



## مدلسازی رفتار کششی کامپوزیت چوب- پلی اتیلن هیبریدی تقویت شده با الیاف ممتد شیشه

عباس ذوالفقاری<sup>1\*</sup>، امیر حسین بهروش<sup>2</sup>

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

\* zolfaghari@nit.ac.ir، صندوق پستی 484

### چکیده

در سال‌های اخیر توجه به استفاده از کامپوزیت‌های چوب پلاستیک در کاربردهای سازه‌ای بیشتر شده است. از آنجایی که این کامپوزیت‌ها دارای استحکام‌های چندان بالایی نیستند از تقویت‌کننده‌های فیبری برای استحکام بخشی آن‌ها استفاده شده است. کامپوزیت‌های هیبریدی چوب پلاستیک که از دو نوع تقویت‌کننده الیاف شیشه و ذرات چوب در یک زمینه پلیمری تشکیل شده‌اند برای کاربردهای سازه‌ای مانند پالت‌های چوب پلاستیک می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. در تحقیقات قبلی نویسندگان، کامپوزیت چوب پلاستیک در یک فرآیند اکستروژن ویژه‌ای و با استفاده از الیاف ممتد شیشه تقویت شده‌اند. الیاف ممتد شیشه در کامپوزیت اکستروژن شده توانسته به مقدار قابل توجهی استحکام مکانیکی مانند استحکام‌های کششی و ضربه را افزایش دهد. در این مقاله، مدلی برای پیش‌بینی استحکام و مدول کششی کامپوزیت‌های چوب پلی‌اتیلن تقویت شده با الیاف ممتد شیشه ارائه شده است. برای مدل کردن کامپوزیت‌های هیبریدی، کامپوزیت چوب پلی‌اتیلن به عنوان زمینه و الیاف شیشه به عنوان تقویت‌کننده در نظر گرفته شده‌اند. از آنجایی که زمینه چوب پلی‌اتیلن ترد است، قانون مخلوط‌های مربوط به این دسته از کامپوزیت‌ها در مورد استحکام استفاده شد. نتایج حاصل از پیش‌بینی استحکام و مدول کششی کامپوزیت‌های هیبریدی چوب پلی‌اتیلن با روش پیشنهادی در این مقاله، به طور قابل قبولی با نتایج تجربی به دست آمده از آزمون کششی مطابقت داشت. متوسط خطاهای محاسبه‌شده بین نتایج تجربی ارائه‌شده و نتایج تجربی برای استحکام و سفتی به ترتیب حدود 9/5% و 8/6% است.

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 23 خرداد 1394  
پذیرش: 03 مرداد 1394  
ارائه در سایت: 24 مرداد 1394  
کلید واژگان:  
کامپوزیت‌های چوب پلی اتیلن  
هیبرید  
الیاف شیشه  
استحکام کششی

## Modeling tensile properties of hybrid wood-polyethylene composite reinforced by unidirectional glass fiber

Abbas Zolfaghari<sup>1\*</sup>, Amir Hossein Behraves<sup>2</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

\* P.O.B. 484, Babol, Iran, zolfaghari@nit.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 13 May 2015  
Accepted 09 July 2015  
Available Online 15 August 2015

#### Keywords:

Wood plastic composites (WPCs)  
Hybrid  
unidirectional glass fiber  
tensile strength

### ABSTRACT

In recent years considerable attention has been given to the structural application of wood plastic composites (WPCs). Regarding the WPCs lower mechanical strengths, fiber reinforcements have been applied for strengthening the WPCs. Hybrid wood plastic composites (HWPCs) include two types of reinforcements of glass fibers and wood flours that are added to a polymeric matrix. WPC pallets, as an example, can exploit the mechanical strength of HWPCs. In previous work, wood plastic composite was reinforced by continuous glass fibers using a unique extrusion process. Embedding the continuous glass fibers in WPC matrix resulted in significant improvements in mechanical properties such as tensile and impact strengths. In this paper, a model has been proposed to predict the tensile strength and modulus of the WPCs reinforced with unidirectional glass fibers. The methodology applied in this research considers the WPC as matrix and the glass fibers as reinforcements. Since WPC matrix is brittle, the rule of mixtures corresponding to the brittle matrix composites was used to predict the tensile strength. Results indicated that the predicted tensile properties were in good agreement with experimental data. The obtained mean errors between the experimental and theoretical results for tensile strength and modulus were 9.5% and 8.6% respectively.

### 1- مقدمه

گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند. آن‌ها از زمینه پلیمری ترموپلاستیک و یا ترموست و فیبرهای تقویتی مانند کربن، شیشه و آرامید تشکیل شده‌اند. با توجه به طول فیبرها، دو گروه از پلاستیک‌های تقویت شده با الیاف ممتد و کوتاه وجود دارد. در کامپوزیت‌های دارای الیاف ممتد که خصوصیات

پلاستیک تقویت شده با الیاف<sup>1</sup> دارای نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت به خوردگی بالا و سهولت ساخت بالا بوده و در صنایع مختلف و به صورت

1- Fiber reinforced plastic (FRP)

Please cite this article using:

A. Zolfaghari, A. H. Behraves, Modeling tensile properties of hybrid wood-polyethylene composite reinforced by unidirectional glass fiber, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 9, pp. 298-304, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

A. Zolfaghari, A. H. Behraves, Modeling tensile properties of hybrid wood-polyethylene composite reinforced by unidirectional glass fiber, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 9, pp. 298-304, 2015 (In Persian)

از این مقاله آن است که خصوصیات کششی کامپوزیت هیبریدی مانند استحکام و مدول کششی را پیش‌بینی نماید. همچنین در انتهای مقاله مشخصات کششی پیش‌بینی‌شده از تئوری با نتایج تجربی ارائه‌شده در مقاله پیشین [8] به منظور ارزیابی صحت مدلسازی، مقایسه خواهند شد. از آنجایی که این دسته از کامپوزیتهای هیبریدی چوب پلاستیک جدید بوده و ساخت آنها همچنان در مرحله تحقیقاتی است، پیش‌بینی استحکام و مدول کششی آنها که موضوع این مقاله است تاکنون منتشر نشده است.

