

# تهیه اسفنج سخت پلی وینیل کلرید با روش روزن رانی بررسی آثار متغیرهای فراورش

Preparation of Cellular Rigid PVC by Extrusion: Investigation on Processing Variables

علی اسماعیل زاده<sup>۱</sup>، علی احمدی<sup>۲</sup>، محمدنبی سریلوکی<sup>۳</sup>

۱- پژوهشگاه صنعت نفت، پژوهشکده علوم و تکنولوژی پلیمر، ۲- دانشگاه تهران، مرکز تحقیقات بیوفیزی و بیوفیزیک

دریافت: ۷۴/۹/۴، پذیرش: ۷۴/۱۰/۱۹

## چکیده

پلی وینیل کلرید و اسفنجهای حاصل از آن به دلیل بی شکلی و وجود جاذبه شدید بین زنجیرهای پلیمر استحکام، دوام و پایداری ابعادی نسبتاً خوبی دارند. با جایگزین کردن اسفنجهای پلی وینیل کلرید در کاربردهای غیراسفنجی آن بویژه در صنایع پروفیل، لوله و عایقندی می توان تا حدود ۴۰٪ در مصرف وزن پادشده صرفه جویی کرد. در این پژوهش، ضمن تهیه اسفنج سخت پلی وینیل کلرید، اثر عوامل فراورش بر کیفیت محصول نیز بررسی شده است. اصولاً هرگونه تغییر در این عوامل می تواند منجر به دگرگونی شکل اسفنج و در پی آن تغییر خواص فیزیکی و مکانیکی شود. در بین این عوامل، نتایج بررسی سه عامل شرایط تهیه آمیزه، دور دستگاه روزن ران و دمای سرحدیده گزارش می شود. نتایج بررسی شکل شناسی برخی نمونه ها، از جمله ضخامت پوسته و میانگین اندازه حباب در فستهای پوسته و مغزه، به کمک میکروسکوپ الکترونی ارائه شده و چگونگی ارزیابی خواص فیزیکی و مکانیکی از قبیل چگالی، کیفیت قطعه و سطوح آن و استحکام کششی، ضربه ای، تراکسی و مدول کششی و همچنین شرایط تهیه ساخت نیز بررسی می شود.

واژه های کلیدی: پلی وینیل کلرید، روزن رانی، عامل پف دهنده، اسفنج ساختاری، شکل شناسی

**Key Words:** polyvinyl chloride, extrusion, blowing agent, structural foam, morphology

## مقدمه

با وجود برخی مشکلات در فرایند شکل دهی پلی وینیل کلرید (PVC)، مانند عدم پایداری گرمایی در دمای ذوب، محصولات تولید شده از آن به علت پاره ای ویژگیها از قبیل استحکام و انقباض کم و پایداری ابعادی خوب، بالغ بر ۲۰ تا ۳۰ درصد کل رزینهای سنتزی و پلاستیکها را در سرتاسر جهان تشکیل می دهد و تاکنون چهار هزار نوع قطعه جهت مصارف صنعتی از این پلیمر ساخته شده است [۱].

محصولات اسفنجی PVC به دلیل بی شکل بودن، پوسته ای نسبتاً محکم دارند که ضخامت آن با تغییر فرمولبندی یا شرایط فرایند قابل کنترل است. این گونه محصولات را اسفنجهای ساختاری می نامند.

این اسفنجها در ساخت برخی از قطعات صنعتی کاربردهای برجسته ای پیدا کرده اند. تولید محصولات اسفنج سخت PVC از سال ۱۹۶۱ رشد تصاعدی داشته و از ۱۹۶۶ به بعد از تولید محصولات اسفنج نرم PVC یشی گرفته است [۲]. نخستین اسفنج سخت PVC طی جنگ جهانی دوم در آلمان توسط تاد با استفاده از عامل پف دهنده شیبیلی ساخته شد [۳] که این اسفنج به دلیل تولید گازهای سسی در اثر تجزیه عامل پف دهنده بعدها کنار گذاشته شد. امروزه، تغییرات زیادی در مواد اولیه و روشهای ساخت داده شده است. بدین ترتیب که در فرمولبندی این محصولات انواع افزودنیها جهت بهبود خواص اضافه می شود [۴-۷]. هم اکنون شرکتهای متعددی با استفاده از اسفنجهای

سخت PVC، لوله و پروفیل تهیه می‌کنند. کاربردهای اسفنج PVC عبارتند از: عایق‌های صوتی و الکتریکی، عایق‌های گرما در سردخانه‌ها و در بین جدارهای هواپیماها و شناورها؛ بسته‌بندی؛ کفیوش؛ لوله و پروفیل؛ مخازن؛ جرم مصنوعی و اسباب‌بازی. با توجه به تنوع کاربرد تحقیقات در این زمینه اهمیت فراوانی دارد [۸].

