



## خواص حرارتی و اثر آن بر سرعت تولید اکستروژن چوب پلاستیک

مازیار لطفی شورابی<sup>۱</sup>، محمد گلزار<sup>۲\*</sup>

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس تهران

۲- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس تهران

\*تهران، صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۱۵ m.golzar@modares.ac.ir

**چکیده-** در این پژوهش خواص و رفتار حرارتی چوب پلاستیک<sup>۱</sup> با استفاده از آزمایش گرماسنجی پویایی تفاضلی<sup>۲</sup> و وزن سنجی حرارتی<sup>۳</sup> اندازه گیری شده است. نمونه های مورد آزمایش عبارتند از: پلی اتیلن با چگالی بالا، ذرات چوب و چوب پلاستیک. نمودارهای به دست آمده از آزمایش گرماسنجی نشان داد که افزودن ذرات چوب به زمینه پلی اتیلن باعث کاهش در سطح زیر نمودار گرماسنجی می شود. در نتیجه، چوب پلاستیک گرمای نهان ذوب کمتری نسبت به پلی اتیلن خالص دارد اما دمای نقطه ذوب آن تغییر قابل ملاحظه ای نمی یابد. ظرفیت گرمایی ویژه پلی اتیلن و ذرات چوب و همچنین چوب پلاستیک با استفاده از آزمایش گرماسنجی به دست آمد. نمونه های چوب پلاستیک گرمای ویژه کمتر از پلی اتیلن و بیشتر از چوب داشتند. در ادامه گرمای ویژه چوب پلاستیک با روش دیگری و با استفاده از قانون مخلوطها به دست آمد و با نتایج حاصل از آزمایش گرماسنجی مقایسه شد. همچنین نتایج آزمایش وزن سنجی حرارتی نشان داد که افزودن ذرات چوب در ماتریس پلیمری، سبب کاهش دمای تخریب چوب پلاستیک می شود. این نتایج در تولید اکستروژن چوب پلاستیک به کار رفت و پس از حل معادله انتقال حرارت، دمای خروجی مذاب به دست آمد که با نتایج تجربی همخوانی قابل ملاحظه ای داشت. پس از محاسبه دمای انجماد مذاب در قالب، پیش بینی لازم برای بالابردن سرعت تولید با افزایش دور ماردون انجام شد و نمونه های تجربی سالمی در تولید پیوسته به دست آمد.

**کلیدواژگان:** گرماسنجی پویایی تفاضلی، وزن سنجی حرارتی، چوب پلاستیک، سرعت تولید اکستروژن

## Thermal Properties and the high Throughput of Extruded WPC

M. Lotfi Shurabi<sup>1</sup>, M. Golzar<sup>2\*</sup>

1- Graduated M. Sc. in Mechanical Engineering

2- Assistant Professor in Mechanical Engineering., University of Tarbiat Modares

\*P.O. Box 14115-143, Tehran, Iran m.golzar@modares.ac.ir

**Abstract-** In this study thermal properties of Wood Plastic Composite (WPC) were measured using Differential Scanning Calorimetry (DSC) and Thermogravimetry (TG). The investigated specimens were: high density polyethylene (HDPE), wood particle and WPC. DSC test showed that adding wood particle to HDPE matrix cause a decrease in the area under the DSC curve. The result revealed that WPC have a heat of fusion less than unfilled HDPE and are more stable when temperature increases. The melting point temperature did not changed significantly. The heat of capacity of HDPE, wood particle and WPC were

1. Wood Plastic Composite (WPC)

2. Differential Scanning Calorimetry (DSC)

3. Thermogravimetry (TG)

obtained using DSC test. An enhancement in the temperature led to a linear increase in the heat of capacity of wood particle. HDPE and WPC showed similar behavior too. But WPC specimen had a heat of capacity more than wood particle and less than HDPE. The heat capacity of WPC by rule of mixture has a good agreement to experimental results. Adding wood to plastic identify higher WPC thermal stability by TG. The extrusion process was modeled and the throughput temperature was calculated using thermal equation. The model was used to carry out high throughput by increasing screw speed. These help to produce defectless extruded WPC in continuous production.

