

## اثر بلورینگی بر مهاجرت مواد سبک از پلی اتیلن سنگین به ماده غذایی چرب

### Crystallinity Effect on Migration of Low Molecular Weight Substances from HDPE into Fatty Food

مریم رفیعی، محمد حسین نوید فامیلی\*، همایون معدل

تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی، گروه پلیمر، صندوق پستی ۱۴۱۱۵/۱۴۳

دریافت: ۸۳/۶/۱۴، پذیرش: ۸۴/۱/۲۳

#### چکیده

مهاجرت، پدیده انتقال مواد از ظروف بسته بندی به ماده غذایی در تماس با آن، برای کنترل سلامت ماده غذایی حائز اهمیت است. عوامل مختلفی مانند نوع پلیمر، ماده غذایی، مواد مهاجر و شرایط تماس در سرعت مهاجرت و مقدار آن مؤثر هستند. بلورینگی و شکل شناسی پلیمر از عوامل مؤثر بر پدیده مهاجرت اند. در این پژوهش، با استفاده از پلی اتیلن سنگین و با روش قالبگیری فشاری و قالبگیری تزریقی نمونه هایی در شرایط مختلف، تهیه شد. مقدار بلورینگی نمونه ها به کمک تجزیه گرمایی معین شد و نمونه ها در شرایط دمایی زیاد در معرض شبه غذایی چرب (محلول اتانول ۹۵ درصد) قرار داده شد. مقدار کاهش وزن نمونه ها، مهاجرت مواد از پلی اتیلن به ماده غذایی و ارتباط آن با بلورینگی نمونه ها بررسی شد. نتایج نشان می دهد که در هر دو فرایند با افزایش بلورینگی قطعات تهیه شده، مهاجرت مواد از نمونه به ماده غذایی کاهش می یابد.

#### واژه های کلیدی

مهاجرت، بسته بندی مواد غذایی،  
پلی اتیلن سنگین، بلورینگی  
تجزیه گرمایی

#### مقدمه

توسعه بسته بندی مواد غذایی در دهه گذشته بوجود آمده است و امروزه بیش از ۳۰ نوع پلیاستیک متفاوت به عنوان مواد بسته بندی استفاده می شود [۱]. پلیمرها موادی خنثی هستند و روی مواد غذایی اثری ندارند. ولی، مواد شیمیایی متنوعی را شامل می شوند که به غذای

بسته بندی، سبب افزایش اطمینان به سلامت مواد غذایی در برابر میکروارگانیسمها و تغییرات زیستی و شیمیایی آن می شود. در نتیجه بسته بندی، جزئی لازم در فرایند تولید مواد غذایی شده است. به دلیل رویارویی با تقاضای وسیع صنعت مواد غذایی، رشد برجسته ای در

#### Key Words

migration, food packaging,  
high density polyethylene, crystallinity  
thermal analysis

قابل تعدیل خواص فیزیکی و مرتبط با شکل شناسی پلیمر است. اما، اندازه گیری و تخمین این عوامل اغلب مشکل است [۳]. انتقال مولکولهای کوچک از میان پلیمری بدون تداخل فرایند نفوذ - انحلال است و شار وابسته به انحلال پذیری و نفوذ پذیری است. نفوذ نفوذکننده ها در پلیمرهای نیمه بلوری بیشتر از میان فاز بی شکل اتفاق می افتد. بلورها بطور کلی برای تمام مولکولهای غیر واکنشی، نفوذناپذیر هستند. بلورها مانعی در برابر انتقال نفوذ کننده ها از میان سامانه ایجاد می کنند که باعث افزایش مسیر نفوذ می شوند. بدین ترتیب، آنچه ممانعت هندسی نامیده می شود، به وسیله عامل پیچ و خم معین می شود. حرکت قطعه فاز بی شکل بشدت با محدودیت ممانعت بلورها کاهش می یابد. همچنین، نواقص زنجیرها شامل انتهای زنجیرها و شاخه های زنجیرها در فاز بی شکل وجود دارد که باعث افزایش حجم آزاد می شود [۵].