در این پژوهش، انتخاب فرمولبندی مناسب بر اساس فرمولبندی پیشنهادی شرکت‌های سازنده قطعات سخت PVC در جهت سهولت تغییر سیستم آنها بوده و اثر سه عامل شرایط تهیه آمیزه، دور دستگاه روزن‌ران و دمای سرحدیده نیز بررسی شده است.

## تجربی

### مواد اولیه

پلی‌وینیل کلراید تعلیقی (PVC-S)، آزودی‌کریونامید (ADCA)، تیتان‌اکسید (روتیل)، مخلوط پایدارکننده‌ها و روان‌کننده‌ها با عنوان تجاری هارومیکس (Haromix) از شرکت BBU اتریش تهیه شده است که شامل روان‌کننده داخلی (مخلوط کلسیم استارات و استاریک اسید) و روان‌کننده خارجی (موم پارافین) و پایدارکننده‌های سرب سولفات دو و سه بازی (دو و سه پایه) و سرب استارات است.

### دستگاهها

دستگاه روزن‌ران (extruder) ساخت کارخانه برابندر مدل ۳۲ PL که مقطع طولی آن در شکل ۱ نشان داده شده است. مخلوط‌کن با دور بالا مجهز به همزن از نوع تیغه‌ای و بدون مانع ساخت شرکت اسکرویل مدل ۹۳۹. میکروسکوپ الکترون پویشی کمبریج مدل S-۳۶۰ و میکروسکوپ نوری ساخت شرکت اولیمپوس مدل SZH دستگاه اندازه‌گیری استحکام ضربه‌ای Charpy ساخت زونیک آلمان، و دستگاه اندازه‌گیری استحکام کششی و تراکی اینترون مدل ۱۱۲۲.

### روش

مراحل عملیاتی این پژوهش مطابق نمودار شکل ۲ انجام شد.

### نتایج و بحث

در این بخش از میان متغیرهای فرآورش، روش‌های تهیه آمیزه، سرعت روزن‌رانی و تغییر دمای حدیده بررسی می‌شود.

### روش‌های تهیه آمیزه

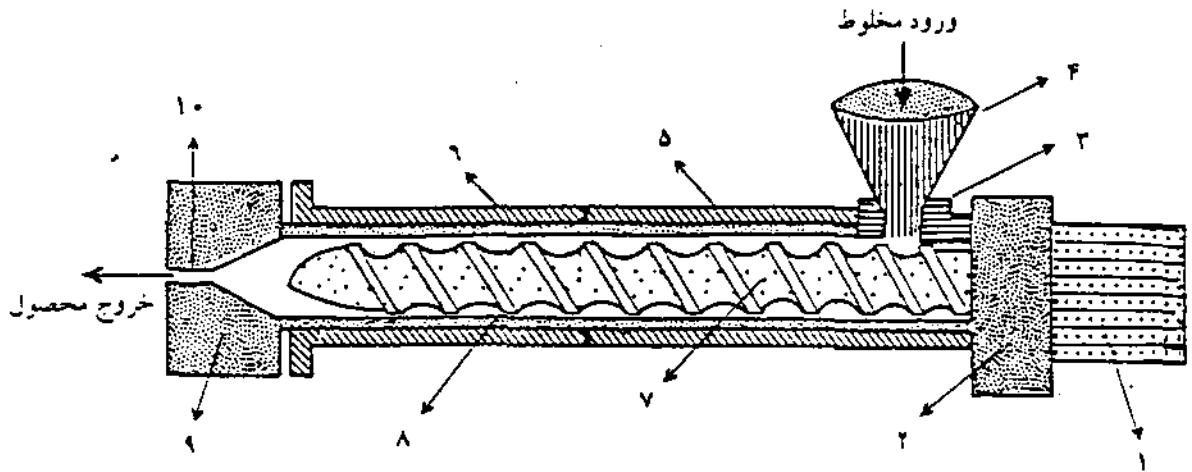
عموماً برای تولید محصولات اسفنجی سخت از مخلوط‌کن تلفیقی گرم

و سرد (hot/cold mixer combination) استفاده می‌شود، زیرا بکارگیری روش‌های غیردستگاهی (مثلاً به کمک هاون)، مخلوط‌کن گلوله‌ای و مخلوط کردن با دور ۱۵۰۰ rpm موجب توزیع نایک‌واخت عامل پف دهنده و هسته‌ساز و در نتیجه ناهمگنی اندازه حبابها در اسفنج حاصل می‌شود [۳]. مخلوط کردن تلفیقی گرم و سرد در دو بخش جداگانه گرم و سرد با دور بالا انجام می‌گیرد و حبابها به صورت ریز و یکواخت در محصول ایجاد می‌شوند.

