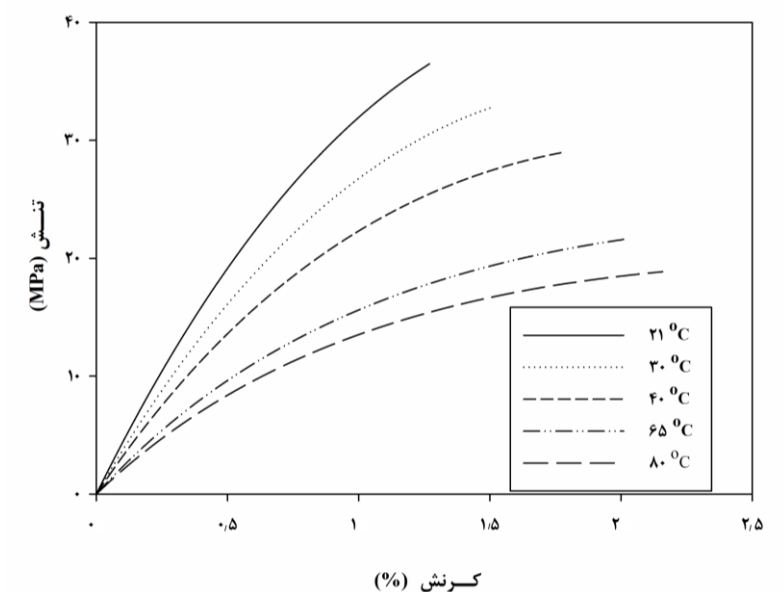


شکل ۲- منحنی‌های میانگین تنش و کرنش کششی در دماهای مختلف

2D Graph 3



شکل ۳- منحنی‌های میانگین تنش و کرنش فشاری در دماهای مختلف



شکل ۴- منحنی‌های میانگین تنش و کرنش خمشی در دماهای مختلف

مورد مطالعه را تقریباً خوب برآورد کند. هرچند مقدار بار تجربی با بار پیش‌بینی شده توسط برنامه تفاوت داشت ولی درصد اختلاف (جدول ۲) در حد قابل قبول (زیر ۲۲ درصد) بود. Haiar (۲۰۰۰) نیز مقادیر بار و خیز پیش‌بینی را کمتر از مقادیر تجربی گزارش کرده است [۵].

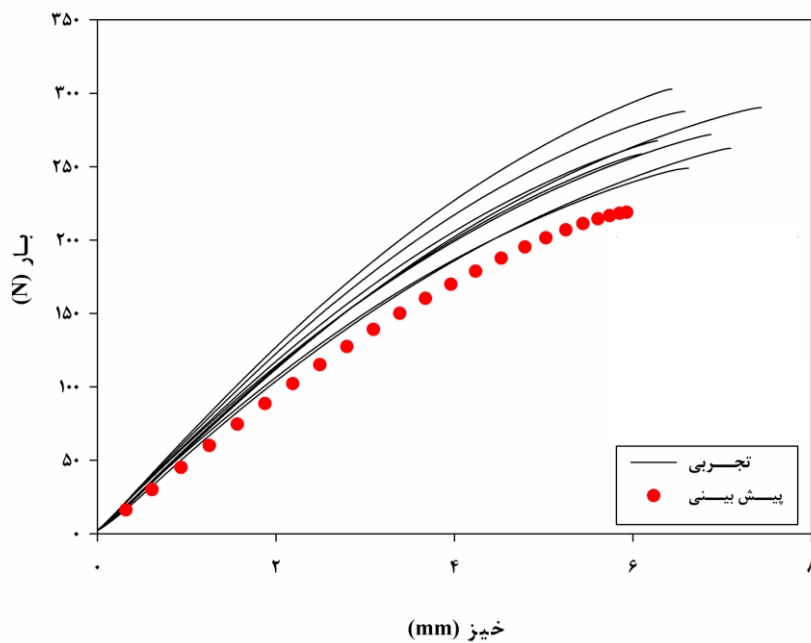
به منظور بررسی صحت نتایج برنامه، داده‌های بار-خیز حاصل از برنامه با داده‌های بار-خیز تجربی مورد مقایسه قرار گرفت. شکل‌های ۵ تا ۹ به مقایسه منحنی‌های بار-خیز تجربی و بار-خیز پیش‌بینی شده با مدل لنگر-انحناء می‌پردازد. همان‌طور که از شکل‌های ۵ تا ۹ استنباط می‌شود، برنامه قادر است روند کلی رفتار بار - خیز چندسازه

