

## مطالعه رفتار جریان مذاب کوپلی استر با دمای ذوب کم با استفاده از روش تعیین شاخص

## جریان مذاب پلیمرها

هنگامه شیرزادی<sup>۱</sup>، محمدعلی توانائی<sup>۲\*</sup>، امین ابراهیمزاده<sup>۳</sup>، نازنین جعفری<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

<sup>۲</sup> دانشیار دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

<sup>۳</sup> دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

<sup>۴</sup> کارشناسی، دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۱۸

tavanaie@aut.ac.ir

## چکیده

استفاده از کوپلی استرها با دمای ذوب کم در صنعت نساجی برای استفاده از قابلیت استحکام بخشی پیوندها و اتصالات به عنوان عامل چسبندگی آنها با ذوب شدن در دمای کم به شکل‌های مختلف، اعم از الیاف، نخ، پارچه و بی‌بافت‌ها بسیار مورد توجه قرار گرفته است. یکی از شاخص‌های مهم ارزیابی محدوده وزن مولکولی و جریان‌پذیری پلیمرها پیش از فرآورش آنها، ارزیابی شاخص جریان مذاب است. با این روش ساده می‌توان با هزینه کم و در مدت زمان کوتاهی رفتار جریان پلیمرهای لیفی را قبل از فرایند ذوب‌ریسی مورد بررسی قرار داد. در این پژوهش مقدار شاخص جریان مذاب چهار گرید مختلف کوپلی‌استر با دمای ذوب کم با ویسکوزیته‌های ذاتی مختلف، مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. بدین منظور در آزمون استاندارد بررسی رفتار جریان با استفاده از دستگاه سنجش شاخص جریان مذاب از متغیرهای دما، زمان ماند و وزنه‌های استاندارد، استفاده شد. نتایج نشان داد که گرانروی ذاتی از عوامل تاثیرگذار بر روی مقدار شاخص جریان مذاب و پایداری سیال در شرایط مختلف آزمون است و متغیرهای دما و زمان ماند بیش‌ترین تاثیر را در تغییرات شاخص جریان مذاب دارند. به طوریکه با افزایش دما و زمان ماند، گرانروی کاهش پیدا می‌کند. همچنین با بررسی دقیق متغیرها در بررسی رفتار جریان مذاب آنها، ملاحظه شد، از بین چهار گرید مختلف کوپلی‌استر مورد بررسی، گرید با گرانروی ذاتی ۰/۶۶ و ۰/۶۹ مناسب‌ترین گزینه برای فرایند ذوب-ریسی است.

کلمات کلیدی: کوپلی‌استر با دمای ذوب کم، شاخص جریان مذاب، گرانروی ذاتی، الیاف نساجی

## Study on melt flow rate behavior of low melt copolyesters using melt flow index measurement method

Hengameh Shirzadi<sup>1</sup>, Mohammad Ali Tenari<sup>2\*</sup>, Amin Ebrahimzadeh<sup>3</sup>, Nazanin Jafari<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Master's degree, Faculty of Textile Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Associate Professor, Faculty of Textile Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

<sup>3</sup> PhD student, Faculty of Textile Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

<sup>4</sup> Bachelor's degree, Textile Engineering Department, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

tavanaie@aut.ac.ir

### Abstract

The use of co-polyesters with a low melting point in the textile industry has received much attention in order to use the ability of strength by melting in different forms, including fibers, yarns, fabrics and non-wovens. One of the important indicators of molecular weight and flowability of fibrous polymers before their processing is to evaluate the melt flow index. With this simple method, the flow behavior of fibrous polymers can be investigated at low cost and in a short period of time before the melt-spinning process. In this research, the value of melt flow index of four different grades of copolyester with a temperature of 198 °C was determined. Therefore, checking the flow behavior by using the melt flow index measuring device, temperature changes, residence time and load weights are used. The results showed that intrinsic viscosity is one of the influencing factors on the value of melt flow index and flow stability in different test conditions, and changes in temperature and residence time have the greatest effect on the change of melt flow index. As the temperature and residence time increase, the viscosity decreases. Also, by carefully examining their melt flow behavior, it was observed that among the four different grades of copolyester examined, the grade with an intrinsic viscosity of 0.66 and 0.69 dl/g is the most suitable option for the melt spinning process.

Keywords: Low Melt Copolyester, Melt Flow Index, Intrinsic viscosity, Textile fibers

## ۱-مقدمه

کوپلی استر معمولاً از پلیمریزاسیون یک پلی اتیلن ترفتالات و درصدی از کومونومر پلی استر و ایزوفتالیک اسید بدست می آید که فرآیند تولید آن، شامل کوپلیمریزاسیون پیوندی دو نوع پلی استر است به عبارتی دیگر کوپلی استر، کوپلیمری است که با اصلاح پلی استرها که ترکیبی از دی اسیدها و دیولها هستند، سنتز می شود [۱]. کوپلی استرها با دمای ذوب کم نیز به همین روش سنتز می شوند به عبارت دیگر با استفاده از مقدار معینی کومونومر ایزوفتالیک اسید (کمتر از ۱۰ درصد) ساخته می شوند که حضور این کومونومر باعث کاهش زیاد درصد بلورینگی پلی استر می شود و از دمای ذوب آن به مقدار قابل توجهی می کاهد. بیش تر کوپلی استرهای با دمای ذوب کم تجاری بر پایه ی ۱،۴- بوتان دی ال<sup>۱</sup>، آدیپک اسید<sup>۲</sup> و ترفتالیک اسید<sup>۳</sup> هستند و دمای ذوب آنها حدود ۱۰۰°C از پلی- اتیلن ترفتالات<sup>۴</sup> کم تر است و استحکام کششی پایین تر و ازدیاد طول بالاتری در نقطه ی پارگی

دارند [۲]. از مزایای کوپلی استر می توان به بهبود مقاومت در برابر ضربه<sup>۵</sup>، مقاومت خمشی<sup>۶</sup> و مقاومت در برابر خستگی<sup>۷</sup> اشاره کرد. به طور کلی خواص مکانیکی بهبود یافته ای را ارائه می دهد مخصوصاً برای کاربردهایی که عملکرد بالا، مقاومت در برابر ضربه ضروری است مانند خودروسازی، بسته بندی و تجهیزات ورزشی و... مناسب است. همچنین از ویژگی های برخی از انواع کوپلی استرها می توان به پایداری حرارتی نسبتاً خوب اشاره کرد که در برابر دماهای بالا مقاومت خوبی از خود نشان می دهد؛ به علاوه برخی از گریدهای این پلیمر دوست دار محیط زیست بوده که سبب می شود در کاربردهای مختلفی استفاده شود [۳]. کوپلی استر بر پایه ی بوتیلن گلایکول<sup>۸</sup>، آدیپک اسید و ترفتالیک- اسید یک ماده ی مناسبی برای تولید منسوجات یکبار مصرف است و تقاضای زیادی در زمینه های پزشکی مانند باند، بسته بندی استریل، بسته جراحی، اسپان باند و ماسک صورت، بهداشتی و همچنین کشاورزی مانند سیستم های کنترل

