

فوم‌های میکروسلولی پلیمری
اصول، مبانی و خواص

به تصنیف:

دکتر طاهر ازدست

مهندس رزگار حسن‌زاده

ازدست، طاهر، ۱۳۵۶ -.

فوم‌های میکروسلولی پلیمری: اصول، مبانی و خواص / طاهر ازدست،
رزگار حسن‌زاده. - ارومیه: دانشگاه ارومیه، ۱۳۹۷.

۱۶۰ ص.: مصور، جدول، نمودار. - (انتشارات دانشگاه ارومیه؛ ۲۳۶).

شابک: 978-600-8681-28-1

کتابنامه.

1-اسفنج های پلاستیکی. 2- پلیمرها. الف. حسن زاده، رزگار، ۱۳۶۸، -
نویسنده همکار. ب. عنوان. ج. فروست.

شماره ملی: ۵۱۶۳۱۲۴---رده کنگره TP، ۱۱۸۳، الف/۵الف ۴،
۱۳۹۷

عنوان: فوم های میکروسلولی پلیمری: اصول، مبانی و خواص

مؤلف: طاهر ازدست، رزگار حسن زاده

ناشر: ارومیه: دانشگاه ارومیه، ۱۳۹۷

سال نشر: 1397

سری انتشارات: 236

شابک: 978-600-8681-28-1

آدرس: ارومیه- دانشگاه ارومیه- 04432779930 -09141869427

پیشگفتار مولفین

پلیمرها امروزه به جزئی اساسی از زندگی ما تبدیل شده و در ساخت اشیای مختلف از موارد مصرف عمومی گرفته تا ابزارهای دقیق و پیچیده‌ی علمی اعم از تجهیزات مهندسی، هوافضا، حمل و نقل، داروسازی و پزشکی به کار می‌روند. فوم‌های پلیمری، خواص خارق‌العاده‌ای دارند که آن را از مواد پلیمری، متمایز می‌کند و باعث می‌گردد این مواد بتوانند به تمامی جنبه‌های زندگی روزمره‌ی ما رخنه کنند. بهبود و توسعه تکنولوژی فرآیند و تجهیزات و در دسترس بودن مواد اولیه، امکان تولید دانش را در این زمینه فراهم ساخته است. اگرچه صنایع فوم طی دهه‌های گذشته با چالش‌های فراوانی روبه‌رو بوده است، اما به نظر می‌رسد که با توجه به زیرساخت‌های بهتر و فرصت‌ها و ارتباطات جهانی گسترده‌تر، به طور پیوسته رشد کند.

اگر به گذشته بنگریم، شگفت‌انگیز به نظر می‌رسد که چگونه فوم‌های پلیمری با سرعت خیره‌کننده‌ای از مفاهیم علمی به تحقیقات آزمایشگاهی و پس از آن به محصولات تجاری رسیده‌اند و بخش مهمی از زندگی را در اواخر قرن حاضر تشکیل داده‌اند. در حال حاضر، محققان دریافته‌اند که مکانیزم تولید فوم تا حدی مرموز و اسرارآمیز است ولی تشکیل یک حباب کروی شکل که ترکیبی از هنر و علم است، به تنهایی یک حقیقت جذاب می‌باشد. تحقیقات علمی و کاربردهای عملی دو حوزه‌ی متفاوت هستند ولی هر دوی آن‌ها به یک میزان چالش برانگیز بوده و ممکن است برای دستیابی به پیشرفت‌های مدنظر و خارق‌العاده، منابع در دسترس را به اشتراک بگذارند.

علم و تکنولوژی بایستی برای یک رشد مفید و متعادل، مکمل یکدیگر باشند. هر کدام بدون دیگری می‌تواند منجر به یک نتیجه ناپایدار شود و زمانیکه دست به دست هم دیگر دهند، می‌توانند با چالش‌های پیش رو مقابله نمایند. دانشمندان از دهه 1930 تا 1950 پایه و اساس صنعت فوم را بنا نهادند و در ادامه این تکنولوژی در دهه 1960 تا 1980 توسعه یافت.

این کتاب رهنمونی واضح برای پیوند بین پایه‌های علمی و تکنولوژی فوم را ارائه می‌دهد. سه فصل اول این کتاب، مقدماتی در مورد پلیمرها و فوم‌های پلیمری و همچنین اصول و پایه‌های مکانیزم فوم را پوشش می‌دهد. در فصل چهارم به بررسی خواص مکانیکی و ساختاری فوم‌های پلیمری تولید شده به روش‌های رایج فرآیندی پرداخته شده و در فصل پنجم خواص عایق حرارتی این مواد مورد بررسی قرار گرفته و نقش برجسته‌ی آن‌ها در کاهش هدر رفت انرژی در عصر حاضر بیان شده است. در این کتاب سعی شده است که ضمن تحلیل و نقد دیدگاه‌های دیگر محققان، نقطه نظرات، نتایج و نوآوری‌های تحقیقات اخیر نویسندگان کتاب نیز ارائه گردد.

این کتاب می‌تواند برای دانشجویان رشته‌های مهندسی مکانیک، مهندسی ساخت و تولید، مهندسی مواد، مهندسی پلیمر و مهندسی شیمی در مقاطع مختلف کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری و همچنین تمامی محققین و فعالین در زمینه صنعت و تولید پلیمرها و فوم‌های پلیمری مفید واقع گردد. همچنین برای فارغ‌التحصیلان مهندسی و علوم پلیمر این کتاب می‌تواند به عنوان یک منبع همیار در نظر گرفته شود.