جدول ۲- مقایسه مقادیر بار پیش‌بینی و بار تجربی

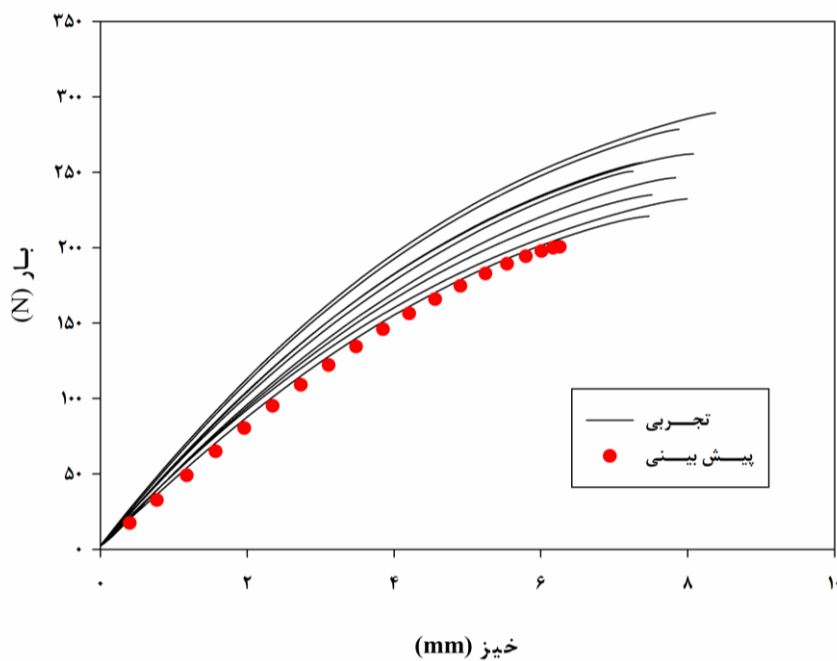
درصد اختلاف	بار پیش‌بینی (N)	بار تجربی (N)	دما (°C)
-۱۹	۲۱۸/۹۴	۲۷۲/۰۱	۲۱
-۱۹	۲۰۰/۵۷	۲۴۹/۲۷	۳۰
-۱۶	۱۸۰/۳۳	۲۱۴/۷۳	۴۰
-۲۱	۱۲۹/۹۳	۱۶۵/۴۳	۶۵
-۲۲	۱۱۰/۱۲	۱۴۲/۳۶	۸۰

تحلیل لنگر-انحناء همچنین به درک توزیع تنش در امتداد ارتفاع تیر کمک می‌کند. در شکل ۱۰ توزیع تنش خمشی حاصل از برنامه Fortran در امتداد ارتفاع تیر، به تصویر کشیده شده است. توزیع غیریکنواخت تنش خمشی و تغییر شکل پذیری کششی در تنش حداکثر به وضوح در شکل ۱۰ قابل مشاهده است که منجر به بالا رفتن تار خنثی به سمت سطح فشاری شده است.

یک روش دیگر برای بررسی صحت برنامه، مقایسه لنگر حداکثر پیش‌بینی و لنگر حداکثر تجربی است. در جدول ۳ مقادیر لنگر تجربی و لنگر حاصله به روش تحلیل لنگر-انحناء توسط برنامه آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود این برنامه قادر است مقادیر لنگر را به نسبت خوب برآورد کند و درصد اختلاف در حد قابل قبول است.

