

خواص فیزیکی و مکانیکی کامپوزیت روغن سویای اپوکسی آکرلیکی-کاه گندم

رضا غفاری ثانی^۱، فروغ دستوریان^{۲*}، سید مجید ذبیح‌زاده^۲ و محمد تسوجی^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی چوب و فرآورده‌های سلولزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران

۲- نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی چوب و فرآورده‌های سلولزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران،

پست الکترونیک: f.dastoorian@sanru.ac.ir

۳- دانشیار، گروه مهندسی چوب و فرآورده‌های سلولزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ایران

۴- دانش آموخته دکتری دانشگاه ویرجینیا، محقق شیمی بخش تحقیق و توسعه، شرکت مواد شیمیایی هگزایون، تگزاس، آمریکا

تاریخ دریافت: مرداد ۱۴۰۱ تاریخ پذیرش: شهریور ۱۴۰۱

چکیده

در سال‌های اخیر استفاده از روغن‌های گیاهی به‌عنوان ماده زمینه در کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف طبیعی، به دلیل ملاحظات فزاینده زیست‌محیطی مورد توجه قرار گرفته‌اند. در این تحقیق از ترکیب روغن سویای اپوکسی آکرلیکی با مالئیک انیدرید و استایرن به‌عنوان ماده زمینه و آرد کاه گندم به‌عنوان پرکننده برای ساخت یک کامپوزیت نسبتاً زیست‌تخریب‌پذیر استفاده شد. برای پیدا کردن زمان بهینه سنتز رزین، در هنگام واکنش مالئیک انیدرید با روغن سویای اپوکسی آکرلیکی، در سه بازه زمانی ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ دقیقه پلیمر تهیه و دانسیته اتصالات عرضی پلیمر، با روش واکنشیدگی حلال تعیین شد. زمان بهینه سنتز رزین روغن سویای اپوکسی آکرلیکی با مالئیک انیدرید، ۹۰ دقیقه به دست آمد. سپس رزین سویای اپوکسی آکرلیکی مالئیک‌دار با ۲۵ درصد وزنی استایرن ترکیب شد و کاه گندم باقی‌مانده روی الک مش ۶۰ در سه نسبت وزنی ۲۰٪، ۳۰٪ و ۴۰٪ به رزین اضافه و به‌صورت دستی مخلوط شد. مخلوط رزین و کاه گندم در یک قالب فلزی ریخته شد و پرس به‌صورت دستی اعمال شد. سپس قالب در آون در دمای ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت قرار گرفت. از طیف‌سنجی زیر قرمز، وزن‌سنجی حرارتی، آزمون کشش و ضربه برای ارزیابی و تحلیل خواص فیزیکی و مکانیکی کامپوزیت حاصل استفاده شد. نتایج طیف‌سنجی زیر قرمز، حکایت از برقراری پیوند اتری بین گروه‌های هیدروکسیل کاه گندم با گروه‌های کربونیل رزین داشت. نتایج آزمون جذب آب نشان داد که بین مقادیر جذب آب در سه سطح کاه گندم تا زمان غوطه‌وری ۱۴۴ ساعت اختلاف معناداری وجود نداشت ولی در زمان غوطه‌وری ۱۶۸ ساعت با افزایش مقدار کاه گندم جذب آب افزایش یافت. البته بین مقادیر واکنشیدگی ضخامت کامپوزیت‌های حاوی مقادیر مختلف کاه گندم در زمان‌های غوطه‌وری مختلف اختلاف معناداری وجود نداشت. با افزایش کاه گندم مقدار مقاومت و مدول کششی به میزان معناداری افزایش یافت. همچنین افزایش کاه گندم موجب بهبود مقاومت به ضربه کامپوزیت حاصل گردید.

واژه‌های کلیدی: استایرن، مالئیک انیدرید، مقاومت کششی، مقاومت به ضربه، وزن‌سنجی حرارتی.

مقدمه

با الیاف (FRP: Fiber Reinforced Polymer)، کاربرد

در طی چند دهه اخیر، کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده گسترده و روزافزون در صنایع هوافضا، حمل‌ونقل، ابزار

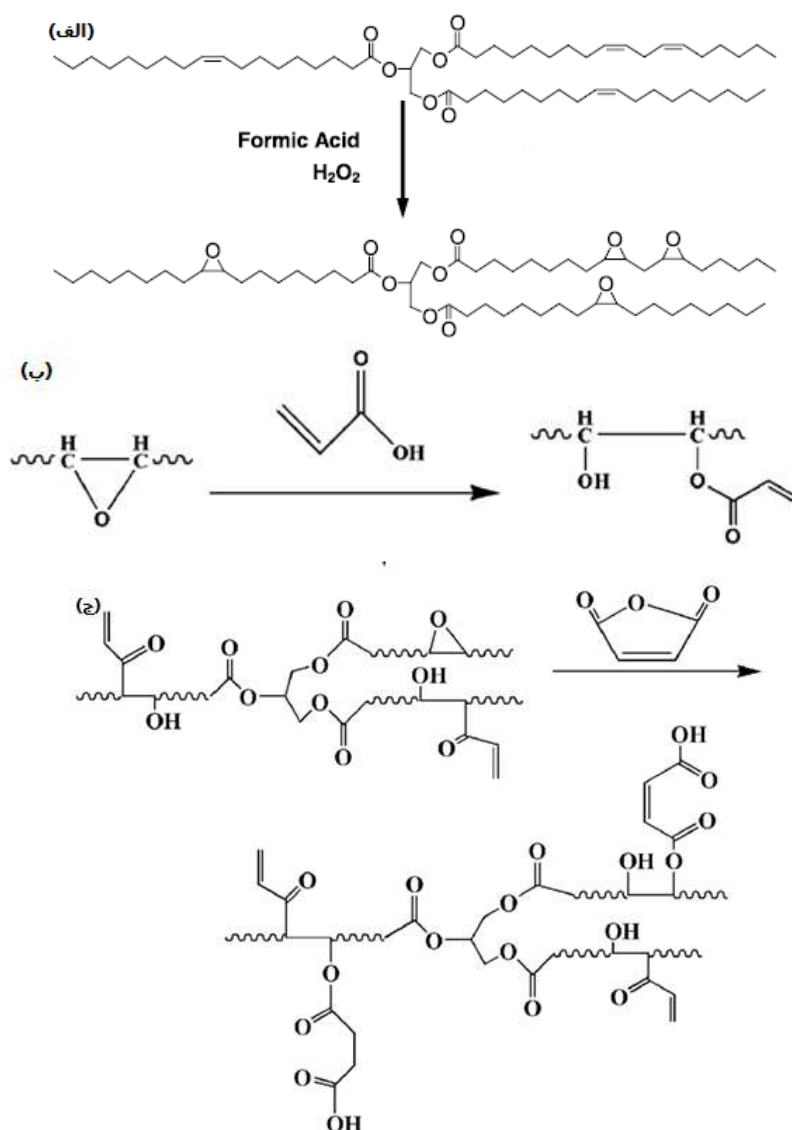
گیاهی در حالت اصلاح نشده، به دلیل پیوندهای دوگانه غیر مزدوج و داخلی، از واکنش پذیری پایینی برخوردارند و برای تبدیل شدن به یک رزین گرماسخت نیاز به اصلاح شیمیایی دارند (Imai *et al.*, 2013). پیوندهای دوگانه موجود در ساختار روغن‌ها، امکان اصلاح شیمیایی از قبیل اپوکسی‌دار کردن را فراهم می‌کنند (Biermann *et al.*, 2000).

روغن‌های گیاهی اپوکسی‌دار شده می‌توانند پلیمر شوند و تشکیل شبکه الاستومری دهند (Zhu *et al.*, 2004). هرچند به دلیل واکنش پذیری کم این گروه‌های اپوکسی و تمایل آنها به برقراری پیوندهای درون مولکولی، همه روغن‌های اپوکسی، رزین‌هایی با قابلیت برقراری پیوندهای عرضی ضعیف با خواص مکانیکی پایین محسوب می‌شوند (Raquez *et al.*, 2010). واکنش پذیری پایین گروه‌های اپوکسی عمدتاً به دلیل ممانعت فضایی ناشی از اسیدهای چرب است، بنابراین خواص مکانیکی و حرارتی پایین عمدتاً ناشی از روغن واکنش نداده و اثر نرم‌کنندگی زنجیرهای طویل اسید چرب می‌باشد (Karger-Kocsis *et al.*, 2013). با شکستن حلقه اکسیران و وارد کردن عوامل برقرارکننده اتصالات عرضی از قبیل آمین‌ها، آکرلیک اسید و انیدریدها می‌توان امکان برقراری واکنش‌های عرضی را افزایش داده و به خواص مکانیکی مطلوب دست یافت (Gerbase *et al.*, 2002).