**KeyWords:** Wood HDPE Composites, Specific Heat, DSC, Thermal properties, High Throughput

## ۱- مقدمه

به تازگی استفاده از الیاف طبیعی به عنوان تقویت کننده پلاستیک‌ها در کاربردهایی مانند مصالح ساختمانی و اجزای اتومبیل مطرح شده است. استفاده از این الیاف مزیت‌های فراوانی دارد که برخی از آنها عبارتند از: تجدیدپذیری، هزینه کم، وزن سبک و دستیابی به خواص مکانیکی و فیزیکی بهتر. الیاف طبیعی مورد استفاده در تقویت پلاستیک‌ها عبارتند از: چوب، کتان، کنف و ضایعات محصولات کشاورزی [۱] تا [۳]. در تولید محصولات چوبی سالیانه مقدار زیادی ضایعات چوبی ایجاد می‌شود (امریکا در حدود ۶۳ میلیون تن در سال ۲۰۰۲) که استفاده از این ضایعات در تولید، باعث پایین آمدن قیمت تمام شده محصول می‌شود [۴]. بنابراین از ضایعات چوب در مقایسه با سایر الیاف طبیعی بیشتر استفاده می‌شود. اما پلاستیک‌های قابل استفاده در ساخت چوب پلاستیک - به علت پایین بودن دمای تجزیه چوب که در حدود  $220^{\circ}\text{C}$  است - محدودند و بیشتر از HDPE, PVC, PP استفاده می‌شود [۵]. روش معمول در تولید چوب پلاستیک اکستروژن بوده و محصولاتی به شکل پروفیل و ورق با این روش تولید می‌شود [۶].

پژوهشهای نسبتاً زیادی در این زمینه انجام شده اما تمرکز بیشتر آنها بر خواص مکانیکی و خاصیت آبدوستی چوب و خاصیت آبرگریزی ماتریس پلاستیک و ایجاد سازگاری بهتر بین این دو ماده بوده است [۴] و [۸]. از آنجا که پژوهشهای اندکی در باره خواص حرارتی چوب پلاستیک انجام شده و هم‌چنین با توجه به اهمیت پارامترهای حرارتی در تولید چوب پلاستیک و تاثیر آنها

بر خواص محصول، در این پژوهش، رفتار حرارتی و برخی خواص حرارتی چوب پلاستیک با ماتریس پلی اتیلن مطالعه شده است. از این خواص در حل معادله انتقال حرارت برای اکستروژن چوب پلاستیک استفاده شد و پس از به دست آوردن دمای مذاب خروجی قالب، صحت آن با مقادیر تجربی اعتبارسنجی شد. هم‌چنین محل انجماد در مسیر قالب با استفاده از دمای انجماد به دست آمده، تخمین زده شد تا بتوان با بالا بردن سرعت دورانی ماردون اکسترودر، سرعت تولید را بالا برد.

## ۲- مبانی نظری

در بیشتر روشهای تولید مواد پلاستیکی، ابتدا مواد گرم یا ذوب شده و سپس شکلدهی انجام می‌شود. لذا آگاهی از معادلات و متغیرهای آنها برای اجرای درست فرایند ضروری است. یکی از روابط مورد نیاز معادله انرژی به شکل زیر است [۷].

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = (\nabla \cdot k \cdot \nabla T) + \frac{1}{\gamma} \mu (\dot{\gamma} : \dot{\gamma}) + \dot{Q} \quad (1)$$

سمت چپ این معادله، انرژی ذخیره شده در جسم است که در آن  $\rho$  چگالی ماده،  $C_p$  گرمای ویژه و  $\frac{\partial T}{\partial t}$  تغییرات دما با زمان است. جمله‌های سمت راست معادله به ترتیب گرمای انتقالی از طریق رسانش، گرمای ناشی از لزجت و گرمای داده شده به ماده است که در آن  $k$  ضریب رسانش گرمایی ماده و  $\dot{\gamma}$  و  $\mu$  به ترتیب نرخ

$$\begin{cases} \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = 0 \\ -k \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=R} = h(T - T_w) \Big|_{x=R} & 0 < x < R \\ T(x, 0) = T_m \text{ } ^\circ\text{C} \end{cases} \quad (5)$$

معادله (۴) با شرایط مرزی (۵) ناهمگن است که با همگن‌سازی و با استفاده از روش جداسازی متغیرها می‌توان آن را حل کرد. معادله نهایی توزیع دما در پروفیل خروجی به شکل زیر است [۸]:

$$T(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\gamma(T_m - T_w) \cdot \sin \xi_n \cos(\frac{\xi_n}{R} x) \cdot e^{-\frac{\xi_n^2}{R^2} \alpha t}}{\xi_n + \sin \xi_n \cdot \cos \xi_n} + T_w$$

$$\xi_n = \frac{hR}{k_w} \cot \xi_n \quad (6)$$

با توجه به این که سرعت خط تولید (سرعت خطی محصول خروجی) برای نرخهای مختلف خروجی، از طریق آزمایش به دست آمده و در دست است، می‌توان با تغییر متغیر  $t = y/V$  پارامتر زمان در معادله (۶) را به پارامتر طولی در جهت اکسترودر تبدیل کرد تا نمودار توزیع دما در دو بعد (y) مسیر جریان و (x) مقطع جریان به دست آید. به این ترتیب با داشتن دمای پیش فرض برای خروجی می‌توان طول مورد نیاز برای سیستم خنک‌کننده را به صورت زیر به دست آورد:

$$T(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\gamma(T_m - T_w) \cdot \sin \xi_n \cos(\frac{\xi_n}{R} x) \cdot e^{-\frac{\xi_n^2}{R^2} \frac{y}{V} \alpha}}{\xi_n + \sin \xi_n \cdot \cos \xi_n} + T_w \quad (7)$$