در مرحله مخلوط کردن گرم و خشک، دمای مخلوط به  $100^{\circ}\text{C}$  یا بالاتر از آن رسانده می‌شود. این عمل موجب می‌گردد تا روان‌کننده داخلی ذوب شود و به درون ذرات PVC نفوذ کند و روان‌کننده خارجی به علت امتزاج‌ناپذیری روی سطح ذرات جمع شود و سطوح چسبنده‌ای را ایجاد کند. این شیوه مخلوط کردن به دلیل نبود نرم‌کننده و در نتیجه ایجاد جریان آزاد شیوه خشک نام دارد. مزیت‌های این روش عبارتند از: بهبود کیفیت و یکواختی مخلوط، کاهش زمان مخلوط شدن، ایجاد جریان آزاد و پراکنده شدن شدید، امکان حمل به وسیله دمش، حذف باقیمانده وینیل‌کلراید و رطوبت.

عموماً از شیوه مخلوط کردن گرم و خشک به همراه مخلوط کردن سرد و خشک (cold/dry blending) استفاده می‌شود. زیرا، در روش مخلوط کردن گرم مشکل کلوخه شدن پودر PVC بوجود می‌آید که با سرد کردن تا دمای  $40^{\circ}\text{C}$  تا  $50^{\circ}\text{C}$  از این عمل طی ذخیره شدن در مخازن و همچنین از تخریب گرمایی جلوگیری بعمل می‌آید. افزون بر این، در فرایند مخلوط کردن بر اثر اصطکاک بارهای الکتروستاتیکی ایجاد می‌شود که بر خواص جریانی اثر می‌گذارد و منجر به ناهمگنی مخلوط می‌شود. یکی از راه‌های حذف این بارها خشک کردن سریع تا دمای  $40^{\circ}\text{C}$  است و برای خشک ماندن مواد و تخلیه گازها عموماً مخازن مورد استفاده مجهز به سیستم خلاء است. به منظور جلوگیری از متلاشی شدن و ناهمگنی مخلوط، زمان مخلوط کردن در هر کدام از مخلوط‌کن‌های گرم و سرد به میزان ۱۵ دقیقه تنظیم می‌شود [۸].

روش مخلوط کردن به‌طور خلاصه بدین ترتیب است: ابتدا پودر PVC-S تا دمای  $80^{\circ}\text{C}$  گرم شده و سپس به مخلوط‌کن با دور بالا (بالاتر از ۱۵۰۰۰ rpm) منتقل می‌شود. پس از آن هارومیکس اضافه شده و به مدت پنج دقیقه این مواد مخلوط می‌گردند. اشاره می‌شود که طی مخلوط کردن، دما بر اثر اصطکاک افزایش می‌یابد و از  $100^{\circ}\text{C}$  بالاتر می‌رود. در این مرحله ضمن ایجاد یک مخلوط همگن با هارومیکس، رطوبت‌زدایی و حذف احتمالی وینیل‌کلراید انجام می‌گیرد. برای پیشگیری از ایجاد نقاط داغ موضعی در ماده، طی عملیات مخلوط کردن از افزایش همزمان رنگدانه تیتان‌اکسید با هارومیکس خودداری می‌شود. به همین جهت، پس از مخلوط‌شدن



شکل ۱ - مقطع طولی دستگاه روزن‌ران: (۱) موتور، (۲) چسبه دنده، (۳) خنک کننده، (۴) فیف، (۵) گرم کننده اول، (۶) گرم کننده دوم، (۷) پیچ، (۸) استوانه، (۹) گرم کننده سرحدیده، (۱۰) حدیده.

روزن‌ران می‌گردد. بدین ترتیب، باینکه افزایش محصول خروجی همواره مطلوب است، اما تغییر شکل محصول در سرعت برورنده زیاد به علت پیدایش پدیده شکست مذاب باعث محدودیت در سرعت می‌شود (شکل ۳).

پدیده شکست مذاب در سرعت برشی (با تنش برشی) بحرانی اتفاق می‌افتد. در لحظه‌ای که تنش برشی به حد بحرانی خود می‌رسد، مقدار انرژی کشانی ذخیره شده در مذاب به حد اشباع می‌رسد و بقیه انرژی وارد شده به آن صرف تغییر شکل محصول خروجی می‌گردد. با کاهش سرعت برورنده یا کاهش تنش برشی، پدیده شکست مذاب حذف می‌شود. از طرفی، مقدار برورنده پلیمر مذاب به گرانی آن بستگی دارد و گرانی خود با وزن مولکولی و در نتیجه با مقدار K ارتباط پیدا می‌کند. در نتیجه، برای هر مقدار Kی رزین PVC تعداد دور خاصی مناسب است (جدول ۲).