از آنجاییکه این کتاب جزو اولین کتاب‌های تخصصی چاپ شده در زمینه‌ی فوم‌های پلیمری به زبان فارسی می‌باشد، نویسندگان کتاب کاملاً بر این امر واقفند که احتمال بروز اشکالات علمی و ادبی در آن وجود دارد. بنابراین نویسندگان کتاب صمیمانه آماده پذیرش دیدگاه‌ها و نقطه نظرات خوانندگان گرامی هستند تا ضمن دریافت نظرات ارزشمند این بزرگواران بتوانند کیفیت علمی کتاب را در چاپ‌های بعدی بهبود بخشند.

در خاتمه، مولفین این کتاب مراتب امتنان خود را از تمامی دوستانی که بی دریغ در تهیه این کتاب ما را یاری کردند، ابراز می‌دارند.

دکتر طاهر ازدست (عضو هیئت علمی دانشگاه ارومیه)

مهندس رزگار حسن‌زاده (دانشجوی دکتری تخصصی دانشگاه ارومیه)

فصل اول: مقدمه‌ای بر پلیمرها و فوم‌های پلیمری

10	..... پلیمرها	1-1
10	..... دسته‌بندی پلیمرها	1-1-1
17	..... فوم	2-1
17	..... خواص ساختاری	1-2-1
17	..... چگالی سلولی	1-1-2-1
Error!	..... نسبت انبساط، چگالی نسبی و کسر توخالی	2-1-2-1
	Bookmark not defined.	
Error! Bookmark not defined.	..... اندازه سلولی	3-1-2-1
Error! Bookmark not defined.	..... میزان سلول باز	4-1-2-1
Error! Bookmark not defined.	..... ضخامت دیواره سلولی	5-1-2-1
Error! Bookmark not defined.	..... دسته‌بندی فوم‌ها	2-2-1
Error! Bookmark not defined.	..... دسته‌بندی فوم‌ها بر اساس چگالی	1-2-2-1
	defined.	
Error!	..... دسته‌بندی فوم‌ها بر اساس اندازه سلولی/چگالی سلولی ..	2-2-2-1
	Bookmark not defined.	
Error! Bookmark not defined.	..... عوامل فوم‌زا	3-2-1
Error! Bookmark not defined.	..... عوامل فوم‌زای شیمیایی	1-3-2-1
	defined.	
Error! Bookmark not defined.	..... عوامل فوم‌زای فیزیکی	2-3-2-1
Error! Bookmark not defined.	..... حلالیت و نفوذ	4-2-1
Error! Bookmark not defined.	..... فرآیند فوم شدن	5-2-1

فصل دوم: هسته‌زائی سلولی

Error! Bookmark not defined.	..... مدل‌های هسته‌زائی	1-2
Error! Bookmark not defined.	..... هسته‌زائی همگن	1-1-2

Error! Bookmark not defined. 1-1-1-2 مدل هسته‌زائی کلاسیک همگن ..

Error! Bookmark not defined. 2-1-1-2 مدل هسته‌زائی واقعی همگن

Error! Bookmark not defined. 2-1-2 مدل هسته‌زائی غیرهمگن

Error! Bookmark not defined. 1-2-1-2 مدل هسته‌زائی کلاسیک غیرهمگن

Error! Bookmark not defined. 2-2-1-2 مدل هسته‌زائی واقعی غیرهمگن ..

Error! Bookmark not defined. 2-2 غلظت گاز محلول

Error! Bookmark not defined. 3-2 فشارهای موضعی

Error! Bookmark not defined. 4-2 ذرات معدنی

Error! Bookmark not defined. 5-2 کریستال‌ها

Error! Bookmark not defined. 6-2 نانوذرات

فصل سوم: رشد و پایداری سلولی

Error! Bookmark not defined. 1-3 مدل رشد سلولی

Error! Bookmark not defined. 2-3 بررسی رشد سلولی

Error! Bookmark not defined. 1-2-3 شعاع پوسته

Error! Bookmark not defined. 2-2-3 شعاع اولیه سلول

Error! Bookmark not defined. 3-2-3 نفوذ

Error! Bookmark not defined. 4-2-3 ثابت قانون هنری

Error! Bookmark not defined. 5-2-3 کشش سطحی

Error! Bookmark not defined. 6-2-3 زمان استراحت تنش

Error! Bookmark not defined. 7-2-3 ویسکوزیته برشی صفر ...

Error! Bookmark not defined. 3-3 پایداری سلولی

Error! Bookmark not defined. 1-3-3 ادغام سلولی

Error! Bookmark not defined. 2-3-3 آماس سلولی

Error! Bookmark not defined. انهدام سلولی 3-3-3

Error! Bookmark not defined. جهت‌گیری سلولی 4-3

Error! Bookmark not defined. اثر فازهای ثانویه بر رشد سلولی 5-3

6-3 تغییرات افت فشار، غلظت گاز و درجه سوپر اشباع نسبت به

Error! زمان

Bookmark not defined.

Error! Bookmark not defined. دمای بهینه برای نسبت انبساط 7-3

defined.

فصل چهارم: خواص مکانیکی و ساختاری فوم‌های پلیمری

Error! Bookmark not defined. فوم توده‌ای 1-4

Error! خواص ساختاری و مکانیکی فوم‌های پلیمری توده‌ای 1-1-4

Bookmark not defined.

Error! Bookmark not defined. فوم اکستروژن 2-4

Error! خواص ساختاری و مکانیکی فوم‌های پلیمری اکستروژنی ... 1-2-4

Bookmark not defined.