### ۳- مواد و روش آزمایش

#### ۳-۱- مواد آزمایش

مواد اصلی به کار رفته برای تولید چوب پلاستیک، ذرات چوب و پلی اتیلن دست اول<sup>۲</sup> است. ذرات چوب به کار رفته در این آزمایش از ضایعات کارخانجات نجاری و بیشتر از چوب درختان جنگلی روسیه است. پلاستیک مورد استفاده پلی اتیلن با گرید 5620EA و شاخص جریان

برش و لزجت ماده و  $\dot{Q}$  گرمای داده شده به آن هستند. یکی از ثابتهای به کار رفته در معادله  $C_p$  است که در این مطالعه از طریق آزمایش DSC به دست آمد. در این آزمایش ماده مورد نظر گرم شده و رفتار آن بررسی می‌شود؛ شرح آزمایش در بخشهای بعدی آورده شده است. در این آزمایش رابطه انرژی بالا به شکل معادله زیر خلاصه می‌شود [۷].

$$\dot{Q} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

با در دست داشتن نرخ گرما می‌توان  $C_p$  را از معادله به دست آورد. در این پژوهش  $C_p$  از معادله زیر نیز - که قانون مخلوط ها<sup>۱</sup> نامید می‌شود- به دست آمد:

$$C_{pc} = C_{pw} wt\% + C_{p(HDPE)} (1 - wt\%) \quad (3)$$

که در آن  $C_{pc}$  ظرفیت گرمایی ویژه چوب پلاستیک،  $C_{pw}$  ظرفیت گرمایی ویژه ذرات چوب،  $C_{p(HDPE)}$  ظرفیت گرمایی ویژه پلی اتیلن و  $wt\%$  درصد وزنی ذرات چوب به کار رفته در چوب پلاستیک است [۷].

اگر معادله (۱) را معادله انتقال حرارت مذاب چوب پلاستیک قالب اکستروژن در نظر بگیریم، با فرض مقطع متقارن برای قالب به شکل معادله زیر در می‌آید:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (4)$$

در معادله (۴) فرض شده است که:

الف) منحنی دما در مرکز متقارن است.

ب) شار حرارتی عبوری در انتقال حرارت هدایت با شار حرارتی در انتقال حرارت جابه‌جایی در سطح بیرونی برابر است.

ج) دمای ورودی مذاب در لحظه اولیه، همان دمای مذاب و معلوم است. به‌طور خلاصه شرایط معادله عبارتند از:

2. Virgin HDPE

1. Rule of Mixture

مذاب برابر  $10\text{min}/20\text{g}$  و چگالی  $0.956\text{g}/\text{cm}^3$ ، محصول کارخانه پتروشیمی اراک است [۹].

STA1500 قرار داده شد و از دمای اتاق تا  $700^\circ\text{C}$  و تحت گاز آرگون قرار گرفت.

### ۲-۳- تهیه چوب پلاستیک

ذرات چوب ابتدا با غربال دستی همگن شده و سپس به مدت ۲۴ ساعت در دمای  $75^\circ\text{C}$  قرار گرفت تا رطوبت ذرات چوب گرفته شود. سپس با نسبت وزنی ۶۰٪ با دانه‌های پلی‌اتیلن مخلوط و به داخل اکسترودر دوماردونه با نسبت  $L/D$  برابر ۲۲ وارد شد. دمای اکسترودر و دور دستگاه به ترتیب برابر  $170^\circ\text{C}$ ،  $10\text{rpm}$  بود. مواد پس از طی مراحل ذوب و اختلاط در اکسترودر به قالب دایروی وارد شده و سپس از دهانه قالب خارج شد. در این پژوهش از هیچ سازگار کننده‌ای استفاده نشده است. جزئیات بیشتر در [۸] آورده شده است.