<sup>5</sup> Impact Resistance<sup>6</sup> Flexural Strength<sup>7</sup> Fatigue Resistance<sup>8</sup> butylene glycol<sup>1</sup> 1,4-butanediol<sup>2</sup> Adipic Acid<sup>3</sup> Terephthalic Acid<sup>4</sup> Poly ethylene terephthalate (PET)

فرسایش خاک دارد [۴]. از نخ فیلامنت یا نخ ریسیده از کوپلی استر با دمای ذوب کم برای تولید نخ‌های دوخت ساده و مقاوم به چروکیدگی، نخ‌های شنیل، پارچه‌های رویی کفش و از الیاف پوسته مغزی متشکل از پوسته‌ی کوپلی استر با دمای ذوب کم و مغزی پلی استر معمولی، در پارچه‌های بی بافت با اتصالات حرارتی موثر و از نخ فیلامنت خالص آن پارچه‌های تقویت کننده (لایه چسباننده یا پیوند زننده) استفاده می‌شود [۵]. برای شناسایی خواص پلیمرها آزمایش‌های متفاوتی وجود دارد که از پرکاربردترین آن می‌توان به تعیین (شاخص جریان مذاب<sup>۱</sup>) اشاره کرد که معیاری است که تحت هر شرایط آزمایشی مختلف به منظور اندازه‌گیری گرانروی ماده‌ی مذاب تحت بار ثابت و نرخ برش کم محاسبه می‌شود. به بیان دیگر MFI شامل جرم مذاب پلیمر خارج شده برحسب گرم از یک روزنه یا قالب<sup>۲</sup> استاندارد (قطر و طول مشخص) در مدت زمان ۱۰ دقیقه تحت شرایط استاندارد (دما و وزنه معین) است. این مقدار با واحد  $g/10\text{min}$  بیان می‌شود [۶]. شاخص جریان مذاب در

حقیقت مقیاسی از جریان پذیری مواد در حالت مذاب است که با وزن مولکولی ماده نسبت عکس دارد. از آنجا که پلیمرها از زنجیرهای مولکولی با طول متفاوت تشکیل شده‌اند، لذا درصد وزن کومونومر، توزیع وزن مولکولی، درجه شاخه‌ای شدن زنجیر، بلورینگی و... حائز اهمیت می‌باشد و از عوامل تاثیرگذار بر روی این شاخص هستند. هرچه مقدار MFI بیش‌تر باشد، پلیمر دارای وزن مولکولی کم‌تر و زنجیره‌هایی با طول کوتاه‌تر است در نتیجه گرانروی مواد کم‌تر و مذاب پلیمری روان‌تر است [۶ و ۷]. آگاهی از قابلیت ذوب‌ریسی پلیمرها پیش از فرایند شکل‌دهی لیف، از اهمیت زیادی برخوردار است [۸ و ۹]. یکی از روشهای ساده و سریع برای بررسی اولیه قابلیت ذوب‌ریسی پلیمرهای گرمانرم استفاده از روش تعیین شاخص جریان مذاب است. در این پژوهش مقدار شاخص جریان مذاب چهار گرید مختلف کوپلی استر با دمای ذوب کم با ویسکوزیته‌های ذاتی مختلف، مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. بدین منظور در آزمون استاندارد بررسی رفتار جریان با استفاده از دستگاه سنجش شاخص جریان مذاب از متغیرهای دما، زمان ماند و وزنه‌های

<sup>1</sup> Melt Flow Index  
<sup>2</sup> die

گرانول‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است و سایر گرانول‌ها نیز با همین ابعاد و شکل ظاهری بودند که از شرکت چینی زیایمن شیانگیو<sup>۲</sup> تهیه شده‌اند. همچنین در پژوهش قبلی، محدوده دمای ذوب برای چهار گرید بین ۱۸۰-۱۷۰ درجه سلسیوس با استفاده از دستگاه بوچی ملتینگ مدل بی-۳۵۴۵ ساخت کشور سوئیس تعیین شد [۱۰].



شکل ۱ نمونه گرید مختلف کوپلی استر

در این پژوهش با استفاده از آزمون MFI به بررسی جریان‌پذیری چهار گرید مختلف کوپلی‌استر با دمای ذوب کم تا زیاد پرداخته شده است که از دما، زمان ماند و وزنه‌های مختلف برای بررسی رفتار جریان‌پذیری در این آزمون استفاده گردید که از عوامل متغیر هستند به طوریکه از دمای ۱۸۰، ۱۹۰، ۲۰۰، ۲۱۰ و ۲۲۰ درجه سلسیوس و وزنه‌های ۳۲۵، ۱۰۵۰، ۲۱۶۰ و ۵۰۰۰ گرمی و

استاندارد، استفاده شده است. هدف اصلی این پژوهش بررسی رفتار سیال مذاب این پلیمرها هنگام خروج از روزنه است، پایداری مذاب، یکنواختی، محدوده MFI سیال مذاب در شرایط مختلف دما، زمان ماند در سیلندر دستگاه و تنش برشی اعمالی به سیال مورد بررسی دقیق قرار گرفته است تا بتوان بهترین گرید را برای فرایند ذوب‌ریسی انتخاب کرد.

## ۲- بخش تجربی

گرانروی ذاتی چیپس‌های کوپلی استر مورد استفاده در این پژوهش با استفاده از گرانروی‌سنج محلول از نوع سه شاخه آبلهود<sup>۱</sup> و حلال‌های فنول، تترا کلرو اتان و تحت استاندارد ASTM D4603 اندازه‌گیری گردید و مقادیر ۰/۷۳، ۰/۶۹، ۰/۶۶ و ۰/۵۳ دسی‌لیتر بر گرم برای گرانروی ذاتی بدست آمد که به ترتیب گرید با گرانروی بسیار زیاد (HHV)، گرانروی زیاد (HV)، گرانروی کم (LV) و گرانروی بسیار کم (LLV) نامیده شدند. این گرانول‌ها هم‌سایز و شفاف بودند که به عنوان نمونه یکی از

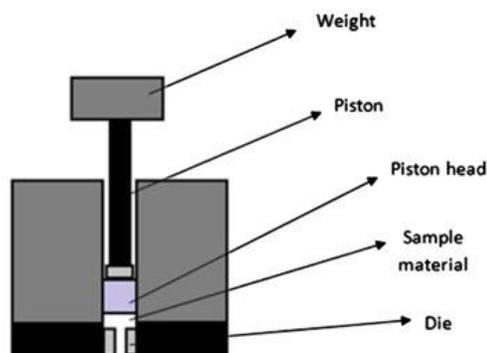
<sup>۲</sup> Xiamen Xiangyou

<sup>۳</sup> Buchi melting point B-545

<sup>۱</sup> Ubbelohde

وارد شده از سمت پیستون که وزنه‌ی مشخصی بر روی آن قرار دارد از سیلندر به سمت روزنه هدایت می‌شود. در ابتدای شروع کار با دستگاه باید توجه داشت که سیلندر و پیستون دستگاه تمیز باشند تا هنگام آزمایش، خطا ایجاد نشود همچنین به دمای مورد نظر رسیدن دستگاه قبل از اضافه کردن گرانول‌ها به سیلندر نیز حائز اهمیت است. در مرحله‌ی بعد باید به پلیمر زمان داده شود تا با سیلندر هم دما شود. پس از آن باید وزنه‌ی مورد نظر روی پیستون قرار داده شود. پس از انجام آزمایش، سیلندر و پیستون باید مجدداً تمیز شوند [۶]. برای انجام آزمون‌های MFI و مطالعه رفتار جریان سیال مذاب کوپلی‌استرها، ابتدا دستگاه اندازه‌گیری شاخص جریان مذاب بر روی دمای مورد نظر تنظیم می‌شود؛ پس از اینکه دمای دستگاه به دمای آزمایش رسید، کمی به دستگاه زمان داده می‌شود تا در همان دما ثابت نگه داشته شود و بعد نمونه را به شکل موجود (گرانول یا پودر) به کمک قیف به داخل سیلندر انتقال و به کمک پیستون کمی فشرده می‌شود تا جایی که ظرفیت سیلندر پر شود. اساس کار بدین صورت است که