روند بلوری شدن مولکولها بسته به پیکربندی زنجیرهاست. زنجیرهای صلب پلیمر به شکل دسته هایی با ساختارهای میله ای شکل می گیرند. ساختار توده یا درشت پلیمرها به اینکه تبلور از محلول رقیق یا مذاب اتفاق می افتد بستگی دارد. زمانی که تبلور در شرایط ساکن در محلول رقیقی اتفاق می افتد، تک بلورها شامل زنجیرهای تاخوردده هستند. زمانی که بلوری شدن از مذاب در شرایط ساکن اتفاق می افتد، تاخوردن زنجیرها به سرعت در تمام جهتهای اتفاق می افتد و منجر به ساختار گویچه ای می شود. تنش اثر مشخصی روی ساختار یا شکل شناسی پلیمر دارد. در محلولهای رقیق و مذابهای زنجیرهای منعطف پلیمری، تنش سبب می شود ساختار شیش کباب (shish kebab) ایجاد شود. زنجیرها تاخوردده بنظر می رسد که از ردیفهای زنجیرهایی که بشدت بسط یافته اند، ناشی می شوند [۶]. درصد بلورینگی اثر مهمی روی ویژگیهای ماده دارد. بلورینگی بیشتر باعث افزایش چگالی می شود. با افزایش چگالی حجم آزاد ماده کاهش می یابد و نواحی بی شکل کمتر و در نتیجه مقدار مهاجرت مواد کمتر می شود. ساختار پلیمر از راههای ظرفیتی روی خواص پلیمر اثر می گذارد. تغییرات کمی در بلورینگی و آرایش یافتگی زنجیرهای پلیمر می تواند مسیر نفوذ را تغییر دهد. اثر بلورینگی و ساختار بلورها بر نفوذ گازها و حلالها به درون پلیمر بررسی شده است [۵]. با وجود فعالیتهای پژوهشی زیاد انجام شده در زمینه پیش بینی و تخمین مقدار مهاجرت و مقالات و مطالب ارائه شده در این خصوص، در اغلب مدلها مقادیر مهاجرت براساس جرم مولکولی، دما و ثابتهایی که براساس کارهای تجربی بدست می آید، تخمین زده شده است. در حالت در نظر گرفتن سایر عوامل نیز تعداد این عوامل زیاد و تعیین آنها هزینه زیادی دارد که از هدف مدلسازی که تسهیل آزمونها و صرفه جویی هزینه های آزمایشها و زمان

بسته بندی شده مهاجرت می کنند [۲]. نوع برهمکنش ماده غذایی با بسته بندی به اجزای غذا و بسته بندی بستگی دارد. این برهمکنشها نتیجه فرایندهای انتقال جرم است که در چند فاز نامتعادل سامانه اتفاق می افتد. سینتیک این فرایند بشدت به خواص اجزای سامانه وابسته است. بسته به ساختار پلیمرها، فرایندهای انتقال جرم ممکن است مهاجرت، عبوردهی یا جذب باشند. همچنین، برخی از اجزا ممکن است منتقل نشوند، ولی فرایند را تحت تأثیر قرار دهند [۳].

پدیده مهاجرت مواد موجود در پلیمر به غذا، در خصوص حرکت مواد کوچک مولکول از بسته بندی به درون ماده غذایی مطرح می شود. اگر این پدیده بر اساس کاهش وزن ظرف بسته بندی پس از مهاجرت به ماده غذایی محاسبه شود، مهاجرت کلی نامیده می شود. در این حالت مهاجرت کلیه مواد مهاجر ارزیابی می شود.

برای کنترل پدیده مهاجرت باید اسلوب مهاجرت و عوامل مؤثر بر آن بررسی شود. پدیده مهاجرت مواد از پلیمرهای لاستیکی در دمای بیشتر از دمای انتقال شیشه ای اتفاق می افتد. این فرایند، انتقال جرم است که از قوانین نفوذ فیک پیروی می کند [۱،۳،۴]. عوامل مؤثر بر پدیده مهاجرت افزون بر ماهیت پلیمر، ماهیت ماده غذایی در تماس با قطعه پلیمری، عوامل انحلال پذیری، دما، غلظت و ضخامت قطعه شامل عوامل دیگر مانند تبلور، آرایش یافتگی زنجیرهای پلیمری و شکل شناسی پلیمر نیز هست [۴]. در فرایندهای مختلف شکل دهی پلیمرها، عوامل فرایندی بر خواص و ویژگیهای مختلف قطعه مؤثر است. از جمله این ویژگیها، آرایش یافتگی زنجیرها، درصد بلورینگی قطعه و شکل شناسی زنجیرهای پلیمری است که با تغییر عوامل فرایندی تفاوت می کند. از آنجا که نفوذ در بخشهای بی شکل پلیمر اتفاق می افتد و بخشهای بلوری ماده به شکل مانعی در برابر نفوذ عمل می کنند، تغییر در مقدار بلورینگی سبب تغییر در ضریب نفوذ می شود [۵].

فرایندهای مهاجرت چه کوچک و چه بزرگ مولکول، در پلیمرهای لاستیکی، پلیمرهایی که در دمای بالای دمای انتقال شیشه ای خود قرار دارند، به وسیله معادلات نفوذ فیک توضیح داده می شوند. پدیده مهاجرت مواد از ظرف بسته بندی به درون غذا در سه مرحله شامل نفوذ درون پلیمر، انحلال در سطح مشترک پلیمر - غذا و توزیع درون غذا اتفاق می افتد. از میان این سه مرحله، مرحله نفوذ درون پلیمر کندترین سرعت را دارد و کنترل کننده پدیده مهاجرت است. از عوامل اصلی در کنترل پدیده مهاجرت، ضریب نفوذ است [۱].