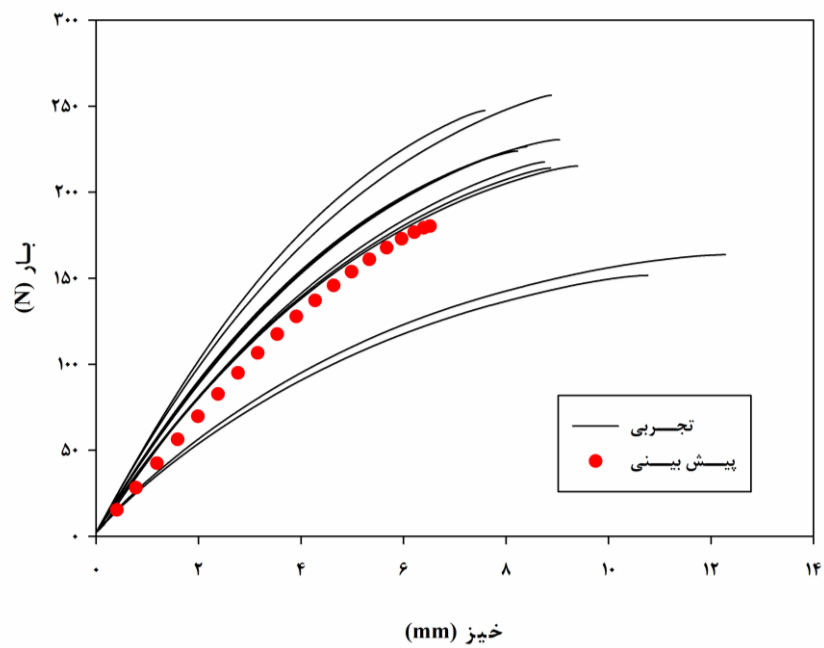


شکل ۵- مقایسه منحنی بار-خیز تجربی و پیش‌بینی در دمای ۲۱°C

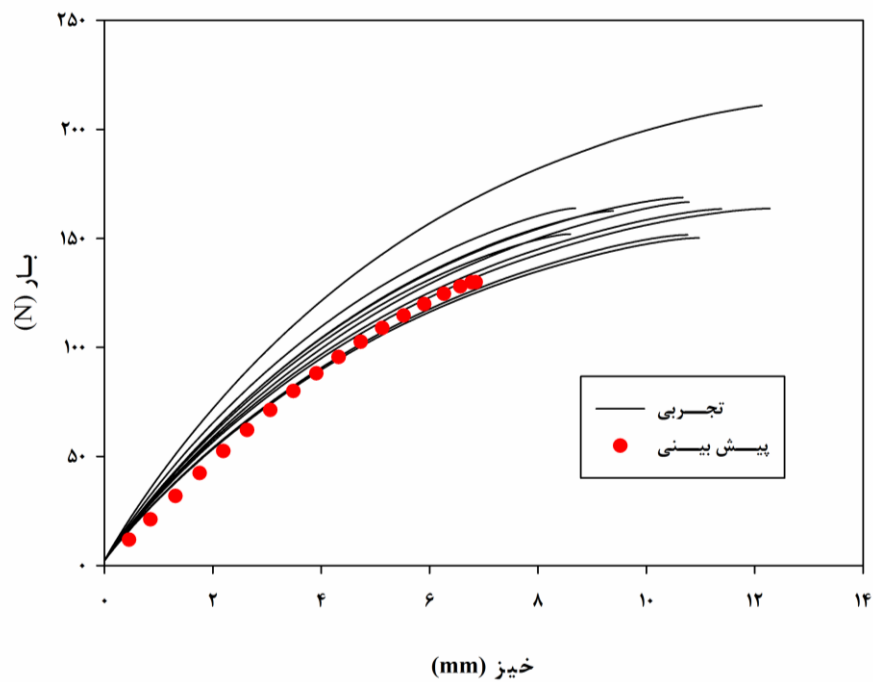


شکل ۶- مقایسه منحنی بار-خیز تجربی و پیش‌بینی در دمای ۳۰°C

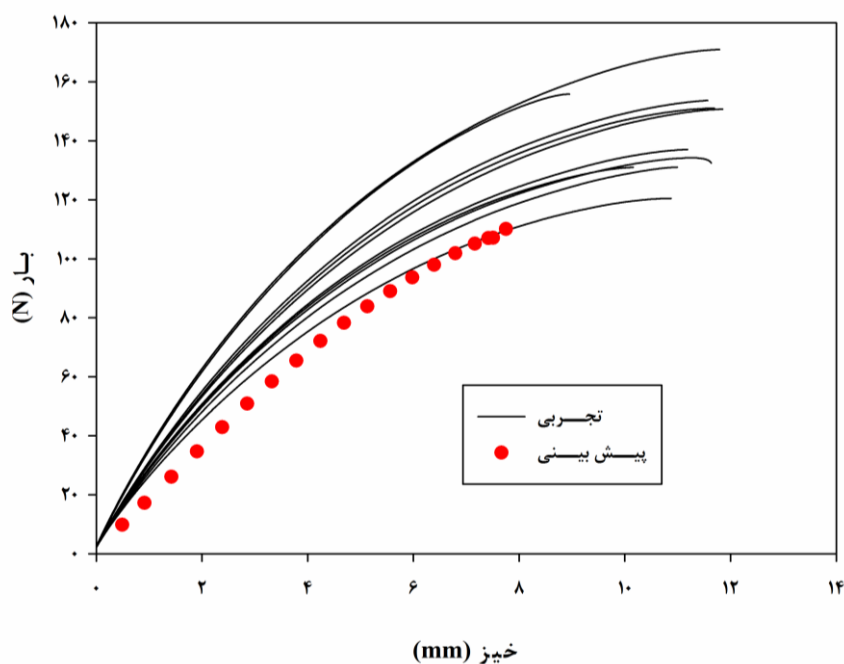




شکل ۷- مقایسه منحنی بار-خیز تجربی و پیش‌بینی در دمای ۴۰ °C