Error! Bookmark not defined. فوم قالب‌گیری تزریقی 3-4

1-3-4 بررسی خواص ساختاری و مکانیکی فوم‌های پلیمری

Error! تزریقی

Bookmark not defined.

فصل پنجم: خواص عایق حرارتی فوم‌های پلیمری

Error! Bookmark not defined. انتقال حرارت 1-5

Error! Bookmark not defined. انتقال حرارت هدایتی ... 1-1-5

Error! Bookmark not defined. انتقال حرارت جابجایی ... 2-1-5

Error! Bookmark not defined. انتقال حرارت تشعشی .. 3-1-5

Error! Bookmark not defined. تاریخچه مواد عایق حرارتی . 2-5

Error! Bookmark not defined. انتقال حرارت در فوم‌های پلیمری 3-5

defined.

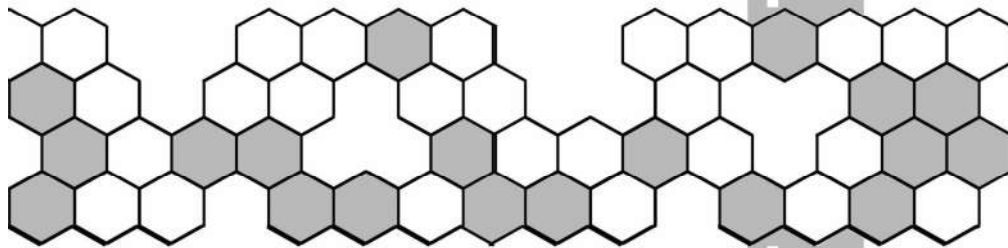
- Error! Bookmark not defined.** 1-3-5 جابجایی حرارتی داخل سلول‌ها
- Error! Bookmark not defined.** 2-3-5 هدایت حرارتی از طریق فاز جامد
- Error! Bookmark not defined.** 3-3-5 تشعشع حرارتی
- Error! Bookmark not defined.** 4-3-5 هدایت حرارتی از طریق فاز گاز
- Error! Bookmark not defined.** 4-5 ارتباط بین چگالی فوم و هدایت حرارتی
- Error!** 5-5 اثر نانولوله‌های کربنی بر روی هدایت حرارتی فوم
- Error! Bookmark not defined.** 6-5 راهکار کاهش هدایت حرارتی از طریق فاز گاز
- Error! Bookmark not defined.** 7-5 ساختار سلولی دوگانه



فصل اول :

مقدمه ای بر پلیمرها و فوم های پلیمری

Introduction of Polymers
and Polymeric Foams



1-1 پلیمرها

امروزه مواد پلیمری به بخش مهمی از زندگی ما تبدیل شده‌اند و تصور جهان پیشرفته کنونی بدون وجود این مواد که در ساخت اشیای مختلف استفاده می‌شوند، امری غیر ممکن به نظر می‌رسد. پلیمرها متشکل از هزاران واحد کوچک مولکولی موسوم به مونومر^۱ هستند که به روش اتصال آن‌ها به یکدیگر پلیمره شدن^۲ گفته می‌شود. برای نام‌گذاری پلیمرها نیز از نام مونومرهای یاد شده بهره گرفته می‌شود؛ بصورتی که نام هر پلیمر متشکل از پیشوند پلی^۳ و نام مونومر تشکیل دهنده‌ی آن است. به عنوان مثال پلیمرهای پلی اتیلن^۴ و پلی استایرن^۵ به ترتیب از مونومرهای اتیلن و استایرن به دست آمده‌اند.

معمولاً هنگام استفاده از کلمه‌ی پلاستیک^۶، این مفهوم با کلمه پلیمر مترادف در نظر گرفته می‌شود، اما در واقع این دو کلمه با یکدیگر تفاوت دارند. پلاستیک نوع خاصی از پلیمر است. پلیمر ماده‌ی خالص حاصل از فرآیند پلیمره شدن است و فاقد هرگونه ناخالصی است. پلیمرها معمولاً به ندرت بصورت خالص مورد استفاده قرار می‌گیرند و با اضافه کردن مواد افزودنی^۷ به آن، اصطلاحاً پلاستیک نامیده می‌شوند [1].

پلیمرها خانواده‌ی بزرگی از مواد مختلف هستند و همانگونه که واژه‌ی فلزها به دسته‌ای از مواد مختلف از جمله فولاد، آلومینیوم، مس، روی و غیره دلالت می‌کند، پلیمرها نیز شامل دسته‌ای متعدد از مواد مختلف مانند پلی اتیلن، پلی پروپیلن^۸، پلی استایرن و غیره هستند.

1-1-1 دسته‌بندی پلیمرها

بر اساس فرآیند پذیری پلیمرها، این مواد به دو دسته‌ی اصلی تقسیم می‌شوند: گرماسخت‌ها یا ترموستها^۹ و گرمانرم‌ها یا ترموپلاستیک‌ها^{۱۰}.

زنجیره‌های مولکولی پلیمرهای گرماسخت با پیوندهای قوی شیمیایی به یکدیگر متصل می‌شوند و ماده نمی‌تواند در اثر حرارت، دوباره نرم و روان شود. اگر حرارت دادن افزایش یابد، ماده تخریب مولکولی شده و می‌سوزد. فنل فرم آلدئید، اوره فرم آلدئید، باکلیت، اپوکسی‌ها^{۱۱} و برخی از پلی‌استرها^{۱۲} جزء مواد گرماسخت محسوب می‌شوند.