ضریب نفوذ براساس نظریه حجم آزاد بیان می شود. بنابراین، احتمال یافتن مهاجر، برابر احتمال یافتن حفره ای است که برای مهاجرت مهاجر به درون آن، به اندازه کافی بزرگ باشد. با این وجود، معادلاتی که وظیفه پیش بینی و تخمین ضریب نفوذ را دارند بر مبنای این نظریه شامل عوامل

مختلف دو فرایند قالبگیری فشاری و قالبگیری تزریقی به دلیل تفاوت مشخص در مقدار آرایش یافتگی، جریان و شکل شناسی زنجیرهای پلیمر انتخاب شد تا نمونه‌هایی با درصد بلورینگی متفاوت بدست آید. بدین منظور نمونه‌هایی در شرایط مختلف فرایند با دستگاه تزریقی و قالبگیری فشاری تهیه و بررسی شد. دستگاه DSC، Mettler Toledo مدل FP۹۹A برای آزمون تجزیه گرمایی نمونه‌ها و ترازوی دقیق با دقت ۰/۰۰۱ g برای اندازه گیری وزن نمونه‌ها بکار گرفته شد.

### روشها

قالبی که برای تولید دیسکهای پلیمری به کمک قالبگیری فشاری استفاده شد، به شکل دیسک و دارای مجرای عبور آب درون هر دو کفه برای تنظیم دماست. بخش داخلی قالب آب گرم داده شد تا قطعه بدون نیاز به استفاده از مواد رهاکننده از قالب جدا شود. قالب روی دستگاه نصب می شود و دمای آن تا دمای فرایند ماده افزایش می یابد. پس از اینکه دما در دو کفه یکنواخت شد، مقدار ماده لازم برای پرکردن قالب حدود ۷۵ برابر وزن قطعه نهایی در نظر گرفته شد. این مقدار را در مرکز قالب قرار داده، دو کفه قالب با سرعت ثابت بسته شد و مدت ۱۰ min در همین شرایط باقی ماند. سپس، جریان آب با دمای ۲۵°C در مجراهای آب قالب برقرار شد تا دمای قالب به حدود دمای محیط برسد، دمای قالب به کمک دماسنج نوری اندازه گیری و سپس، قطعه از قالب خارج شد. در تهیه نمونه‌های پلی اتیلن سنگین به کمک دستگاه پرس عوامل مختلف ثابت و تنها سرعت سرمایش متفاوت بود. دمای قالب ۱۵۰°C، زمان اقامت ۱۰ min و فشار پرس ۳۰ MPa تنظیم شد. سرعت سرمایش برای نمونه‌های مختلف در جدول ۲ نشان داده شده است.

برای تهیه نمونه‌ها به روش قالبگیری تزریقی، دمای مذاب، دمای قالب، فشار تزریق و سایر شرایط، ثابت و برای هر سه نمونه یکسان و تنها دمای قالب در شرایط تهیه آنها متفاوت است و در سه دمای مختلف قرار داده شده است. دمای قالب به کمک دماسنج نوری اندازه گیری شد. از آنجا که دمای قالب کمتر از دمای ذوب ماده پلی اتیلن سنگین است، ورود مذاب به قالب سبب سرد شدن مذاب می شود. هر چه اختلاف جدول ۲ شرایط تولید قطعه با دستگاه قالبگیری فشاری.

نمونه	دمای مذاب (°C)	زمان اقامت (min)	سرعت سرمایش (°C/min)
۱	۱۵۰	۲	۳۰
۲	۱۵۰	۲	۱۴/۵
۳	۱۵۰	۲	۲/۰۵

است به دور است. اما، درخصوص بررسی اثر بلورینگی بر پدیده مهاجرت مواد همراه با پلیمر به درون مواد غذایی که به عنوان شاخص اثر فرایند در نظر گرفته شده است، مطلبی یافت نشده و این موضوع بررسی نشده است.