با افزایش مقدار K یعنی زیاد شدن وزن مولکولی تعداد گره‌های مولکولی (molecular nodes) در واحد حجم پلیمر افزایش می‌یابد که این امر منجر به بهبود خواص مکانیکی می‌شود. گره‌های مولکولی مانع از کشیده شدن زنجیرهای پلیمر در امتداد مسیر جریان مذاب خروجی از

جدول ۲ - شرایط بهینه سرعت روزن‌رانی برای مقادیر Kی متفاوت رزین PVC [A]

مقدار K	سرعت روزن‌رانی (rpm)
۷۰	۲۵
۶۵	۳۰
۶۰	۴۰
۵۷	۴۰

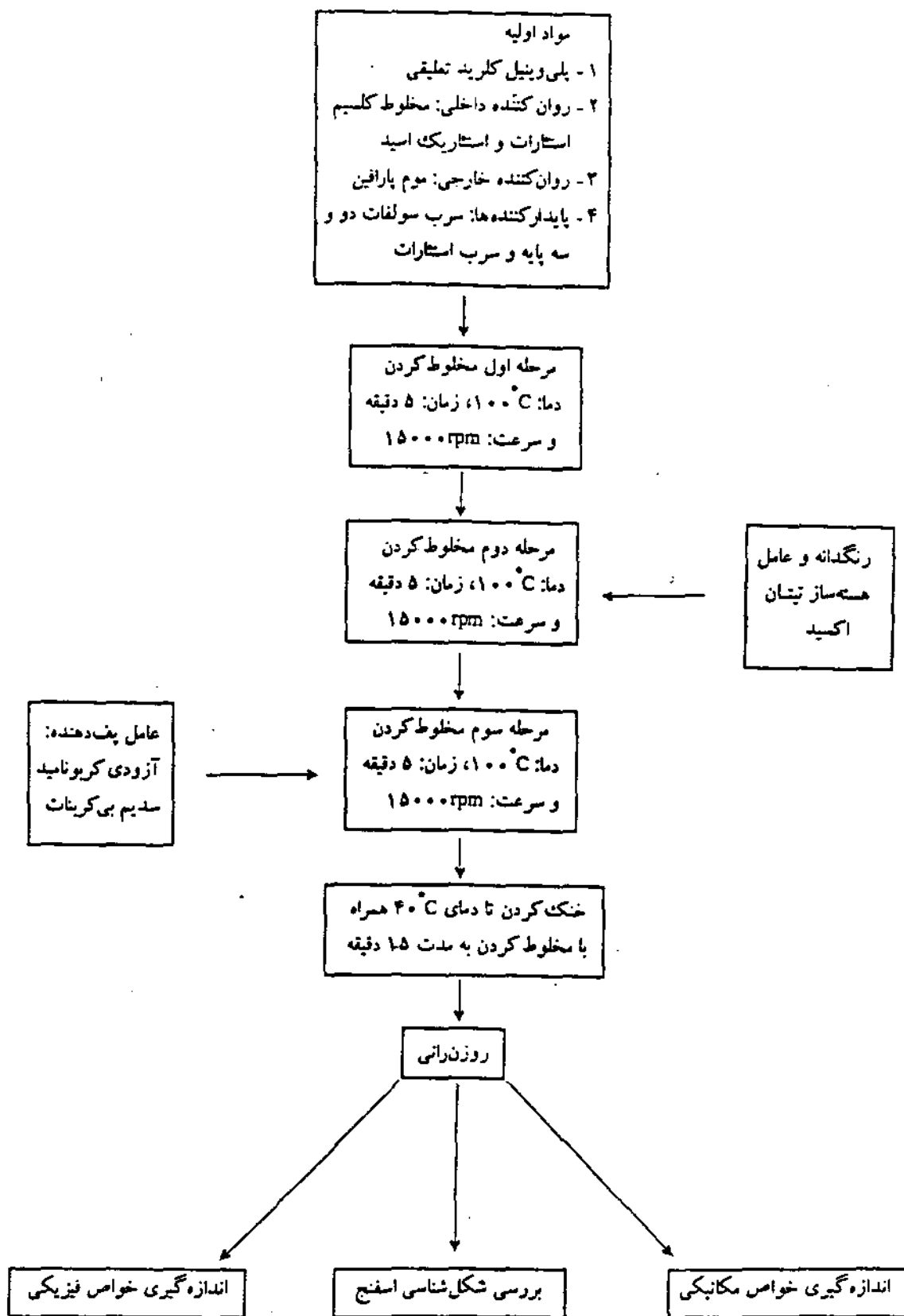
PVC با هارومیکس به مدت پنج دقیقه، رنگدانه به مخلوط اضافه شده و دوباره به مدت پنج دقیقه مواد مخلوط می‌شوند. آن‌گاه، عامل پف‌دهنده نوع آزودی‌کربونامید به مخلوط کن وارد شده و برای مدت پنج دقیقه دیگر عمل مخلوط کردن با دور بالا انجام می‌شود. علت افزایش عامل پف‌دهنده در مرحله نهایی پیشگیری از تجزیه زودرس این عامل طی فرایند مخلوط کردن است. سرانجام، برای تخلیه بار الکتریکی و جلوگیری از کلوخه شدن، مخلوط در مجاورت هوا (گاز خنثی برتری دارد) تا دمای  $40^{\circ}\text{C}$  خنک می‌شود و به مدت ۱۵ دقیقه دیگر عمل مخلوط کردن ادامه پیدا می‌کند. در این مرحله مواد مخلوط شده جهت انتقال به دستگاه روزن‌ران کاملاً آماده‌اند. فرمولبندی طبق جدول ۱ است.