گرمانرم‌ها، پلیمرهایی هستند که زنجیره‌های مولکولی آن‌ها با نیروهای ضعیف واندروالسی در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند و بنابراین وقتی به این مواد حرارت داده می‌شود، نیروهای ضعیف بین مولکولی از هم گسیخته می‌شوند و ماده نرم و شکل‌پذیر می‌شود. با ادامه یافتن فرآیند حرارت دهی، این مواد به مذابی جریان‌پذیر تبدیل می‌شوند که در صورت سرد کردن مجدد، جامد می‌شوند. این فرآیند

¹ Monomer

² Polymerization

³ Poly

⁴ Polyethylene (PE)

⁵ Polystyrene (PS)

⁶ Plastic

⁷ Additives

⁸ Polypropylene (PP)

⁹ Thermoset

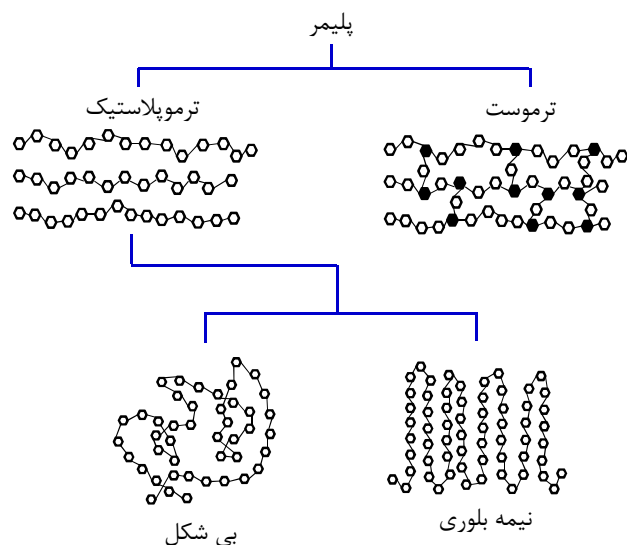
¹⁰ Thermoplastic

¹¹ Epoxy

¹² Polyester

را می‌توان بارها و بارها تکرار کرد که این ویژگی، مهم‌ترین مشخصه‌ی پلیمرهای گرمانرم است. پلی آمید (نایلون)^{۱۳}، پلی اتیلن، پلی استایرن، پلی متیل متاکریلات^{۱۴}، پلی کربنات^{۱۵} و پلی پروپیلن نمونه‌هایی از ترموپلاستیک‌ها هستند.

گرمانرم‌ها از نقطه نظر ساختار زنجیره‌های مولکولی‌شان به دو دسته‌ی بلوری (نیمه بلوری)^{۱۶} و بی شکل^{۱۷} تقسیم می‌شوند. برخی از گرمانرم‌ها نظیر پلی اتیلن و نایلون، از نظم ساختمانی و بلوری بالایی برخوردارند، ولی دقیق‌تر اینست که آن‌ها را نیمه بلوری یا جزئی بلوری بنامیم. دیگر گرمانرم‌ها نظیر پلی کربنات و پلی استایرن نامنظم و بی شکل هستند. در شکل 1-1 بصورت شماتیک، دسته‌بندی پلیمرها و ساختار زنجیره‌های پلیمری نشان داده شده است.



شکل 1-1: دسته‌بندی پلیمرها و شماتیک زنجیره‌های پلیمری مختلف

بطور کلی گرمانرم‌های بلوری چگالی بیشتری دارند؛ زیرا بلوری بودن ناشی از تراکم بیشتر مولکول‌های پلیمر است. سایر خواص این دو دسته از پلیمرهای گرمانرم در جدول 1-1 آورده شده است.

جدول 1-1: مقایسه خواص پلیمرهای گرمانرم بی شکل و نیمه کریستالی [1]

بی شکل	نیمه بلوری
--------	------------

¹³ Polyamide (Nylon)

¹⁴ Poly methyl methacrylate (PMMA)

¹⁵ Polycarbonate (PC)

¹⁶ Semi-crystalline

¹⁷ Amorphous

1	محدوده گسترده نرمش: جنبش گرمایی مولکول‌ها پیوندهای ثانویه‌ی ضعیف را می‌شکند. آهنگ این عمل در سرتاسر ساختار بی‌شکل متفاوت است و موجب گسترده‌تر شدن محدوده‌ی دمای نرمش می‌شود.	نقطه ذوب مشخص: ساختار متراکم منظم موجب شکستن همزمان پیوندهای ثانویه می‌شود.
2	معمولاً شفاف: ساختار باز آن نور را از خود عبور می‌دهد، بنابراین ماده شفاف به نظر می‌رسد.	معمولاً کدر (مات): اختلاف در شاخص انکسار بین دو فاز (بلوری و بی‌شکل) موجب تداخل بلوری می‌شود، بطوریکه ماده کدر یا مات به نظر می‌رسد.
3	انقباض کم: در اثر سرد شدن، آرایش بدون نظم مولکول‌ها موجب کمترین تغییر حجم و در نتیجه انقباض اندک آن در حین انجماد می‌شود.	انقباض زیاد: در اثر سرد شدن ماده از حالت مذاب، پلیمرها ساختاری متراکم و کاملاً آرایش یافته پیدا می‌کنند. این امر موجب تغییر حجم قابل توجه و در نتیجه انقباض زیادی می‌شود.
4	مقاومت شیمیایی اندک: ساختار بسیار باز، موجب حمله عمیق‌تر مواد شیمیایی در ماده می‌شود که بسیاری از پیوندهای ثانویه را از بین می‌برد.	مقاومت شیمیایی زیاد: ساختار کاملاً متراکم از حمله عمیق مواد شیمیایی به داخل ماده جلوگیری می‌کند.
5	مقاومت کم در برابر سایش و خستگی: ساختار نامنظم ماده کمترین کمک را به بهبود خواص سایشی یا خستگی می‌کند.	مقاومت در برابر سایش و خستگی: ساختار یکنواخت منشأ خواص سایشی و خستگی خوب آن‌هاست.