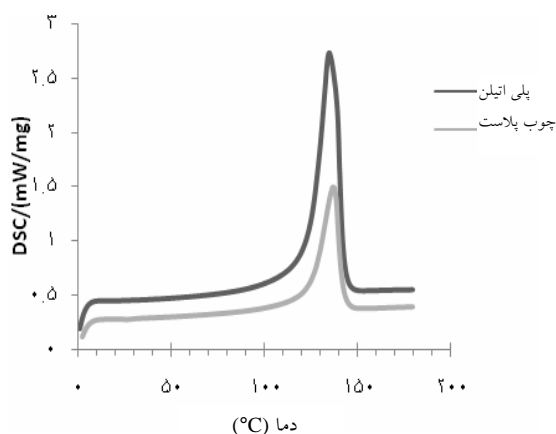
### ۴- نتایج و بحث

#### ۴-۱- خواص حرارتی

نتایج آزمون DSC از نمونه‌های گرانول خالص و چوب پلاستیک در شکل (۱) آورده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود هر دو نمونه در دمای حدود  $135^\circ\text{C}$  دارای اوج حرارتی هستند که نشان دهنده دمای ذوب هر دو نمونه است. آنچه در این جا مهم به نظر می‌رسد آن است که افزودن ذرات چوب در داخل ماتریس پلی‌اتیلن سبب تغییر اندکی در دمای ذوب ماتریس می‌شود. این نتیجه پیشتر توسط فاتح [۳] و [۵] در سال ۲۰۰۸ با چوب اکالیپتوس نیز گزارش شده است.

#### ۳-۳- آزمایش DSC و TG

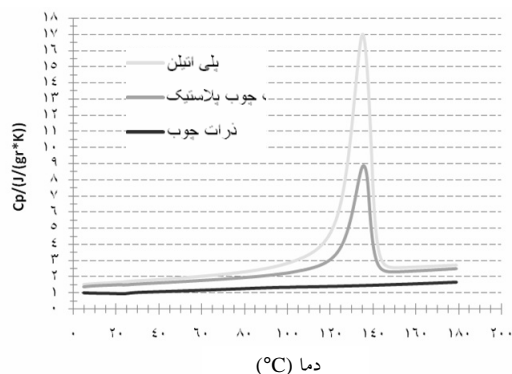
به منظور انجام آزمایش DSC، برشهای مختلفی از محصول تولید شده تهیه شده و  $13\text{mg}$  از آن برداشته شد. نمونه مورد نظر در داخل دستگاه DSC (NETZSCH DSC 200 F3) تحت اتمسفر کنترل شده‌ای از نیتروژن قرار داده شد. ماده مرجع در این جا یاقوت مصنوعی<sup>۱</sup> است. محدوده دمایی آزمایش با توجه به کاربرد آن در اکسترودر برابر  $0-180^\circ\text{C}$  و نرخ افزایشی  $10^\circ\text{C}/\text{min}$  در نظر گرفته شد. آزمایش سه بار به صورت گرم کردن-سرد کردن-گرم کردن مجدد تکرار شد تا تاریخچه حرارتی ماده یا سایر عوامل ایجاد خطا در مرحله اول حذف شود؛ و بنابراین نتایج صحیح آزمایش در گرمادهی مجدد قابل رؤیت است. علاوه بر چوب پلاستیک، آزمایش فوق با همان شرایط قبلی بر روی ذرات چوب خالص و پلی‌اتیلن خالص نیز تکرار شد تا رفتار سه ماده مقایسه شود. هم‌چنین برای انجام آزمایش TG و بررسی نحوه تجزیه حرارتی کامپوزیت و اجزای آن،  $3\text{mg}$  از سه ماده به صورت جداگانه در داخل دستگاه تجزیه حرارتی



شکل ۱ نمودار DSC چوب پلاستیک و پلی اتیلن سنگین

تفاوت مهم بین پلی‌اتیلن خالص و چوب پلاستیک در سطح زیر نمودار DSC دو ماده است. سطح زیر نمودار پلی‌اتیلن تقریباً برابر  $196\text{J}/\text{g}$  است که این مقدار برای پلی‌اتیلن ۱۰۰٪ متبلور در محدوده  $268-300\text{J}/\text{g}$  قرار دارد. این عدد در واقع مقدار گرمای لازم برای ذوب بلورهای ماده است این مقدار برای چوب پلاستیک

1. Sapphire



شکل ۲ تغییر ظرفیت گرمایی ویژه چوب پلاستیک، ذرات چوب و پلی اتیلن سنگین با دما

همان طور که دیده می شود  $C_p$  به دست آمده در آزمایش در محدوده ای از دما خطی بوده و می توان آن را با توابع خطی مناسبی تقریب زد. این توابع در محدوده دمایی مشخصی، به شکل زیر است که ضریب همبستگی ( $R^2$ ) در آنها بسیار نزدیک به یک است.