در این پژوهش، ارتباط مقدارمهاجرت مواد و بلورینگی در دو فرایند مختلف شکل دهی شامل قالبگیری تزریقی و قالبگیری فشاری، از نمونه پلی اتیلن سنگین بررسی شده است. عوامل مختلف اثر گذار بر پدیده مهاجرت مانند نوع مواد، مقدار اولیه ماده افزودنی و دیگر عوامل ثابت نگه داشته شده و تنها یکی از شرایط فرایندی برای ایجاد تغییر در بلورینگی ماده تغییر داده شده است. سپس، نمونه‌های تهیه شده در مجاورت شبه غذای چرب و در دمای زیاد، ۲ h در ۱۲۰°C و سپس ۲۳۸ h در ۴۰°C قرار داده شد [۷]. مقادیر مهاجرت مواد براساس کاهش وزن نمونه‌ها و مهاجرت کلی اندازه گیری شد. برای بدست آوردن مقادیر بلورینگی نمونه‌ها، روی آنها تجزیه گرمایی انجام شد، در انتها ارتباط آنها مورد بررسی قرار گرفته است. مهاجرهای احتمالی پلی اتیلن سنگین (HDPE) شامل ضدآکسند، عوامل ضدالکتریسته ساکن، رنگدانه‌ها، روان کننده‌ها و عوامل لغزنده هستند. در مقالات آینده مهاجرت ویژه (شامل آزمایش و تعیین مقدار مهاجرت ماده‌ای خاص) ضدآکسندهای موجود در پلی اتیلن سنگین بررسی خواهد شد.

### تجربی

#### مواد

در این پژوهش، از پلی اتیلن سنگین نوع EX۳، محصول مجتمع پتروشیمی اراک با مشخصات ارائه شده در جدول ۱، اتانول ۹۵درصد مرک با شماره ۱۱۱۷۲۷ و آب یون زدوده ویژه HPLC تهیه شده به وسیله دستگاه دوبار تقطیر استفاده شد.

#### دستگاهها

در بحث ساختار بلورها و درصد بلورینگی، عوامل فرایندی مانند دمای مذاب، دمای قالب، سرعت سرمایش، جریان و تنشهای فرایندی در درشت ساختار و درصد تبلور بسیار موثر هستند. از میان فرایندهای

جدول ۱ مشخصات فیزیکی پلی اتیلن.

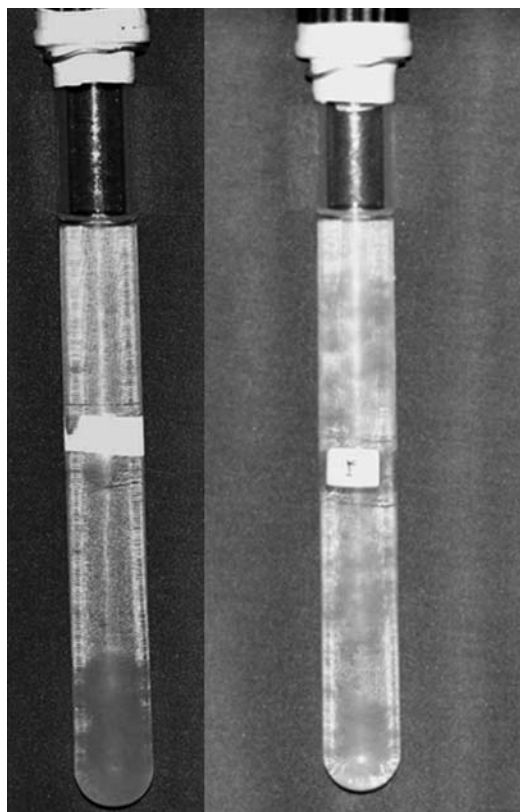
مشخصه	روش آزمون	مقدار
MFI (g/۱۰min)	DIN ۵۳۷۳۵	۰/۴-۰/۷
چگالی (g/cm <sup>۳</sup> )	DIN ۵۳۴۷۹	۰/۹۴۲-۰/۹۴۶

پلیمر خارج شود. هنگام تثبیت وزن، قطعه‌ها با دقت  $0.0001 \text{ g}$  توزین شدند. برای هر نمونه، آزمایش ۳ بار تکرار و از نتایج میانگین عددی گرفته شد. شکل ۱ محلول باقیمانده را در انتهای آزمون مهاجرت نشان می‌دهد. این محلول محتوی مواد مهاجرت کرده از نمونه پلیمری به محلول اتانول است که به شکل مواد معلق مشاهده می‌شود.

برای تعیین مقدار بلورینگی، تجزیه گرمایی روی نمونه‌ها انجام شد. به این منظور از هر نمونه دو قطعه با وزن مشخص، از دمای محیط ( $30^\circ\text{C}$ ) تا دمای  $200^\circ\text{C}$  با سرعت گرمادهی  $10^\circ\text{C}/\text{min}$ ، در یک مسیر رفت، گرما داده شدند و رفتار گرمایی آنها بررسی شد. با استفاده از تجزیه گرمایی نمونه‌ها، درصد بلورینگی ( $\chi_c$ ) با استفاده از آنتالپهای ذوب از طریق معادله (۱) محاسبه شد:

$$\% \chi_c = \frac{\Delta H_a - \Delta H}{\Delta H_a - \Delta H_c} \times 100 \quad (1)$$

در این معادله  $\Delta H$  آنتالپی ذوب نمونه مجهول و  $\Delta H_a$  و  $\Delta H_c$  به ترتیب آنتالپهای ذوب نمونه‌های بلوری و بی‌شکل استاندارد است. دمای ذوب پلی اتیلن صد درصد بلوری  $143^\circ\text{C}$  و گرمای ذوب آن  $286/7 \text{ mJ}/\text{mg}$  گزارش شده است [۹].