همچنین زمان‌ماند ۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه برای بررسی رفتار شاخص جریان مذاب استفاده گردید. مقدار شاخص جریان مذاب نمونه‌ها طبق استاندارد ASTM D1238 مورد ارزیابی قرار گرفت و همچنین نمای شماتیک دستگاه MFI در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲ نمای شماتیک دستگاه اندازه‌گیری شاخص جریان مذاب [۶]

دستگاه اندازه‌گیری شاخص جریان مذاب از یک سیلندر که در وسط یک منبع حرارتی قرار دارد، تشکیل شده که منبع حرارتی، خود دارای یک محفظه‌ی عایق بیرونی است تا از تلفات انرژی جلوگیری شود. در آزمایش اندازه‌گیری شاخص جریان مذاب، اندازه‌ی روزنه‌ی خروجی دستگاه، مشخص و ثابت است و مذاب به کمک نیروی ثابت

گرانول‌ها توسط پیستون و با استفاده از نیروی دست متراکم می‌گردند تا حباب‌های هوای محبوس بین نمونه‌ها خارج گردد. در این مرحله با توجه به زمان ماند مورد نظر، به پلیمر فرصت داده می‌شود تا با سیلندر هم دما شود و ذوب گردند. زمان‌های ماند ۱۰، ۲۰ و ۳۰ دقیقه به این دلیل اعمال می‌شود که به این مقدار مدت زمان، تحت دمای تنظیم شده قرار بگیرد سپس نمونه تحت دما و نیرویی که از طرف وزنه بالای آن اعمال می‌شود قرار می‌گیرد و مذاب آن شروع به خروج از منفذ تعبیه شده در پایین آن می‌کند تا زمانی که پیستون تا اولین خط نشانه‌ای که روی آن قرار دارد، وارد سیلندر شود، زمان را اندازه گرفته و نمونه توسط کاتر برش زده می‌شود تا با توزین آن، مقدار شاخص جریان مذاب نمونه بدست آید. به منظور کاهش خطاهای احتمالی آزمایش هر نمونه در دما، زمان مشخص و تحت وزنه‌ی تعیین شده، سه مرتبه تکرار شده است که میانگین و انحراف معیار آن‌ها نیز محاسبه می‌شود.

### ۳- نتایج و بحث

نتایج مربوط به اندازه‌گیری میانگین و انحراف معیار از میانگین نمونه‌ها برای گریدهای مختلف LLV، LV، HV و HHV به ترتیب در جداول ۱، ۲، ۳ و ۴ در بخش ضمائم ارائه شده است و در شکل ۳ نمودارهای ستونی تغییرات آن بر حسب زمان ماند و وزنه‌های مختلف ترسیم شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که در گرید LLV با افزایش وزن وزنه‌ها، میزان شاخص جریان مذاب کوپلی‌استر با دمای ذوب کم افزایش یافته است. به طور کلی با توجه به نمودارهای تغییرات با افزایش وزنه و زمان ماند در دمای ۱۸۰ و ۱۹۰ درجه سلسیوس مقدار MFI نیز افزایش پیدا کرده است. دمای ۱۹۰ درجه سلسیوس، دمای مناسبی برای این گرید است زیرا خروجی مذاب به صورت یکنواخت و شفاف می‌باشد و در همه وزنه‌ها و زمان‌های ماند امکان اندازه‌گیری وجود دارد. در دماهای بالای ۲۰۰ درجه، با افزایش وزنه و زمان ماند امکان اندازه‌گیری وجود ندارد و تغییر رنگ در خروجی مذاب مشاهده می‌گردد زیرا تخریب حرارتی نمونه‌ها شروع می‌شود. به طور کلی زمان ماند در گرید LLV در وزنه‌های بالاتر (۲۱۶۰ گرمی)، بیش‌ترین

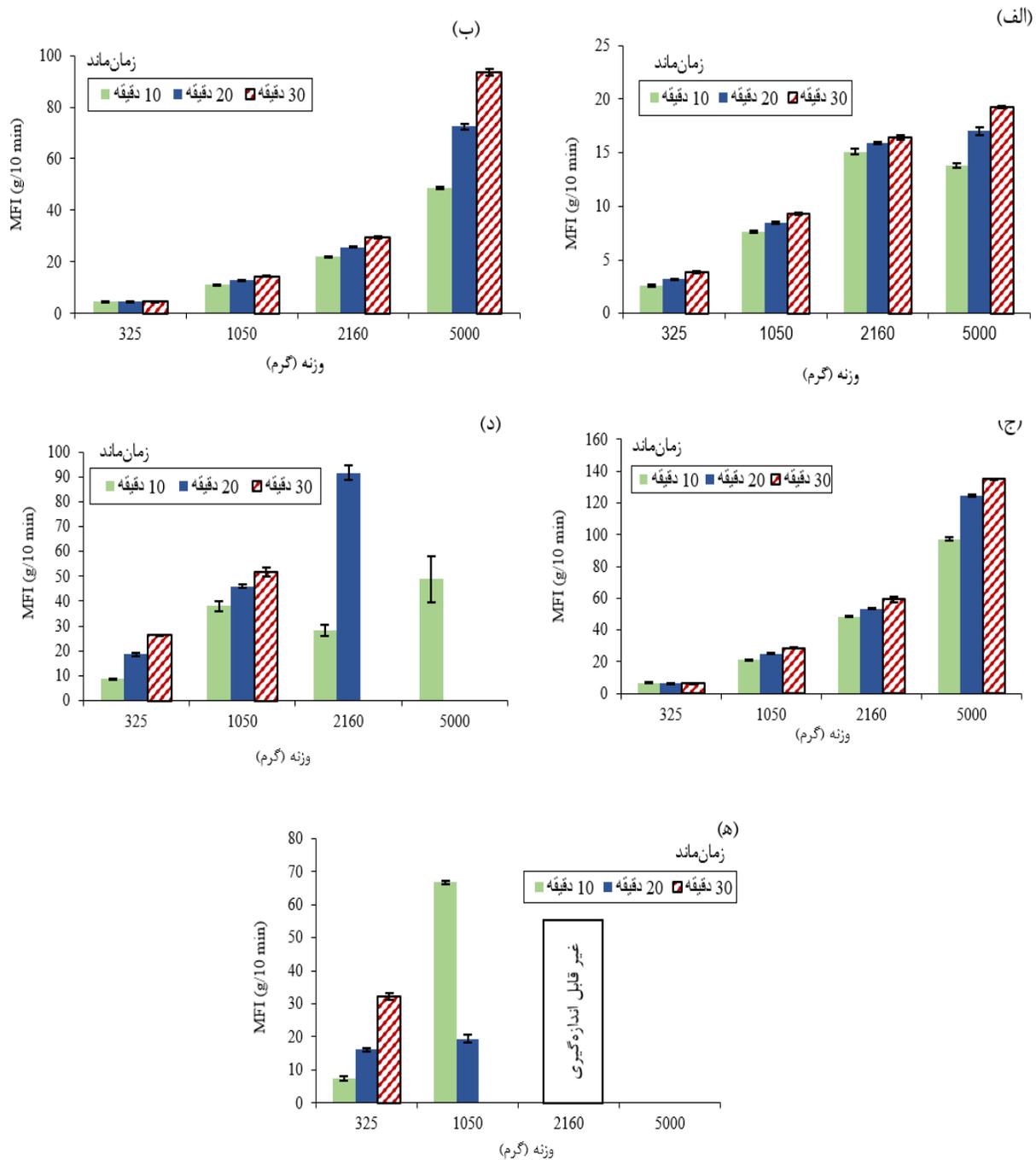
تأثیر را بر روی مقدار شاخص جریان مذاب دارد. اعمال نیروی بیشتر توسط وزنه‌های سنگین‌تر سبب افزایش تنش برشی وارده از دیواره سیلندر و روزنه دستگاه به مذاب پلیمر می‌شود و این تنش برشی بیشتر منجر به این می‌شود که در زمان‌های ماند طولانی‌تر، کاهش گرانروی بیشتری حاصل شود. شکل ۴ نیز تغییرات شاخص جریان مذاب کوپلی استر گرید LV در دما، وزنه و زمان‌های ماند متفاوت نشان می‌دهد.