تغییر سرعت روزن‌رانی

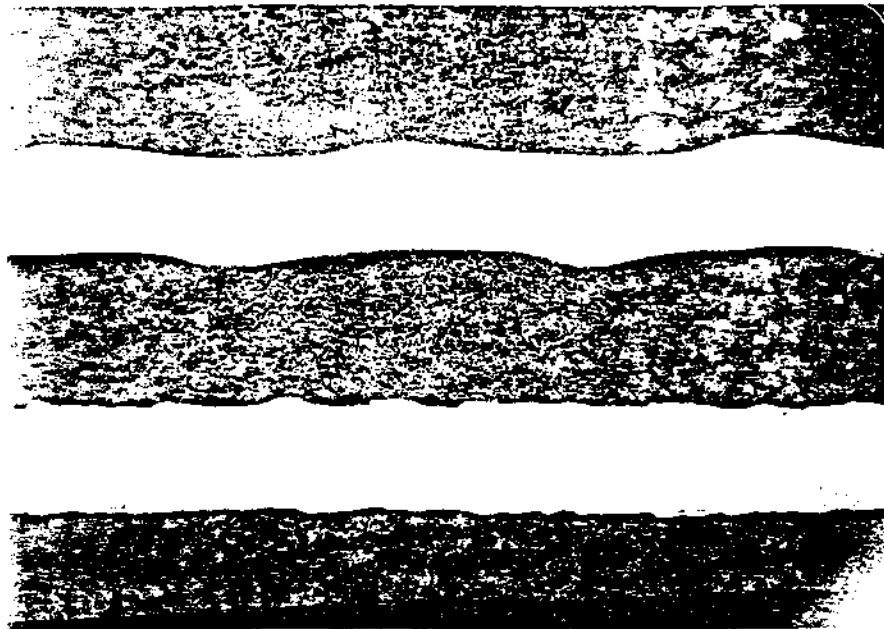
هنگامی که مذاب در دستگاه روزن‌ران به سمت جلو روانه می‌شود از عامل مقاوم در برابر جریان جلورنده، بویژه در مورد PVC که گرانی زیاد است، می‌توان صرف‌نظر کرد. در نتیجه، برورنده با تقریب قابل قبولی با سرعت پیچ نسبت مستقیم دارد. اما عواملی نظیر بدشکلی ساختار اسفنج در سرعت‌های بالا موجب محدودیت سرعت

جدول ۱ - فرمولبندی اسفنج در بررسی آثار عوامل فراورش.

مقدار معرفتی	اجزای مخلوط
۱۰۰g	پلی وینیل کلرید
۲/۳۴phr	هارومیکس
۰/۲۸۴phr	تیتان‌اکسید
۰/۳phr	آزودی‌کربونامید



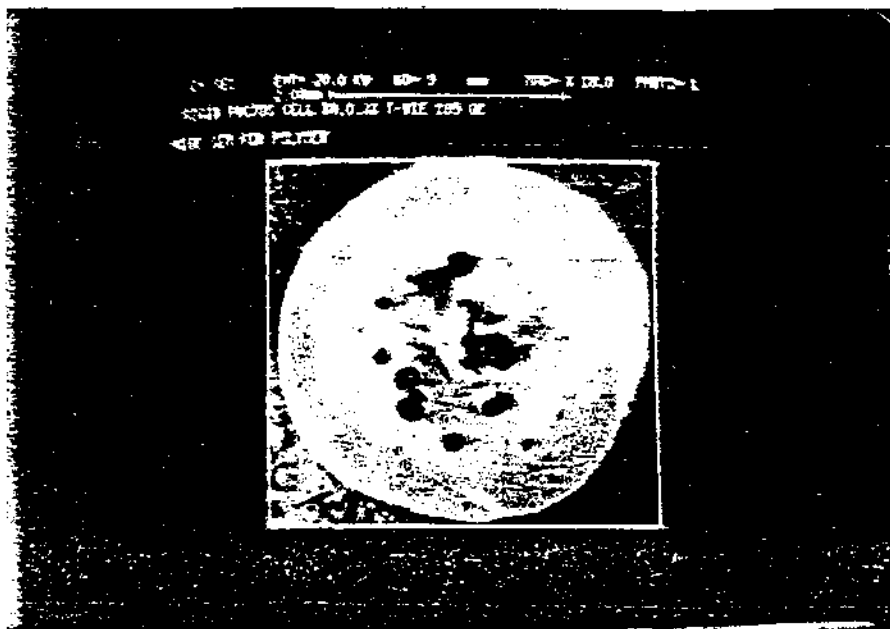
شکل ۲- نمودار مراحل عملیاتی پژوهش.