شکل ۱ محلول باقیمانده پس از آزمون مهاجرت، شامل محلول اتانول ۹۵ درصد و مواد مهاجر.

دمای مذاب و قالب بیشتر باشد مانند این است که شوک گرمایی به نمونه وارد شده است و به عبارتی به ایجاد شرایط سرد شدن ناگهانی (quench) نزدیکتر است. بنابراین، هر چه اختلاف دمای قالب و مذاب بیشتر باشد، مذاب سریعتر سرد می‌شود، بلورهای تشکیل شده ریزتر و ناپایدارتر و درصد بلورینگی نمونه کمتر است. اختلاف دمای مذاب و قالب، سبب سرد شدن دمای مذاب می‌شود. به دلیل تفاوت دمای قالب در نمونه‌ها، اختلاف دمای مذاب و دمای قالب برای نمونه‌های مختلف متفاوت است و تفاوت در سرعت سرد شدن سبب تفاوت در ساختار و مقدار بلورهای تشکیل شده می‌شود. تغییر در شرایط فرایندی با هدف دستیابی به درصدهای بلورینگی متفاوت انجام شده است. باید توجه داشت شرایط فرایند هدف این پژوهش نیست و هدف از هر نوع تغییر در شرایط فرایندی رسیدن به درصد بلورینگی (ساختار بلوری یا مقدار بلورینگی) متفاوت است. جدول ۳ شرایط تولید قطعه را به کمک دستگاه قالبگیری تزریقی نشان می‌دهد.

از هر یک از نمونه‌های معرفی شده ۵ قطعه تهیه گردید که ۳ قطعه برای انجام آزمون مهاجرت و ۲ قطعه برای انجام تجزیه گرمایی و اندازه‌گیری مقدار بلورینگی استفاده شد.

برای انجام آزمایش مهاجرت، نمونه‌ها درون محلول آبی اتانول ۹۵ درصد که به عنوان شبه غذایی چرب است [۴]، قرار داده شد. نسبت حجم محلول به سطح قطعه براساس استاندارد ۰/۸۳ درصد انتخاب شد [۸]. بدین ترتیب که قطعاتی با ابعاد  $3 \times 11 \times 120 \text{ mm}^3$  از نمونه‌ها تهیه و با دقت  $0.0001 \text{ g}$  توزین شد و در ظرف محتوی  $22 \text{ mL}$  محلول آبی اتانول ۹۵ درصد قرار داده شد. سر ظرف با کمک نوار تفلون و درپوش پیچی بسته شد تا از تبخیر مواد در طول آزمایش جلوگیری شود. شرایط معادل با شرایط پر کردن ظرف در دمای زیاد و نگهداری در دمای محیط به مدت ۶ تا ۱۲ ماه به عنوان شرایط آزمایش انتخاب شد که تسریع شده این شرایط شامل نگهداری نمونه به مدت ۲ h در  $121^\circ\text{C}$  و سپس به مدت ۲۳۸ h در دمای  $40^\circ\text{C}$  است [۴]. سپس، قطعات پلیمری مدت حدود ۲ h در آن در دمای  $60^\circ\text{C}$  قرار داده شد. تا ثابت شدن وزن، نمونه‌ها درون خشکانه قرار داده شد تا حلال جذب شده به داخل پلیمر، تبخیر شده از