رایج‌ترین روغن گیاهی مورد استفاده برای رزین‌ها، روغن سویای اپوکسی است (Tan *et al.*, 2013) که تری-گلیسریدهای آن به ازای هر مولکول به‌طور متوسط پنج پیوند اشباع نشده دارد. شکل ۱-الف شمای واکنش پیوندهای دوگانه روغن سویا را با اسید پراکسی و تشکیل روغن سویای اپوکسی (ESO)، شکل ۱-ب واکنش آکرلیک اسید با روغن سویای اپوکسی و تشکیل روغن سویای اپوکسی آکرلیکی (AESO) و شکل ۱-ج واکنش مالئیک‌دار کردن روغن سویای اپوکسی آکرلیکی را نشان می‌دهد. بنابراین ملاحظه می‌شود با مالئیک‌دار کردن، موقعیت‌های غیراشباع در ساختار روغن افزایش یافته و واکنش پذیری آن به مراتب بیشتر خواهد شد.

ورزشی، صنایع ساختمانی و صنایع الکتریکی پیدا کرده‌اند و از مقاومت و سفتی ویژه بالاتری در مقایسه با پلیمر خالص برخوردارند. این کامپوزیت‌ها از دو بخش ماده زمینه پلیمری و الیاف تقویت‌کننده یا پرکننده تشکیل شده‌اند. الیاف تقویت‌کننده وظیفه تحمل بار را به عهده دارند، درحالی‌که ماده زمینه نقش انتقال بار و ایجاد یکپارچگی و پیوستگی را در کامپوزیت ایفا می‌کند (Thakur & Thakur, 2014). متداول-ترین الیاف مورد استفاده در کامپوزیت‌های FRP، الیاف کربن، آرامید، شیشه و الیاف طبیعی هستند. الیاف کربن از مقاومت و سفتی بالایی برخوردارند و استفاده از آنها در کامپوزیت‌ها برای مصارف هوافضا، ساختمانی و راکت تنیس و چوب گلف توسعه یافته است؛ هرچند از قیمت بالا و ماهیت شکننده برخوردارند. الیاف آرامید دارای ویژگی‌های عالی هستند ولی قیمت آنها بسیار بالاست. استفاده از الیاف شیشه در این کامپوزیت‌ها رواج بیشتری دارد؛ هرچند اثر تقویت‌کنندگی آنها به اندازه الیاف کربن نیست ولی از قیمت پایین‌تری نسبت به الیاف کربن برخوردارند. استفاده از الیاف طبیعی به جای الیاف سنتزی، به دلیل در دسترس بودن، تجدیدپذیری، مقاومت ویژه بالا و قیمت ارزان مورد توجه قرار گرفته است. الیاف طبیعی به لحاظ اثر تقویت‌کنندگی مانند الیاف کربن نیستند ولی با توجه به میزان استفاده، با الیاف شیشه برابری می‌کنند (Willimas & Wool, 2000).

پلیمرهای مورد استفاده در کامپوزیت‌های FRP می‌توانند گرمانرم یا گرماسخت باشند. پلیمرهای گرمانرم از قبیل پلی-اتیلن، پلی پروپیلن، پلی وینیل کلراید و پلی اتیلن ترفتالات در اثر حرارت‌دهی دوباره نرم می‌شوند بدون اینکه تغییری در ساختار شیمیایی آنها رخ بدهد. پلیمرهای گرماسخت شامل انواع پلی‌استرهای غیراشباع، وینیل‌استر و رزین‌های اپوکسی در هنگام پلیمر شدن دچار واکنش‌های شیمیایی می‌شوند، بنابراین در اثر حرارت‌دهی دوباره، ذوب نخواهند شد (May, 1988). رزین‌های اپوکسی مشتق شده از روغن‌های گیاهی به دلیل غیرسمی بودن می‌توانند جایگزین ارزان‌قیمت و سبز برای پلیمرهای حاصل از مشتقات نفتی در کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف شوند (Imai *et al.*, 2013). روغن‌های



شکل ۱- الف. واکنش اپوکسی دار شدن روغن سویا (Lu et al., 2005)، ۱- ب. واکنش روغن سویای اپوکسی با اسید آکرلیک و ۱- ج. واکنش روغن سویای اپوکسی آکرلیکی با مالئیک انیدرید (Mandal et al., 2018)

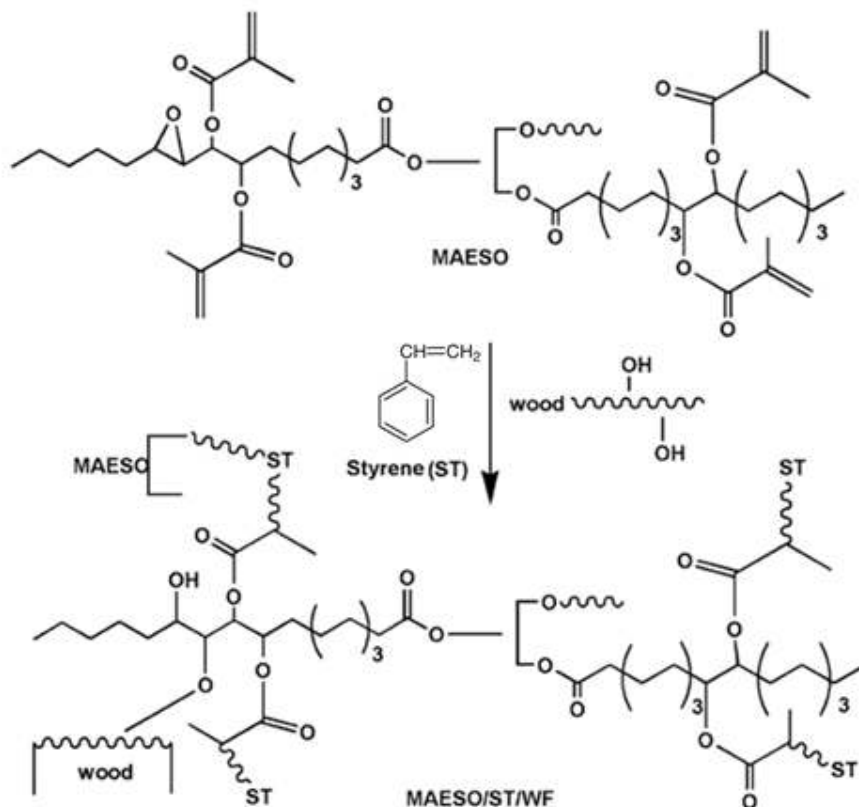
Figure 1. 1-a) epoxidation reaction of soybean oil (Lu et al., 2005), (1-b) reaction of epoxidized soybean oil with acrylic acid, 1-c) Reaction of acrylated epoxidized soybean oil (AESO) with maleic anhydride (Mandal et al., 2018)

کامپوزیت می‌شود (Liu et al., 2012). البته باید در نظر داشت که استایرن یک ماده سمی، زیست‌تخریب‌ناپذیر و دارای ترکیبات آلی فرار است و جایگزینی بخشی از آن با مواد زیست‌تخریب‌پذیر به لحاظ زیست‌محیطی یک مزیت محسوب می‌شود. استایرن برای پلیمر شدن نیاز به آغازگری مانند بنزوئیل پراکساید یا بوتیل پراکسی بنزوات دارد

افزودن استایرن به رزین حاصل از روغن سویای اپوکسی، علاوه بر رقیق‌کنندگی و کاهش ویسکوزیته، موجب افزایش سفتی می‌شود (Li & Larock, 2003; Meiorin et al., 2013). مولکول استایرن دارای حلقه آروماتیکی و پیوند دوگانه کربن-کربن است و از طریق واکنش پلیمری رادیکال آزاد موجب افزایش سفتی و دانسیته اتصالات عرضی

با گروه‌های هیدروکسیل چوب را نشان می‌دهد.

شکل ۲. واکنش استایرن و روغن سویای اپوکسی آکرلیکی مالٹیک دار (Williams & Wool, 2000; Can *et al.*, 2001).



شکل ۲- واکنش بین MAESO، استایرن و چوب (Mandal 2019)

Figure 2. Reaction between MAESO, styrene and wood (Mandal 2019)

(Berns & Caesar, 1999). سلول‌های اپیدرم کاه گندم با یک لایه مومی شکل پوشانیده شده‌اند که به دلیل ماهیت غیرقطبی از ترشوندگی پایین برخوردار بوده و اگر از رزین‌های قطبی برای ساخت کامپوزیت کاه گندم استفاده شود به دلیل چسبندگی ضعیف، فرآورده حاصل دچار افت مقاومت‌های مکانیکی خواهد شد (Tasooji *et al.*, 2010). تحقیقات زیادی در مورد از بین بردن یا اصلاح این لایه مومی شکل با هدف بهبود کیفیت اتصال انجام شده است (Han *et al.*, 2001؛ Zhang *et al.*, 2003). راهکار دیگر حفظ لایه مومی شکل و استفاده از رزین‌های سازگار با این لایه مومی همانند رزین‌های بر پایه روغن است (Tasooji *et al.*, 2010).

روغن‌های گیاهی در حالت اصلاح شده و در ترکیب با تقویت‌کننده/پرکننده‌های طبیعی (مواد لیگنوسلولزی) برای ساخت کامپوزیت قابل استفاده هستند. در دهه‌های اخیر با توجه به پدیده اثر گلخانه‌ای و انتشار گاز دی‌اکسیدکربن ناشی از سوزاندن پسماندهای کشاورزی، مدیریت پسماندهای کشاورزی و رسیدن به کشاورزی پایدار از جایگاه ویژه‌ای برخوردار شده است.