گرید LV در دمای ۱۸۰ درجه سلسیوس و وزنه‌های کم به دلیل گرانروی پایین، مقدار شاخص جریان مذاب قابل اندازه‌گیری نمی‌باشد در حالیکه در وزنه‌ی ۵۰۰۰ گرمی و زمان‌های ماند متفاوت، مذاب با سرعت کم و به صورت یکنواخت خارج شده و از قابلیت کشسانی خوبی برخوردار است. همانطور که نتایج نشان می‌دهد دمای ۱۹۰°C بهترین دما برای این گرید می‌باشد زیرا با افزایش وزنه و زمان‌های ماند، شاخص جریان مذاب روند افزایشی داشته است.

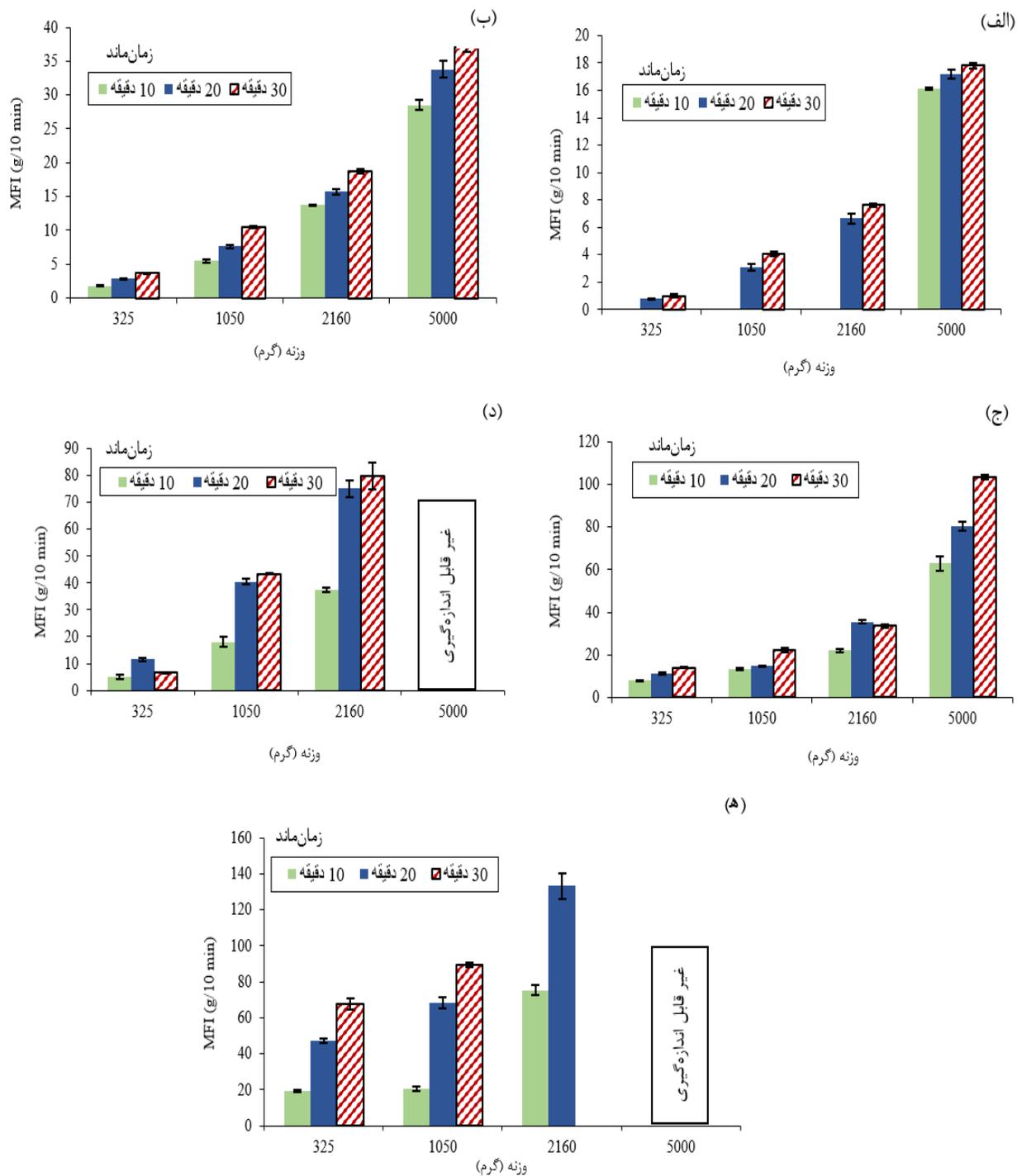
به طور کلی با افزایش وزنه و زمان ماند در دمای ۲۰۰°C مقدار MFI افزایش یافته است، به غیر از وزنه ۲۱۶۰ گرمی که مقدار شاخص جریان مذاب در زمان ماند ۲۰ دقیقه به مقدار بسیار جزئی بیش‌تر از ۳۰ دقیقه است و ممکن است بر اثر خطای اندازه‌گیری باشد. در دماهای بالاتر از ۲۰۰°C نیز همین روند مشاهده می‌شود که در وزنه ۵۰۰۰ گرمی به دلیل بالا بودن دما و وزنه، امکان اندازه‌گیری وجود نداشته و طبق مشاهدات خروجی مذاب به صورت نایکنواخت بوده است به دلیل آن که نمونه شروع به تجزیه حرارتی<sup>۱</sup> نموده و این با تغییر رنگ سیال مذاب به رنگ زرد نیز به دلیل اکسایش حرارتی گروه‌های انتهایی زنجیرها قابل رویت بود.