## 2- تئوری

شکل 1 اجزا تشکیل‌دهنده کامپوزیت هیبریدی شامل پلی اتیلن، خاک اره و الیاف شیشه در این مقاله را نشان می‌دهد. مدل‌های تئوری بسیاری وجود دارند که استحکام و سفتی کششی ترموپلاستیک‌های تقویت شده را پیش‌بینی می‌کنند [9]. کامپوزیت تولیدشده در این مقاله هم الیاف کوتاه (ذرات چوب) و هم الیاف ممتد (الیاف شیشه) را شامل می‌شود. پیشنهاد می‌شود که کامپوزیت چوب پلاستیک (پلی اتیلن+ذرات چوب) به عنوان زمینه برای کامپوزیت هیبریدی در نظر گرفته شود. با این روش تئوری‌های پیچیده مربوط به ترموپلاستیک‌های تقویت شده با الیاف کوتاه حذف شده و تنها الیاف شیشه به عنوان تقویت‌کننده محسوب می‌شود. از آنجایی که الیاف شیشه بصورت طولی و ممتد در داخل کامپوزیت چوب پلاستیک جای گرفته است، کامپوزیت هیبریدی را می‌توان مشابه با یک لایه تک جهته تصور نمود.

در آزمایش کشش یک لایه تک جهته، به شرطی که اتصالی قوی بین فیبر و زمینه وجود داشته باشد، کرنش در زمینه و فیبر برابر خواهد بود. با اعمال قانون مخلوط‌ها<sup>4</sup> تنش در جهت طولی (جهت فیبر) کامپوزیت بصورت زیر بیان می‌شود:

$$\sigma_c = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m \quad (1)$$

که در آن  $V_f$  و  $V_m$  کسر حجمی،  $\sigma_f$  و  $\sigma_m$  تنش‌های کششی به ترتیب در الیاف و زمینه می‌باشند.

پاسخ کامپوزیتهای تک جهته در کشش تک محوری، به کرنش‌های شکست کششی فیبر  $\epsilon_f^*$  و زمینه  $\epsilon_m^*$  بستگی دارد. با توجه به مقدار این کرنش‌ها دو حالت وجود دارد: 1- کرنش شکست الیاف بزرگ‌تر از زمینه باشد  $\epsilon_m^* > \epsilon_f^*$ ؛ 2- کرنش شکست زمینه بزرگ‌تر از الیاف باشد  $\epsilon_m^* < \epsilon_f^*$ . حالت شکست کامپوزیتها به این کرنش‌های شکست نسبی بستگی دارد.

در تحقیق قبلی [8] ترکیب زمینه چوب پلاستیک با تغییر دادن مقدار ذرات چوب و عامل جفت‌کننده تغییر می‌یافت. بیشترین کرنش شکست کامپوزیت چوب پلاستیک در آزمون کشش حدود 1/5% بوده درحالی‌که الیاف شیشه در کرنش شکست حدود 3% دچار شکست می‌شوند. بنابراین در تمامی کامپوزیتهای تقویت‌نشده چوب پلاستیک در این تحقیق، کرنش شکست کششی کمتر از کرنش شکست الیاف شیشه است. این نوع از کامپوزیتها به عنوان کامپوزیتهای زمینه ترد (مانند سرامیک‌های تقویت شده با الیاف)

اورتوتروپیک دارند، فیبرها در داخل زمینه در یک جهت مورد نظر قرار گرفته‌اند که تشکیل یک لایه را می‌دهد. در این لایه تک جهته<sup>1</sup> خصوصیات مکانیکی به جهت فیبرها وابسته است. در پلاستیک‌های تقویت شده با الیاف کوتاه، این فیبرها در زمینه پراکنده بوده و به همین دلیل این دسته از کامپوزیتها خواص همسانگرد دارند. کامپوزیتهای چوب پلاستیک<sup>2</sup> از ذرات خردشده چوب (با فیبر طبیعی) و زمینه ترموپلاستیک ساخته شده‌اند و به عنوان کامپوزیتهای الیاف کوتاه محسوب می‌شوند. کامپوزیتهای با الیاف تک جهته خواص مکانیکی بالایی در جهت فیبرها دارند. مدل‌های تئوری و نیمه تجربی بسیاری در مراجع وجود دارد که می‌توانند رفتار مکانیکی کامپوزیتهای با الیاف ممتد و کوتاه را پیش‌بینی کنند.

برای معرفی کردن یک ماده جدید، تعادل بین قیمت و کارآمدی آن (شامل خواص مکانیکی، فیزیکی و ...) برای رقابت کردن با مواد سنتی ضروری است. کامپوزیتهای هیبریدی از دو یا چند تقویت‌کننده مختلف بهره می‌برند. با انتخاب نوع مناسب و مقدار کسر حجمی هر کدام از اجزای آنها مصالح‌های بین هزینه و کارآمدی برقرار می‌شود. کامپوزیتهای چوب پلاستیک استحکام‌های مکانیکی پایینی (به خصوص استحکام به ضربه) دارند و از آنها به صورت گسترده‌ای در کف پوش منازل و محیط‌های بیرونی استفاده می‌شود. در راستای استحکام بخشی کامپوزیتهای چوب پلاستیک، هیبرید کردن این کامپوزیتها با الیاف شیشه یکی از روش‌های بکار گرفته‌شده در تحقیقات اخیر [1-4] است. در این مقالات، فیبرهای کوتاه شیشه به داخل زمینه چوب پلاستیک در فرآیندهای اکستروژن، قالب‌گیری تزریقی و فشاری اضافه می‌شود. علیرغم بهبود خواص مکانیکی در این روش، روش دیگری برای تقویت بخشی توسط برخی از محققان به تازگی بکار گرفته شده است [5،6]. در این تحقیقات پلیمرهای تقویت شده با الیاف بر روی سطوح کامپوزیتهای چوب پلاستیک اتصال داده شده‌اند. نتایج تحقیقات نشان داد که افزایش در استحکام‌های کششی و خمشی قابل ملاحظه بوده است. در تحقیقات پیشین نویسندگان این مقاله [7،8]، یک روش منحصر به فردی برای تقویت بخشی کامپوزیتهای چوب پلاستیک پیشنهاد شده است. کامپوزیتهای چوب پلاستیک با الیاف ممتد شیشه از نوع E تقویت شده‌اند. ابتدا، الیاف پیوسته شیشه (بصورت روینگ شیشه) با مذاب پلی اتیلن آغشته شده و سپس این الیاف وارد پروفیلی از جنس چوب پلاستیک و با مقطع دایروی در یک فرآیند اکستروژن می‌شود. آزمون‌های کشش، خمش و ضربه بر روی این کامپوزیتهای هیبریدی انجام شده است و نتایج نشان داد که بهبود چشمگیری در خواص مکانیکی آنها حاصل شد بطوریکه استحکام‌های کششی و ضربه به ترتیب 6 و 20 برابر بدست آمده بودند. هدف از انجام آن تحقیق ورود کامپوزیتهای چوب پلاستیک به کاربردهای سازه‌ای مانند پالت چوب پلاستیکی بود.