کاه گندم از جمله پسماندهای کشاورزی است که در مقایسه با چوب حاوی مقدار مشابهی هولو سلولز (۷۰-۷۵ درصد) است اما مقدار سلولز آن کمتر است. مقدار لیگنین کاه گندم تا حدودی کمتر از چوب می‌باشد و خاکستر بیشتری دارد

اپوکسی آکرلیکی در ترکیب با تری آلایل مالئویمارات (۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ درصد وزنی) اشتقاق یافته از روزین، به عنوان ماده زمینه در ساخت کامپوزیت حاوی ۴۰ درصد وزنی آرد چوب سوزنی برگ استفاده کردند. آنان دریافتند که ترکیب حاوی ۳۰ درصد وزنی تری آلایل مالئویمارات از بهترین مقاومت مکانیکی و پایداری حرارتی بالاتر برخوردار بود، همچنین بیان کردند که این ترکیب می تواند جایگزین خوبی برای ترکیبات آروماتیک یا سیکلوالیفاتیکی همانند استایرن در ساخت کامپوزیت سبز باشد.

برای توسعه کاربرد ساختمانی کامپوزیت های FRP، پلیمر مورد استفاده به عنوان ماده زمینه باید از مقاومت کافی برای انتقال تنش بدون ایجاد ترک و از دانسیته اتصالات عرضی بالا و دمای انتقال شیشه ای بالاتر از دمای محیط برخوردار باشد. بنابراین پیدا کردن شرایط دما و زمان بهینه سنتز روزین از اهمیت بالایی برخوردار است. در این تحقیق از ترکیب روغن سویای اپوکسی آکرلیکی با مالئیک انیدرید و استایرن به عنوان ماده زمینه و آرد کاه گندم به عنوان پرکننده در سه نسبت وزنی ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد برای ساخت یک کامپوزیت نسبتاً زیست تخریب پذیر استفاده شد. برای پیدا کردن زمان بهینه سنتز روزین، در هنگام واکنش مالئیک انیدرید با روغن سویای اپوکسی، در چند بازه زمانی پلیمر تهیه و دانسیته اتصالات عرضی پلیمر، با هدف حصول به ماده زمینه با ویژگی های بهینه محاسبه شد.

مواد و روش ها

کاه گندم از مزارع کشاورزی استان مازندران تهیه و توسط آسیاب به آرد تبدیل شد، سپس آرد باقیمانده روی الک ۶۰ مش، بعد از خشک شدن در آون در دمای ۷۰ درجه سانتی گراد به مدت ۲۴ ساعت، برای ساخت کامپوزیت مورد استفاده قرار گرفت. برای ساخت روزین از روغن سویای اپوکسی آکرلیکی (شرکت فناوران شیمی سپاهان)، مالئیک انیدرید (Merck Co.)، دی متیل بنزیل آمین (Merck Co.)، هیدروکینون (Merck Co.)، بنزویل پرکسید (CDH Co. India) و استایرن (پتروشیمی تبریز) استفاده شد و از حلال تولوئن نیز برای واکنش پذیری پلیمر و تعیین دانسیته اتصالات عرضی استفاده گردید.

تاکنون تحقیقاتی در زمینه استفاده از روغن های زیستی آکرلیکی به عنوان روزین در ساخت تخته خرده چوب ساخته شده از کاه گزارش شد که در همه آنها به برتری روغن نسبت به اوره فرمالدهید به عنوان روزین، به دلیل قطبیت کمتر و چسبندگی بهتر با ذرات کاه گندم اتفاق نظر داشتند (Saremi Shakeri *et al.*, 2010; Tasooji *et al.*, 2015). همچنین تحقیقی در مورد ساخت کامپوزیت با روغن آفتابگردان اپوکسی آکرلیکی در ترکیب با استایرن و لیاف گیاهی در دو سطح تیمار قلیایی شده و تیمار قلیایی نشده و در نسبت وزنی ۵ تا ۱۰ درصد انجام و بهترین خواص مکانیکی و حرارتی در نسبت وزنی ۷/۵ درصد لیاف تیمار قلیایی شده حاصل شد (Kadem *et al.*, 2018).

Mandal و همکاران (۲۰۱۸) از روغن سویای اپوکسی آکرلیکی و مالئیک انیدرید و ۳۳ درصد وزنی استایرن به عنوان ماده زمینه پلیمری در ساخت کامپوزیت تقویت شده با آرد سوزنی برگ استفاده کردند. همچنین مقادیر یک، سه و پنج درصد وزنی نانورس اصلاح شده به کامپوزیت اضافه کردند و اظهار داشتند که بهترین مقاومت کششی و خمشی در سطح ۳ درصد نانورس به دست آمد.

Mandal و همکاران (۲۰۱۹) کامپوزیت گرماسخت از روغن سویای عامل دار و آرد چوب سوزنی برگ (۴۰ درصد وزنی نسبت به وزن کل) با روش قالب گیری فشاری تهیه کردند. در ابتدا روغن سویای اپوکسی را با اسید متاکریلیک و بعد با انیدرید متاکریلیک اصلاح کردند. همچنین برای مقایسه، از روزین خالص و روزین مخلوط شده با استایرن (با نسبت آرد چوب به روزین به استایرن ۴۰:۴۵:۱۵) در تهیه کامپوزیت استفاده کردند. آنان اذعان داشتند با ترکیب روزین حاصل با استایرن، مقاومت خمشی و مقاومت کششی کامپوزیت های حاصل در مقایسه با سطح فاقد استایرن بهبود قابل ملاحظه ای یافت. همچنین حضور استایرن در ماده زمینه موجب بهبود پایداری حرارتی، مقاومت در برابر جذب آب و مقاومت در برابر آتش شد. همچنین با افزایش مقدار انیدرید متاکریلیک در روزین، خواص فیزیکی و مکانیکی بهبود یافت.

Mandal و همکاران (۲۰۲۰) از ترکیب روغن سویای

کسر حجمی پلیمر (V_p) از رابطه ۲ قابل محاسبه است که (m_1) وزن پلیمر قبل از واکنشیدگی، (m_2) وزن پلیمر بعد از واکنشیدگی، (d_s) دانسیته حلال و (d_p) دانسیته پلیمر است.

$$V_p = -\frac{m_1 d_s}{m_1(d_s - d_p) + m_2 d_r} \quad \text{رابطه ۲}$$

پارامتر برهم‌کنش بین پلیمر و حلال (χ) با استفاده از رابطه Bristow & Watson (رابطه ۳) محاسبه شد که (β) ثابت رابطه و معادل ۰/۳۴، (R) ثابت جهانی گاز، (T) دما برحسب کلوین، (δ_s) و (δ_p) به ترتیب پارامتر حلالیت حلال و پلیمر است.

$$\chi = \beta + \frac{V_s}{RT}(\delta_s - \delta_p)^2 \quad \text{رابطه ۳}$$

حجم مولی حلال (V_s) با استفاده از رابطه ۴ قابل محاسبه است که (M) وزن مولکولی حلال و (d_s) دانسیته حلال است.

$$V_s = \frac{M}{d_s} \quad \text{رابطه ۴}$$

بعد از پیدا کردن زمان بهینه سنتز رزین سویای اپوکسی آکریلیکی مالئیک‌دار، مقداری رزین در یک ظرف پلاستیک ریخته شد و ۲۵ درصد وزنی استایرن به رزین اضافه و به مدت ۱۰ دقیقه با همزن دستی همزده شد. سه سطح گاه گندم باقیمانده روی الک ۶۰ مش (۲۰٪، ۳۰٪ و ۴۰٪ وزنی) به رزین اضافه و به صورت دستی مخلوط شد.

مخلوط رزین و گاه گندم در یک قالب فلزی به طول ۲۰۰ میلی‌متر و عرض ۴۰ میلی‌متر ریخته شد (شکل ۳-الف) و بعد برای خروج رطوبت، به مدت ۴۵ دقیقه در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد در آون قرار داده شد. پس‌ازاین زمان، پرس به صورت دستی با استفاده از پیچ‌هایی که در چهار گوشه قالب تعبیه شده بود، انجام شد و قالب در آون در دمای ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد به مدت یک ساعت قرار گرفت. بعد از خنک شدن قالب، نمونه از قالب خارج شد و به ابعاد مورد نظر برای آزمون برش داده شد (شکل ۳-ب).