شکل ۸- مقایسه منحنی بار-خیز تجربی و پیش‌بینی در دمای ۶۵ °C



شکل ۹- مقایسه منحنی بار-خیز تجربی و پیش‌بینی در دمای ۸۰ °C

جدول ۳- مقایسه مقادیر لنگر پیش‌بینی و لنگر تجربی

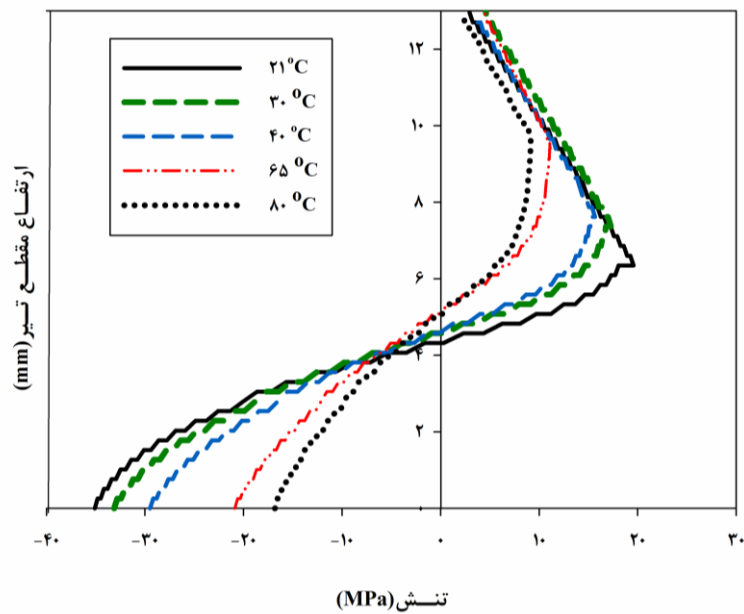
درصد اختلاف	لنگر پیش‌بینی (N)	لنگر تجربی (N)	دما (°C)
-۱۹	۱۰/۹۴	۱۳/۶۰	۲۱
-۱۹	۱۰/۰۲	۱۲/۴۶	۳۰
-۱۶	۹/۰۲	۱۰/۷۳	۴۰
-۲۰	۶/۶۱	۸/۲۷	۶۵
-۲۴	۵/۳۶	۷/۱۱	۸۰