بسته به کاربرد کامپوزیتهای چوب پلاستیک هیبریدی با الیاف ممتد شیشه (که از این پس به اختصار کامپوزیت هیبریدی نامیده می‌شود) کسر حجمی الیاف شیشه می‌بایست به درستی تعیین گردد. زمانی که استحکام بالاتر و نگرانی از شکست ناگهانی<sup>3</sup> یک معیار مهم در طراحی کامپوزیتهای چوب پلاستیک باشد، کسر حجمی بالاتری از الیاف شیشه مورد نیاز است. اما از طرفی به این موضوع باید توجه داشت که با افزایش کسر حجمی الیاف تولید کامپوزیت هیبریدی به روش اکستروژن دچار مشکل می‌شود. لذا، هدف



شکل 1 نمایشی از مواد تشکیل‌دهنده کامپوزیت هیبریدی

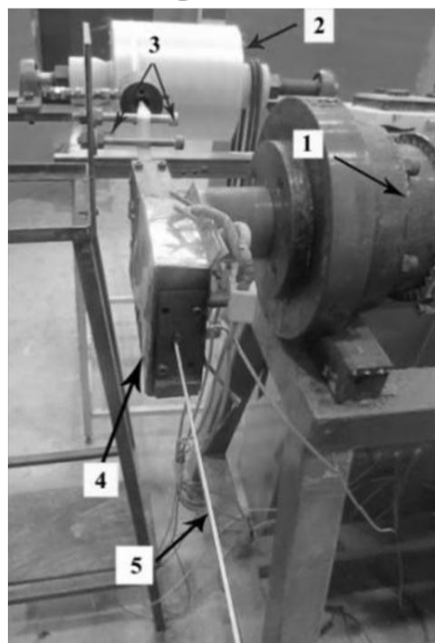
1- Unidirectional laminae  
2- Wood plastic composite (WPCs)  
3- Catastrophic failure

4- Rule of mixture

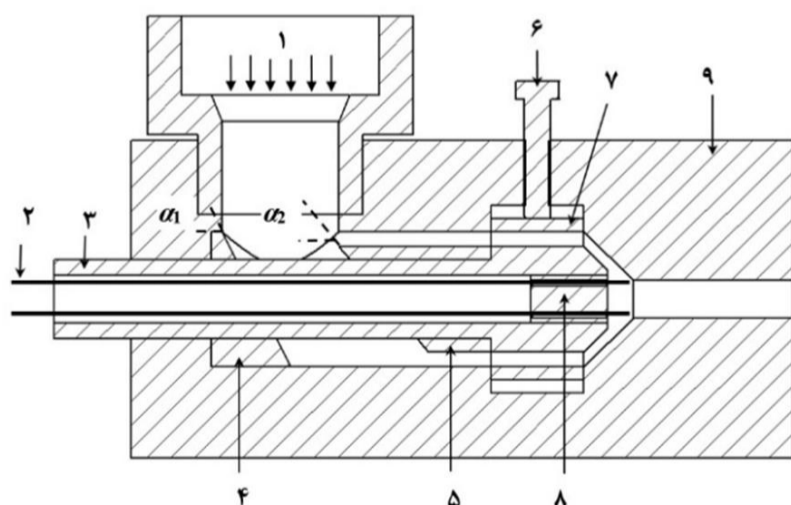
کامپوزیت هیبریدی بسیار موثر است. برای این منظور ابتدا الیاف شیشه طی فرآیندی مجزا با مذاب پلی اتیلن آغشته می‌شود. در این فرآیند همانطوری که در شکل 3 نشان داده شده است الیاف شیشه از داخل حمام مذاب پلی اتیلن که در داخل آن پین‌هایی بصورت زیگزاگی تعبیه شده است عبور می‌کند. در انتهای این حمام مذاب، یک دای استوانه‌ای به قطر 2 میلی‌متر و طول 18 میلی‌متر قرار گرفته است. یک کشنده در انتهای خط قرار دارد که الیاف آغشته شده را بر روی یک ماندرل می‌پیچاند. یک اکسترودر وظیفه تأمین مذاب به داخل حمام را دارد.

سرعت خطی الیاف شیشه در حین آغشته سازی 15 mm/s در نظر گرفته شد. بعد از مرحله آغشته سازی می‌بایست این الیاف شیشه در فرآیند اکستروژن به داخل کامپوزیت چوب پلاستیک وارد شده تا یک کامپوزیت هیبریدی را تشکیل دهد. برای این منظور یک دای اکستروژن خاصی طراحی و ساخته شد که در شکل 4 نشان داده شده است.

مذاب چوب پلاستیک (1) پس از خروج از اکسترودر با یک چرخش 90 درجه‌ای وارد کانال داخلی دای می‌شود. این کانال دارای طراحی خاصی بوده بطوریکه، تعادل جریان در خروجی را تضمین می‌کند. مذاب پس از طی مسیری مستقیم، در ناحیه مخروطی بین دای شکل‌دهنده (9) و ماندرل (3) با روینگ‌های آغشته شده (2) برخورد کرده و در داخل آن جای می‌گیرد. به منظور موقعیت دهی دقیق‌تر روینگ‌های آغشته شده در داخل چوب پلاستیک از پیچ تنظیم کننده جریان (6) استفاده می‌شود. قطر خروجی دای (دای



شکل 3 فرآیند آغشته سازی الیاف شیشه: (1) اکسترودر، (2) دوک الیاف شیشه، (3) پین‌های پخش‌کننده الیاف شیشه، (4) محفظه آغشته سازی، (5) روینگ شیشه آغشته شده به مذاب