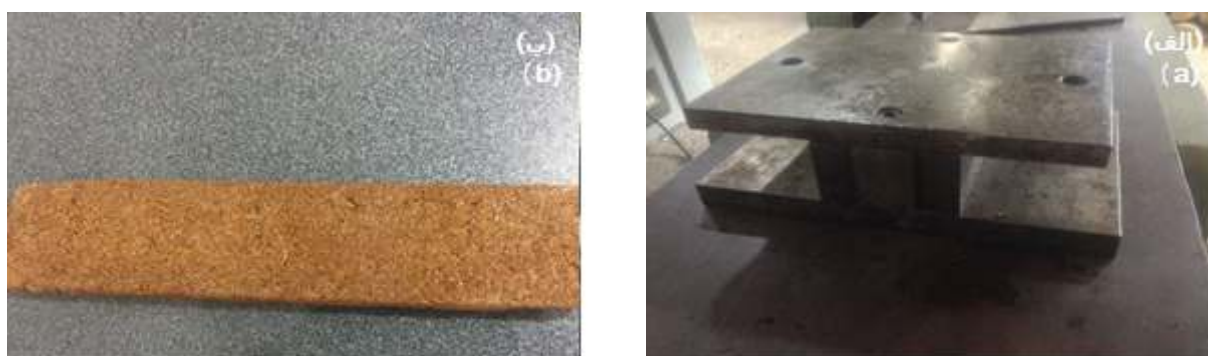
برای سنتز رزین، ابتدا ۶۰ گرم روغن سویای اپوکسی آکریلیکی با ۰/۱ گرم هیدروکینون در یک بشر ریخته شد و توسط همزن مکانیکی در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ده دقیقه مخلوط شد (Mandal et al., 2018). سپس ۱۵ گرم مالئیک‌انیدرید اضافه و دما به ۸۰ درجه سانتی‌گراد رسانیده شد تا به طور کامل حل شود. دو گرم دی‌متیل بنزیل‌آمین به عنوان کاتالیزور اضافه شد. سه زمان واکنش ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ دقیقه در نظر گرفته شد و در ۱۰ دقیقه پایانی ۵ گرم بنزوئیل پراکساید به عنوان آغازگر اضافه گردید.

رزین‌های حاصل از سه زمان واکنش، در ظروف آلومینیومی مجزا ریخته شد و در آون آزمایشگاهی به مدت ۲/۵ ساعت در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد و بعد در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد به مدت دو ساعت و در مرحله سوم به مدت یک ساعت در دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفت تا پلیمر شدن رزین به صورت کامل انجام شود.

برای پیدا کردن زمان بهینه سنتز رزین، از روش واکنشیدگی حلال برای محاسبه دانسیته اتصالات عرضی استفاده شد. پلیمرهای تهیه شده در سه زمان سنتز ۶۰، ۹۰ و ۱۲۰ دقیقه، به ابعاد ۲×۱۰×۲۰ میلی‌متر برش داده شده و در سه تکرار، به مدت ۷۲ ساعت در دمای اتاق در تولوئن قرار داده شدند. در پایان زمان غوطه‌وری، نمونه‌ها از تولوئن خارج و به سرعت در یک بطری حاوی دستمال کاغذی خشک‌کن قرار داده شدند تا حلال اضافی خارج شود و بعد وزن نمونه‌های واکنشیده توسط ترازو با دقت ۰/۰۰۱ گرم اندازه‌گیری شد.

دانسیته اتصالات عرضی (V_{cross}) با استفاده از رابطه Flory-Rehner (رابطه ۱) محاسبه گردید که (V_p) کسر حجمی پلیمر، (V_s) حجم مولی حلال، (χ) پارامتر برهم‌کنش بین پلیمر و حلال و (d_p) دانسیته پلیمر است.

$$V_{cross} = -\frac{\ln(1 - v_p) + v_p + \chi v_p^2}{2d_p V_s \left(\sqrt[3]{v_p} - \frac{v_p}{2} \right)} \quad \text{رابطه ۱}$$



شکل ۳- الف. قالب فلزی مورد استفاده برای قالب‌گیری فشاری کامپوزیت، ۳- ب. کامپوزیت حاصل از ترکیب کاه گندم و روغن سویای اپوکسی آکریلیکی مالئیک‌دار

Figure 3. Steel mold for compression molding of the composite (a), the composite resulted from combination of wheat straw and maleinated acrylated epoxidized soybean oil

دستگاه Thermo Nicolet Nexus 670 spectrometer (Waltham, MA, USA) در محدوده عدد موج 648 cm^{-1} - ۴۰۰۰ انجام شد.

برای تعیین مقاومت به ضربه، نمونه‌ها بر اساس استاندارد ASTM-D6110 در ابعاد $120 \times 10 \times 10$ میلی‌متر تهیه و از دستگاه SANTAM SIT-100 با ظرفیت ۱۰۰ ژول استفاده شد. برای آزمون کشش، نمونه‌هایی به ابعاد $200 \times 12 \times 10$ میلی‌متر طبق استاندارد ASTM-D7031 تهیه و آزمون کشش به وسیله دستگاه SANTAM-STM-20 انجام شد.

تجزیه و تحلیل آماری در قالب طرح کاملاً تصادفی با استفاده از نرم‌افزار SPSS 16 انجام شد. از آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه برای مقایسه میانگین‌ها و از گروه‌بندی دانکن در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ استفاده شد. برای آزمون‌های فیزیکی و مکانیکی پنج تکرار در نظر گرفته شد.

نتایج

مقادیر متوسط دانسیته اتصالات عرضی برای سه زمان سنتز رزین، با استفاده از روابط مربوطه محاسبه و نتایج حاصل در جدول ۱ آورده شده است. ملاحظه می‌شود که با افزایش زمان واکنش از ۶۰ دقیقه به ۹۰ دقیقه، دانسیته اتصالات عرضی افزایش یافت و پس‌از آن افزایش زمان

برای آزمون جذب آب، نمونه‌های مستطیل شکل به طول ۲ سانتی‌متر و عرض یک سانتی‌متر تهیه و در آب مقطر در دمای اتاق قرار داده شد. توزین نمونه‌ها در بازه زمانی ۲ ساعت، ۴ ساعت، ۸ ساعت، ۲۴ ساعت و پس‌از آن هر ۲۴ ساعت تا ثابت شدن وزن نمونه‌ها انجام شد. برای توزین از یک ترازوی دیجیتال با دقت 0.001 گرم و اندازه‌گیری ضخامت با استفاده از یک کولیس دیجیتال با دقت 0.001 میلی‌متر استفاده شد. میزان جذب آب (WA) با استفاده از رابطه ۵ و میزان واکنش ضخامت (TS) با استفاده از رابطه ۶ محاسبه گردید.

$$WA(\%) = \frac{(M_t - M_0)}{M_0} \times 100 \quad \text{رابطه ۵}$$

که M_t و M_0 به ترتیب جرم قبل از غوطه‌وری و بعد از غوطه‌وری در زمان t می‌باشد.

$$TS = \frac{(D_t - D_0)}{D_0} \times 100 \quad \text{رابطه ۶}$$

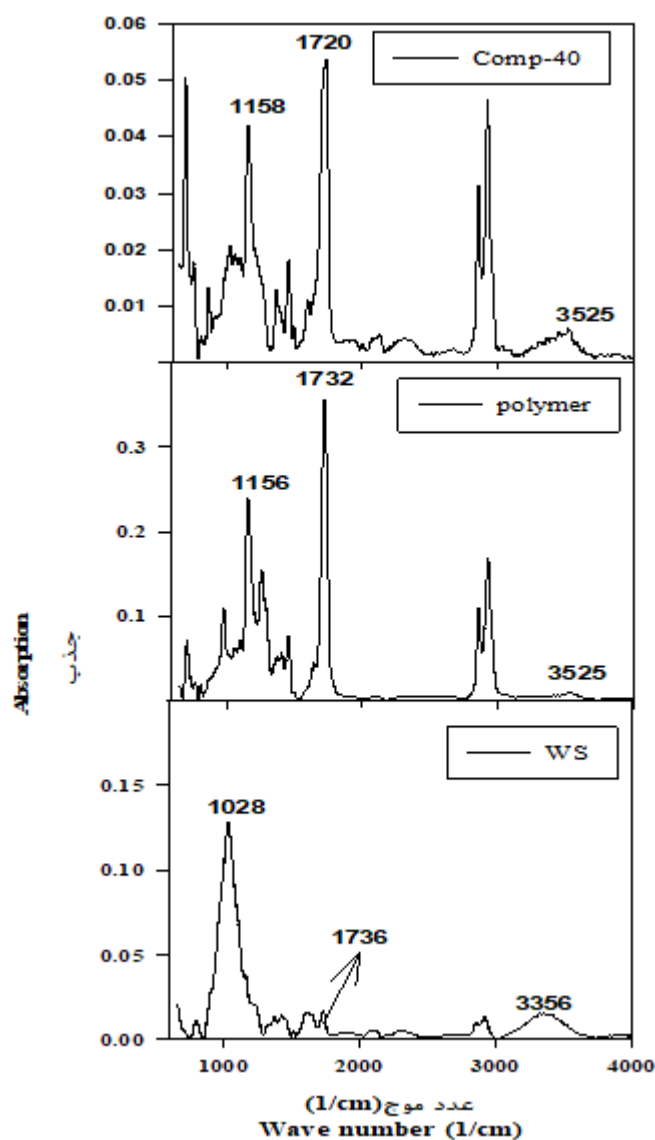
که D_t و D_0 به ترتیب معرف ضخامت نمونه قبل و بعد از غوطه‌وری در زمان t هستند. برای آزمون TGA، از دستگاه Bahr (STA503، آلمان) در دامنه دمایی ۲۵ تا ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد و میزان افزایش دما ۱۰ درجه سانتی‌گراد بر دقیقه در محیط گاز آرگون استفاده شد. طیف‌سنجی FTIR توسط

واکنش تا ۱۲۰ دقیقه تغییر محسوس در دانسیته اتصالات سویای اپوکسی آکریلاتی با مالئیک انیدرید، ۹۰ دقیقه در نظر
 عرضی ایجاد نکرد، بنابراین زمان بهینه سنتز رزین روغن گرفته شد.