۵-۲ درصد بیشتر از تنش کششی بوده است بنابراین می‌توان گفت در سطح تنش طراحی، تفاوت بین تنش کششی و فشاری ناچیز بوده و قابل چشم‌پوشی است. بسته به رابطه بین تنش کششی و فشاری در خمش، تار خنثی می‌تواند از سنترئوئید تیر جابه‌جا شود. به دلیل اختلاف بین تنش فشاری و کششی، می‌توان انتظار داشت که با افزایش لنگر، تار خنثی به دلیل ظرفیت کم تنش کششی، به سمت بالا یعنی سطح فشاری جابه‌جا شود. شکل ۱۱ موقعیت تار خنثی به صورت تابعی از لنگر را در دماهای مختلف نشان می‌دهد. زمانی که کرنش کششی به مقدار حداکثر می‌رسد، تغییر شکل‌پذیری کششی ماده

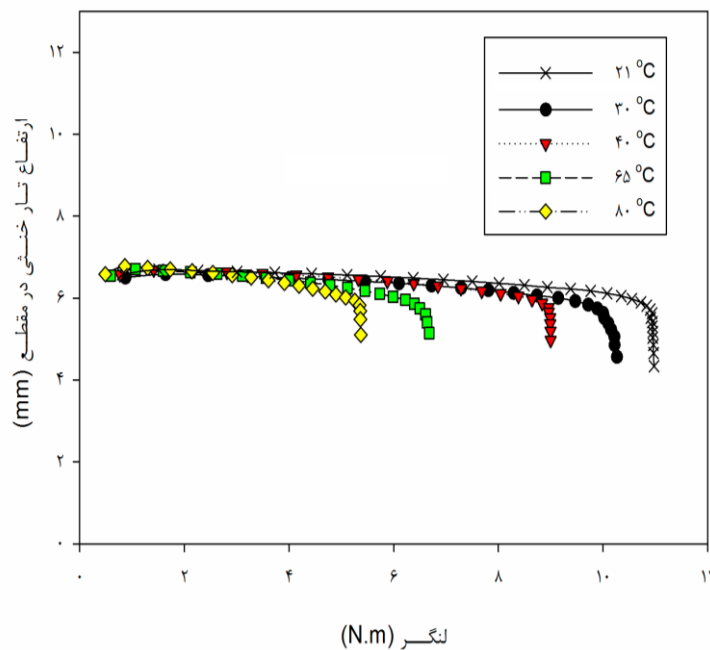
همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود توزیع تنش کششی و فشاری در امتداد ارتفاع مقطع یکنواخت نیست و در هنگام شکست تنش فشاری غالب می‌شود. تحلیل داده‌های تنش فشاری و کششی در خمش نشان می‌دهد که با افزایش دما، تنش فشاری بیشتر از تنش کششی کاهش یافته، اختلاف تنش فشاری و کششی نهایی از هم کمتر می‌شود و در نتیجه با افزایش دما توزیع تنش یکنواخت‌تر می‌شود. این امر به نوبه خود سبب می‌شود در دماهای بالاتر جابه‌جایی تار خنثی به سمت سطح فشاری کمتر شود. همچنین آنالیز داده‌ها نشان داد که در سطح تنش بین ۳۰ تا ۴۰ درصد تنش نهایی، تنش فشاری تنها

در نظر گرفتن نتیجه حاصله، قابل ذکر است که می توان با تقویت سطح کششی در سطح مقطع اعضای خمشی، ظرفیت تحمل بار خمشی در این مواد مرکب را افزایش داد.

