روشهای وولکانش پیوسته برای آمیزه‌های اکسترودری

Continuous Vulcanization for Extrusion Compounds

اعظم جلالی آرانی ،سیامک مطهری مقدم

دانشگاه امیرکبیر ،دانشکده پلیمر

واژه‌های کلیدی:

اکسترودر ،بستر سیال ،میکروموج ،سره برشی ،پرتودهی

چکیده

وولکانش یکی از فرایندهای اساسی صنعت لاستیک محسوب می‌شود.هر آمیزه لاستیکی پس از تهیه باید شکل دهی و وولکانش شود تا از کارآیی لازم برخوردار گردد.فرایند شکل دهی به روشهای مختلف از جمله با استفاده از اکسترودر ،کلندر ،قالبگیری و غلتک قابل اجراست.وولکانش نیز می‌تواند همزمان با شکل دهی ،مانند فرایند قالبگیری ،یا به صورت فرایند جداگانه انجام شود.در صورت استفاده از اکسترودر ،عمل وولکانش پس از شکل دهی و به روشهای پیوسته یا ناپیوسته صورت می‌گیرد.در این گزارش روشهای پیوسته وولکانش برای محصولات اکسترودری بررسی می‌شود.

مقدمه

تا قبل از شناخت پدیده وولکانش استفاده چندان زیادی از لاستیک نمی‌شد و مصرف آن محدود به موارد خاصی مانند پوشش دهی بود.در واقع توسعه صنایع لاستیک پس از شناخت این پدیده آغاز شد.روشهای عملی وولکانش آمیزه‌های لاستیکی نیز تا قبل از سال ۱۹۶۰ پیشرفت چندانی نداشت و تا آن زمان وولکانش به صورت ناپیوسته انجام می‌شد.در این سال استفاده از حمام مذاب جهت وولکانش پیوسته آمیزه‌های لاستیکی پیشنهاد شد و در واقع از این تاریخ بود که دسترسی به سرعت زیاد در تولید نوارهای لاستیکی و شیلنگها با استفاده از خط تولید ساده و نه چندان طویل ممکن شد.پس از آن وولکانش پیوسته توسعه پیدا کرد و روشهای دیگری نیز ابداع و به کار گرفته شد.

در روش وولکانش پیوسته ،به آمیزه لاستیکی قبل از مرحله وولکانش شکل داده می‌شود.شکل دهی توسط دستگاههای مختلفی می‌تواند انجام گیرد.اکسترودر دستگاهی است که برای شکل دهی و تولید انواع نوارهای لاستیکی ،کابلها و شیلنگها مورد استفاده قرار می‌گیرد.وولکانش پیوسته آمیزه خروجی از اکسترودر با استفاده از سیستم لوله بخار ،هوای داغ ،بستر سیال ،حمام مذاب ،ریز موج (UHF)،سره برشی اکسترودر و پرتو دهی قابل انجام است.در این مقاله پس از ارائه توضیح کوتاهی در باره وولکانش و اکسترودر به بحث در مورد این سیستمها و مزایا و معایب هریک می‌پردازیم.

وولکانش

قبل از به کارگیری فرایند وولکانش در صنایع لاستیک ،در عمل ، لاستیکها کاربرد چندانی نداشتند ودر برخی موارد تنها به عنوان ماده پوششی مورد استفاده قرار می‌گرفتند.در حقیقت این وولکانش بود که صنعت لاستیک را متحول ساخت.طبق تعریف ،وولکانش فرایندی است که طی آن یک لاستیک از حالت ویسکوالاستیک به صورت یک لاستیک کشسان در می‌آید.این تغییر مربوط به خواص ظاهری جسم است ،ولی باید دید که چه تغییراتی در ساختار شیمیایی باعث ایجاد این تحول می‌شود.به نظر می‌رسد که یک عامل ایجادکننده پیوند عرضی بین درشت مولکولهای الاستومر قرار می‌گیرد و آنها را به طور عرضی به یکدیگر متصل می‌کند.این پیوندهای عرضی در نقاط فعال زنجیر ایجاد می‌شود و بدین ترتیب ،درگیری زنجیرها با یکدیگر به شدت افزایش می‌یابد و تغییر شکل در اثر حرکت و جابه جایی زنجیرها ،تغییر شکل جریانی (flow deformation) ،از بین می‌رود.در واقع مقدار زیادی از خاصیت گرانروی لاستیک خام به دلیل امکان انتقال زنجیرهاست.

نکته مهم دیگر انرژی لازم برای انجام این واکنش است.معمولاً برای ایجاد پیوندهای عرضی انرژی اولیه مورد نیاز است.انرژی لازم برای شروع واکنش می‌تواند به روشهای مختلف تامین شود.گرما دادن یکی از متداولترین روشهاست که می‌تواند با استفاده از وسایل مختلفی انجام پذیرد.به عنوان مثال ،در فرایند قالبگیری لاستیک گرما از بدنه داغ قالب به مواد منتقل می‌شود.درصورتی که در روش حمام مذاب ،گرما توسط مواد مذاب درون بستر به لاستیک انتقال می‌یابد.