جدول ۱- مقادیر دانسیته اتصالات عرضی (mol/g) در سه سطح زمان سنتز رزین

Table 1- Cross-link density values at three times of resin synthesis

زمان سنتز رزین (دقیقه) Time of resin Synthesis (min)	60	90	120
دانسیته اتصالات عرضی (مول بر گرم) Cross-link density (mol/g)	0.29×10^{-3}	0.51×10^{-3}	0.50×10^{-3}



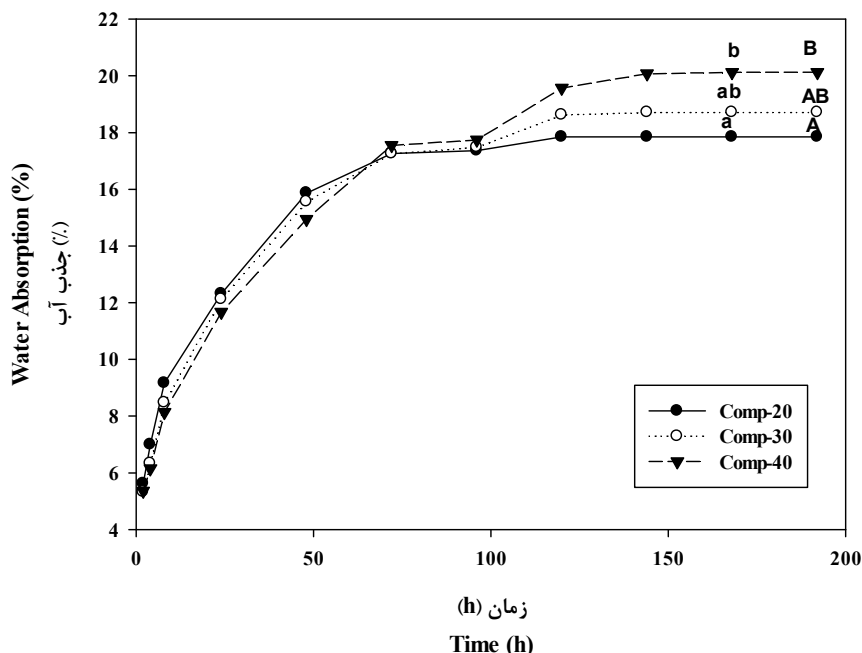
شکل ۴- طیف FTIR کاه گندم (WS)، پلیمر خالص (Polymer) و کامپوزیت حاوی ۴۰ درصد کاه گندم (Comp-40)

Figure 4. FTIR spectra of wheat straw (WS) pure polymer (Polymer) and composite with 40% of wheat straw (Comp-40)

از نمونه پلیمر ظاهر شد.

مقادیر جذب آب کامپوزیت با درصدهای متفاوت کاه گندم در شکل ۵ نشان داده شده است. با افزایش زمان غوطه‌وری میزان جذب آب افزایش یافت و میزان جذب آب در زمان‌های ابتدایی غوطه‌وری بالا و با گذشت زمان کاهش یافت. به‌نحوی که تا زمان ۱۲۰ ساعت میزان جذب آب در هر سه نمونه کامپوزیت حاوی درصدهای متفاوت کاه گندم یکسان بود. نتایج تحلیل واریانس مقادیر جذب آب در زمان‌های مختلف غوطه‌وری نشان داد که بین مقادیر جذب آب در سه سطح کاه گندم تا زمان غوطه‌وری ۱۴۴ ساعت اختلاف معنادار (در سطح اطمینان ۹۵ درصد) وجود نداشت. ولی در زمان غوطه‌وری ۱۶۸ و ۱۹۲ ساعت با افزایش مقدار کاه گندم جذب آب افزایش یافت ($P \text{ Value}=0.046$). نتایج گروه‌بندی دانکن نشان داد که بین مقادیر میانگین جذب آب کامپوزیت حاوی ۳۰ و ۴۰ درصد کاه گندم در زمان‌های غوطه‌وری ۱۶۸ و ۱۹۲ ساعت اختلاف معناداری وجود نداشت.

طیف‌های FTIR کاه گندم، پلیمر حاصل از ترکیب روغن سویای اپوکسی آکریلیکی مالتیک‌دار و استایرن و کامپوزیت حاوی ۴۰ درصد کاه گندم در شکل ۴ نشان داده شده است. پیک مشاهده‌شده در محدود 3300 cm^{-1} تا 3600 cm^{-1} مربوط به ارتعاش کششی گروه‌های هیدروکسیل الکلی (Yang *et al.* 2010) و در محدوده $2500 - 3300 \text{ cm}^{-1}$ مربوط به گروه‌های هیدروکسیل اسیدهای کربوکسیلی می‌باشد (Segneanu *et al.* 2012). در نمونه کاه گندم این پیک در عدد موج 3356 cm^{-1} و در نمونه کامپوزیت در عدد موج 3525 cm^{-1} و با شدتی برابر ۵۰ درصد نمونه کاه گندم ظاهر شد. پیک مشاهده‌شده در محدوده عدد موج $1720 - 1750 \text{ cm}^{-1}$ مربوط به ارتعاش کششی $\text{C}=\text{O}$ می‌باشد که در نمونه کامپوزیت با شدتی بسیار کمتر از نمونه پلیمری مشاهده گردید. پیک مشاهده‌شده در عدد موج $1156 - 1158 \text{ cm}^{-1}$ مربوط به ارتعاش کششی $\text{C}-\text{O}$ در پیوند اتری $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ است (Coates, 2000) که در نمونه کامپوزیت با شدتی بسیار بیشتر

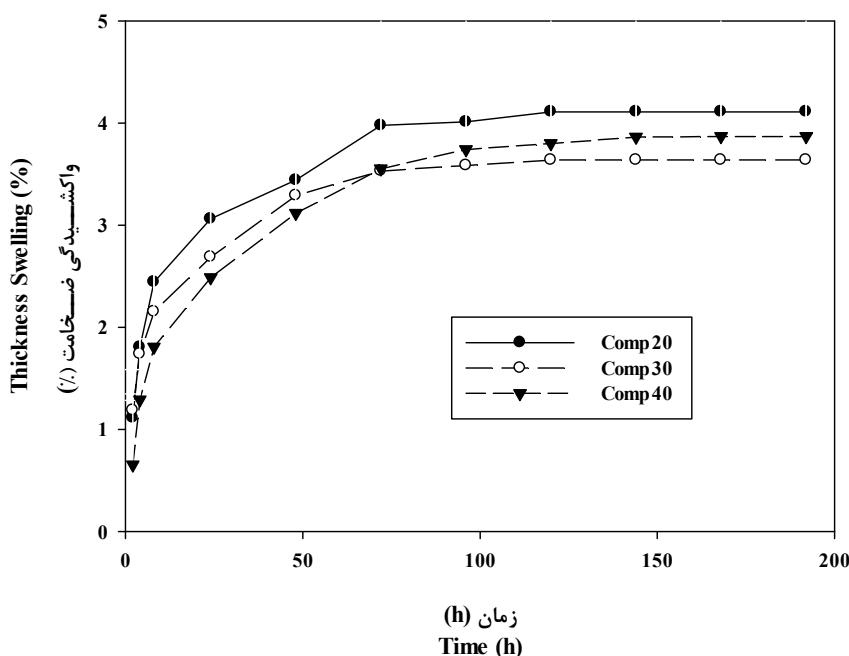


شکل ۵- مقادیر جذب آب کامپوزیت‌های حاوی ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد کاه گندم (گروه‌بندی دانکن برای زمان ۱۶۸ ساعت با حروف کوچک انگلیسی و برای زمان ۱۹۲ ساعت با حروف بزرگ انگلیسی نشان داده شده است).

Figure 5. Water absorption values of composites with 20, 30 and 40% of wheat straw (Duncan grouping for time of 168 and 192 hours are represented with English lower case and capital letters respectively)

کامپوزیت‌های حاوی مقادیر مختلف کاه گندم در زمان‌های غوطه‌وری مختلف اختلاف معناداری را نشان نداد.