سبب می شود نرخ کرنش در سطح بالا و پایین تار خنثی تفاوت داشته باشد. این سبب می شود تار خنثی به سمت بالا حرکت کند زیرا به دلیل مقاومت فشاری بالاتر نسبت به مقاومت کششی در ماده مورد مطالعه، نرخ کرنش فشاری نرخ کرنش کششی را به تأخیر می اندازد؛ بنابراین با



شکل ۱۰- منحنی توزیع تنش در امتداد ارتفاع سطح مقطع تیر در دماهای مختلف



شکل ۱۱- موقعیت تار خنثی به عنوان تابعی از لنگر در دماهای مختلف

نشان داد که تابع تانژانت هایپربولیک به خوبی قادر به پیش بینی رفتار تنش- کرنش غیرخطی این مواد است. همچنین نتایج نشان داد که این برنامه قادر است روند کلی رفتار بار-خیز ماده مرکب مورد مطالعه را تقریباً خوب برآورد کند. هرچند مقدار بار خمشی و خیز پیش بینی شده در حدود ۲۲ درصد کمتر از مقادیر تجربی بوده است. تحلیل لنگر-انحناء نشان داد که با افزایش لنگر تار خنثی به سمت بالا یعنی سطح فشاری جابه جا می شود. همچنین نتایج نشان داد که با افزایش دما ارتفاع تار خنثی از سطح فشاری اندکی کاهش یافته است که علت این امر به اختلاف کمتر بین مقاومت کششی و مقاومت فشاری در دماهای بالاتر نسبت داده شد.

همان طور که از شکل ۱۱ مشاهده می شود با افزایش لنگر، تعادل بین کرنش فشاری و کرنش کششی از طریق جابه جایی تار خنثی به سمت فشاری حفظ می شود. شکل ۱۱ نشان می دهد که با افزایش دما، فاصله تار خنثی از سطح فشاری اندکی کاهش یافته است که علت این امر را می توان به اختلاف کمتر بین تنش فشاری و کششی در دماهای بالاتر نسبت داد.

### نتیجه گیری

از یک برنامه لنگر-انحناء برای پیش بینی رفتار خمشی ماده مرکب الیاف باگاس-پلی پروپیلن در دماهای مختلف استفاده گردید. رفتار غیرخطی این ماده با یک تابع تانژانت هایپربولیک با دو ثابت تناسب سازی توصیف شد. نتایج

### مراجع

- [1] Clemons, C., 1992. Wood-plastic composites in the United States; The interfacing of two industries. Forest Product Journal, 52(6):10-18.
- [2] Cai, Zh. and Ross, R.J., 2011. Mechanical properties of wood-based composite materials. In: Wood handbook, Forest Products Laboratory, 12.1-12.12.
- [3] Odell, J., 2008. Wood plastic composite sill plate for continuous anchorage of shear walls in light frame wood structures. MSc thesis, Washington State University.
- [4] 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.
- [5] Haiar, K.J., 2000. Performance and design of prototype wood-plastic composite sections. MSc thesis, Washington State University.
- [6] Monterio, S.N, Rodriquez, R.J.S., De Souza, M.V. and D'Almeida, JRM., 1998. sugar cane bagasse waste as reinforcement in low cost composites. Advanced performance materials, 5(3):183-191.
- [7] Schildmeyer, A.J., Wolcott, M.P. and Bender, D.A., 2009. Investigation of the temperature-dependent mechanical behavior of a polypropylene-pine composite. Journal of Materials in Civil Engineering; 21(9): 460-466.
- [8] Tajvidi, M., Feizmand, M., Falk, R.H. and Felton, C., 2009. Effect of cellulose fiber reinforcement on the temperature dependent mechanical performance of nylon 6. Journal of Reinforced Plastic Composite; 28(22): 2781-2790.
- [9] Tajvidi, M., Motie, N., Rassam, G.H., Falk, R.H. and Felton, C., 2010. Mechanical performance of hemp fiber polypropylene composites at different operating temperatures. Journal of Reinforced Plastic Composite, 29(5): 664-674.
- [10] Dastoorian, F, Layeghi, M., Ebrahimi, Gh., Tajvidi, M. and Zabihzadeh, S.M., 2014. Evaluation of elevated temperature influence on mechanical properties of a commercial unrefined bagasse fiber-polypropylene composite. Iranian Journal of Wood and Paper Industries, 5(2): 129-142. (In Persian).
- [11] Kobbe RG., 2005. Creep behavior of a Wood-Polypropylene Composite. MSc Thesis, Washington State University.