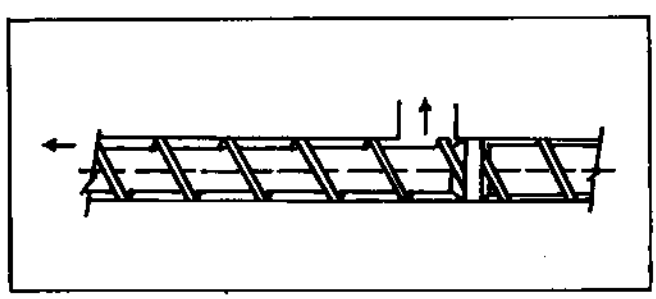
Key Words:extruder, fluidized bed, microwave, shear head, radiation

روش دیگر انرژی دادن به سیستم ،استفاده از پرتوهای پر انرژی است که در این روش پرتوهای تابیده شده می‌تواند در توده الاستومر گرما ایجاد کند یا با تحریک اتمها انرژی لازم برای شروع واکنش را در اختیار ماده قرار دهد [4-1].

اکسترودر

در اغلب موارد اکسترودر یکی از اجزای اصلی فرایند پیوسته وولکانش است.با پیشرفت روز افزون تکنولوژی ساخت این دستگاه می‌توان کنترل دقیقتری بر خواص محصولات تولید شده داشت و سرعت تولید نیز افزایش پیداکرده است.در اکسترودری که نسبت طول به قطر بیشتر است می‌توان کنترل دقیقتری بر جریان داشت.در دستگاههایی که امروزه به بازارهای بین‌المللی عرضه می‌شوند حسگرهای بسیاری وجود دارد تا شرایط دلخواه در طول فرایند به وجود آید.از جمله حسگرهای دما ،که در طول بدنه اکسترودر نصب می‌شوند و این امکان را برای کار با آن فراهم می‌کنند که دمای دلخواه را در طول مسیر حرکت مواد به دست آورد و همچنین حسگرهای فشار که فشار را در حدیده اندازه‌گیری می‌کنند.در این گونه اکسترودرها می‌توان دما را در طول مسیر چنان تنظیم کرد که حداکثر فشار در حدیده وجود داشته باشد.همچنین حسگرهای فشار قادرند که در صورت بالا رفتن فشار از یک حد بحرانی به طور خودکار اعلام خطر کنند.این سیستم به ویژه در شرایطی که زمان برشتگی آمیزه کوتاه است ،یا سرعت بالای تولید مورد نیاز است بسیار مفید است.

مزیت دیگر استفاده از حسگرهای فشار این است که می‌توان بدین وسیله دمای نواحی مختلف را در طول بدنه اکسترودر بهینه کرد ،که البته این امر در طراحی قالب و آمیزه از اهمیت به سزایی برخوردار است.در مورد آمیزه‌هایی که در آنها آب و یا مواد فرّار وجود دارد ، استفاده از گریزگاه (vent) در اکسترودر ضرورت دارد.طراحی مارپیچ در اکسترودرهایی که گریزگاه دارند بسیار حساس است.در این دستگاهها رسیدن به سرعت دلخواه همراه با انتقال مواد فرّار بدون آنکه پدیده لبریز شدن (flooding) رخ دهد از اهمیت به سزایی برخوردار است [5-3].شکل ۱ طرحی از یک اکسترودر مجهز به گریزگاه را نشان می‌دهد.



شکل ۱ - یک اکسترودر مجهز به گریزگاه [4]

عموماً سرعت خروج مواد از اکسترودر به نوع آمیزه و گرانروی آن ،طرح مارپیچ ،چگونگی کنترل دما ،اندازه و شکل دستگاه ،و بود و نبود گریزگاه وابسته است.حذف گریزگاه در یک دستگاه باعث می‌شود تا میزان مواد خروجی به نسبت ۲۰ تا ۳۵ درصد کاهش یابد.سرعت خروج مواد ،همان طور که اشاره شد ،تابع دما نیز می‌باشد.این موضوع را به هنگام استفاده از یک اکسترودر برای وولکانش پیوسته باید در نظر داشت.در این حالت ،افزایش دما هم می‌تواند باعث کاهش گرانروی و افزایش سرعت خروج مواد شود و هم می‌تواند زمان لازم برای پخت کامل را در مرحله بعدی کوتاهتر کند.ولی در مقابل ،مسئله برشتگی زودرس آمیزه در این حالت مطرح می‌شود و احتمال شروع وولکانش قبل از خروج مواد از داخل اکسترودر وجود دارد که مشکلات زیادی را به دنبال خواهد داشت.

نکته جالب توجه دیگر این است که با افزایش سرعت مارپیچ دمای آمیزه نیز افزایش می‌یابد ،این بالا رفتن دما ناشی از تبدیل انرژی مکانیکی به انرژی گرمایی در آمیزه است و میزان افزایش دما بستگی به نوع آمیزه و مواد مصرف شده در آن دارد.وظیفه اصلی یک آمیزه کار لاستیک این است که علاوه بر توجه به خواص نهایی مورد نظر ،آمیزه خود را با سیستمی که قرار است در آن فرایند شود نیز تطابق دهد [5-3].