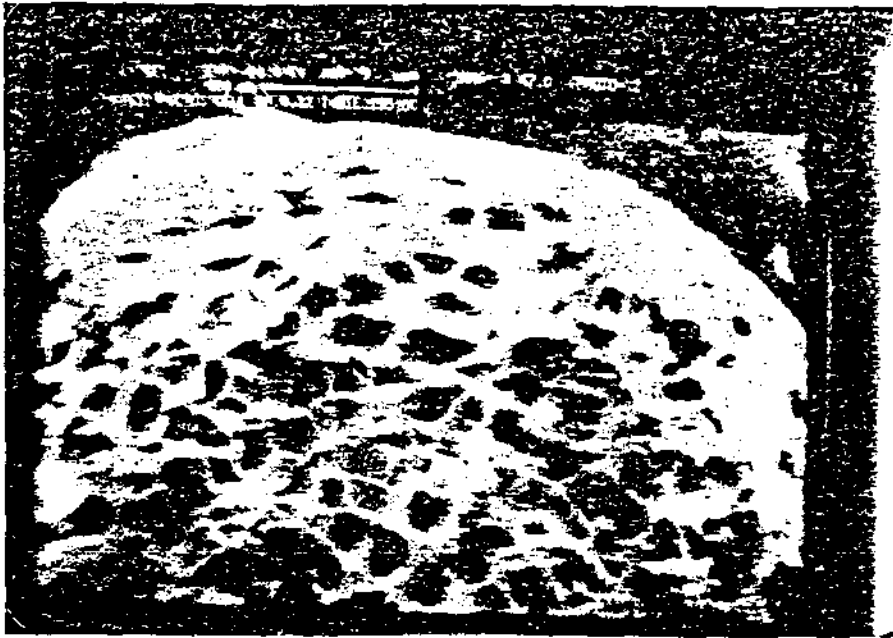
شکل ۳- تصویر قطعات روزن‌رانده در سرعت بیش از ۷۰ rpm.

استنجی بیشتری ایجاد می‌شود. با توجه به خواص مکانیکی PVC دارای مقدار K برابر ۶۰ مناسبترین نوع است. یادآور می‌شود که بیینه‌سازی باید بر اساس فشار ورودی و خروجی روزن‌ران انجام گیرد، اما به دلیل آنکه روزن‌ران آزمایشگاهی مورد استفاده در این پژوهش در قسمت جدید فشارسج نداشت، این

حدیده می‌گردد. در این وضعیت، عمل هسته‌زایی (nucleation) در سیستم به آسانی انجام نمی‌گیرد. به عبارت دیگر، استنج شونده‌گی (foamability) با افزایش مقدار K کاهش می‌یابد. بنابراین، در مقادیر زیاد K یعنی ۶۵ و ۷۰، ساختار استنجی نامناسب ایجاد می‌شود. هرچه وزن مولکولی کمتر باشد، یعنی مقادیر K برابر ۵۷ و ۶۰، ساختار



شکل ۴- تصویر میکروسکوپ الکترونی (با درشت‌نمایی ۱۱۶) از مقطع عرضی استنج به دست آمده در دمای حدیده C ۱۸۵.



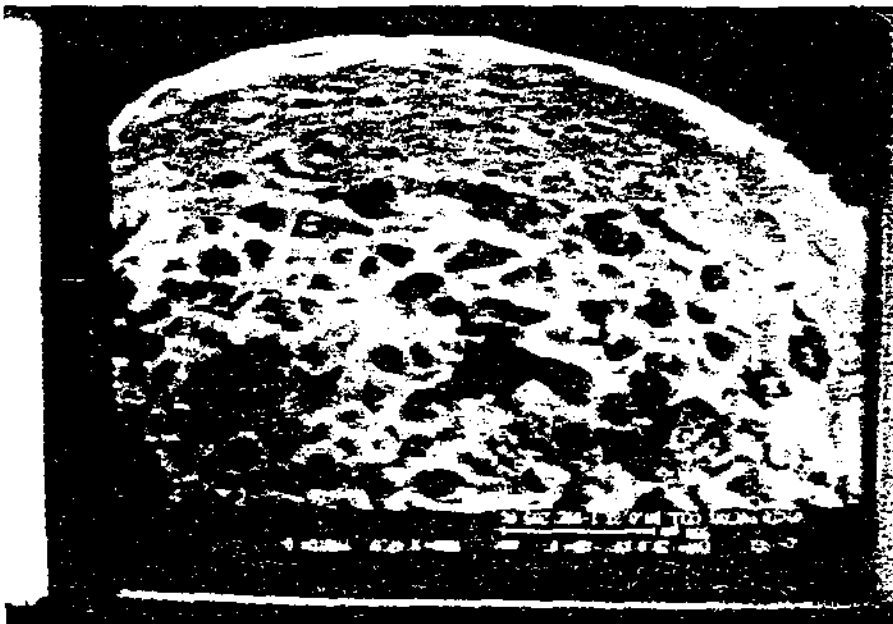
شکل ۵- تصویر میکروسکوپ الکترونی (با درشت‌نمایی ۴۲) از مقطع عرضی اسفنج به دست آمده در دمای حدیده  $195^{\circ}\text{C}$ .