شکل 4 شماتیکی از دای طراحی شده در ساخت کامپوزیتهای هیبریدی: (1) ورود مذاب چوب پلاستیک از اکسترودر، (2) الیاف شیشه آغشته شده، (3) ماندرل، (4) و (5) متعادل کننده جریان، (6) پیچ تنظیم جریان، (7) رینگ تنظیم کننده جریان، (8) راهنمای عبور الیاف شیشه آغشته شده، (9) دای شکل‌دهنده

محسوب می‌شوند. همچنین با توجه به کسر حجمی الیاف، دو حالت مختلف شکست مشخص می‌شود. در کسر حجمی پایین الیاف، زمینه بخش بزرگی از نیروی اعمال شده به کامپوزیت را تحمل می‌کند. شکست زمینه پیش از شکست الیاف روی می‌دهد و بنابراین تمامی نیرو به الیاف منتقل می‌شود. در این لحظه الیاف (به دلیل کسر حجمی پایین) نمی‌تواند تمامی نیرو را تحمل کرده و بنابراین کامپوزیت دچار شکست می‌شود. در این حالت، استحکام کششی نهایی کامپوزیت  $\sigma_c^*$  از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$\sigma_c^* = \sigma_f' V_f + \sigma_m^* V_m \quad (2)$$

در این رابطه  $\sigma_f'$  استحکام الیاف در کرنش شکست زمینه یعنی  $\epsilon_m^*$  و  $\sigma_m^*$  استحکام کششی زمینه می‌باشد.

اگر مقدار الیاف بالا باشد، الیاف سهم اصلی را در مشارکت نیرو دارد. هنگامی که کرنش شکست کامپوزیت به مقدار کرنش شکست زمینه یعنی  $\epsilon_m^*$  برسد، زمینه دچار شکست شده و تمام بار بر روی الیاف منتقل می‌شود. این مکانیزم انتقال نیرو از زمینه به الیاف، به وسیله اتصال مطلوبی که بین زمینه و الیاف وجود دارد انجام می‌شود. نیرو در کامپوزیت تا ظرفیت کششی الیاف بالا رفته و سرانجام پاره شده که در نتیجه کل کامپوزیت دچار شکست می‌شود. از این رو استحکام کامپوزیت با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\sigma_c^* = \sigma_f^* V_f \quad (3)$$

رابطه بین استحکام کامپوزیت و کسر حجمی بصورت شماتیک در شکل 2 نشان داده شده است. همانطوری که مشخص است، در کسر حجمی بحرانی  $V_f'$  استحکام کامپوزیت در دو مسیر جداگانه تغییر می‌نماید.  $V_f'$  کسر حجمی خاصی را نشان می‌دهد که مشخص می‌نماید از کدام یک از روابط (2) یا (3) می‌بایست استفاده شود. این کسر حجمی از تقاطع دو منحنی استحکام به دست می‌آید [10]:

$$V_f' = \frac{\sigma_m^*}{(\sigma_f^* - \sigma_f' + \sigma_m^*)} \quad (4)$$

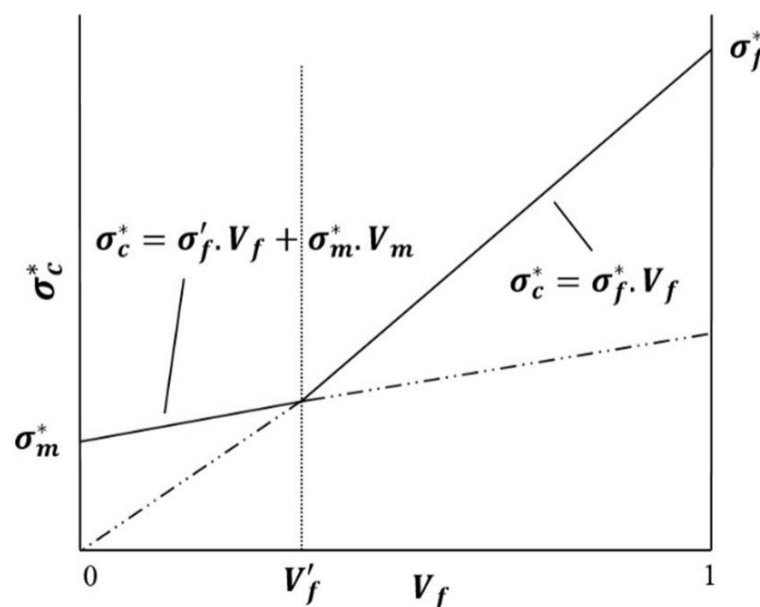
مدول کششی  $E_c$  کامپوزیتهای تک جهته با قانون مخلوطها از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$E_c = E_f V_f + E_m V_m \quad (5)$$

که در آن  $E_m$  و  $E_f$  به ترتیب مدول کششی الیاف و زمینه می‌باشند.

### 3- ساخت کامپوزیتهای هیبریدی چوب پلاستیک با الیاف ممتد

اتصال بین الیاف شیشه و چوب پلاستیک در بهبود خواص مکانیکی



شکل 2 استحکام کامپوزیت بر حسب کسر حجمی الیاف در کامپوزیتهای با زمینه ترد

#### 4-مدلسازی استحکام و سفتی کششی کامپوزیت‌های هیبریدی

همانطوری که بیان شد روینگ آغشته شده و کامپوزیت چوب پلاستیک به ترتیب بعنوان تقویت کننده و زمینه در نظر گرفته می‌شوند. بنابراین به دست آوردن مشخصات کششی این دو جز ضروری است.