نتایج مربوط به اندازه‌گیری رفتار شاخص جریان مذاب از گرانول پلیمر کوپلی استر گرید HV در شکل ۵ نشان داده شده است.

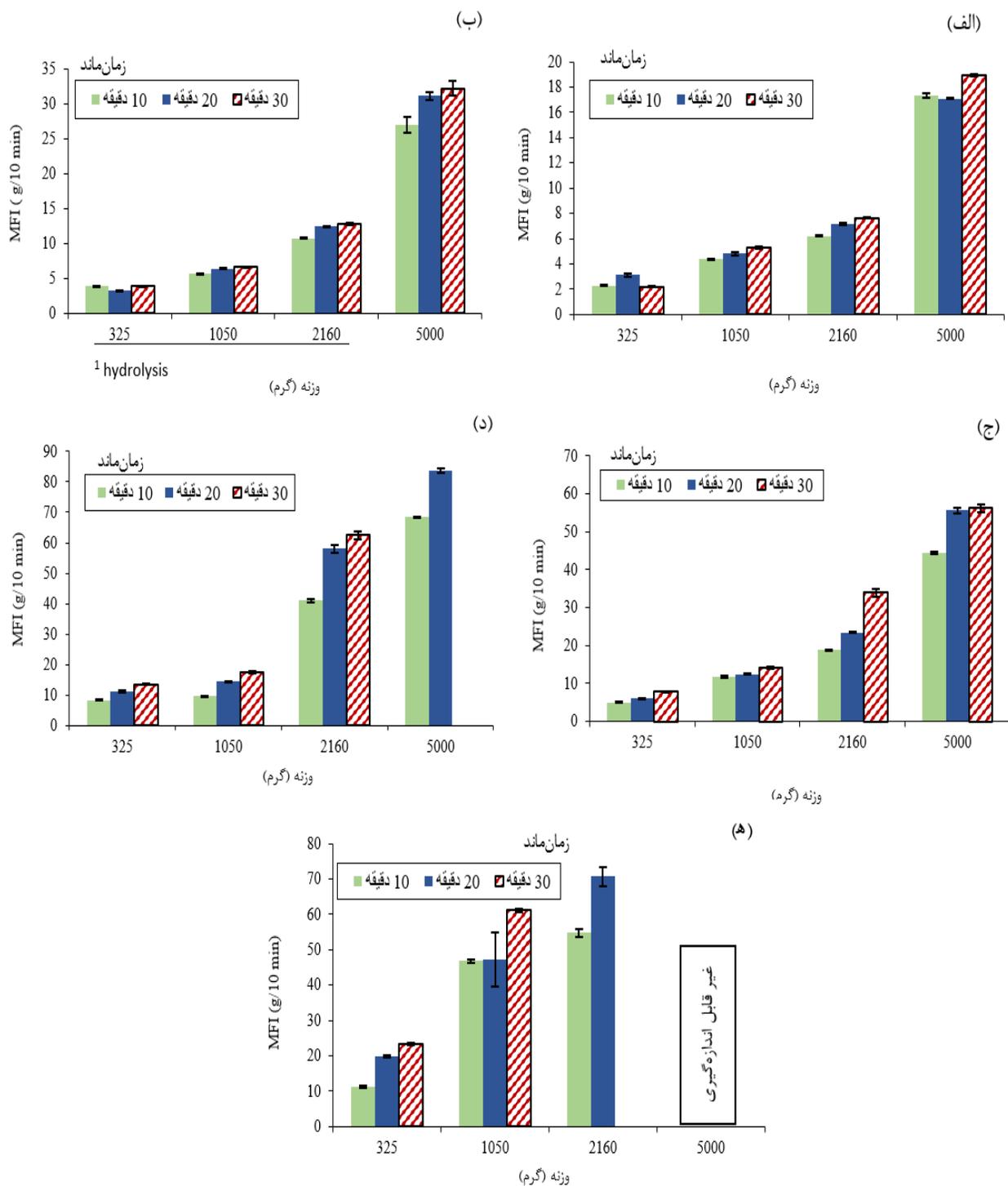
<sup>1</sup> hydrolysis



شکل ۳ - تغییرات شاخص جریان مذاب کوبلی استر گرید LLV در وزنه‌ها و زمان‌ماندهای مختلف: الف) ۱۸۰ °C، ب) ۱۹۰ °C، ج) ۲۰۰ °C، د) ۲۱۰ °C، ه) ۲۲۰ °C.



شکل ۴ - تغییرات شاخص جریان مذاب کوپلی استر گرید LV در وزن‌ها و زمان‌مادهای مختلف: الف) ۱۸۰ °C، ب) ۱۹۰ °C، ج) ۲۰۰ °C، د) ۲۱۰ °C، هـ) ۲۲۰ °C