دستگاههای فرایند پخت پیوسته

برای وولکانش پیوسته آمیزه‌های اکسترودری روشهای مختلفی وجود دارد.انتخاب هریک از این روشها باید با توجه به نیازها و شرایط کار انجام گیرد.در مرحله انتخاب عوامل بسیار متعددی را باید در نظر داشت.به عنوان مثال ،یکی از عوامل مهم در این سیستمها انتقال گرماست.سرعت انتقال گرما در هریک از این روشها فرق می‌کند و با توجه به نوع آمیزه ، سرعت تولید ،ضخامت جسم و سایر مواردی که در انتقال گرما تاثیر دارند،روش مناسب انتخاب می‌شود.مسئله دیگر آلوده شدن محصول است.در برخی از این روشها محیط عمل باعث آلودگی محصولات می‌شود.در نتیجه استفاده از فرایند دیگری برای تمیز کردن محصولات ضرورت پیدا می‌کند.علاوه بر آن گاهی آلودگی اشکالاتی در محصول به وجود می‌آورد.عامل مهم دیگر انرژی مصرفی توسط دستگاه است.مقدار انرژی و نیز منابع تامین کننده آن مواردی هستند که در انتخاب یک روش مؤثرند.به عنوان مثال در کشور ما که از نظر دسترسی به گاز طبیعی مشکل چندانی وجود ندارد ،استفاده از این منبع انرژی بسیار مفیدتر و اقتصادی‌تر خواهد بود.

نکته جالب توجه دیگر خواصی از محصول نهایی است که به سیستم و نوع وولکانش ارتباط پیدا می‌کند.از این گذشته ،اصولاً در انتخاب یک روش باید خواص فیزیکی و شیمیایی آمیزه را در نظر گرفت که در این مورد سینتیک واکنش شیمیایی می‌تواند در انتخاب روش مناسب مطرح شود.

مساحت اشغال شده توسط ماشین آلات ،به ویژه در شرایطی که فضای کارگاه محدود است ،از عوامل مؤثر در انتخاب سیستم می‌باشد. سرانجام برای انتخاب بهترین روش برای تولید یک محصول ، باید از کاستیها و قابلیتهای هریک از روشها اطلاعات کافی داشته باشیم [1,4,5].

وولکانش در لوله‌های بخار

در این روش محصول پس از خروج ازاکسترودر وارد لوله بخار با فشار ۱۵ بار و دمای حدود ۱۸۰°C می‌شود.در این سیستم محصول تکیه گاهی ندارد و به صورت آزاد می‌باشد.این موضوع ممکن است کشش و تخریب آمیزه را سبب گردد.به همین دلیل ،لوله بخار تنها برای محصولاتی از لاستیک مناسب است که دارای تقویت کننده غیرلاستیکی و غیرقابل کشش در دمای وولکانش باشند.در اصل ،از این روش برای وولکانش کابلها و شیلنگها استفاده می‌شود.اتصال بین لوله بخار و اکسترودر باید به طور کامل آب بندی شود.سطح آب در لوله بخار باید طوری تنظیم گردد که نسبت مناسب بخار و آب جهت تشکیل پیوندهای عرضی به صورت یکنواخت در محصول تأمین شود.لوله بخار به سه شکل عمودی ،شیبدار ،مستقیم و خمیده کاربرد دارد.در تولید یک محصول نوعی از لوله به کار می‌رود که عدم تماس محصول و دیواره لوله حاصل گردد.طول متوسط لوله عمودی ۵۰ متر ،لوله شیبدار ۶۰ متر و لوله خمیده ۱۰۰ متر می‌باشد [5].

وولکانش توسط هوای داغ

شاید بتوان گفت ساده‌ترین روشی که در وولکانش پیوسته سالها مورد استفاده قرار گرفته است ،وولکانش توسط هوای داغ می‌باشد.در این سیستم از یک اون (oven) استفاده می‌شود که در آن گازهای سوخته و هوای داغ جریان دارد.محصول لاستیکی پس از خروج از اکسترودر وارد اون می‌شود و توسط یک تسمه نقاله در طول آن حرکت می‌کند.یکی از معایب سیستم یاد شده این است که انتقال گرما در آن بسیار کند صورت می‌گیرد.از این رو ،سرعت تولید را باید پایین آورد تا زمان اقامت محصول در اون طولانی شود یا طول اون را بزرگ در نظر گرفت که در هر دو مورد اشکالاتی پیش می‌آید.نکته دیگر اینکه به دلیل کندی سرعت انتقال گرما باید زمان برشتگی در حداقل ممکن باشد تا آمیزه هرچه سریعتر پخت شود.ولی کوتاه بودن زمان برشتگی احتمال وولکانش نابه هنگام آمیزه را در داخل اکسترودر افزایش می‌دهد.

معمولاً طول اون در این سیستم در حدود ۳۰ الی ۱۰۰ متر می‌باشد و سرعت تولید در حدود ۷ تا ۲۵ متر در دقیقه است.دمای هوای داغ داخل اون ۱۷۰ تا ۳۲۰°C می‌باشد.در کشورهایی که از نظر دسترسی به گاز طبیعی محدودیت دارند ،برای گرم کردن هوای داخل اون از المانهای الکتریکی استفاده می‌شود [4,5].در جدول ۱ مزایا و معایب این روش ارائه شده است.