در جدول 1-2، دسته‌بندی برخی از پلیمرهای گرمانرم بی شکل و نیمه کریستالی ارائه شده است.

جدول 1-2: دسته‌بندی پلیمرهای گرمانرم بی شکل و نیمه کریستالی [2]

بی شکل	نیمه کریستالی
پلی وینیل کلراید (PVC)	پلی آمید (PA)
پلی استایرن (PS)	پلی اتیلن (PE)
پلی کربنات (PC)	پلی پروپیلن (PP)
پلی فنیلن (PPO)	استال (POA)
اکریلونیتریل بوتادین استایرن (ABS)	پلی استر (PBRT & PETP)

امروزه بسیاری از قطعات از پلیمر ساخته می‌شوند و کاربردهای وسیعی از زندگی را از وسایل روزمره تا کاربردهای پیشرفته به خود اختصاص داده‌اند. برای تولید قطعه‌ای سالم مخصوصاً در مواردی که دقت ابعادی از دغدغه‌های اصلی تولید می‌باشد، عوامل مختلفی

نظیر پارامترهای فرآیندی، موادی و طراحی قالب تاثیرگذار هستند. علیرغم کنترل و بهینه‌سازی همه‌ی این عوامل و پارامترها، یکی از مهم‌ترین پدیده‌هایی که در تولید قطعات پلیمری خصوصاً در روش‌های قالبگیری مطرح است، پدیده انقباض^{۱۸} پس از تولید می‌باشد. این پدیده به عنوان یک عیب باعث می‌شود که دقت ابعادی نهایی قطعات مطلوب نباشد و حتی زمانیکه انقباض‌های غیر یکنواخت در جهات مختلف روی دهد، باعث بوجود آمدن اعوجاج^{۱۹} در قطعه شود. نویسندگان این کتاب بر آن شدند که در تحقیقی جامع میزان انقباض پلیمرهای بی شکل و نیمه کریستالی را با هم مقایسه کرده و تاثیر پارامترهای فرآیندی را در فرآیند قالبگیری تزریقی (که پرکاربردترین روش تولید قطعات پلیمری می‌باشد) بررسی نمایند. از میان پلیمرهای بی‌شکل، پلی کربنات به عنوان یکی از پرکاربردترین پلیمرهای مهندسی و از بین پلیمرهای نیمه‌بلوری، پلی اتیلن با چگالی بالا به عنوان یکی از پرکاربردترین پلیمرهای نیمه بلوری ارزان قیمت انتخاب شدند.

برای بررسی پارامترهای فرآیندی قالبگیری تزریقی، چهار پارامتر تاثیرگذار دمای تزریق، فشار تزریق، زمان اعمال فشار نگهداری و زمان خنک‌کاری به عنوان پارامترهای متغیر در نظر گرفته شدند و سایر پارامترها روی سطوح مشخصی در خلال تمامی آزمایش‌ها ثابت گردیدند.

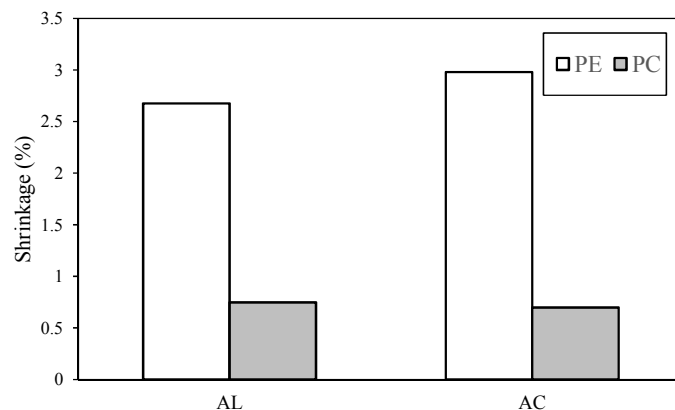
در شکل 1-2 میزان انقباض در دو جهت طولی (در راستای تزریق، AL)^{۲۰} و عرضی (عمود بر جهت تزریق، AC)^{۲۱} برای هر دو پلیمر مقایسه شده است. میزان انقباض در تمامی جهات برای PE بصورت آشکارا بیشتر از PC است که این پدیده بخاطر ماهیت دو پلیمر می‌باشد. PE از جمله پلیمرهای نیمه بلوری می‌باشد که دارای ساختاری منظم و بلوری شکل است و چنانچه به آن گرما داده شود، با باز شدن زیاد این زنجیره‌های به هم پیوسته و متعاقباً در اثر انجماد دوباره، انقباض آن بالا خواهد بود. از طرفی دیگر PC جزو پلیمرهای آمورف است که ساختاری منظم ندارد و در اثر گرم شدن و متعاقباً انجماد، به میزان کمتری نسبت به PE دچار انقباض خواهد شد. نتایج مشخص می‌سازد که PC از پایداری ابعادی بالاتری نسبت به PE برخوردار است. میزان انقباض PE در جهت عرضی بیشتر از جهت طولی می‌باشد. این نتیجه مشابه تحقیق Liao و همکاران [3] و Kc و همکاران [4] می‌باشد. همانطور که در بررسی‌های قبلی صورت گرفته روی پلیمرهای آمورفی مانند ABS، PS و PBT نشان داده شده بود [4]، جهت جریان تاثیری بر میزان انقباض در PC ندارد. این پدیده نیز به نوبه خود بیانگر پایداری ابعادی بالای PC در مقایسه با PE می‌باشد و همچنین روشن می‌سازد که جریان سیال در PC تقریباً ایزوتروپیک است، در حالیکه برای PE جریان سیال به صورت غیرایزوتروپیک اتفاق می‌افتد.