#### 4-1- استحکام و سفتی روینگ‌های آغشته شده

هر یک از روینگ‌های شیشه قبل از ورود به دای نشان داده شده در شکل 4، در مرحله آغشته سازی از یک دای استوانه‌ای به قطر 2 میلیمتر کشیده شده‌اند. در اثر این کشیده شدن و همچنین انقباض مذاب پلیمر، قطر نهایی آن از 2 میلیمتر کمتر خواهد شد. همچنین باید به این نکته توجه داشت که سطح مقطع آن دیگر مقطع ایده‌آل گرد نخواهد بود. برای این منظور مساحت سطح مقطع روینگ آغشته شده  $A_i$  می‌بایست به روشی اندازه‌گیری شود. ابتدا با استفاده از یک رزین اپوکسی و سفت کننده<sup>3</sup> مربوط به آن تکه‌ای از روینگ آغشته شده در داخل در یک قالب باز، قالب‌گیری می‌شود. به رزین به مدت یک روز در دمای اتاق اجازه پخت داده شده است. سپس سطح آن با استفاده از سمباده‌های با شماره‌های 500 و 2000 سنگزنی شده و در پایان پولیش می‌شود. تصویری از سطح مقطع روینگ آغشته شده بعد از پولیش در شکل 6 نشان داده شده است. سپس این تصویر با استفاده از نرم‌افزار سالیدورکس<sup>4</sup> ارزیابی شده تا سطح مقطع روینگ آغشته شده ( $A_i$ ) محاسبه شود. آزمون کششی کامپوزیت هیبریدی در تحقیق قبلی [8] در نرخ کششی 2 mm/min انجام شده است. لذا، همین سرعت برای آزمون کششی روینگ‌های آغشته شده در این تحقیق در نظر گرفته شده است. از تقسیم بیشترین نیروی تحمل شده به وسیله روینگ آغشته به سطح مقطع آن، استحکام کششی  $\sigma_f^*$  روینگ‌های آغشته شده به دست می‌آید. مدول کششی از شیب نمودار تنش- کرنش در بین کرنش‌های 0/1% الی 0/4% تعیین می‌گردد. سطح مقطع کلی روینگ‌های آغشته شده در کامپوزیت هیبریدی  $n \times A_i$  از رابطه بدست می‌آید که در آن  $n$  تعداد روینگ‌های آغشته شده موجود در کامپوزیت هیبریدی است. کسر حجمی  $V_f$  از تقسیم سطح مقطع کلی روینگ‌های آغشته شده به سطح مقطع کامپوزیت هیبریدی یعنی ( $A$ ) به دست می‌آید. این نکته می‌بایست ذکر شود که به دلیل انقباض محصول اکستروژن شده در خروجی دای، قطر تمامی محصولات اکستروژن شده می‌بایست اندازه‌گیری شود تا مقدار صحیح کسر حجمی الیاف (یا روینگ) به دست آید.

#### 4-2- استحکام و سفتی کامپوزیت‌های چوب پلاستیک

در تحقیق قبلی [8] کامپوزیت‌های چوب پلاستیک تقویت نشده با درصد‌های وزنی چوب 60 و 70 مورد آزمون کشش قرار گرفته‌اند. خلاصه‌ای از مشخصات کششی آنها در جدول 2 آمده است.

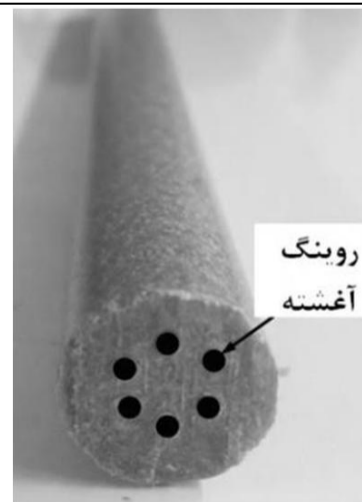


شکل 6 تصویری از سطح مقطع روینگ آغشته شده

شکل دهنده شماره (9)، 14 میلیمتر در نظر گرفته شده است. در این تحقیق سه پارامتر مورد بررسی قرار گرفته است: (1) تعداد ورودی‌های روینگ شیشه در چهار سطح، (2) درصد وزنی چوب در دو سطح و (3) وجود یا عدم وجود جفت کننده<sup>1</sup> مالئیک پیوند زده شده با پلی اتیلن<sup>2</sup>. جفت کننده‌ها موجب بهبود سطحی ذرات چوب و مذاب پلی اتیلن می‌شود و اتصال قوی‌تری برقرار می‌کند. در مجموع 16 نوع کامپوزیت ساخته شده است که در جدول 1 لیست آنها به همراه اجزای تشکیل دهنده آنها آمده است. لازم به ذکر است که اگر کامپوزیتی با روینگ تقویت شده باشد با حرف R (مخفف روینگ) و به همراه تعداد روینگها بصورت کد کامپوزیت نشان داده شده است. اگر کامپوزیت چوب پلاستیک با روینگ تقویت نشده باشد بدون حرف R و اگر دارای جفت کننده باشد با حرف M نشان داده شده است. بعنوان مثال کدهای WPC60، WPC602R و WPC60M2R به ترتیب نشان دهنده کامپوزیت چوب پلاستیک 60 درصد وزنی چوب، کامپوزیت هیبریدی 60 درصد وزنی چوب با دو روینگ و در نهایت کامپوزیت هیبریدی با دو روینگ به همراه جفت کننده است. در شکل 5 نمونه‌ای از کامپوزیت اکستروژن شده در درصد وزنی چوب 70 که با شش روینگ تقویت شده است نمایش داده شده است.

جدول 1 کامپوزیت‌های اکستروژن شده و اجزای تشکیل دهنده

کد کامپوزیت	درصد وزنی چوب	تعداد روینگ آغشته شده	درصد وزنی جفت کننده
WPC60	60	0	0
WPC602R	60	2	0
WPC604R	60	4	0
WPC606R	60	6	0
WPC70	70	0	0
WPC702R	70	2	0
WPC704R	70	4	0
WPC706R	70	6	0
WPC60M	60	0	3
WPC60M2R	60	2	3
WPC60M4R	60	4	3
WPC60M6R	60	6	3
WPC70M	70	0	3
WPC70M2R	70	2	3
WPC70M4R	70	4	3
WPC70M6R	70	6	3



شکل 5 کامپوزیت هیبریدی با 70 درصد وزنی چوب و دارای شش روینگ؛ دایره‌های سیاه معرف روینگ‌های آغشته شده هستند.