جدول ۱ - مزایا و معایب روش وولکانش توسط هوای داغ [4]

مزایا	معایب
۱ - محصول سطح تمیزی دارد. ۲ - طول محصول نامحدود می‌باشد. ۳ - فرایند کاملاً خودکار است. ۴ - برای لاستیک سیلیکون silicon مناسب می‌باشد. ۵ - قابل استفاده در پوشش دهی مستقیم است.	۱ - انتقال گرما به کندی صورت می‌گیرد. ۲ - در مورد قطعاتی که دیواره نازک دارند احتمال تغییر شکل وجود دارد. ۳ - طول خط تولید بسیار زیاد است. ۴ - سرعت تولید کم است. ۵ - بازده گرمایی کم است. ۶ - احتمال اینکه تسمه نقاله روی محصول اثری باقی بگذارد وجود دارد.

یادآور می‌شود که روشی به ظاهر شبیه به روش بالا وجود دارد که در آن محصول خروجی از اکسترودر به قطعاتی بریده می‌شود و در سینیهای بزرگی قرار می‌گیرد.سپس ،این سینیها به داخل اون منتقل می‌شوند که پخت در آنجا صورت می‌گیرد.در واقع ،این روش یک سیستم وولکانش ناپیوسته است و با روش وولکانش پیوسته توسط هوای داغ تفاوت دارد.

وولکانش توسط بستر سیال

این روش شباهت زیادی به روش پیش گفته دارد.در اینجا نیز آمیزه توسط اکسترودر شکل می‌گیرد و سپس محصول وارد بستری می‌شود که پخت در آنجا صورت می‌گیرد.این بستر که به نام بستر سیال خوانده می‌شود دارای ذرات بسیار ریز شیشه است که در اثر دمش هوای داغ از قسمت زیر اون به صورت معلق در می‌آیند.این ذرات شیشه قطری در حدود ۰/۱ تا ۰/۲mm دارند.

در این روش معایب سیستم قبلی تا حدی برطرف شده است.همان طور که قبلاً اشاره شد اشکال عمده سیستم وولکانش توسط هوای داغ کندی انتقال گرماست که بسیاری از مسائل و مشکلات یاد شده ناشی از آن است.در روش بستر سیال انتقال گرما سرعت بیشتری دارد و به همین دلیل زمان توقف محصول در داخل اون کمتر است که بدین ترتیب می‌توان سرعت تولید را افزایش داد و طول اون را نیز کمتر در نظر گرفت.از طرف دیگر در این روش می‌توان چند نوار لاستیکی را به طور همزمان از داخل اون عبور داد.بدین ترتیب هم از نظر اقتصادی و هم از لحاظ فضای اشغال شده می‌توان صرفه جویی کرد.یکی از معایب این سیستم وجود آلودگی زیاد در محصول وولکانش یافته است ،بدین صورت که ذرات ریز و کوچک شیشه قادرند به محصول بچسبند.در نتیجه ،یک فرایند اضافی برای رفع آلودگی مورد نیاز است.تولید

کنندگانی که از این سیستم استفاده می‌کنند برای پاک کردن محصولات خود وسایل متنوعی را به کار می‌برند که برس ،هوای فشرده ،آب با فشار زیاد از آن جمله‌اند.به تازگی از امواج فراصوت نیز در این زمینه استفاده شده است.معمولاً ذرات جدا شده از سطح محصول را دوباره به داخل اون بر می‌گردانند تا از نظر اقتصادی به کارگیری این روش مقرون به صرفه باشد.

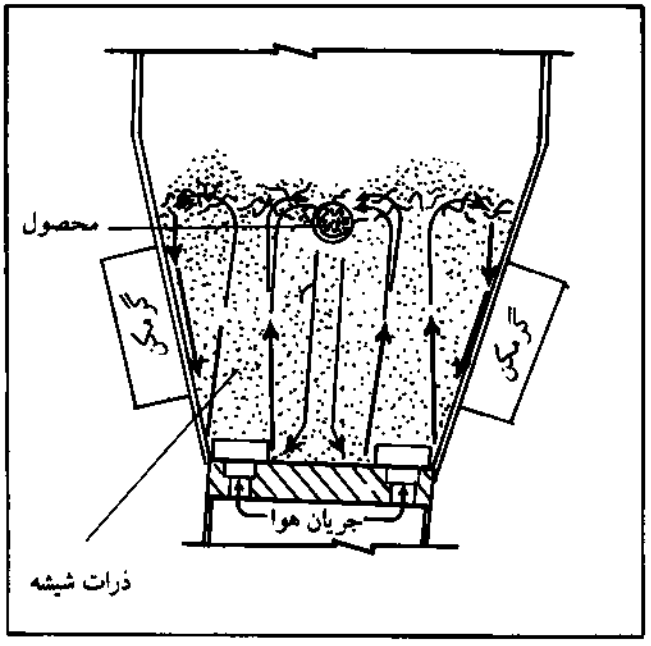
در این روش دمای بستر معمولاً بین ۱۷۰ تا ۲۸۰°C و سرعت تولید ۱۰ تا ۳۰ متر در دقیقه است.بدین ترتیب زمان توقف محصول در بستر به حدود یک سوم در مقایسه با روش تونل هوای داغ کاهش می‌یابد [4-6].در جدول ۲ مزایا و معایب این سیستم و در شکل ۲ طرحی از یک واحد وولکانش پیوسته توسط بستر سیال ارائه شده است.