$$C_p(T) = 0.008T + 1.308, R^2=0.98 \quad 0 < T < 100^\circ C \quad (8)$$

$$C_p(T) = 0.007T + 1.245, R^2=0.997 \quad T > 140^\circ C \quad (9)$$

در روش دیگری  $C_p$  چوب پلاستیک با استفاده از  $C_{pw}$  ذرات چوب،  $C_{p(HDPE)}$  پلی اتیلن و معادله (۳) به دست آمد. مقایسه  $C_p$  به دست آمده از این روش با نتایج به دست آمده از آزمون DSC نشان می دهد که  $C_p$  به دست آمده از روش آزمایشی، مقادیر بزرگتری نسبت به مقادیر به دست آمده از معادله قانون مخلوطها دارند که در شکل (۳) کاملا نمایان است. برای محاسبه خطای بین این دو روش می توان از معادله زیر استفاده کرد.

$$E = \frac{C_{p(آزمایش)} - (C_{p(قانون مخلوط)})}{C_{p(آزمایش)}} \cdot 100 \quad (10)$$

خطای بین این دو روش در محدوده ۰.۸٪ تا ۱.۸٪ است. علت این اختلاف شاید فشرده شدن ذرات چوب و بالا رفتن چگالی آن در تولید باشد زیرا چگالی چوب می تواند در اندازه ظرفیت گرمایی آن مؤثر باشد [۱۰].

برابر  $85 \text{ J/g}$  به دست آمد که تقریباً برابر ۴۰٪ سطح زیر نمودار پلی اتیلن خالص است (جدول ۱).

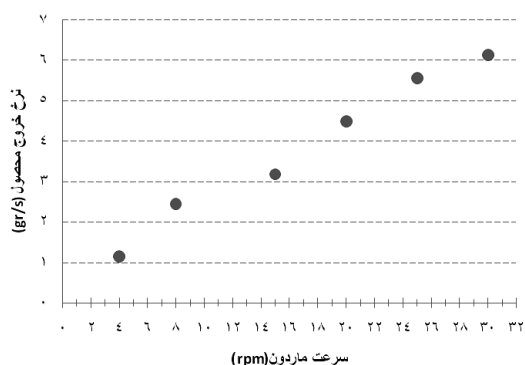
جدول ۱ دما و گرمای نهان در آزمایش DSC

کمیت	(واحد)	اندازه گیری شده
دمای ذوب پلی اتیلن خالص	( $^\circ C$ )	۱۲۳/۵
دمای ذوب چوب پلاستیک	( $^\circ C$ )	۱۲۴
دمای انجماد چوب پلاستیک	( $^\circ C$ )	۹۸
گرمای نهان ذوب پلی اتیلن	(kJ/kg)	۱۹۶
گرمای نهان ذوب چوب پلاستیک	(kJ/kg)	۸۵

این نسبت در واقع همان نسبت وزنی پلی اتیلن به کار رفته در چوب پلاستیک است. لذا افزودن ذرات چوب به داخل ماتریس پلیمری، فقط سطح زیر نمودار پلی اتیلن خالص را به نسبت وزنی ذرات چوب به کار رفته در آن کاهش می دهد. بنابراین طبق این نتایج اول آن که دمای اکسترودر باید بالاتر از  $135^\circ C$  باشد تا برای تولید محصول مناسب باشد و دوم آن که با توجه به سرعت چرخش ماردون - که روی دستگاه تنظیم می شود - و محاسبه زمان ماندگاری محصول در اکسترودر، میزان گرمای لازم برای ذوب و تولید محصول باید کافی باشد. در محاسبه مقدار گرمای لازم برای تولید محصول که می توان آن را از معادله (۱) به دست آورد،  $C_p$  یا ظرفیت گرمایی ویژه چوب پلاستیک یکی از ثابت های مجهول است. لذا در آزمایش دیگری،  $C_{pc}$  چوب پلاستیک،  $C_{pw}$  ذرات چوب و  $C_{p(HDPE)}$  پلی اتیلن از طریق آزمون DSC به دست آمده و نتایج آن مقایسه شده است. نتایج به دست آمده نشان می دهد که ظرفیت گرمایی ویژه هر سه ماده - ذرات چوب، پلی اتیلن خالص و نمونه چوب پلاستیک - همگی رفتاری خطی داشته و با افزایش دما به صورت خطی افزایش می یابند که این در شکل (۲) دیده می شود. همچنین دیده می شود که ظرفیت گرمایی ویژه چوب پلاستیک، مقداری کمتر از ظرفیت گرمایی ویژه پلی اتیلن و بالاتر از ظرفیت گرمایی ویژه ذرات چوب است.