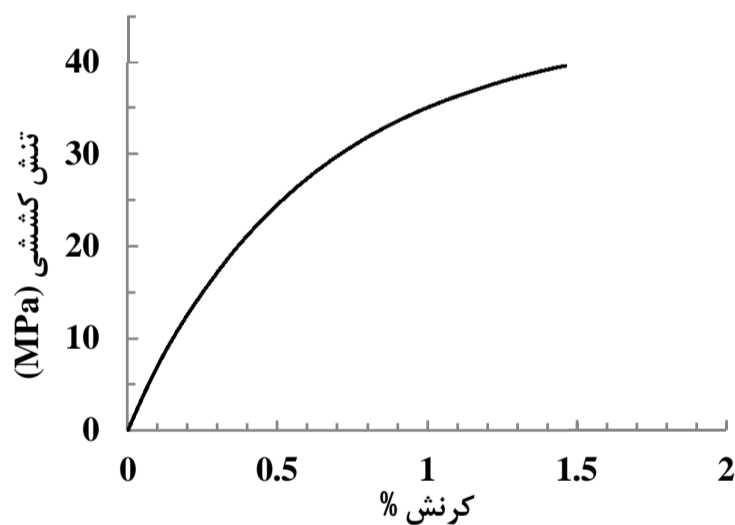
3- Hardener  
4- SolidWorks

1- Coupling agent  
2- Maleic grafted polyethylene (MAPE)

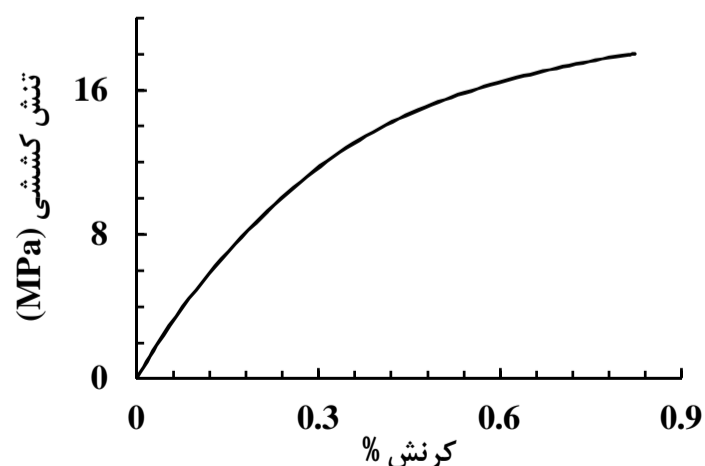
همانطوریکه از نمودار شکل 8 مشخص است در برخی از کامپوزیتهای هیبریدی کسر حجمی  $V_f'$  از مقدار اندازه‌گیری شده کسر حجمی  $V_f$  بزرگتر است. بعنوان مثال در تمامی چوب پلاستیکهای با 60 درصد وزنی، مقدار  $V_f'$  از  $V_f$  کوچکتر است. درحالی‌که در کامپوزیتهای چوب پلاستیک با جفت کننده مالئیک تنها کامپوزیت هیبریدی تقویت شده با شش روینگ دارای  $V_f'$  کوچکتر از  $V_f$  است. این مورد نشان‌دهنده این است که هنگامی که زمینه مستحکم‌تر باشد، کامپوزیت می‌بایست دارای درصد بالاتری از تقویت کننده باشد بطوریکه بار اعمال شده بعد از شکست زمینه به الیاف منتقل شده و الیاف بتواند بار اعمال شده را تحمل نماید.

نمودارهای تنش-کرنش کششی دو نمونه از کامپوزیتهای هیبریدی چوب-پلی اتیلن، بعنوان مثال کامپوزیتهای 70 درصد وزنی چوب و دو روینگ در دو حالت با و بدون جفت کننده مالئیک به ترتیب در شکل‌های 9 و 10 آمده است. از شکل 8 مشخص است در حالتی که از جفت کننده مالئیک استفاده شود استحکام آنها از معادله (2) و در حالتی که از مالئیک استفاده نشود از معادله (3) استفاده خواهد شد. مقادیر پیش‌بینی شده استحکام کششی برای این دو حالت (با و بدون مالئیک) به ترتیب برابر 37.65MPa و 20.99MPa است. همانطوری که از نمودارهای اشکال 9 و 10 مشخص است مقادیر پیش‌بینی شده با نتایج تجربی آنها مطابقت قابل قبولی دارد.

به همین ترتیب استحکامهای کششی در کامپوزیتهای هیبریدی محاسبه شده با استفاده از معادلات (2) و (3) علاوه بر نتایج تجربی بدست آمده در مرجع [8] در شکل‌های 11 و 12 ارائه شده است. همانطوری که مشاهده می‌شود تطابق قابل قبولی بین نتایج بدست آمده از مدلسازی و نتایج تجربی وجود دارد. بطوریکه متوسط خطای بین استحکام کششی پیش‌بینی شده و نتایج تجربی حدود 9/5% است. این مقدار خطا را می‌توان به



شکل 9 نمودار تنش-کرنش کششی کامپوزیت چوب پلی اتیلن 70 درصد وزنی با دو روینگ و مالئیک



شکل 10 نمودار تنش-کرنش کششی کامپوزیت چوب پلی اتیلن 70 درصد وزنی با دو روینگ و بدون مالئیک

جدول 2 مشخصات کششی کامپوزیتهای چوب پلاستیک تقویت نشده [8]

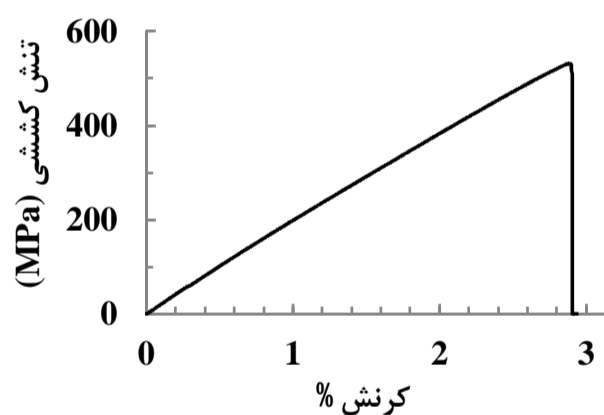
کد WPC	استحکام (MPa)	مدول (GPa)	کرنش شکست
WPC60	15/4±1/48	5/46±0/77	0/68±0/14
WPC70	11/61±0/56	5±0/4	0/53±0/09
WPC60M	23/95±1/13	5/42±0/6	1/22±0/27
WPC70M	28/81±2/1	7/15±0/38	1/35±0/28

تنش کششی در روینگ آغشته در کرنش شکست زمینه  $\sigma_f'$  برای هر کدام از کامپوزیتهای چوب پلاستیک از نمودار تنش-کرنش روینگ آغشته شده تعیین می‌شود. با استفاده از رابطه 4، کسر حجمی بحرانی  $V_f'$  در هر ترکیب از کامپوزیت هیبریدی به دست آمده و با مقدار  $V_f$  اندازه‌گیری شده در هر مورد مقایسه می‌شود. بر اساس تئوری بیان شده، برای کامپوزیتهای هیبریدی که در آن  $V_f < V_f'$  باشد از رابطه 2 و در غیر این صورت از رابطه (3) استفاده می‌شود.