جدول ۲ - مزایا و معایب سیستم وولکانش بستر سیال [4]

مزایا	معایب
۱ - در مقایسه با روش هوای داغ ، محصول تغییر شکل کمتری دارد.	۱ - محصول با آلودگی همراه است.
۲ - طول محصول می‌تواند نامحدود باشد.	۲ - کنترل چگونگی تعلیق ذرات شیشه داخل بستر به طور یکنواخت ممکن نیست.
۳ - طول خط تولید از روش هوای داغ کمتر است.	۳ - ذرات ریز داخل بستر به انتهای اون منتقل می‌شوند.
۴ - انتقال گرما بهتر انجام می‌شود.	۴ - کنترل و یکنواخت نگاه داشتن دما مشکل است.
۵ - همزمان چند نوار لاستیکی را می‌توان از یک بستر عبور داد.	۵ - محصول ذرات شیشه را به بیرون منتقل می‌کند.
۶ - از آمیزه‌هایی با زمان برشتگی بیشتر می‌توان استفاده کرد.	

پخت توسط حمام مذاب

پیش از به کارگیری سیستم بستر سیال برای پخت پیوسته نوارهای لاستیکی از بستری استفاده می‌شد که یک ماده مذاب با دمای ۱۷۰ تا ۲۸۰°C در آن قرار داشت و نوار از میان آن عبور می‌کرد.در این فرایند انتقال گرما بسیار سریعتر از روش استفاده از هوای داغ و روش بستر سیال است ،به همین دلیل سرعت پخت خیلی بیشتر و زمان توقف نوار لاستیک در داخل محیط گرم بسیار کمتر خواهد بود.در این روش زمان توقف نوار در حمام مذاب در حدود یک دقیقه است و بدین ترتیب امکان تولید با سرعت زیاد وجود دارد.این فرایند به نام محیطهای پخت مایع ،LCM (Liquid Cure Media)معروف است.در گذشته مواد بسیاری را به عنوان سیال داغ برای انتقال گرما به محصول لاستیکی مورد بررسی و استفاده قرار داده‌اند که فلزات دارای نقطه ذوب پایین ،انواع روغنها و گلیکول از آن جمله‌اند.در مورد انتخاب سیال داغ بستر نکاتی را باید در نظر داشت.یکی امکان آلودگی محصول توسط سیال است.زیرا که احتمالاً بر روی محصول وولکانش یافته اثراتی از سیال داغ بستر برجای می‌ماند.مورد دیگر ،مقاومت سیال در برابر حرکت است که به گرانروی سیال داغ ارتباط دارد.از سوی دیگر ،گرانروی سیال بر ضریب انتقال گرما مؤثر است و در نتیجه بر سرعت انتقال گرما اثر می‌کند.پس ،باید این دو موضوع همراه با هم بررسی شوند [4,7].



شکل ۲ - سطح مقطع یک واحد وولکانش پیوسته ،بستر سیال [4]

امروزه ،پس از بررسیهای انجام شده استفاده از یک مخلوط نمکی برای ذوب در داخل بستر پیشنهاد شده است.اجزای محیط و درصد هریک در جدول ۳ مشاهده می‌شود.

جدول ۳ - ترکیب مخلوط نمکی مورد استفاده در حمام مذاب [7]

نمک	درصد
پتاسیم نیترات (KNO_3)	۴۵-۵۵
سدیم نیتریت ($Na NO_2$)	۳۵-۴۵
سدیم نیترات ($Na NO_3$)	۵-۱۰

حدود تغییرات نقطه ذوب مخلوط ۱۳۵ تا ۱۹۰°C است.دمای ذوب تنها وابسته به نسبت نمکها در مخلوط است و ارتباطی با نوع آمیزه و اجزای آن ندارد.در یک واحد LCM عمدتاً یک ظرف دارای نمک مذاب وجود دارد که توسط المانهای الکتریکی گرم می‌شود.این المانها

معمولاً در داخل ظرف قرار می‌گیرند.البته ،در برخی موارد نیز از پرتوهای IR یا سوختن گاز طبیعی برای گرم کردن ظرف نمک استفاده می‌شود.به هنگام استفاده از المانهای الکتریکی ،دو انتهای المان در خارج از ظرف و به دور از نمک مذاب قرار می‌گیرد.یکی از مسائلی که معمولاً در این فرایند پیش می‌آید از چگالی بیشتر نمک مذاب (حدود $1/9 gr/cm^3$ در ۲۰۰°C) نسبت به محصول لاستیکی ناشی می‌شود.در این حالت محصول لاستیکی تمایل دارد که روی سطح نمک قرار گیرد و به حالت شناور درآید.برای رفع این اشکال استفاده از استوانه‌هایی جهت هدایت نوار لاستیکی به زیر نمک امکان دارد ،ولی در نواری که هنوز پخت نشده و ثبات شکلی پیدا نکرده است احتمال تغییر شکل و خرابی وجود دارد.برای حل مسئله راههایی وجود دارد ،از جمله نمک مذاب را به صورت فواره ای کوچک روی محصول می‌ریزند و پس از آنکه نوار مقداری پخت شد و ثبات شکلی پیدا کرد ،آن را برای کامل شدن پخت توسط استوانه‌ای به زیر سیال داغ هدایت می‌کنند.