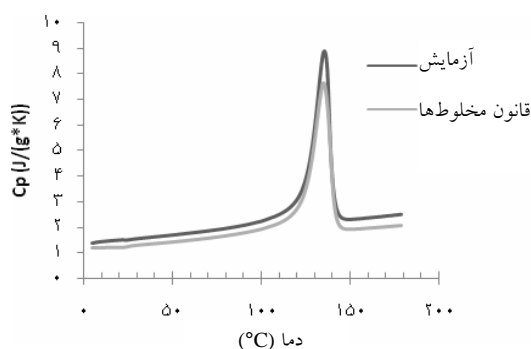
#### ۴-۲- بالا بردن سرعت ماردون

در اکستروژن، مواد با سرعت ماردون به قالب وارد شده و در آنجا شکل خروجی را به خود گرفته و محصول نهایی ایجاد می‌شود. هر چه سرعت دورانی ماردون بیشتر باشد یعنی سرعت تولید بالاتر باشد، مواد فرصت کمتری برای شکل‌گیری در قالب دارند و به نظر می‌رسد در این حالت عامل مهم در تولید محصول سالم و بدون عیوب، نحوه انتقال حرارت و نرخ آن در قالب باشد. آنچه در اینجا پژوهش شده، ایجاد شرایطی برای انجام صحیح ماده در قالب است به‌طوری که در سرعت‌های بالا نیز بتوان محصولاتی سالم و بدون عیوب تولید کرد و سرعت تولید را افزایش داد. در شکل (۵) افزایش سرعت تولید یا نرخ خروج محصول بر روی محور عمودی برحسب افزایش سرعت دورانی ماردون آورده شده است.



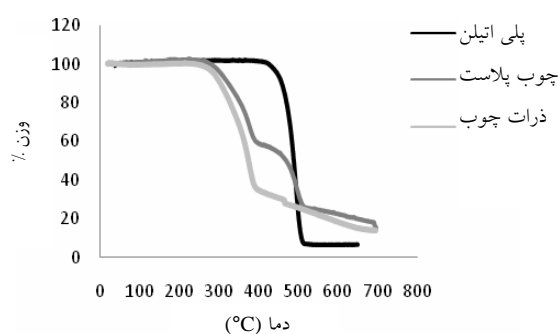
**شکل ۵** سرعت تولید با استفاده از سیستم خنک کننده برحسب سرعت دورانی ماردون

برای بررسی نتایج نظری و تجربی، دمای سطح محصول در خروجی اندازه‌گیری و با نتایج نظری حاصل از یعنی حل معادله (۴) مقایسه شده است. نتایج نظری و نتایج حاصل از آزمایش که در شکل (۶) دیده می‌شود تطابق نسبتاً خوبی دارند. اما علت بیشتر بودن دماهای نظری نسبت به دماهای اندازه‌گیری شده را می‌توان ساده‌سازی‌های فرض شده در معادله (۱) دانست و همچنین در شرایط مرزی حل معادله مانند در نظر نگرفتن مقاومت جدار قالب یا مقاومت تماسی بین دو ماده.



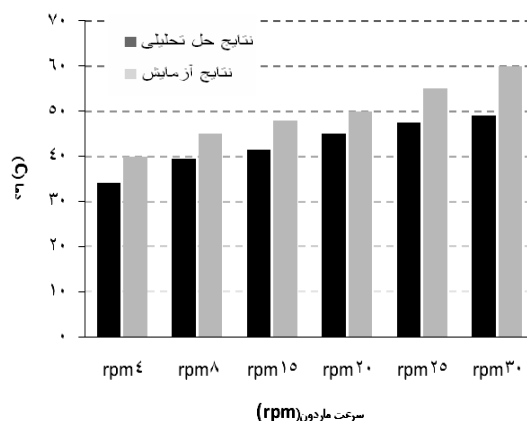
**شکل ۳** تغییر ظرفیت گرمایی ویژه چوب پلاستیک با استفاده از آزمایش و با استفاده از قانون مخلوطها

نتایج آزمایش TG نیز در شکل (۴) آورده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود افزودن ذرات چوب به داخل ماتریس پلی‌اتیلن سبب پایین آمدن دمای تجزیه چوب پلاستیک شده است. در نمودار مربوط به چوب پلاستیک دو ناپیوستگی وجود دارد که اولی مربوط به ذرات چوب بوده و ناپیوستگی دوم مربوط به ماده پلیمری است. یکی دیگر از نکات مهم به دست آمده در این آزمایش، دمای شروع تخریب است که در این جا در حدود  $230^{\circ}\text{C}$  به دست آمده است و به نوعی بیشترین دمای انتخابی در روشهای تولید چوب پلاستیک را مشخص می‌کند. البته در عمل به دلیل وجود کمی هوا در جریان تولید، دمای کار را پایین‌تر انتخاب می‌کنند.