¹⁸ Shrinkage

¹⁹ Warpage

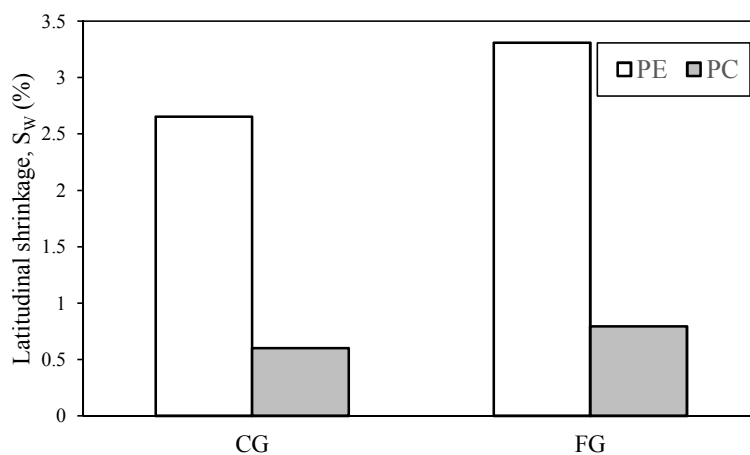
²⁰ Along injection (AL)

²¹ Across injection (AC)



شکل 1-2: مقایسه بین انقباض در جهات عرضی (AC) و طولی (AL) جریان

تغییرات انقباض عرضی در راستای تزریق برای هر دو پلیمر PE و PC در شکل 1-3 مشاهده می‌شود. برای هر دو پلیمر میزان انقباض در نقاط دور از محل تزریق^{۲۲}، بیشتر از نقاط نزدیک به محل تزریق^{۲۳} است. با ورود ماده به داخل قالب، افت شدیدی در دما و فشار اتفاق می‌افتد و هرچه ماده از محل تزریق دورتر می‌شود، انجماد بیشتر می‌گردد؛ بصورتی که در نقاط انتهایی قالب، جریان ماده کم می‌شود. از طرفی دیگر در نقاط ابتدایی قالب (نزدیک به محل تزریق) که دما و فشار بالاتر است، جریان ماده راحت‌تر بوده و بنابراین در اثر فشار تزریق و نگهداری، فشردگی مواد در این ناحیه بالاتر می‌باشد و متعاقباً انقباض کمتری اتفاق می‌افتد. در حالیکه فشار نگهداری به دلیل انجماد بیشتر نواحی دور از محل تزریق، تاثیر کمتری بر این نواحی دارد که این امر سبب بالا رفتن انقباض در نواحی دور از گیت می‌شود. وابستگی میزان انقباض به فاصله از محل تزریق برای PE بیشتر از PC است.



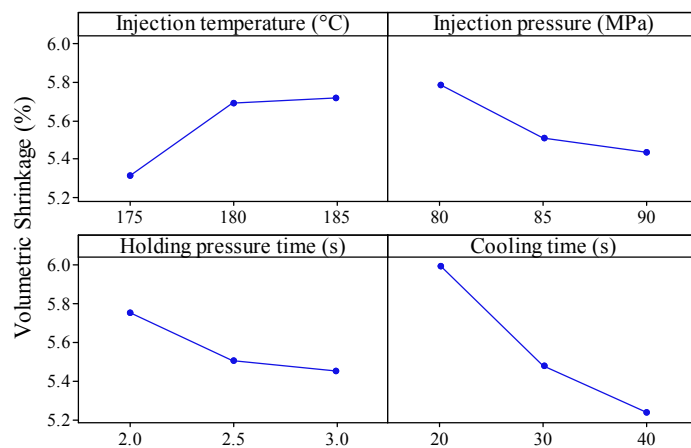
شکل 1-3: مقایسه بین انقباض عرضی در نقاط نزدیک به گیت (CG) و دور از گیت (FG)

²² Far from the gate (FG)

²³ Close to the gate (CG)

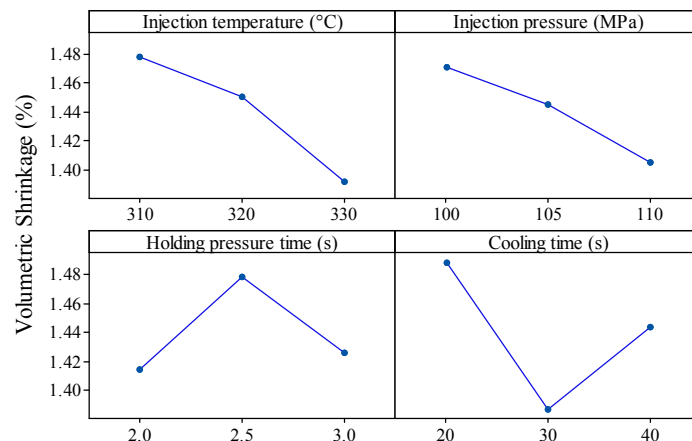
نحوه تاثیر پارامترهای تزریق بر روی میزان انقباض حجمی PE و PC به ترتیب در شکل 1-4 و شکل 1-5 نشان داده شده است.