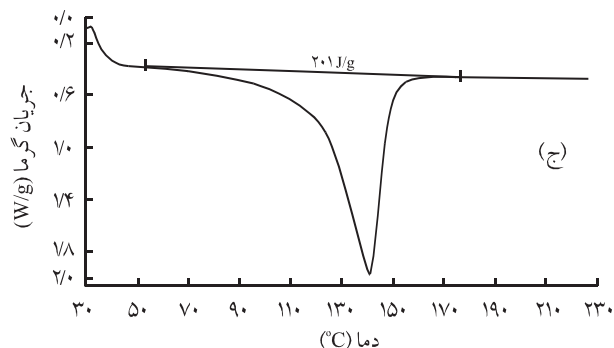
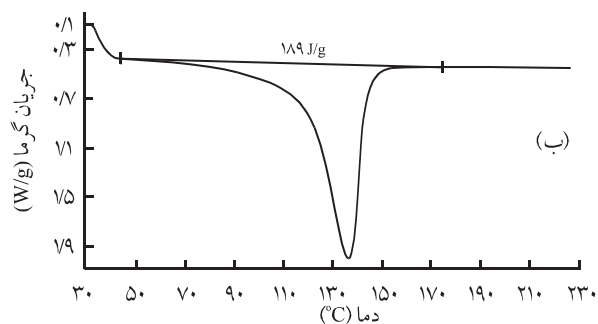
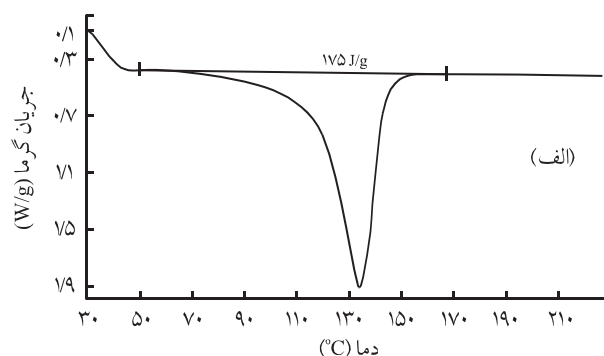
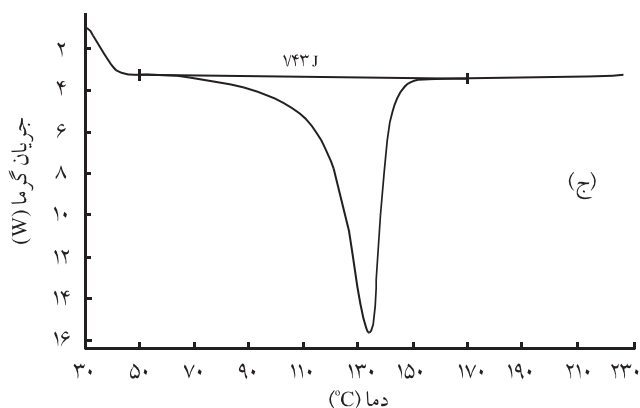
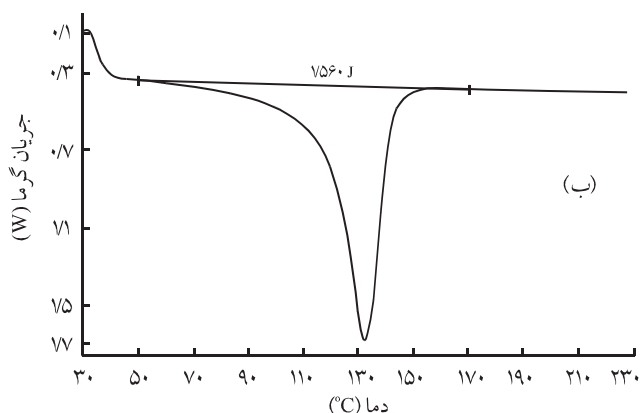
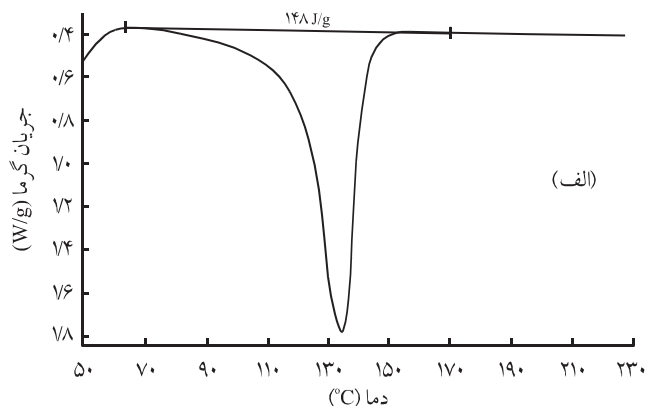
جدول ۳ شرایط تولید قطعه با دستگاه تزریق.

نمونه	دمای قالب ( $^\circ\text{C}$ )	دمای مذاب ( $^\circ\text{C}$ )	زمان اقامت (min)
۴	۳۰	۱۵۰	۲
۵	۵۵	۱۵۰	۲
۶	۸۰	۱۵۰	۲

## نتایج و بحث

با کاهش سرعت سرمایش، به دلیل افزایش بلورینگی، ساختار بلورهای تشکیل شده کاملتر و بلورهای تشکیل شده از لحاظ ترمودینامیکی پایدارتر هستند. سرعت سرمایش بر مقدار بلورینگی مؤثر است. با کم شدن سرعت سرمایش، مقدار بلورینگی افزایش می یابد و با توجه به نتایج، با کاهش سرعت سرمایش، سطح زیر پیک ذوب افزایش می یابد. به این مفهوم که آنتالپی ذوب افزایش یافته و بلورینگی بیشتر شده است.