- [12] Standard Practice for Conditioning Plastics for Testing, Annual Book of ASTM Standard, D 618, 2000.
- [13] Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, Annual Book of ASTM Standard, D 638-03, 2002.
- [14] Standard test method for compressive Properties of rigid plastics, Annual Book of ASTM Standard, D 695-02, 2002.
- [15] Standard test method for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials, Annual Book of ASTM Standard, D 790-90, 2002.
- [16] Xu, B., Simonsen, J. and Rochefort, W.E., 2000. Mechanical properties and creep resistance in polystyrene/polyethylene Blends. *Journal of Applied Polymer Science*, 76:1100-1108.
- [17] Houshyar, S. and Shanks, R.A., 2004. Tensile properties and creep response of polypropylene fiber composites with variation of fiber diameter. *Polymer International*, 53:1752-1759.
- [18] Altenbach, H., 2002. Creep analysis of thin walled structures. *Journal of applied mathematics and mechanics*, 82(8): 507-533.
- [19] Ugural, A.C. and Fenster, S.K., 2003. *Advanced strength and applied elasticity*. 4<sup>th</sup> Ed., Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, United States.544p.
- [20] Lockyear, S.A., 1999. Mechanical analysis of transversely loaded wood plastic sections, Master thesis, Washington state university.
- [21] Hermanson, J.C., Adcock, T. and Wolcott, M.P., 1998. Evaluation of extruded materials group, Annual Navy Report. Washington state university.

## Influence of elevated temperature on flexural behavior of a bagasse fiber-polypropylene composite assessed by moment curvature analysis method

### Abstract

In order to develop the structural applications of natural fiber-polypropylene composites, achieving enough knowledge about their mechanical behavior is necessary. One method for describing flexural characteristics of a flexural section is using the moment-curvature analysis which is an alternative for stress-strain relationship in many analyses. In this study the effect of temperature on natural axis position and flexural stress distribution in section of flexural test specimens was investigated using a moment curvature analysis method. Flexural, tensile and compressive tests were conducted in temperatures ranging from room temperature to 80°C. A FORTRAN program was used for analysis of moment-curvature in flexural section of flexural test specimens. In order to verify the results of the program, the predicted load-deflection and maximum moment data obtained from the program were compared with the experimental load-deflection and maximum moment data and results showed that the program was able to describe the flexural behavior of the studied composite. Results showed that non-uniform flexural stress distribution led to moving up the neutral axis toward compressive side. Also, with increasing temperature, the balance between compressive and tensile strain is maintained with shifting the neutral axis to compressive side, and with elevating temperature, the movement of the neutral axis decreased.

**Keywords:** moment-curvature analysis, composite, elevated temperature, neutral axis, Stress distribution.

**F. Dastoorian**<sup>1\*</sup>  
**M. Layeghi**<sup>2</sup>  
**Gh. Ebrahimi**<sup>3</sup>  
**M. Tajvidi**<sup>4</sup>  
**S. M. Zabihzadeh**<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Assistant professor, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.

<sup>2</sup> Assistant professor, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

<sup>3</sup> Professor, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.

<sup>4</sup> Assistant professor, University of Maine, Orono, ME, USA.

<sup>5</sup> Associate professor, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.

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

Received: 2015.11.18  
Accepted: 2016.02.09