### 5- نتایج و بحث

سطح مقطع روینگ آغشته شده  $2.54 \text{ mm}^2$  اندازه‌گیری شد. اطلاعات تنش-کرنش از نمودار آزمون کشش در شکل 7 آمده است. همانطوری که مشخص است روینگهای آغشته شده بصورت ناگهانی دچار شکست شده‌اند. مشخصات کشش آنها مانند استحکام، مدول و کرنش شکست از نمودار به راحتی قابل دستیابی است که در جدول 3 نشان داده شده است.

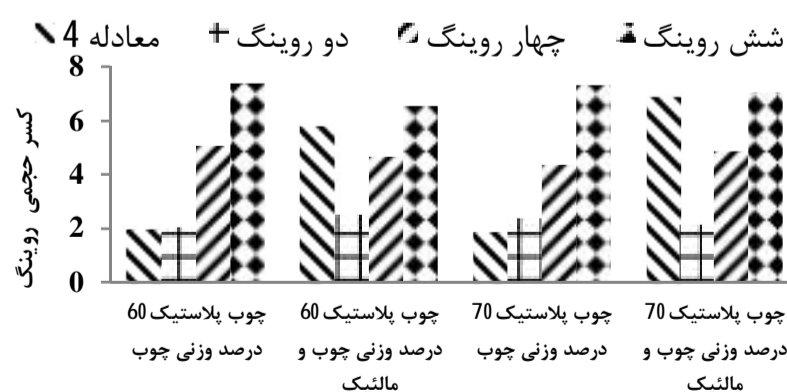
در کامپوزیتهای هیبریدی کسر حجمی بحرانی  $V_f'$  از رابطه 4 استفاده می‌شود. برای تمامی این کامپوزیتهای این مقدار برآورد شده و در شکل 8 مقایسه‌ای بین  $V_f$  و  $V_f'$  آمده است.



شکل 7 منحنی تنش-کرنش روینگ آغشته شده

جدول 3 مشخصات کششی روینگ آغشته شده

کرنش شکست %	مدول (GPa)	استحکام (MPa)
2/82±0/21	18/75±0/56	540±21/6



شکل 8 مقایسه بین کسر حجمی بحرانی محاسبه شده از رابطه (4) و کسر حجمی اندازه‌گیری شده برای کامپوزیتهای هیبریدی

## 6- نتیجه گیری

در این تحقیق، استحکام و مدول کششی کامپوزیتهای چوب پلی اتیلن تقویت شده با الیاف ممتد شیشه بررسی گردید. ترکیب پلی اتیلن و ذرات چوب بعنوان زمینه و روینگهای ممتد شیشه بعنوان تقویت کننده در نظر گرفته شده اند. روینگ آغشته شده مورد آزمون کشش قرار گرفته و استحکام و مدول کششی آنها بدست آمد. این اطلاعات به همراه نتایج بدست آمده از تحقیق پیشین وارد مدل پیشنهادی شد. کسر حجمی بحرانی در هر کامپوزیت هیبریدی به دست آمد. مطابق با آن استحکام مربوطه محاسبه شده و با نتایج تجربی مقایسه شده است. همچنین مدول کششی نیز با قانون مخلوطها محاسبه شده که با نتایج تجربی مقایسه گردید. بین نتایج تجربی و نتایج پیش بینی شده استحکام و مدول کششی تطابق قابل قبولی وجود داشته که بیان کننده کارآمدی این مدل در پیش بینی خواص کششی کامپوزیتهای هیبریدی چوب پلاستیک تقویت شده با الیاف ممتد است. پیش از طراحی کامپوزیتهای هیبریدی می توان با استفاده از نتایج این تحقیق مقدار استحکام مورد نظر را بدست آورده و بر اساس آن فرآیند ساخت را طراحی نمود.

## 7- فهرست علائم

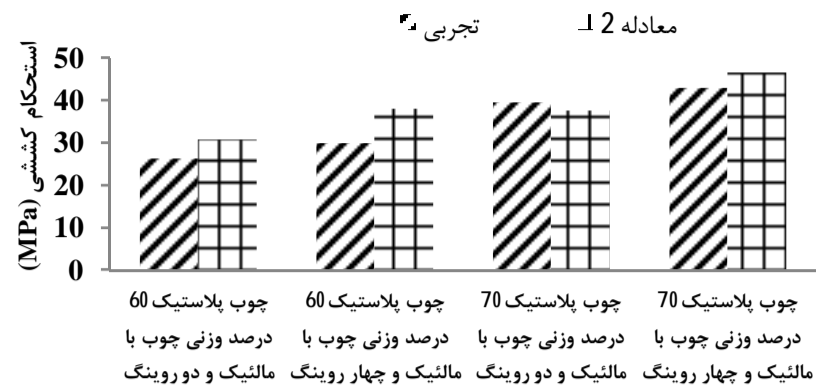
$A$	مساحت سطح مقطع کلی کامپوزیت هیبریدی
$A_i$	مساحت سطح مقطع روینگ آغشته
$A_{it}$	مساحت سطح مقطع کلی روینگ آغشته در کامپوزیت هیبریدی
$E_c$	مدول کششی کامپوزیت
$E_f$	مدول کششی روینگ شیشه
$E_m$	مدول کششی زمینه
$n$	تعداد روینگ آغشته
$V_f$	کسر حجمی روینگ شیشه
$V_m$	کسر حجمی زمینه
$V_f'$	کسر حجمی بحرانی روینگ شیشه