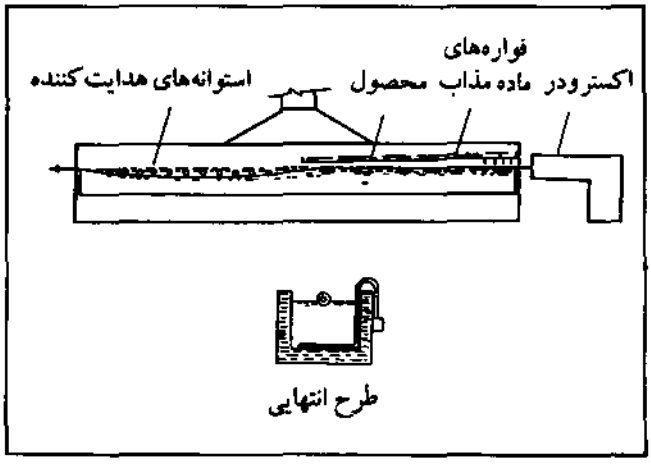
یکی از مسائل دیگر این سیستم آلوده شدن محصول توسط نمک مذاب است.بدین ترتیب که مقداری از نمک روی سطح محصول باقی می‌ماند که در نتیجه فرایند پاکسازی محصول مورد نیاز می‌باشد.ولی، چون مخلوط نمکی به خوبی در آب حل می‌شود ،معمولاً برای پاک کردن محصول آن را از داخل یک ظرف آب عبور می‌دهند.در نتیجه ، نمک اضافی شسته شده و از بین می‌رود.در مرحله بعد ،آب روی سطح جسم توسط دمش هوای گرم خشک می‌شود و محصول آماده می‌گردد.در این سیستم طول بستر مذاب در حدود ۱۲ تا ۲۵m و سرعت تولید در حدود ۳۰ متر در دقیقه است [4,5,7].مزایا و معایب این روش، در جدول ۴ و طرح یک واحد LCM در شکل ۳ ارائه شده است.

جدول ۴ - مزایا و معایب سیستم وولکانش با حمام نمک مذاب

مزایا	معایب
۱ - در مقایسه با روشهای وولکانش توسط تونل هوای داغ و بستر سیال محصول تغییر شکل کمتری دارد.	۱ - مشکل آلوده سازی محصول وجود دارد.
۲ - طول خط تولید بسیار کوتاه است.	۲ - به دلیل اعمال نیروی شناوری محصول روی سطح سیال داغ شناور می‌ماند.
۳ - سرعت انتقال گرما بیشتر است.	۳ - درکار با ماده مذاب احتمال خطراتی از جمله ایجاد سوختگی در کارکنان وجود دارد.
۴ - انعطاف پذیری سیستم برای تولید محصولات گوناگون زیاد است.	

سیستم میکروموج

به علت پایین بودن رسانش گرمایی الاستومرها ،معمولاً زمان لازم برای گرم شدن آنها و رسیدن به دمای مورد نظر طولانی است.از این نظر هزینه تمام شده محصول بالا می‌رود.به علاوه ،این امر موجب می‌شود که توزیع دما در داخل جسم یکنواخت نباشد و پخت ناهمگن انجام شود که در نتیجه گاهی محصول کارآیی خود را از دست می‌دهد.استفاده از سیستم میکروموج (ultra high frequency) ،می‌تواند مشکلات بالا را برطرف سازد ،زیراکه هم توسط این سیستم جسم به طور یکنواخت گرم می‌شود و هم اینکه سرعت گرم شدن بسیار بالاست.مزیت دیگری که این روش دارد و آن را از روشهای قبلی کاملاً متمایز می‌سازد این است که گرم شدن قطعه لاستیکی ارتباطی با ضریب انتقال گرمای آن ندارد ،در صورتی که در روشهای قبلی گرم شدن تابع انتقال گرما و ضرایب مربوط به آن ، ضخامت و سایر پارامترهای مؤثر در انتقال گرماست.



شکل ۳ - طرحی از یک واحد وولکانش پیوسته با حمام نمک مذاب [4]

روش کار در این فرایند بدین ترتیب است که جسم نارسانا بین دو صفحه خازن با فرکانس بالای الکتریکی قرار می‌گیرد و زیر تأثیر میدان الکتریکی متناوب واقع می‌شود و در نتیجه اتلاف دی الکتریک (dielectric loss) دمای جسم بالا می‌رود.اتلاف دی الکتریک منتسب به دبای (Debye) است.قطبش متناوب زیر نفوذ میدان با فرکانس بالا عاملی است که باعث ایجاد اصطکاک داخلی می‌شود و بدین ترتیب مقداری از انرژی مصرف می‌شود.این مطلب با مشاهده گرم شدن جسم ثابت شده است.در این ارتباط باید انواع گوناگون قطبش را از یکدیگر متمایز کرد:

۱ - قطبش الکترونی که به دلیل انتقال الکترون با توجه به مثبت بودن هسته اتم انجام می‌شود.