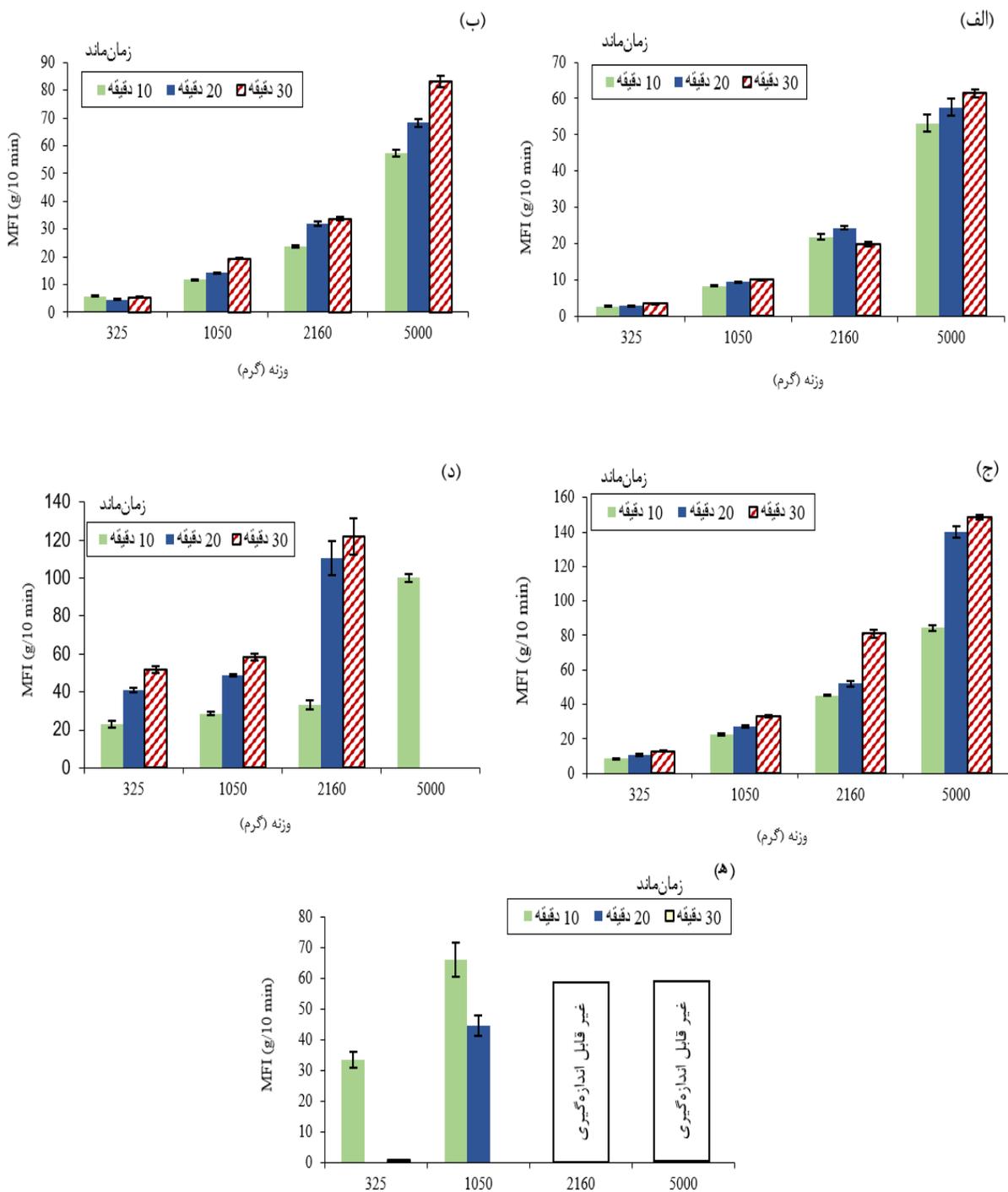


شکل ۵ - تغییرات شاخص جریان مذاب کوپلی استر گرید HV در وزنه‌ها و زمان‌ماندهای مختلف: الف) 180°C، ب) 190°C، ج) 200°C، د) 210°C، ه) 220°C.

اندازه‌گیری رفتار شاخص جریان مذاب از گرانول پلیمر کوبلی استر گرید HHV در شکل ۶ نشان داده شده است.

نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که در دمای ۱۸۰ درجه سلسیوس و وزنه‌ی ۲۱۶۰ گرمی بر خلاف انتظار با افزایش زمان ماند، مقدار شاخص جریان مذاب کاهش پیدا کرده و طبق مشاهدات خروجی سیال مذاب در زمان ماند ۱۰ دقیقه به صورت یکنواخت بوده در حالیکه این یکنواختی در زمان‌های ماند بیش‌تر کاهش می‌یابد. به طور کلی در گرید HHV با افزایش زمان ماند، وزن مولکولی و در نتیجه گرانروی کاهش یافته که منجر به ناپایداری خواص رئولوژیکی مذاب می‌شود. بهترین دما برای این گرید، دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس می‌باشد زیرا با افزایش وزنه و زمان ماند، MFI به دلیل کاهش گرانروی و درهم رفتگی زنجیرهای مولکولی افزایش می‌یابد. این گرید نسبت به دو گرید ذکر شده از روند مشخصی پیروی نمی‌کند، به این معنی که در دماهای بالاتر رفتار بی ثبات‌تری را از خود نشان می‌دهد.

نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که دمای ۲۰۰ درجه سلسیوس بهترین دما برای گرید HV است زیرا در تمامی وزنه‌ها و زمان‌های ماند، تغییرات شاخص جریان مذاب روند افزایشی داشته و قابل اندازه‌گیری بوده است. با افزایش دما، حرکت زنجیرهای مولکولی بیش‌تر می‌شود، سپس گره‌خوردگی کاهش می‌یابد. به این صورت که با کاهش گره‌خوردگی، مقاومت پلیمر در برابر جاری‌شدن نیز کم‌تر شده و گرانروی کاهش می‌یابد. در نتیجه خروجی مواد نسبت به دو دمای ۱۸۰°C و ۱۹۰°C یکنواخت‌تر و پیوسته‌تر است. این در حالی است که در دماهای بالای ۲۰۰°C افزایش وزنه و زمان ماند به طور همزمان منجر به ایجاد ناپایداری‌های مولکولی رفتار پلیمر می‌شود و با افزایش انحراف معیار همراه است که این افزایش منجر شده که اندازه‌گیری MFI قابل انجام نباشد. همچنین خروجی مذاب در دماهای ۲۱۰°C و ۲۲۰°C به صورت نایکنواخت بوده است. هر چه مقدار انحراف معیار کم‌تر باشد، میزان ناپایداری و نایکنواختی مذاب کم‌تر است به این معنا که قابلیت ریسندگی مذاب بهتر است. نتایج مربوط به



شکل ۶ - تغییرات شاخص جریان مذاب کوپلی استر گرید HHV در وزنه‌ها و زمان‌های مختلف: (الف) 180°C، (ب) 190°C، (ج) 200°C، (د) 210°C، (ه) 220°C.

برای بررسی دقیق تر رفتار جریان مذاب سیال پلیمر و پیش‌بینی آن قبل از فرایند ذوب‌ریسی، مقدار MFI برای چهار گرید مختلف کوپلی‌استر که در محدوده ۱۰ تا ۴۰ گرم بر در ۱۰ دقیقه است در وزنه‌ها و زمان‌های ماند مختلف با توجه به جداول ۱-۴ محاسبه و در جدول ۵ گزارش شده است. دلیل انتخاب این محدوده MFI محدوده پلیمرهای لیفی مختلف مورد استفاده در این فرایند است.

جدول ۵: نمونه‌هایی با مقدار شاخص جریان مذاب بین ۱۰-۴۰ در دماهای مختلف در محدوده زمان ماند ۱۰-۳۰ دقیقه و وزنه‌های ۳۲۵-۵۰۰۰ گرمی

نمونه‌ها	دما					جمع کل	غیر قابل اندازه‌گیری
	180	190	200	210	220		
HHV	4	6	5	3	1	19	11
HV	3	6	6	4	3	22	5
LV	3	7	8	3	2	23	10
LLV	6	6	3	4	2	21	10

همانطور که نتایج نشان می‌دهد گرید LV و HV به ترتیب بیش‌ترین تعداد شاخص جریان مذاب که در محدوده ۱۰-۴۰ هستند را دارا می‌باشد با این تفاوت که در گرید HV مقدار شاخص جریان مذابی که قابل اندازه‌گیری نبودند نیز کم‌تر از گرید LV می‌باشد. در نتیجه گرید HV نسبت به سایر گریدها عملکرد بهتری دارد زیرا مقدار شاخص جریان مذاب قابل اندازه‌گیری در دما، وزنه و زمان‌های ماند مختلف در این گرید با توجه به جدول ۳ نسبت با سایر گریدها بیش‌تر می‌باشد. همچنین درصد تغییرات شاخص جریان مذاب دو گرید HV و LV در محدوده تغییرات دمای ۱۸۰ تا ۲۱۰ درجه سلسیوس و بین وزنه‌های ۳۲۵ و ۲۱۶۰ گرمی در زمان ماند ۲۰ دقیقه محاسبه و در جدول ۶ گزارش شده است. نتایج نشان می‌دهد که گرید HV به ترتیب در دمای ۱۸۰ و ۲۱۰ درجه سلسیوس کم‌ترین و بیش‌ترین تغییرات را دارا می‌باشد و طبیعی است که با افزایش دما، مقدار تغییرات

شاخص جریان مذاب افزایش می‌یابد. در حالیکه مقدار شاخص جریان مذاب گرید LV با توجه به مقادیر جدول ۲ در دمای ۱۸۰ درجه سلسیوس و وزنه ۳۲۵ گرمی، بسیار پایین می‌باشد که همین باعث افزایش درصد تغییرات شده است. همچنین در دمای ۱۹۰ درجه سلسیوس کم‌ترین مقدار درصد تغییرات را دارد.