## علائم یونانی

$\epsilon_f^*$	کرنش شکست کششی روینگ شیشه
$\epsilon_m^*$	کرنش شکست کششی زمینه
$\sigma_f$	تنش کششی در روینگ شیشه
$\sigma_c^*$	استحکام کششی نهایی کامپوزیت
$\sigma_f'$	تنش کششی روینگ شیشه در کرنش شکست زمینه
$\sigma_f^*$	استحکام کششی روینگ شیشه
$\sigma_m^*$	استحکام کششی زمینه
$\sigma_c$	تنش کششی در کامپوزیت
$\sigma_m$	تنش کششی در زمینه

## 8- مراجع

- [1] M. Ashrafi, A. Vaziri, H. Nayeb-Hashemi, Effect of Processing Variables and Fiber Reinforcement on the Mechanical Properties of Wood Plastic Composites, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 10.1177/0731684411431120, 2011.
- [2] Y-H. Cui, J. Tao, Fabrication and Mechanical Properties of Glass Fiber-Reinforced Wood Plastic Hybrid Composites, *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 112, No. 3, pp. 1250-1257, 2009.
- [3] T. Ohta, Y. Takai, YW. Leong, H. Hamada, Mechanical Properties of Injection-Moulded Jute/Glass Fibre Hybrid Composites, *Polymers & Polymer Composites*, Vol. 17, No. 8, pp. 487-493, 2009.
- [4] GM. Rizvi, H. Sernalul, Glass-Fiber-Reinforced Wood/Plastic Composites, *Journal of Vinyl & Additive Technology*, Vol. 14, No. 1, pp. 39-42, 2008.
- [5] L. Jiang, M.P. Wolcott, J. Zhang, K. Englund, Flexural properties of surface reinforced wood/plastic deck board, *Polymer Engineering & Science*, Vol. 47, No. 3, pp. 281-288, 2007.
- [6] S. Tamrakar, S. Shaler, R. Lopez-Anido, Mechanical Property

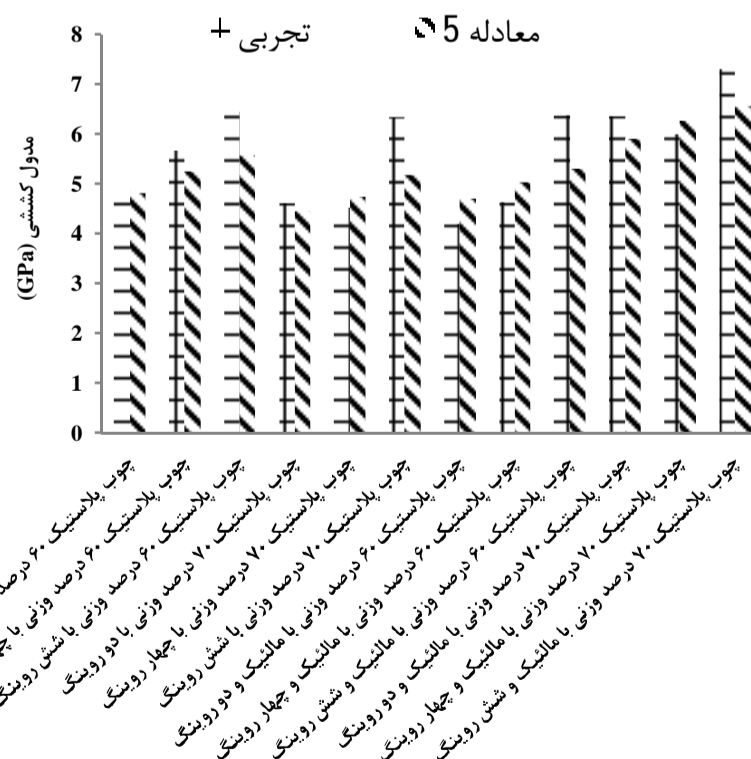


شکل 11 مقایسه بین استحکام نهایی کششی کامپوزیتهای هیبریدی از نتایج تجربی و تئوری (کسر حجمی الیاف کوچکتر از کسر حجمی بحرانی الیاف)



شکل 12 مقایسه بین استحکام نهایی کشش کامپوزیتهای هیبریدی از نتایج تجربی و تئوری (کسر حجمی الیاف بزرگتر از کسر حجمی بحرانی الیاف)

پاره شدن تعدادی از رشته های شیشه روینگ در مرحله آغشته سازی (شکل 3)، پارگی برخی از رشته های روینگ آغشته شده در هنگام ورود به دای کامپوزیت هیبریدی (شکل 4) و همچنین عدم مستقیم بودن روینگ و قرارگیری نامنظم آنها در داخل نمونه کامپوزیت هیبریدی نسبت داد. از آنجایی که کنترل فرآیند اکستروژن در هنگام تولید نمونه ها به پارامترهای بسیاری بستگی دارد، این مقدار خطای متوسط (هر چند نسبتاً بالا) را می توان قابل قبول دانست. مدول کششی کامپوزیتهای هیبریدی از رابطه (5) محاسبه می شود که در شکل 13 همراه با نتایج تجربی آنها نمایش داده شده است. برای مدول کششی نیز متوسط خطاها بین نتایج تئوری و تجربی 8/6% است.



شکل 13 مقایسه بین مدول کششی نتایج تجربی و تئوری

- [8] A. Zolfaghari, A.H. Behraves, A. Adli, Continuous glass fiber reinforced wood plastic composite in extrusion process: Mechanical properties, *Materials & Design*, Vol. 51, No. 9, pp. 701-708, 2013.
- [9] A.G. Facca, *Predicting the Tensile Modulus and Strength of Single and Hybrid Natural Fiber Reinforced Thermoplastic Composites*, PhD thesis, Chemical Engineering and Applied Chemistry, University of Toronto, Toronto, 2007.
- [10] D. Hull, *An introduction to composite materials*, Britain, Cambridge university press, pp. 127-130, 1981.
- [7] A. Zolfaghari, A.H. Behraves, A. Adli, M.T. Sarabi, Continuous glass fiber reinforced wood plastic composite in extrusion process: Feasibility and processing, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 32, No. 1, pp. 52-60, 2013.
- Characterization of Fiber-Reinforced Polymer Wood-Polypropylene Composite Panels Manufactured Using a Double Belt Pressing Technology, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 24, No. 9, pp. 1193-1200, 2012.