۲ - قطبش دو قطبی که توسط اثر میدان بر مولکولها ،در ارتباط با خاصیت دو قطبی آنها به وجود می‌آید.

۳ - قطبش یونی یا بین سطحی که به علت تجمع یونهای آزاد در سطوح مشترک موادی که رسانایی و ثابت دی الکتریک مختلف دارند ، صورت می‌گیرد [2].

لاستیکهای NR و SBR که جزء ترکیبات ناقطبی محسوب می‌شوند ،تنها قادرند توسط قطبش الکترونی که در دستگاههای مولد جریان متناوب با فرکانس بالا ایجاد می‌شود گرم شوند.به همین دلیل احتیاج به فرکانس خیلی بالا دارند.الاستومرهایی که مشخصه دو قطبی دارند ،مانند NBR و پلی کلروپرن ،توسط این روش به آسانی گرم می‌شوند و این عمل به طور یکنواخت در آنها صورت می‌گیرد.ولی با همه اینها روش ریزموج را می‌توان برای همه الاستومرها به کار برد [4,8-10].

نکته جالب توجه دیگر این است که آمیزه‌های لاستیکی یک توده ناهمگن می‌باشند و مکانیسم گرم شدن آنها هنوز به درستی تشریح نشده است.نظریه مهمی که در این زمینه وجود دارد نظریه واگزاست که به نام دسته‌بندی دی الکتریک معروف است.از این نظریه برداشت می‌شود که یک سیستم ناهمگن الکتریکی درست مانند یک سیستم ناهمگن نوری عمل می‌کند.یعنی همان گونه که در سیستمهای نوری محیط مغشوش کننده نور باعث جذب نور می‌شود ،در سیستمهایی که از نظر الکتریکی ناهمگن هستند (ثابتهای دی الکتریک گوناگون دارند) نیز محیط انرژی را جذب کرده و مقداری از آن را تلف می‌کند.

در این سیستم عواملی وجود دارد که به دستگاه ارتباط پیدا می‌کند،در نتیجه کارآیی دستگاههایی که توسط شرکتهای مختلف ساخته می‌شوند متفاوت است.این عوامل عبارت است از:فرکانس ،ولتاژ جریان متناوب و فاصله بین دو صفحه خازن [4].

یکی از اشکالات سیستم یاد شده که کاربرد آن را محدود می‌سازد این است که امواج تولید شده توسط دستگاه می‌تواند با امواج رادیویی تداخل کند و از این نظر اختلالاتی را در شبکه‌های ارتباطی و مخابراتی منطقه اطراف خود به وجود آورد.در نتیجه ،از احداث این گونه سیستمها در اطراف فرودگاهها و سایر مراکز مخابراتی ممانعت به عمل می‌آید.علاوه بر آن در کشورهای مختلف محدودیتهایی از نظر فرکانس دستگاه وجود دارد.در آلمان غربی معمولاً فرکانس ۲۷/۱۲،۱۳/۵۶ و ۴۰/۶۸ MHz در نظر گرفته می‌شود که توسط اداره استاندارد این کشور معین شده است.در امریکا کارگاههای استفاده کننده از این دستگاه مجازند که بین فرکانسهای ۹۱۵ تا ۲۴۵۰ MHz کار کنند.معمولاً از فرکانس ۲۴۵۰ MHz در صنایع بیشتر استفاده می‌شود [4,8].

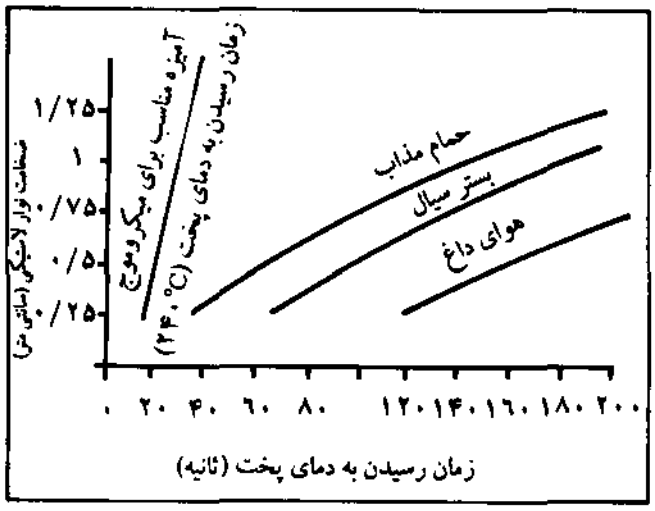
برای به دست آوردن دمای دلخواه در این سیستم می‌توان ولتاژ و زمان اثر آن را بر مواد تنظیم کرد.این سیستم معمولاً همراه با سایر روشهای وولکانش مورد استفاده قرار می‌گیرد.بدین ترتیب که گرمای آمیزه تا نزدیکی دمای پخت با این سیستم افزایش می‌یابد و سپس ،برای ثابت نگه داشتن دمای آمیزه در مدت زمان معین تا رسیدن به خواص مطلوب ،در سیستم دیگری پخت نهایی انجام می‌گیرد.برای این منظور معمولا از تونل هوای داغ ،به دلیل آسانی کاربرد ،تمیز بودن و کم خطر بودن ،استفاده می‌شود.سیستم میکروموج به ویژه برای وولکانش قطعات ضخیم بسیار مفید است.این روش هم در فرایندهای پیوسته و هم ناپیوسته قابل استفاده است.در روشهای پیوسته محصول خروجی از اکسترودر وارد محفظه‌ای می‌شود و در آنجا تحت تأثیر میکروموج قرار می‌گیرد.در نتیجه دما به صورت یکنواخت در آن افزایش می‌یابد.در ساخت این محفظه نکاتی را باید رعایت کرد.از جمله درهای اضافی در ورودی و خروجی باید به گونه‌ای طراحی شوند که مقدار نفوذ امواج به خارج را به حداقل برسانند.به علاوه شکل هندسی داخل محفظه و مواد سازنده جدار داخلی آن نباید سبب جذب یا بازتاب انرژی شوند.همچنین این مواد نباید باعث ایجاد جرقه و آتش سوزی در داخل محفظه شوند.سرانجام باید منبع تولید امواج لوله مگنترون (magnetron tube) خود در مقابل پرتوهای بازتابیده حفاظت شود [4,5,11].