مقادیر میانگین واکنش‌پذیری ضخامت کامپوزیت‌های حاوی ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد وزنی کاه گندم در شکل ۶ نشان داده شده است. نتایج تحلیل واریانس واکنش‌پذیری ضخامت

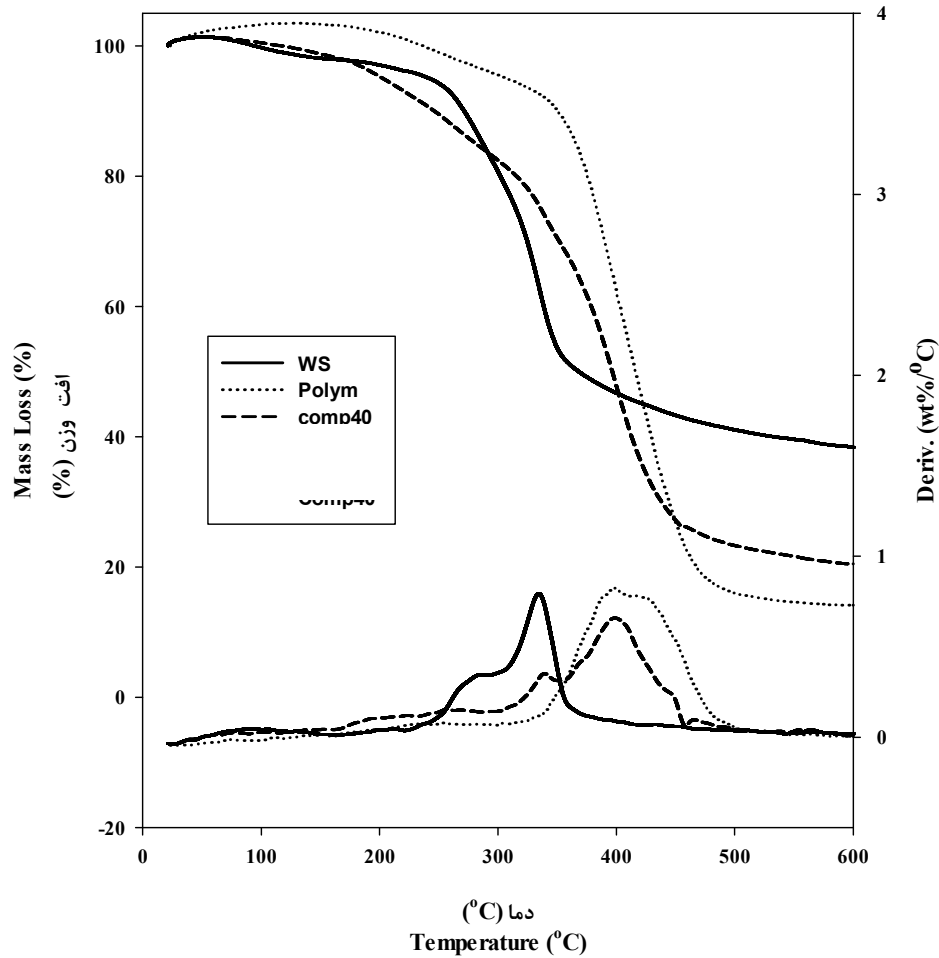


شکل ۶- مقادیر میانگین واکنش‌پذیری ضخامت کامپوزیت‌های حاوی ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد وزنی کاه گندم

Figure 6. Average thickness swelling values of composites with 20, 30 and 40% of wheat straw

بیشتر از دمای بیشینه تخریب کاه گندم است ولی همان‌طور که منحنی‌های TGA نشان می‌دهند میزان تخریب در این دما و بعد از آن خیلی بیشتر از میزان تخریب کاه گندم است. پیک اول در نمودار DTG کاه گندم مربوط به تخریب همی سلولز (280°C) و پیک دوم (331°C) مربوط به تخریب سلولز می‌باشد. پیک اول و دوم منحنی DTG در کامپوزیت، به دمای بالاتر (به ترتیب 338°C و 398°C) انتقال یافت. همچنین یک پیک کوچک در دمای 70°C در منحنی DTG کاه گندم مشاهده شد.

منحنی‌های TGA و DTG نمونه‌های کاه گندم و پلیمر خالص و کامپوزیت در سطوح دمایی مختلف در شکل ۷ به تصویر کشیده شده است. در جدول ۲ میزان خاکستر باقیمانده و دما در افت جرم‌های دو درصد تا ۲۰ درصد و همچنین دمای حداکثر تخریب (T_{\max}) و دمای شروع تخریب (T_i) آورده شده است. دمای شروع تخریب پلیمر ($214/83^{\circ}\text{C}$) بیشتر از دمای شروع تخریب کاه گندم (173°C) بود. دمای شروع تخریب کامپوزیت ($229/45^{\circ}\text{C}$) بیشتر از دمای شروع تخریب پلیمر و کاه گندم بود. دمای بیشینه تخریب برای پلیمر نیز $401/2^{\circ}\text{C}$ می‌باشد که اندکی



شکل ۷- منحنی‌های TGA و DTG کاه گندم (WS)، پلیمر خالص (Polym) و کامپوزیت حاوی ۴۰ درصد کاه گندم (Comp 40)
 Figure 7. TGA and DTG curves of wheat straw (WS), pure polymer (Polym) and composite with 40% of wheat straw (Comp 40)

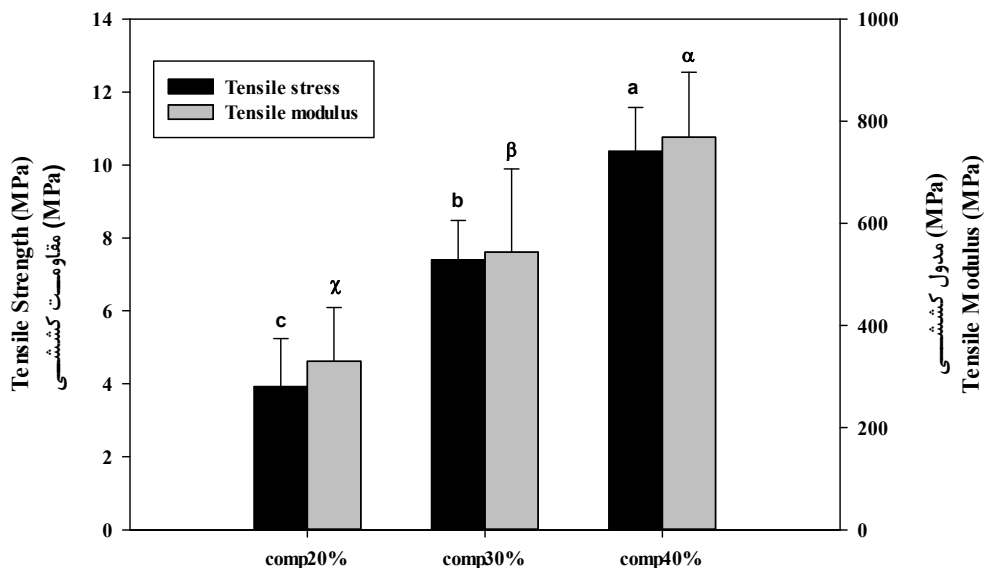
جدول ۲- دمای متناظر با افت جرم‌های ۲ تا ۲۰ درصد، دمای شروع تخریب T_i و دمای تخریب بیشینه T_{max}

Table 2- Temperature corresponding to mass losses of 2-20%, initial degradation temperature (T_i) and maximum degradation temperature (T_{max})

نمونه Sample	$T_{2\%}$	$T_{5\%}$	$T_{10\%}$	$T_{15\%}$	$T_{20\%}$	T_i	T_{max}	درصد خاکستر Ash percent
کامپوزیت Composite	167.46	202.58	245.81	280.84	315.31	229.45	398.30	20.46
کاه گندم Wheat Straw	156.7	242.2	270.12	287.32	301.2	173	331.56	38.39
پلیمر Polymer	263.4	307.12	350.35	365.59	375.15	214.86	401.2	14.12

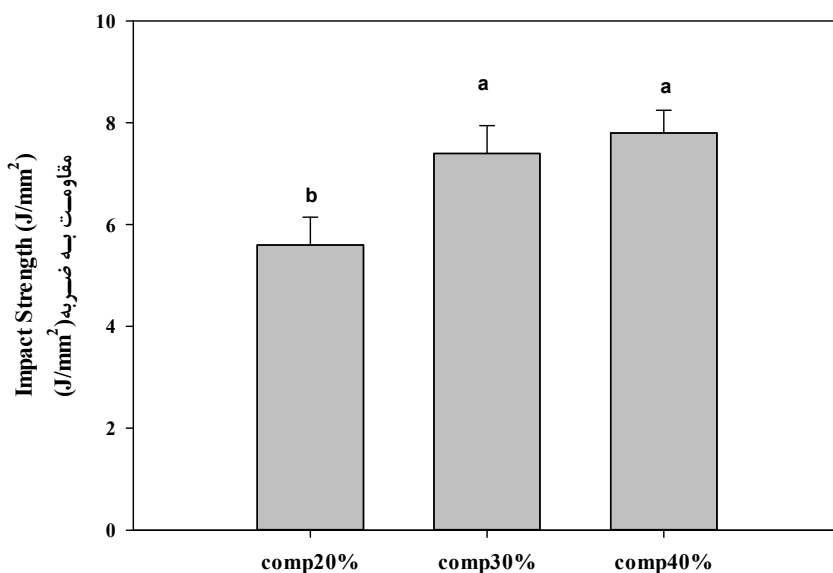
معناداری افزایش می‌یابد (به ترتیب P و P Value=0.001 (value=0.000).