با کمک نمودارهای حاصل از نتایج تجزیه گرمایی، مقدار بلورینگی نمونه ها محاسبه شد. این نمودارها در شکل های ۲ و ۳ آمده است. نتایج حاصل از نمودارهای بدست آمده از تجزیه گرمایی نمونه ها و مقدار بلورینگی محاسبه شده براساس این نتایج و معادله (۱)، در جدول ۴ خلاصه شده است. همان طور که در نتایج DSC ارائه شده در جدول ۴ مشاهده می شود با کاهش سرعت سرمایش نمونه ها، دمای ذوب و مساحت پیک مربوط به آنتالپی مذاب افزایش می یابد. تغییر سرعت سرمایش، در ساختار واحدهای ساختاری بلورها تغییری ایجاد نمی کند.

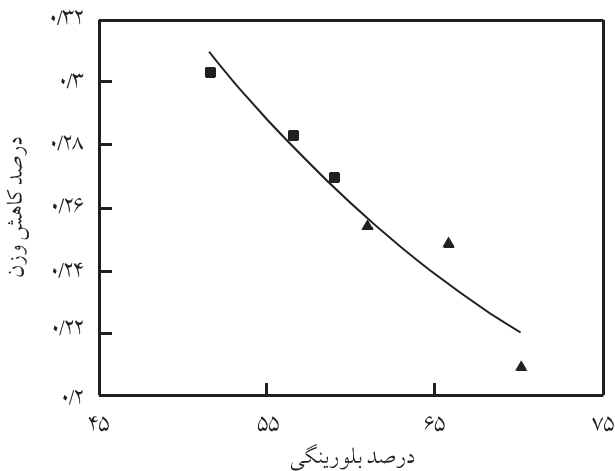


شکل ۳ نمودارهای تجزیه گرمایی نمونه های قالبگیری تزریقی مختلف: (الف) نمونه ۴، (ب) نمونه ۵ و (ج) نمونه ۶.

شکل ۲ نمودارهای تجزیه گرمایی نمونه های قالبگیری فشاری مختلف: (الف) نمونه ۱، (ب) نمونه ۲ و (ج) نمونه ۳.

جدول ۴ نتایج حاصل از آزمون DSC نمونه‌ها.

نمونه	دمای ذوب (°C)	آنتالپی ذوب (J/g)	وزن نمونه (mg)	درصد بلورینگی (%)
۱	۱۳۰/۵	۱۷۵	۹۵	۶۷/۰۴
۲	۱۳۳/۴	۱۸۹	۹۵	۶۵/۹۲
۳	۱۳۷/۲	۲۰۱	۱۰۷	۷۰/۱۱
۴	۱۳۵	۱۴۸	۹۶	۵۱/۶۲
۵	۱۳۳	۱۶۲/۵	۹۲	۵۶/۶۸
۶	۱۳۴	۱۶۹/۵۶	۸۸	۵۹/۱۴



شکل ۴ نمودار مقدار مهاجرت کلی برحسب درصد بلورینگی: (■) نمونه‌های قالبگیری تزریقی، (▲) نمونه‌های قالبگیری فشاری و (—) منحنی عبور داده شده از داده‌های نمونه‌های قالبگیری فشاری و تزریقی.

نتیجه‌ای مشخص در این زمینه ضروری است ساختار بلوری نمونه‌ها مشخص شود و بررسی بیشتر و آزمایش‌های دقیق‌تری روی نمونه‌ها انجام شود.

### نتیجه‌گیری

پدیده مهاجرت مواد از ظروف پلی اتیلن سنگین به ماده غذایی چرب، با نفوذ مواد درون پلیمر کنترل می‌شود. پدیده نفوذ با نظریه حجم آزاد بیان می‌شود. از طرفی مقدار بلورینگی ماده، با حجم آزاد رابطه معکوس دارد. به عبارتی نفوذ از بخش‌های بی‌شکل انجام می‌شود. بنابراین، با افزایش بلورینگی پلیمر، حجم آزاد کاهش می‌یابد و نفوذ سخت‌تر اتفاق می‌افتد. عوامل فرایند شکل‌دهی که کنترل‌کننده بلورینگی قطعه پلیمری هستند، بر مقدار حجم آزاد نمونه اثر دارد و بدین ترتیب بر مقدار مهاجرت مواد از قطعه به ماده غذایی مؤثر است. به همین دلیل شاخص بلورینگی به عنوان شاخصی اثرپذیر از فرایند شکل‌دهی انتخاب و اثر آن بر مقدار مهاجرت کلی بررسی شده است. با کاهش سرعت سرمایش قطعه پلی اتیلن سنگین در فرایندهای قالبگیری فشاری و قالبگیری تزریقی، بلورینگی نمونه افزایش می‌یابد. مقدار مهاجرت مواد از نمونه به شبه غذای چرب کاهش می‌یابد. روند کاهش مقدار مهاجرت کلی براساس افزایش بلورینگی برای هر دو فرایند قالبگیری فشاری و تزریقی