با افزایش دمای تزریق میزان انقباض حجمی برای PE و PC به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد. با افزایش دما از آنجایی که PE جزو پلیمرهای نیمه کریستالی است، زنجیره‌های پلیمری منظم، بیشتر از هم باز شده و اصطلاحاً میزان آب رفتگی بیشتری بوجود می‌آید و در نتیجه در اثر انجماد دوباره، میزان جمع‌شدگی و متعاقباً انقباض افزایش می‌یابد. از طرفی دیگر با افزایش دما، در مرحله خنک‌کاری لایه‌ی خارجی قطعه منجمد می‌شود، در حالیکه هسته قطعه همچنان گرم است و این امر سبب افزایش انقباض می‌شود، هرچند که با افزایش از 180 به 185 درجه سانتیگراد، تغییر محسوسی در نتایج حاصل نشد. افزایش انقباض در اثر افزایش دمای مذاب برای پلیمر HDPE در تحقیق Chang و Fasion [5] نیز مشاهده شده است.



شکل 1-4: نمودار تاثیر پارامترهای تزریق بر روی انقباض PE

اما در مورد PC شرایط کاملاً متفاوت است. از آنجایی که PC جزو پلیمرهای آمورف می‌باشد، تغییرات دمایی تاثیر چندانی بر روی ساختار زنجیره‌های پلیمر نمی‌گذارد و با افزایش دما صرفاً ویسکوزیته‌ی سیال کاهش یافته و در نتیجه پرکردن قالب راحت‌تر می‌شود و قطعات با فشردگی بالاتری قالبگیری شده و موجب کاهش میزان انقباض می‌گردد. این پدیده برای سایر پلیمرهای آمورف از جمله PS [6] و ABS [7] نیز مشاهده شده است.



شکل 1-5: نمودار تاثیر پارامترهای تزریق بر روی انقباض PC

برای هر دو پلیمر، با افزایش فشار تزریق میزان انقباض کاهش می‌یابد. طبیعی است که با افزایش میزان فشار تزریق، مواد در مرحله تزریق با فشار بیشتری وارد حفره شده و در نتیجه فشردگی نمونه قالبگیری شده افزایش می‌یابد که این امر به نوبه خود سبب کاهش میزان انقباض می‌شود. این پدیده در تحقیقات دیگر برای سایر پلیمرها از جمله PP [8] و PS [6] نیز نشان داده شده است.

با افزایش هر دو پارامتر زمان اعمال فشار نگهداری و زمان خنک‌کاری، میزان انقباض PE کاهش می‌یابد. با افزایش زمان اعمال فشار نگهداری، فشار نگهداری مدت زمان بیشتری بر روی قطعه اعمال می‌شود و در نتیجه جبران کاهش مقدار ماده داخل قالب به دلیل انجام، بهتر صورت می‌گیرد که این امر سبب کاهش میزان انقباض می‌گردد. کاهش میزان انقباض در اثر افزایش زمان اعمال فشار نگهداری در سایر تحقیقات برای دیگر پلیمرها از جمله PP [6 و 8]، PS [6] و ABS [5] نیز مشاهده شده است. با افزایش زمان خنک‌کاری نیز، قطعه مدت زمان بیشتری داخل قالب می‌ماند و تحت شرایط مقید به قالب، زمان بیشتری را برای استراحت تنش‌های حرارتی و فشاری به وجود آمده، در دمایی بالاتر از دمای محیط در اختیار دارد و بنابراین انقباض کاهش می‌یابد. این پدیده برای HDPE در تحقیق Chang و Fasion [5] نیز مشاهده شده است.

تحلیل نحوه تاثیر پارامترهای زمان اعمال فشار نگهداری و زمان خنک‌کاری بر روی انقباض PC تا حدودی پیچیده است. برای پلیمرهای آمورفی مانند ABS [5] مشاهده شد که با افزایش زمان خنک‌کاری میزان انقباض افزایش می‌یابد. دلیل این مشاهدات را می‌توان در نرخ خنک‌کاری دید. هرچه زمان خنک‌کاری بیشتر شود، خنک‌کاری با نرخ پایین‌تری صورت می‌گیرد که نرخ خنک‌کاری پایین به مولکول‌ها فرصت بیشتری برای منظم شدن می‌دهد، در نتیجه باعث انقباض بیشتر می‌شود [9].

همانند آنچه که انتظار می‌رفت، با افزایش زمان خنک‌کاری از 30 به 40 ثانیه، میزان انقباض PC افزایش می‌یابد. اما با کاهش زمان خنک‌کاری از 30 به 20 ثانیه، میزان انقباض با افزایش غیرمنتظره‌ای همراه گردید. همچنین با افزایش زمان اعمال فشار نگهداری از 2 به 2/5 ثانیه، میزان انقباض PC بصورت غیرعادی افزایش یافت. هرچند که با افزایش از 2/5 به 3 ثانیه مجدداً روند کاهشی به خود گرفت. مطالعات عمیق بر روی نمونه‌های تولید شده، این مشاهدات غیرطبیعی در سطوح زمان خنک‌کاری 20 ثانیه و زمان اعمال فشار نگهداری 2/5 ثانیه را توجیه می‌کند.