نتایج مربوط به آزمون کشش در شکل ۸ نشان می‌دهد که با افزایش کاه گندم مقدار مقاومت و مدول کششی به میزان



شکل ۸- مقاومت و مدول کششی در نمونه‌های کامپوزیت با مقادیر ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد کاه گندم (گروه‌بندی دانکن برای مقادیر مقاومت و مدول به ترتیب با حروف انگلیسی و یونانی نشان داده شده است)

Figure 8. Tensile strength and modulus of composites with 20, 30 and 40% of wheat straw (Duncan grouping for strength and modulus is represented with English letters and Greek letters respectively)



شکل ۹- مقاومت به ضربه نمونه‌های کامپوزیت با مقادیر ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد کاه گندم

Figure 9. Impact strength of composites with 20, 30 and 40% of wheat straw

خالی باقی مانده در کامپوزیت راه نفوذ آب و امکان واکنشیدگی را فراهم می‌کنند. Mandal و همکاران (۲۰۱۸) بیان کردند هرچه برقراری اتصالات عرضی در کامپوزیت حاوی روغن سویای ایوکسی و آرد چوب بیشتر باشد، تخلخل کمتر و جذب آب نیز کمتر خواهد بود. در کامپوزیت مورد مطالعه میزان جذب آب کامپوزیت حاوی ۳۰ و ۴۰ درصد گندم در زمان غوطه‌وری ۱۶۸ ساعت بیشتر از کامپوزیت حاوی ۲۰ درصد گندم بود؛ ولی بین مقادیر واکنشیدگی ضخامت سطوح مختلف در کل زمان غوطه‌وری اختلاف معناداری مشاهده نشد. بنابراین می‌توان چنین نتیجه گرفت که زمان غوطه‌وری طولانی موجب نفوذ آب به تخلخل‌های ریز باقی مانده در کامپوزیت و جذب آب بیشتر می‌شود ولی به دلیل برقراری پیوند اتری بین گندم و ماده زمینه، قادر به واکنشیدگی کردن معنادار فاز تقویت‌کننده نیست. واکنشیدگی اندکی که در کامپوزیت‌ها مشاهده شد (حداکثر ۴ درصد) می‌تواند مربوط به ماده زمینه و باقی ماندن اندک موقعیت‌های جذب آب در پلیمر (گروه‌های هیدروکسیل) باشد.

خواص مکانیکی

با افزایش گندم مقدار مقاومت و مدول کششی به میزان معناداری افزایش یافت. افزایش گندم و متعاقباً افزایش پیوند بین گروه‌های هیدروکسیل گندم با پیوندهای دوگانه مالئیک انیدرید و استایرن و همچنین افزایش برقراری پیوند عرضی بین استایرن و مالئیک انیدرید موجب انتقال تنش از الیاف تقویت‌کننده به ماده زمینه پلیمری و افزایش مقاومت کششی کامپوزیت می‌شود (Mandal et al., 2019). همچنین افزایش مدول کششی با افزایش مقدار گندم را نیز می‌توان به مدول بالاتر مواد لیگنوسلولزی در مقایسه با ماده زمینه پلیمری و برقراری پیوند اتری بین گندم و پلیمر نسبت داد. Quirino و همکاران (۲۰۱۱) نیز گزارش کردند با افزایش آرد چوب تا ۷۰ درصد در ماده زمینه پلیمری روغن سویا و مالئیک انیدرید، مقاومت کششی و مدول کششی افزایش یافت و پس‌از آن، افزایش بیشتر آرد چوب تأثیری در بهبود مقاومت نداشت.

نتایج مربوط به آزمون مقاومت به ضربه (شکل ۹) نشان می‌دهد که بین مقادیر مقاومت به ضربه در سطوح مختلف گندم اختلاف معنادار وجود داشت (P Value=0.000). گروه‌بندی دانکن اختلاف معنی‌دار را بین مقادیر مقاومت به ضربه در سطح ۲۰ و ۳۰ درصد گندم نشان داد، ولی بین سطح ۳۰ و ۴۰ درصد اختلاف معنی‌دار وجود نداشت.

بحث

طیف‌سنجی FTIR

در نمونه گندم پیک مربوط به ارتعاش کششی گروه‌های هیدروکسیل الکلی در عدد موج 3356 cm^{-1} و در نمونه کامپوزیت در عدد موج 3525 cm^{-1} با شدتی برابر ۵۰ درصد نمونه گندم ظاهر شد. علت کاهش شدت پیک مذکور در نمونه کامپوزیت را می‌توان به برقراری پیوند اتری بین گروه‌های هیدروکسیل گندم با گروه‌های کربونیل رزین نسبت داد. جابه‌جایی پیک به عدد موج بالاتر می‌تواند ناشی از کاهش گروه‌های هیدروکسیل درگیر در پیوند هیدروژنی باشد. پیک مشاهده‌شده در محدوده عدد موج 1720 cm^{-1} - 1750 که مربوط به ارتعاش کششی $\text{C}=\text{O}$ می‌باشد، در نمونه کامپوزیت با شدتی بسیار کمتر از نمونه پلیمری مشاهده شد که حکایت از واکنش گروه‌های کربونیل‌انیدرید و استر آکریلیک و همچنین گروه‌های کربونیل استایرن با گروه‌های هیدروکسیل گندم و برقراری پیوند اتری دارد. پیک مشاهده‌شده در عدد موج $1156-1158 \text{ cm}^{-1}$ که مربوط به ارتعاش کششی $\text{C}-\text{O}$ در پیوند اتری $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ است، در نمونه کامپوزیت با شدتی بسیار بیشتر از نمونه پلیمر ظاهر شد که مؤید برقراری پیوند اتری بین گروه‌های هیدروکسیل گندم و گروه کربونیل رزین است.

جذب آب و واکنشیدگی ضخامت

به‌طور کلی رفتار جذب آب در کامپوزیت‌ها متأثر از فضای خالی موجود در کامپوزیت و ماهیت شیمیایی اجزای تشکیل‌دهنده آن است (Mandal et al., 2019). فضاهای

پایداری حرارتی آنها افزایش یافته و پیک اول و دوم منحنی DTG کامپوزیت، به دمای بالاتر (به ترتیب 338°C و 398°C) انتقال یافت. یک پیک کوچک در دمای 70°C در منحنی DTG گندم مشاهده شد که مربوط به تبخیر آب آزاد بود.

منابع مورد استفاده

- ASTM D7031-04, 2004. Standard Guide for Evaluating Mechanical and Physical Properties of Wood-Plastic Composite Products, American society for testing materials, United States.
- ASTM D6110-02, 2002. Standard Test Methods for Determining the Charpy Impact Resistance of Notched Specimens of Plastics, American society for testing materials, United States.
- Berns, J. and Caesar, C., 1999. Practical experiences in the production of panels using agricultural based fibers. Proceedings of the Meeting of the Eastern Canadian Section of the Forest Products Society. May 19-20, Winnipeg, Manitoba.
- Biermann, U., Friedt, W., Lang, S., Lühs, W., Machmüller, G., Metzger, J., Rüscher, M., Schäfer, H.J. and Schneider, M., 2000. New Syntheses with Oils and Fats as Renewable Raw Materials for the Chemical Industry. *Angewandte Chemie (International ed. in English)*. 39(13):2206–2224.
- Can, E., Küsefoğlu, S. and Wool. R.P., 2001. Rigid, thermosetting liquid molding resins from renewable resources. I. Synthesis and polymerization of soy oil monoglyceride maleates. *Journal of Applied Polymer Science*. 81:69–77.
- Coates J., 2000. *Encyclopedia of Analytical Chemistry, Interpretation of Infrared Spectra, A Practical Approach*. Chichester: John Wiley & Sons.
- Gerbase, A.E., Petzhold, C.L. and Costa. A.P.O., 2002. Dynamic mechanical and thermal behavior of epoxy resins based on soybean oil. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 79:797–802.
- Han, G., Umemura, K., Zhang, M., Honda, T. and Kawai, S., 2001. Improvement mechanism of bondability in UF-bonded reed and wheat straw boards by silane coupling agent and extraction treatments. *Journal of Wood Science*. 47:350–355.
- Imai, N., Nakagaito, A.N., Yano H. and Uyama, H., 2013. Biocomposite from epoxidized soybean oil and microfibrilled cellulose. *Wood Research Journal*, 4(1): 136-40.
- Kadem, S. Irinislmane, R. and Belhaneche Bensemra, N., 2018. Novel biocomposites based on sunflower oil

با افزایش گندم، مقدار مقاومت به ضربه افزایش معناداری یافت؛ هرچند بین مقادیر مقاومت به ضربه در سطح ۲۰ و ۳۰ درصد گندم اختلاف معنادار بود، ولی بین سطح ۳۰ و ۴۰ درصد اختلاف معنی دار نبود. بهبود مقاومت به ضربه در سطح ۳۰ درصد و ۴۰ درصد گندم می‌تواند به دلیل برهم‌کنش خوب بین دو فاز پرکننده و ماده زمینه باشد که به صورت یک مانع عمل می‌کند و از پیشروی ترک جلوگیری می‌نماید. Sandhyarani و همکاران (۲۰۱۰) دریافته‌اند با افزایش مقدار اکسید آلومینیوم به کامپوزیت اپوکسی-الیاف طبیعی، به دلیل بهبود برهم‌کنش بین دو فاز، مقاومت به ضربه بهبود می‌یابد.