پس از انجام آزمون مهاجرت به روش عنوان شده، کاهش وزن نمونه‌ها محاسبه شد. آزمونها برای هر نمونه ۳ بار تکرار شد، خطای نسبی آزمایشها براساس نتایج محاسبه شده حدود ۷۲۴ درصد بدست آمد. نتایج کاهش وزن نمونه‌ها پس از آزمون مهاجرت، در جدول ۵ آمده است. نتایج بدست آمده از آزمون مهاجرت کلی برای هر دو دسته نمونه‌های قالبگیری تزریقی و فشاری نشان می‌دهد که با افزایش مقدار بلورینگی نمونه‌ها، مقدار کاهش وزن نمونه‌ها کاهش می‌یابد. به عبارتی با افزایش بلورینگی، مقدار مهاجرت کلی کاهش می‌یابد. روند مشاهده شده در کاهش مقدار مهاجرت کلی برای نمونه‌های قالبگیری تزریقی و قالبگیری فشاری در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود روند کاهش در مقدار مهاجرت کلی برای نمونه‌های قالبگیری تزریقی و قالبگیری فشاری یکسان است و بیان‌کننده این نکته است که نوع فرایند شکل‌دهی، به عبارتی تفاوت جریان و تنشها در فرایندهای شکل‌دهی و در نتیجه تفاوت در ساختار بلورها اثر قابل توجهی بر مقدار مهاجرت مواد ندارد، البته برای دستیابی به

جدول ۵ نتایج آزمون مهاجرت عمومی نمونه‌ها.

نمونه	وزن اولیه نمونه (g)	وزن ثانویه نمونه (g)	درصد کاهش وزن نمونه	آنتالپی ذوب (J/g)
۱	۲/۸۹۸۸	۲/۸۹۱۴	۰/۲۵۵	۱۴۲
۲	۲/۹۲۶۶	۲/۹۲۳۹	۰/۲۴۹	۱۵۱
۳	۲/۷۵۶۱	۲/۷۵۰۳	۰/۲۱	۱۶۱
۴	۳/۰۶۴۳	۳/۰۵۴۹	۰/۳۰۳	۱۲۶
۵	۳/۰۹۵۹	۳/۰۸۷۱	۰/۲۸۳	۱۲۸
۶	۲/۹۳۶۴	۲/۹۲۸۵	۰/۲۶۹	۱۳۷/۴۴



### تشکر و قدردانی

از حمایت‌های مالی شرکت پژوهش و فناوری پتروشیمی، گروه پژوهش‌های مشتری محور و راهنمای‌های مسئولان محترم آن شرکت در انجام این پژوهش قدردانی می‌شود.

یکسان است. این موضوع حاکی از آن است که اثر نوع فرایند و به عبارتی ساختار بلورها بر مقدار مهاجرت قابل چشم پوشی است. برای رسیدن به نتیجه دقیق در مورد اثر ساختار بلورها بر مقدار مهاجرت بررسی‌های بیشتری باید انجام شود.

### مراجع

1. Lau O.W. and Wong S.K., Contamination in Food from Packaging Material, *J. Chromatography A*, **882**, 255-270, 2000.
2. Castle L., An Introduction to Chemical Migration from Food Contact Materials, *Int. Food Safety News*, **9**, 2-4, 2000.
3. Garde J.A. and Catala R., Characterizing the Migration of Antioxidants from Polypropylene into Fatty Food Simulants, *Food Additive and Contaminants*, **18**, 750-762, 2000.
4. Piringer O.G. and Baner A.L., *Plastic Packaging Materials for Food* (Barrier Function, Mass Transport, Quality Assurance and Legislation), John Wiley and Sons, Chap. 3, 2000.
5. Hedenqvist M., Angelstok A., Edsberg L., Larsson P.T. and Gedde U.W., Diffusion of Small-Molecule Penetrants in Polyethylene: Free Volume and Morphology, *Polymer*, **37**, 2887-2902, 1996.
6. Baird D.G. and Collias D.I., *Polymer Processing Principles and Design*, Butterworth-Heinemann, Washington, 4-5, 1995.
7. Report of Food U.S. and Drug Administration, Guidance for Industry Preparation of Food Contact Notification and Food Additive Petitions for Food Contact Substances, Chemistry Recommendations, Final Guidance, Center for Food Safety and Applied Nutrition Office of Food Additive Safety, April 2002.
8. Standard Test Method for Two-Slided Liquid Extraction of Plastic Materials Using FDA Migration Cell, Annual Book of ASTM Standards, D4754-98, 2000.
9. Hatakeyama T. and Liu Z., *Handbook of Thermal Analysis*, Wiley and Sons, Chap. 4, 1998.