ملاحظات بصری روی نمونه‌هایی که دارای شرایط فرآیندی زمان اعمال فشار نگهداری 2/5 ثانیه، زمان خنک‌کاری 20 ثانیه، دمای مذاب 330 درجه (کمترین ویسکوزیته) و فشار تزریق 110 مگاپاسکال (بیشترین فشار تزریق) هستند، حکایت از تشکیل پلیسه روی این نمونه‌ها دارد. در این نمونه‌ها چون ویسکوزیته پایین است و نمونه‌ها با فشار بسیار بالا تزریق می‌شوند، مقداری ماده از قالب خارج می‌شود که این خروج ماده، میزان انقباض را بصورت چشمگیری بالا می‌برد.

مباحث مطرح شده نشان می‌دهد که کنترل انقباض در فرآیندهای تولید قطعات پلیمری که یک پدیده بسیار مهم می‌باشد، بسیار دشوار بوده و پارامترهای فرآیندی بصورت چشمگیری بر روی آن تاثیرگذار هستند. در ادامه‌ی کتاب با وارد شدن به بحث فوم، نشان داده می‌شود که با فوم کردن پلیمرها می‌توان انقباض در پلیمرها را بصورت چشمگیری کاهش داده یا حتی حذف کرد.

1-2-2 فوم^{۲۴}

پلیمر یک ماده بسیار فراگیر و رایج در ساخت و تولید قطعات می‌باشد. یکی از خواص مهم پلیمرها انعطاف‌پذیری آن‌ها می‌باشد. پلیمر می‌تواند به راحتی و به ارزانی تغییر فرم یابد؛ به همین دلیل امروزه بسیاری از قطعات با پلیمر ساخته می‌شوند. استفاده از پلیمر کمتر، ضمن کاهش هزینه‌های تولید به دلیل کاهش مقدار ماده‌ی مصرفی، مزایای زیست محیطی بالایی را عرضه می‌کند، لذا برای صنعت بسیار با ارزش است که روشی برای کاهش مقدار ماده مصرفی در فرآیند تولید قطعه ابداع شود. روش تولید فوم یا ایجاد حباب در توده ماده (خصوصاً مواد پلیمری) یکی از روش‌های کاهش مواد مصرفی می‌باشد به شرطی که بر عملکرد قطعه تاثیر منفی نگذارد.

کلمه فوم از عبارت آلمانی Viem به معنی کف استخراج شده و به ساختاری که دارای حباب‌های گاز پراکنده شده در یک فاز پیوسته باشد، اطلاق می‌شود. در واقع فوم در دانش پلیمر به کامپوزیت‌هایی گفته می‌شود که از یک ماده پلیمری به عنوان بستر و حباب‌های گاز به عنوان جزء دوم کامپوزیت تشکیل شده است. به‌طور کلی می‌توان فوم‌ها را موادی با ساختار سلولی نامید که چگالی آن‌ها از مواد اولیه پایین‌تر است. حباب‌های فاز گاز معمولاً سلول^{۲۵} نامیده می‌شوند.

1-2-1-1 خواص ساختاری^{۲۶}

برای بررسی خواص ساختاری و کیفیت فوم‌ها از پارامترهای متعددی بهره گرفته می‌شود که در ادامه به بررسی جداگانه‌ی آن‌ها پرداخته خواهد شد:

1-1-2-1 چگالی سلولی^{۲۷}

یکی از مهم‌ترین پارامترها برای بررسی کیفیت فوم‌شدن، چگالی سلولی است که به عنوان تعداد سلول‌های موجود در واحد حجم تعریف می‌شود و بصورت رابطه‌ی (1-1) معرفی می‌گردد:

²⁴ Foam

²⁵ Cell

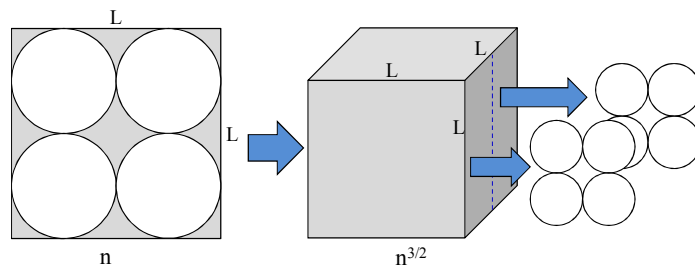
²⁶ Structural properties

²⁷ Cell density

$$N = \left(\frac{n}{A}\right)^{\frac{3}{2}} \quad (1-1)$$

که در این رابطه، N چگالی سلولی بر حسب cell/cm^3 و n تعداد سلول شمارش شده در سطح A از تصاویر دو بعدی می باشد. هر چه مقدار چگالی سلولی بالاتر باشد، تعداد سلول های بیشتری در واحد حجم ایجاد شده و مطلوب تر است.

مطابق شکل 6-1 چنانچه در تصاویر دو بعدی از مقطع نمونه ی فوم شده، در تصویری به مساحت $L \times L$ تعداد چهار سلول مشاهده شود، در مکعبی به طول ضلع L ، با فرض یکنواختی توزیع سلولی، هشت سلول وجود دارد که شامل دو ردیف سلول چهارتایی در جلو و عقب است (که چهار سلول جلویی در تصاویر دو بعدی قابل مشاهده هستند). به عبارتی دیگر چنانچه 4 سلول در تصاویر دو بعدی مشاهده شود، تعداد $4^{3/2}$ یعنی 8 سلول در حجم انتظار می رود.



شکل 6-1: روند محاسبه چگالی سلولی