آزمون TGA و DTG

دمای شروع تخریب پلیمر ($214/83^{\circ}\text{C}$) بیشتر از دمای شروع تخریب گندم (173°C) بود که حکایت از پایداری حرارتی بیشتر پلیمر خالص در مقایسه با گندم دارد. دمای شروع تخریب کامپوزیت ($229/45^{\circ}\text{C}$) بیشتر از دمای شروع تخریب پلیمر و گندم بود. ترکیب پلیمر MAESO و استایرن با گندم یک ساختار شبکه‌ای با اتصالات عرضی تشکیل می‌دهد که سبب بالا رفتن دمای شروع تخریب در کامپوزیت می‌شود (Mandal, 2018). دمای بیشینه تخریب پلیمر نیز $401/2^{\circ}\text{C}$ می‌باشد که اندکی بیشتر از دمای بیشینه تخریب گندم است ولی میزان تخریب در این دما و بعد از آن خیلی بیشتر از میزان تخریب گندم است. این پدیده نشان می‌دهد که در دمای 401°C درجه سانتی‌گراد، پایداری حرارتی گندم بیشتر از پلیمر است.

پیک اول در نمودار DTA گندم مربوط به تخریب همی سلولز (280°C) و پیک دوم (331°C) مربوط به تخریب سلولز است. تخریب حرارتی لیگنین در بازه دمایی گسترده‌ای رخ می‌دهد، بنابراین پیک مشخصی در منحنی DTG ظاهر نشد. به‌طور کلی در میان اجزای سازنده دیواره سلولی، همی سلولز از پایین‌ترین پایداری حرارتی برخوردار است، ولی در کامپوزیت گندم و رزین به دلیل برقراری پیوند اتری بین گروه‌های هیدروکسیل همی سلولز و سلولز با رزین،

- Sandhyarani, B., Alok, S. and Amar, P., 2021. Effect of Ceramic Fillers on Mechanical Properties of Bamboo Fiber Reinforced Epoxy Composites: A Comparative Study. *Advanced Materials Research*, 123-125: 1031-1034.
- Saremi, K., Tabarsa, T., Shakeri, A. and Nalbandi, A., 2015. Investigation on introducing epoxy in soy oil for producing wheat straw board, *J. of Wood & Forest Science and Technology*, 22 (4): 79-102 (In Persian).
- Segneanu, A.E, Gozescu, I., Dabici, A., Sfirloaga, P. and Szabadai, Z., 2012. Organic compounds FT-IR spectroscopy. In: *Macro To Nano Spectroscopy*, InTech, Romania, pp 145-164.
- Shakeri, A., Tabarsa, T. and Tasoji, M., 2010, Investigation the Properties of Acrylated Epoxidized Soy Oil-Wheat Straw Particle Board, *Iranian Journal of Polymer Science and Technology*, 23(1): 29-39 (In Persian).
- Tan, S.G., Ahmad, Z. and Chow, W.S., 2013. Relationships of cure kinetics and processing for epoxidized soybean oil bio-thermoset. *Industrial Crops and Products*. 43:378–385.
- Tasooji, M., Tabarsa, T., Khazaeian, A. and Wool, R.P., 2010. Acrylated epoxidized soy oil as an alternative to urea-formaldehyde in making wheat straw Particleboards. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 24(8-10):1717-1727.
- Thakur, V.K. and Thakur, M.K., 2014. Processing and characterization of natural cellulose fibers/thermoset polymer composites. *Carbohydrate Polymer*, 109:102–117.
- Williams, G.I. and Wool, R.P., 2000. Composites from natural fibers and soy oil resins. *Applied Composite Materials*, 7(5-6):421-432.
- Yang, H., Gao, M., Wang, J., Mu, H. and Qi, D., 2012. Fast Preparation of High-Performance Wood Materials Assisted by Ultrasonic and Vacuum Impregnation. *Forests* 12(5): 567-579.
- Zhang, Y., Lu, X., Pizzi, A. and Delmotte, L., 2003. Wheat straw particleboard bonding improvements by enzyme pretreatment. *Holz als Roh und Werkstoff*, 61: 49–54.
- Zhu, J., Chandrashekhara, K., Flanigan, V. and Kapila, S., 2004. Manufacturing and mechanical properties of soy-based composites using pultrusion. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 35(1):95-101.
- and alfa fibers as renewable resources. *Journal of Polymers and the Environment*, 26: 3086–3096.
- Karger-Kocsis, J., Grishchuk, S., Soroachynska, L. and Rong, M.Z., 2013. Curing, gelling, thermomechanical, and thermal decomposition behaviors of anhydride-cured epoxy (DGEBA)/epoxidized soybean oil compositions. *Polymer Engineering and Science*, 54(4):747-755.
- Li, F and Larock, R.C. 2003. New soybean oil–styrene–divinylbenzene thermosetting copolymers. VI. Time–temperature–transformation cure diagram and the effect of curing conditions on the thermoset properties. *Polymer International*, 52(1):126–132.
- Liu, C., Yang, X, Cui, J., Zhou, Y. L., Hu, Zhang M. and Liu. H., 2012. Tung oil based monomer for thermosetting polymers: synthesis, characterization, and copolymerization with styrene. *Bioresources*, 7:447–463.
- Lu, J., Khot, S. and Wool, R.P., 2005. New sheet molding compound resins from soybean oil. I. Synthesis and characterization. *Polymer*, 46(1):71–80.
- Mandal, M., Nath D. and Maji. T.K., 2018. Wood polymer nanocomposites from functionalized soybean oil and nanoclay. *Wood Science and Technology*, 52(6): 1621-1643.
- Mandal, M., Begum, P., Deka, R.C. and Maji, T.K., 2019. Wood flour thermoset composites using chemically modified epoxidized soybean oil. *European journal of wood and wood products*, 77(4):569-580.
- Mandal, M., Bardhan, P., Mandal, M. and Maji, T.K., 2020. Development of wood polymer composites with thermosetting resin from soybean oil cross-linked with rosin derivative. *European Journal of Wood and Wood Products*, 78(6): 1265-1278.
- May, CA., 1988. *Epoxy resins. Chemistry and technology*. New York: Dekker, 1288p.
- Meiorin, C., Mosiewicki, M.A. and Aranguren MI. 2013. Ageing of thermosets based on tung oil/ styrene/ divinylbenzene. *Polymer Testing*, 32(2):249–255.
- Quirino, R.L. and Larock, R.C., 2011. Rice hull biocomposites, part 2: effect of the resin composition on the properties of the composite. *Journal of Applied Polymer Sciences*, 121(4): 2050-2059.
- Raquez, J.M., Deleglise, M., Lacrampe, M.F. and Krawczak, P., 2010. Thermosetting (bio) materials derived from renewable resources: a critical review. *Progress in Polymer Science*. 35(4):487-509.

Physical and mechanical properties of acrylated epoxidized Soybean Oil –Wheat Straw Composite

R. Ghaffari Sani¹, F. Dastoorian^{2*}, S. M. Zabihzadeh³ and M. Tasooji⁴

1-M.Sc. Student, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Dep. Of Wood & Cellulosic Products Engineering, Iran

2*-Corresponding author, Assistant Professor, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Dep. Of Wood & Cellulosic Products Engineering, Iran, Email: f.dastoorian@sanru.ac.ir

3-Associate Professor, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Dep. Of Wood & Cellulosic Products Engineering, Sari, Iran

4- PhD graduated of Virginia Tech University, R&D Chemist, Hexion Chemical Co., Texas, USA

Received: July, 2022

Accepted: Sep., 2022

Abstract

In recent years, plant oils usage as matrix in natural fiber reinforced polymer composites, has been considered because of increasing environmental concern. In the present research work, acrylated epoxidized soybean oil combined with maleic anhydride and styrene as a matrix and wheat straw flour as filler was used for making a relatively biodegradable composite. In order to find the optimum synthesis time of resin, three reaction times of 60, 90 and 120 minutes of maleic anhydride with acrylated epoxidized soybean oil, polymer was considered and cross link density was determined using “solvent swelling” method. The optimum synthesis time of resin was obtained 90 min. Then the prepared maleated acrylated epoxidised soybean oil was manually mixed with 25% of styrene and 60 mesh wheat straw flour in three weight ratio of 20, 30 and 40%. The combination of resin and wheat straw flour was poured in a steel mold and was manually Pressed. The die was placed in an oven at temperature of 140°C for one hour. Infrared spectroscopy, thermogravimetric analysis, tensile and impact test was conducted to evaluate and analyze the physical and mechanical properties of the resulted composite. Infrared spectroscopy results showed ether bond formation between hydroxyl groups of wheat straw and carbonyl groups of resin. Water absorption test results showed no statistical difference between water absorption values of three loading of wheat straw till 144 hours of immersion. However after 168 hours of immersion, water absorption values were increased with increased wheat straw loading. There was no statistical difference between thickness swelling values of composites with different wheat straw loading. With increasing wheat straw loading, tensile strength and modulus was increased significantly. Also the impact strength increased at higher wheat straw loading.

Keywords: Impact strength, maleic anhydride, styrene, tensile strength, thermogravimetric analysis.