کار ممکن نشد.

روزن‌ران، باید آمیزش مخلوط تا قبل از رسیدن مذاب به منطقه سرحدیده انجام گیرد. برای این منظور دمای منطقه داخل استوانه بطور ثابت  $170^{\circ}\text{C}$  انتخاب شد (در دمای بالاتر پلیمر تجزیه می‌شود). برای آسانی شکل‌دهی مواد، عمل انبساط و تجزیه عوامل پف‌دهنده لازم است که دمای منطقه حدیده از استوانه بیشتر باشد. ولی به دلیل

تغییر دمای حدیده

برای انجام آمیزش و انبساط، انتخاب دمای مناسب در منطقه استوانه و سرحدیده کاملاً لازم است و به علت ضرورت هسته‌زایی در درون



شکل ۶- تصویر میکروسکوپ الکترونی (با درشت‌نمایی ۴۲) از مقطع عرضی اسفنج به دست آمده در دمای حدیده  $205^{\circ}\text{C}$ .



شکل ۷- تصویر میکروسکوپ الکترونی (با درشت‌نمایی ۴۲) از مقطع عرضی اسفنج به‌دست آمده در دمای جدید  $215^{\circ}\text{C}$ .

کم‌فشار مکیده شده و با افزایش دما سلولها بزرگتر شوند. به‌طوری که اسفنجهای بدست آمده در دمای جدید  $195^{\circ}\text{C}$  و  $205^{\circ}\text{C}$  دارای حبابهای تقریباً یک اندازه‌اند. ولی در دمای  $215^{\circ}\text{C}$  دارای حبابهای درشت‌اند. در ضمن، در این دما حبابها تا سطح بیرونی اسفنج گسترش پیدا می‌کنند و پوسته حذف می‌شود (شکل ۷). خواص فیزیکی-مکانیکی اسفنج حاصل از PVC تعلیقی ( $K=60$ ) در دمای  $205^{\circ}\text{C}$  در جدولهای ۳ و ۴ ارائه شده است و برای مقادیر دیگر  $K$  نیاز به بررسی بیشتری دارد. یادآور می‌شود که کسر حجمی گاز از معادله زیر بدست آمده است:

$$\rho = 1 - \frac{D_p}{D_s}$$

که در آن  $D_p$  چگالی قطعه به شکل خیر اسفنجی ( $1/39 \text{ g/cm}^3$ )،  $D_s$  چگالی اسفنج در دمای مورد نظر و  $\rho$  کسر حجمی گاز است.

زایننداری PVC در دمای ذوب نمی‌تواند در محدوده وسیعی از دما به منطقه تغییر دمای منطقه سرحدیده برده‌آید. با توجه به این امر و میزان دقت سیستم اندازه‌گیری دما، تغییرات دما از  $185^{\circ}\text{C}$  تا  $215^{\circ}\text{C}$  با تصاعد حسابی  $10^{\circ}\text{C}$  بررسی شد. در دمای جدید  $185^{\circ}\text{C}$  محصول دارای پوسته بسیار ضخیم است (شکل ۴). زیرا انعقاد سریع مذاب به محصول امکان انبساط نمی‌دهد. در دمای جدید معادل  $195^{\circ}\text{C}$  بخش عمده‌عامل پخت‌دهنده تجزیه می‌شود و چگالی برمت انت می‌کند و یک پوسته با ضخامت مناسب گرداگرد قطعه ایجاد می‌شود (شکل ۵). به این محصول، اسفنج ساختاری نیز می‌گویند. شکل هندسی حبابها در منطقه پوسته به‌صورت بیضوی با دیواره ضخیم گزارش شده است [۳] این پدیده در محصول به‌دست آمده در دمای جدید  $205^{\circ}\text{C}$  بروشنی دیده می‌شود (شکل ۶).

بر اساس رابطه لاپلاس و بانگ [۳] عامل محرک احتلال فشار موجب می‌شود که سلولهای کوچک و پر فشار به درون سلولهای بزرگ

جدول ۳- خواص فیزیکی محصولات اسفنجی در دماهای مختلف سرحدیده.

کیفیت سطح قطعه	کسر حجمی گاز	ضخامت پوسته (قطعه) ( $\mu\text{m}$ )	میانگین اندازه حباب ( $\mu\text{m}$ )		چگالی ( $\text{g/cm}^3$ )	سطح مقطع قطعه ( $\text{cm}^2$ )	دمای جدید ( $^{\circ}\text{C}$ )
			مغزه	پوسته			
آبزر شکست مذاب در سطح	۰/۶۱۵	۱۰۰۰	۱۵۲	۰	۱/۳۷	۰/۰۹	۱۸۵
سطح صاف	۰/۳۸	۳۰۰	۶۰	۵۰	۰/۸۰	۰/۱۲	۱۹۵
سطح صاف و کاملاً بیضی	۰/۵۸	۳۰۰	۶۱	۳۹	۰/۵۸	۰/۱۶	۲۰۵
تیز حباب روی سطح	۰/۶۲	۰	۷۸	۵۸	۰/۵۲	۰/۱۹	۲۱۵

جدول ۴ - خواص مکانیکی محصولات اسفنجی در دماهای مختلف سرحدیده.