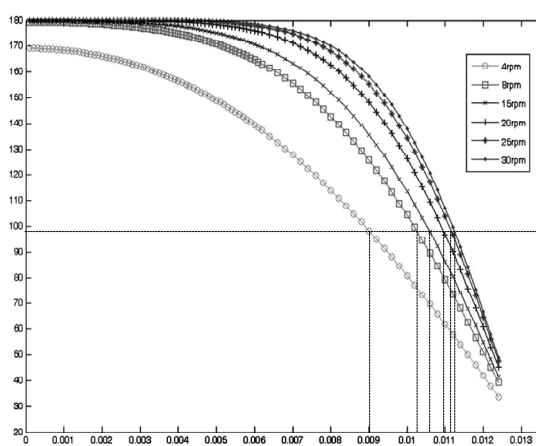


**شکل ۴** نمودار TG پلی‌اتیلن خالص، چوب پلاستیک و ذرات چوب خالص

هم‌چنین افزایش سرعت تولید، با افزایش سرعت دورانی ماردون، توزیع دما را در جهت شعاعی و در خروجی قالب تغییر می دهد که در شکل (۸) نشان داده شده است. با توجه به جدول (۱) دمای انجماد محصول تقریباً برابر  $98^{\circ}\text{C}$  است بنابراین برطبق انتظار هر چه سرعت تولید بیشتر باشد، دمای خروجی نیز بیشتر است و نقطه انجماد به خروجی قالب نزدیکتر می شود. دماهای خروجی در شکل (۶) نیز خلاصه شده و با مقادیر تجربی مقایسه شده بود.

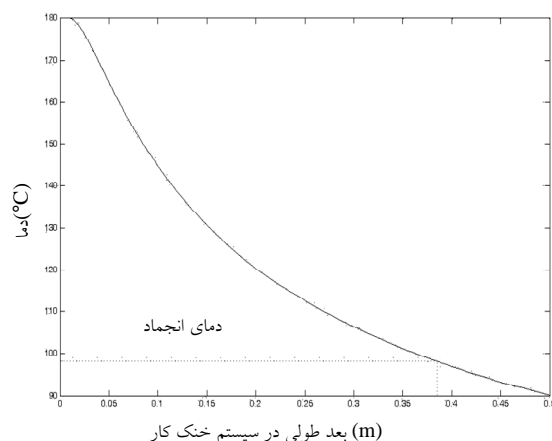


شکل ۶ دمای اندازه گیری شده از سطح محصول خروجی با نتایج نظری در سرعت‌های مختلف ماردون



شکل ۸ توزیع نظری دمای تئوری محصول در جهت عرضی (شعاعی) و در خروجی قالب

توزیع دما برای  $R=12.5\text{ mm}$  و در ضخامت  $1\text{ mm}$  از سطح محصول  $(x=11.5\text{ mm})$  و برای بیشترین سرعت تولید در شکل (۷) ترسیم شده است دمای این قسمت مذاب از مقدار اولیه آن ( $180^{\circ}\text{C}$ ) به صورت نمایی کم شده و در حدود  $40$  سانتی متری از محل ورود مذاب در طول سیستم خنک کننده به دمای  $98^{\circ}\text{C}$  می رسد. این دما مطابق نمودارهای DSC که در بالا آورده شده برابر دمای انجماد محصول است.



شکل ۷ توزیع نظری دما از مرکز در بیشترین سرعت تولید محصول

### ۵- نتیجه گیری

در این پژوهش چوب پلاستیک با استفاده از ضایعات ذرات چوب حاصل از کارخانجات نجاری و پلی اتیلن دست اول ساخته و تحلیل‌های حرارتی با استفاده از آزمایش DSC و TG برای آن انجام شد. نتایج نشان داد که افزودن ذرات چوب به داخل ماتریس پلی اتیلن تغییر محسوسی را در دمای ذوب ماده پلیمری ایجاد نمی کند. اما گرمای ذوب چوب پلاستیک را در مقایسه با پلی اتیلن خالص به نسبت ذرات چوب به کار رفته در آن کاهش می دهد که این را باید در محاسبه گرمای لازم برای اکسترودر مد نظر قرار داد.