جدول ۶: درصد تغییرات شاخص جریان مذاب دو گرید HV و LV در زمان ماند ثابت ۲۰ دقیقه بین وزنه‌های ۳۲۵ گرمی و ۲۱۶۰ گرمی

نمونه‌ها	دما			
	210	200	190	180
LV	550 %	212 %	458 %	763 %
HV	414 %	286 %	284 %	128 %

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه تاثیر دما، وزنه و زمان ماند بر روی اندازه‌گیری شاخص جریان مذاب چهار گرید مختلف کوپلی استر با دمای ذوب کم مورد مطالعه قرار گرفته است. با توجه به نتایج بدست آمده با افزایش دما و وزنه‌ها (از ۳۲۵ گرم تا ۵۰۰۰ گرم) و همچنین زمان ماند از ۱۰ دقیقه تا ۳۰ دقیقه نیز در تمامی گریدها افزایش شاخص جریان مذاب کوپلی استر مشاهده گردید. به طور کلی گرید HV بهترین

نتایج را دارا می‌باشد زیرا در تمامی دماها، وزنه‌ها و زمان‌های ماند جز دمای ۲۲۰ درجه سلسیوس و وزنه‌ی ۵۰۰۰ گرمی، آزمایش قابل اندازه‌گیری می‌باشد. این روند برای گرید HV از نظم بیش‌تری نسبت به سه گرید دیگر برخوردار است و همچنین خروجی سیال مذاب به صورت شفاف و یکنواخت بوده و احتمالاً قابلیت ریسندگی بهتری دارد. همه‌ی پارامترها از جمله دما، زمان و وزنه از عوامل تاثیرگذار بر روی شاخص جریان مذاب می‌باشد ولی دما بیش‌ترین تاثیر را دارد به دلیل آن که با افزایش دما، وزن مولکولی کم‌تر شده به عبارت دیگر به علت کوتاه بودن طول زنجیرها، درهم رفتگی و گره‌خوردگی کم‌تر بوده در نتیجه گرانروی مذاب کم‌تر و سرعت خروجی بیش‌تر می‌شود. بعد از دما، زمان ماند تاثیر بیش‌تری دارد زیرا در دماهای بالا، افزایش زمان ماند منجر به کاهش گرانروی می‌شود. بهترین نمونه‌ی آزمایشی، وزنه‌ی ۱۰۵۰ گرمی است زیرا در زمان‌های ماند متفاوت قابل اندازه‌گیری و دارای نتیجه بود و با افزایش وزنه‌ها که سبب افزایش تنش برشی وارد شده از دیواره روزنه و سیلندر دستگاه به مذاب می‌شود، احتمال ناپایداری

مذاب و گسیختگی مذاب خارج شده از روزنه افزایش یافته و به همین دلیل شاخص جریان مذاب

قابل اندازه گیری نخواهد بود.

## ۵- مراجع

- [1]. Copolyester – A Versatile Choice for Medical Applications Thijs Jaarsma, Business Briefing: *Medical Device Manufacturing & Technology*, 2004.
- [2]. B. Catia Bastioli; “Handbook of Biodegradable Polymers”, rapra technology, 2021.
- [3]. D.P. Kint, et al.; “Crystallization and properties of poly (ethylene terephthalate) copolymers containing 5-test butyl isophthalic units”, *Polymer*, 43(26): p. 7529-7537, 2002
- [4]. W. Haile, M. Tincher, and F. Williams; “Biodegradable copolyester for fibers and nonwovens”, *International Nonwovens Journal*, vol 2: p. 1558925002OS-01100209, 2002.
- [5]. Kim, H., et al., “The thermal-bonding behavior of polyethylene/poly (ethylene terephthalate) bicomponent fibers”, *Journal of the Textile Institute*, 88(3): p. 37-51, 1997.
- [6]. R. Singh, R. Kumar, I. Singh Ahuja, “Thermal Analysis for Joining of Dissimilar Polymeric Materials Through Friction Stir Welding”, *Elsevier Journal*, 2017.
- [7]. R. Dewi, N. Sylvia, Zulnazri, M. Riza; “Melt Flow Index (MFI) analysis of sago based thermoplastic starch blend with polypropylene and polyethylene”, *Elsevier Journal*, 87: p. 396-400, 2023.
- [8]. N. Haghghat, M. A. Tavanaie, M. Safi, F. Najafi, Spinnability and Tensile Properties of Poly(ethylene terephthalate) Fibers Blended with Polymeric Ionic Liquids in Melt Spinning Process, *Journal of Apparel and Textile Science and technology*, 2(4): p. 229-235, 2013.
- [9]. Mohammad Ali Tavanaie, Ahmad Moosavi Shooshtari, Fatemeh Gouharpei, Mohammad Baamani moghaddam, Optimization and Prediction of Mechanical Properties of Polypropylene/Poly(butylene terephthalate) Blend Fibers Using Response Surface Methodology, *Journal of Apparel and Textile Science and technology*, 2(2): p. 104-113, 2012.
- [10]. M. Korangbeheshti, A study on melt spinnability and some structural and physical properties of low melt co-PET filament yarns, M.Sc. Thesis, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran, 2022.

## ۶- ضمیمه

جدول ۱: MFI کوپلی استر با دمای ذوب کم گرید LLV، در دماها و وزنه‌های مختلف.

5000 (g)	2160 (g)	1050 (g)	325 (g)	وزنه زمان ماند(دقیقه)	دما (°C)
13.82 (0.37)	15.11 (0.51)	7.62 (0.25)	2.6 (0.14)*	10	180
17.02 (0.68)	15.92 (0.16)	8.48 (0.25)	3.19 (0.01)	20	
19.26 (0.19)	16.41 (0.38)	9.28 (0.17)	3.80 (0.20)	30	
48.73 (0.73)	22.04 (0.49)	11.23 (0.20)	4.75 (0.23)	10	190
72.41 (2.22)	25.82 (0.25)	13.03 (0.24)	4.82 (0.08)	20	
93.43 (2.87)	29.45 (0.64)	14.48 (0.48)	4.86 (0.11)	30	
97.39 (2.71)	48.57 (1.23)	21.35 (0.75)	6.81 (0.37)	10	200
124.72 (1.51)	53.49 (0.98)	25.22 (0.57)	6.49 (0.18)	20	
135.17 (0.42)	59.33 (3.06)	28.75 (1.09)	6.39 (0.66)	30	
48.92 (18.68)	28.34 (4.42)	38.14 (4.10)	8.74 (0.33)	10	210
قابل اندازه‌گیری نبود -	91.6 (5.97)	46.08 (1.25)	18.55 (0.97)	20	
قابل اندازه‌گیری نبود -	قابل اندازه‌گیری نبود -	51.89 (3.54)	26.24 (0.53)	30	
قابل اندازه‌گیری نبود -	قابل اندازه‌گیری نبود -	66.73 (0.98)	7.41 (1.11)	10	220
قابل اندازه‌گیری نبود -	قابل اندازه‌گیری نبود -	19.42 (2.39)	16.1 (1.28)	20	
قابل اندازه‌گیری نبود -	قابل اندازه‌گیری نبود -	قابل اندازه‌گیری نبود -	32.23 (1.98)	30	

\* انحراف معیار

جدول ۲: MFI کویلی استر با دمای ذوب کم گرید LV در دماها و وزنه‌های مختلف.