استاندارد (ASTM)						دمای حدیده (°C)
D ۶۳۸	D ۱۵۶۵	D ۶۳۸	D ۶۳۸	D ۱۵۶۵	D ۲۵۶	
مدول کششی (Kg/cm <sup>2</sup> )	تراکم پذیری	ازدیاد طول (%)	استحکام کششی (Kg/cm <sup>2</sup> )	استحکام تراکمی (Kg/cm <sup>2</sup> )	استحکام ضربه‌ای (Kg/cm)	
۸۱	۴/۹	۱۰۷	۳۹۰	۴۰۹	۹۳	۱۸۵
۵۶	۶/۲	۴۹	۱۹۹	۲۱۹	۵۷	۱۹۵
۳۹	۷/۴	۳۹	۱۱۷	۱۲۶	۳۴	۲۰۵
۲۸	۹/۷	۴۴	۱۱۶	۱۰۶	۲۵	۲۱۵

کتر، یعنی حدود ۶۰، برای تهیه این گونه اسفنجها مناسب است. براساس نتایج بدست آمده، در دمای حدیده ۱۸۵°C محصول دارای پوسته بسیار ضخیمی است و در دمای ۲۱۵°C پوسته اسفنج کاملا حذف می شود که منجر به افت خواص مکانیکی می گردد. در دمای ۱۹۵°C اسفنجی با پوسته مناسب و خواص مکانیکی خوب طبق جدول ۴ بدست می آید و (بسته به نوع مصرف که با نسبت چگالی به خواص مکانیکی مشخص می شود) دماهای ۱۹۵°C و ۲۰۵°C مناسب است.

#### مراجع

- 1 Seymour R. B.; *Polym. News*; 6, 106, 1980.
- 2 Tallman J. C.; *Chem. Eng. Prog.*; 57, 10, 60, 1961.
- 3 Frisch K. C. and Saunders J. H.; *Plastic Foams*; 1, Marcel Dekker; New York, 4, 1972.
- 4 Deanin R. and Agarwal P.; *Chemical Abstracts*; 103, P179066w, 1985.
- 5 Simck J. and Stepek J.; *Chemical Abstracts*; 100, P86950c, 1984.
- 6 Wein T. and Nytrai J.; *Chemical Abstracts*; 109, P111542s, 1988.
- 7 Hashimoto K. and Astsumi K.; *Chemical Abstracts*; 109, P74907s, 1988.
- 8 Titow W. V.; *PVC Technology*; 4th ed., Elsevier Applied Science, 15, 1984.

محاسبه میانگین اندازه حباب پوسته و مغزه اسفنج براساس روش اسکوچ دوپل (Skoch dopole) است [۲] که از میانگین قطرهای عمود بر هم بدست می آید. میانگین اندازه حبابها در یک سطح مشخص معادل  $3.0 \mu\text{m}$  محاسبه شده است. برای این کار از تصاویر مربوط (روی اسلاید) با درشت‌نمایی ۵۰۰ استفاده شد. روی این تصاویر تغییرات اندازه بروشنی دیده می شود.

#### نتیجه‌گیری

نتایج بدست آمده نشان می دهد که برای تولید محصولات اسفنجی سخت باید از روش مخلوط کردن تلفیقی گرم و سرد با دور بالا استفاده کرد تا اسفنج حاصل دارای حبابهای ریز و یکپوخت باشد. در ضمن با حذف مرحله مخلوط کردن گرم، روی سطوح قطعات بدست آمده تاولتهایی ایجاد می شود که علت آن رطوبت موجود در مخلوط است که با خشک کردن آن به روش مخلوط کردن گرم این مشکل برطرف می گردد. بنابراین، روش مخلوط کردن تلفیقی گرم و سرد باعث حذف آب و رفع مشکل تاول زدگی در سطح پوسته اسفنج می شود و از کلوخه شدن پودر در مرحله قبل از شکل دهی جلوگیری می کند.

برای هر وزن مولکولی پلیمر، سرعت روزن رانی معینی جهت شکل دهی مناسب است. زیرا با رشد وزن مولکولی، یعنی افزایش مقدار  $k_t$  عمل هسته زایی به آسانی انجام نمی شود و اسفنج شونده گی کاهش پیدا می کند. بدین ترتیب، هنگامی که وزن مولکولی پلی دینیل کلرید زیاد است، یعنی در مقدار  $K$  حدود ۷۰، سرعت روزن رانی تا حدود ۲۵ rpm کاهش پیدا می کند تا ساختاری مناسب برای اسفنج به دست آید، که این امر منجر به تجزیه تدریجی PVC می شود. بنابراین مقدار  $K$