## ۷- فهرست علائم

$\alpha$	ضریب پخش حرارتی
$\Delta H$	تغییر آنتالپی
$\mu$	لزجت
$\rho$	چگالی
$C_p$	گرمای ویژه
$h$	ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی
$k$	ضریب هدایت حرارتی
$\dot{m}$	دبی جرمی
$P$	فشار
$Q$	دبی حجمی
rpm	دور ماردون
$R$	شعاع محصول
$t$	زمان
$T$	دما
$T_m$	دمای ذوب
$T_w$	دمای خنک‌کار
$V$	سرعت خروجی محصول
$x$	مختصات شعاعی
$y$	مختصات در مسیر جریان

## ۸- منابع

- [1] Yao F, Wu Q, Lei Y, Xu Y, " Rice straw fiber- reinforced high- density polyethylene composite: Effect of fiber type and loading", industrial crops and products 28(2008) 63-72
- [2] Fatih M, Kadir K, " Determination fo Thermal Proprieties and Morphology of Eucalyptus Wood Residue High Density Polyethylen composite ", Molecular Sciences (2008,9):107-119
- [3] Fatih M, Kadir K, " Thermal Degradation, Mechanical Properties and Morphology of Wheat Straw Flour Filled Recycled Thermoplastic. Sensors (2008,8):500-519

نمودارهای به‌دست آمده برای ظرفیت گرمایی ویژه سه نمونه یعنی چوب پلاستیک، ذرات چوب و پلی‌اتیلن خالص، نشان دهنده افزایش خطی ظرفیت گرمایی ویژه آنها در برابر افزایش دما است. مقایسه ظرفیت گرمایی ویژه به‌دست آمده برای چوب پلاستیک بین دو روش آزمایش و استفاده از روش قانون مخلوطها، نشان دهنده اختلاف کمی بین نتایج این دو روش است.

هم‌چنین نتایج آزمایش TG نشان داد که افزودن ذرات چوب به داخل ماتریس پلی‌اتیلن دمای تجزیه چوب پلاستیک را پایین می‌آورد. به علاوه با استفاده از هر دو آزمایش DSC و TG کمترین و بیشترین دمای مجاز در تولید چوب پلاستیک با زمینه پلی‌اتیلن به ترتیب در حدود  $135^{\circ}\text{C}$  و  $230^{\circ}\text{C}$  به‌دست آمد.

انجماد چوب پلاستیک در خروجی اکستروژن مطالعه شد تا به‌وسیله آن بتوان سرعت تولید را افزایش داد. بدین منظور سرعت تولید با استفاده از تغییر سرعت ماردون دستگاه افزایش داده شد اما به دلیل عدم انجماد مناسب محصول، تولید محصولات سالم بدون استفاده از سیستم خنک کننده ناممکن بود. بنابراین معادلات انتقال حرارت ماده در خروجی قالب حل شد تا توزیع دمایی مواد در قالب به‌دست آید. با استفاده از نمودار توزیع دما و مشخص شدن نحوه انجماد محصول، سیستم خنک کننده مناسبی طراحی و ساخته شد. با استفاده از سیستم خنک کننده در تولید محصول مشاهده شد که تولید در سرعت‌های بالای ماردون تا ۳۰ دور بر دقیقه با موفقیت امکان پذیر بوده و کیفیت محصول نیز بهبود یافته است.

## ۶- تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از همیاری و همفکری آقای دکتر امیر حسین بهروش و در اختیار قرار دادن کارگاه تکنوپلاست صمیمانه تشکر و قدردانی می‌کنند. هم‌چنین از آقای مهندس امیر شاهی که در انجام و اجرای تولید محصول کمک کردند، تشکر می‌شود.



- [۸] لطفی شورابی مازیار، "بررسی اثر نقطه انجماد در محصول اکستروژن کامپوزیت چوب پلاستیک"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۸.
- [9] Kumari R, Ito H, Takatani H, Uchiyama M, Okamoto T, "Fundamental studies on wood/cellulose-plastic composites: effects of composition and cellulose dimension on the properties of cellulose/PP composite ", *J Wood Sci* (2007) 53:470-480
- [10] Mark A. Dietenberger, David W. Green, "wood handbook", U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. p 4631999.
- [4] Kamal B. Adhikary, Shusheng Pang, Mark P. Staiger, " Dimensional stability and mechanical behaviour of wood-plastic composites based on recycled and virgin high-density polyethylene (HDPE)", *Composites: Part B* 39 (2008) 807-815
- [5] Christoph B., " Processing of Thermal Sensitive Materials – a Case Study for Wood Plastic", *Transfercenter for Plastics Technology – Upper Austrian Research GmbH, Wels, Austria, Springer-Verlag* 2007.
- [6] Wechslera A, Hiziroglu S, " Some of the properties of wood-plastic composites", *Building and Environment* 42 (2007) 2637-2644.
- [7] Osswald T, Menges Georg, "Materials Science of Polymer for Engineers", *Carl Hanser, Munich* (2003).