5000 (g)	2160 (g)	1050 (g)	325 (g)	وزنه زمان ماند(دقیقه)	دما (°C)
16.11 (0.16)	قابل اندازه‌گیری نبود -	قابل اندازه‌گیری نبود -	قابل اندازه‌گیری نبود -	10	180
17.21 (0.67)	6.65 (0.71)	3.06 (0.45)	0.77 (0.12)	20	
17.80 (0.41)	7.61 (0.20)	4.06 (0.34)	0.99 (0.26)	30	
28.53 (1.61)	13.72 (0.12)	5.48 (0.51)	1.79 (0.12)	10	190
33.81 (2.39)	15.72 (0.84)	7.6 (0.62)	2.82 (0.24)	20	
36.95 (1.24)	18.74 (0.61)	10.44 (0.30)	3.75 (0.06)	30	
62.97 (6.90)	22.04 (1.83)	13.21 (0.94)	7.87 (0.47)	10	200
80.39 (3.90)	35.40 (1.47)	14.91 (0.39)	11.34 (0.97)	20	
103.5 (2.26)	33.67 (1.69)	22.18 (2.11)	13.99 (0.70)	30	
قابل اندازه‌گیری نبود -	37.4 (1.98)	18.08 (3.72)	4.89 (1.75)	10	210
قابل اندازه‌گیری نبود -	75.07 (5.98)	40.38 (2.03)	11.54 (1.36)	20	
قابل اندازه‌گیری نبود -	79.64 (10.13)	43.33 (0.35)	6.56 (0.56)	30	
قابل اندازه‌گیری نبود -	75.17 (5.54)	20.54 (2.46)	19.36 (1.06)	10	220
قابل اندازه‌گیری نبود -	133.23 (14.30)	68.49 (6.18)	47.04 (2.35)	20	
قابل اندازه‌گیری نبود -	قابل اندازه‌گیری نبود -	89.23 (2.22)	67.8 (6.47)	30	

جدول ۳: MFI کوبلی استر با دمای ذوب کم گرید HV در دماها و وزنه‌های مختلف.

وزنه / زمان ماند (دقیقه)	325 (g)	1050 (g)	2160 (g)	5000 (g)	دما (°C)
10	2.30 (0.08)	4.37 (0.02)	6.22 (0.12)	17.31 (0.31)	180
20	3.15 (0.26)	4.83 (0.28)	7.20 (0.18)	17.10 (0.14)	
30	2.21 (0.05)	5.29 (0.16)	7.66 (0.08)	18.91 (0.22)	
10	3.87 (0.86)	5.72 (0.14)	10.77 (0.25)	26.91 (2.27)	190
20	3.24 (0.26)	6.40 (0.23)	12.42 (0.19)	31.10 (1.02)	
30	3.92 (0.11)	6.62 (0.17)	12.81 (0.29)	32.19 (2.13)	
10	5.15 (0.13)	11.43 (0.58)	18.59 (0.12)	44.50 (0.20)	200
20	6.09 (0.08)	12.43 (0.35)	23.47 (0.56)	55.65 (1.52)	
30	7.75 (0.15)	14.11 (0.38)	33.96 (2.06)	56.16 (2.10)	
10	8.24 (0.29)	9.65 (0.26)	40.95 (0.99)	68.37 (0.29)	210
20	11.28 (0.78)	14.44 (0.36)	57.99 (2.42)	83.76 (1.66)	
30	13.39 (0.33)	17.32 (0.8)	62.74 (2.80)	قابل اندازه‌گیری نبود -	
10	11.16 (0.72)	46.83 (0.98)	54.78 (2.37)	قابل اندازه‌گیری نبود -	220
20	19.87 (0.46)	47.29 (15.33)	70.73 (5.26)	قابل اندازه‌گیری نبود -	
30	23.39 (0.42)	61.18 (0.84)	قابل اندازه‌گیری نبود -	قابل اندازه‌گیری نبود -	

جدول ۴: MFI کوبلی استر با دمای ذوب کم گرید HHV، در دماها و وزنه‌های مختلف.

5000 (g)	2160 (g)	1050 (g)	325 (g)	وزنه زمان ماند(دقیقه)	دما (°C)
<b>18.59</b> (0.12)	<b>21.89</b> (1.55)	<b>8.40</b> (0.22)	<b>2.7</b> (0.25)	10	<b>180</b>
<b>23.47</b> (0.56)	<b>24.39</b> (1.16)	<b>9.43</b> (0.28)	<b>2.96</b> (0.13)	20	
<b>23.47</b> (0.56)	<b>19.82</b> (1.10)	<b>10.07</b> (0.05)	<b>3.46</b> (0.17)	30	
<b>57.36</b> (2.57)	<b>23.68</b> (0.58)	<b>11.95</b> (0.07)	<b>5.86</b> (0.61)	10	<b>190</b>
<b>68.24</b> (2.82)	<b>32</b> (1.37)	<b>14.14</b> (0.10)	<b>4.62</b> (0.31)	20	
<b>83.28</b> (3.92)	<b>33.77</b> (0.98)	<b>19.27</b> (0.39)	<b>5.47</b> (0.15)	30	
<b>84.41</b> (3.20)	<b>45.3</b> (0.29)	<b>22.55</b> (1.75)	<b>8.72</b> (0.12)	10	<b>200</b>
<b>140.05</b> (7.14)	<b>52.18</b> (3.20)	<b>27.25</b> (0.89)	<b>10.74</b> (0.81)	20	
<b>148.52</b> (2.54)	<b>81.04</b> (5.11)	<b>33.40</b> (1.28)	<b>12.88</b> (1.01)	30	
<b>100.12</b> (4.14)	<b>33.48</b> (4.77)	<b>28.4</b> (1.71)	<b>23.17</b> (3.83)	10	<b>210</b>
قابل اندازه‌گیری نبود -	<b>110.77</b> (18.20)	<b>48.84</b> (1.17)	<b>41.20</b> (2.56)	20	
قابل اندازه‌گیری نبود -	<b>122.16</b> (19.37)	<b>58.29</b> (3.42)	<b>52.06</b> (3.57)	30	
قابل اندازه‌گیری نبود -	قابل اندازه‌گیری نبود -	<b>65.92</b> (11.03)	<b>33.48</b> (5.06)	10	<b>220</b>
قابل اندازه‌گیری نبود -	قابل اندازه‌گیری نبود -	<b>44.49</b> (6.49)	قابل اندازه‌گیری نبود -	20	
قابل اندازه‌گیری نبود -	قابل اندازه‌گیری نبود -	قابل اندازه‌گیری نبود -	قابل اندازه‌گیری نبود -	30	