ظرفیت منبع انرژی برای یک دستگاه میکروموج ۰/۷۵ تا ۱۰ کیلو وات است که براساس حداکثر انرژی لازم طراحی می‌شود.اکثر مگنترونها عمری در حدود ۵ هزار ساعت دارند که باید افزایش داده شود.میزان جذب و مصرف انرژی باید بین ۷۵ و ۹۵ درصد باشد تا از نظر اقتصادی استفاده از این سیستم مقرون به صرفه شود.این امر بستگی به پلیمر مصرفی و اجزای داخل آمیزه دارد.بنابراین ،به هنگام نوشتن فرمول یک آمیزه باید دقت کرد از موادی استفاده شود که ضمن تأمین خواص نهایی مورد نظر قادر به جذب میکروموج نیز باشند.

از سوی دیگر ،تولید آمیزه نیز باید مقرون به صرفه باشد.به همه این دلایل ،در حالی که این روش بسیار جالب می‌باشد ،ولی چندان رایج نشده است [4,11-13].در جدول ۵ مزایا و معایب سیستم میکروموج و در شکل ۴ مقایسه سرعت گرم شدن نوار لاستیکی در سیستم میکروموج با برخی دیگر از روشهای وولکانش پیوسته ارائه شده است.

جدول ۵- مزایا و معایب سیستم میکروموج [4,7]

مزایا	معایب
۱- محصول تمیز است.	۱- استفاده از آن برای ترکیبات ناقطبی همراه با مشکلاتی است.
۲- به پیش گرم کردن نیازی نیست.	۲- ممکن است اثر تسمه نقاله روی نوار لاستیکی بماند.
۳- حداقل تغییر شکل ممکن در محصول پیش می‌آید.	۳- سرمایه گذاری اولیه زیادی مورد نیاز است.
۴- میزان تولید و سرعت آن زیاد است.	۴- برای جلوگیری از انتشار امواج در محیط باید احتیاط لازم به عمل آید.
۵- فضای کمتری از نظر طول برای ماشین آلات مورد نیاز است.	۵- عمر لوله مگنترون محدود است.
۶- مقدار ضایعات به هنگام شروع تولید کم است.	
۷- ضایعات به هنگام تولید حداقل است.	
۸- گرما به صورت یکنواخت در سطح مقطع نوار لاستیکی توزیع می‌شود.	



شکل ۴ - مقایسه سرعت گرم شدن نوار لاستیکی در روشهای مختلف [4]

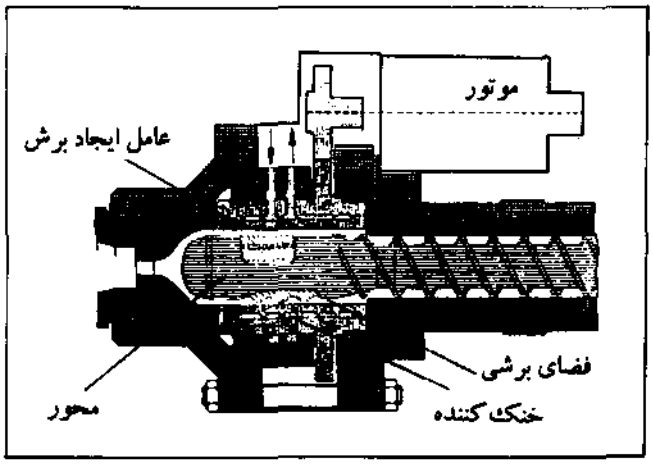
استفاده از سره برشی در اکسترودر

سره برشی اکسترودر وسیله‌ای برای افزایش دمای یک آمیزه لاستیکی تا حد دمای مناسب وولکانش است.اگر چه سره برشی جایگزین سره معمولی یک اکسترودر می‌شود ،ولی در واقع یک بخش از خط وولکانش را تشکیل می‌دهد.

همان گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود یک شکاف باریک بین انتهای مارپیچ و بخش چرخان سره برشی وجود دارد که مسیر عبور جریان از مارپیچ به حدیده (die)را تشکیل می‌دهد.در این شکاف حلقوی تنش و سرعت برشی زیاد ایجاد می‌شود که سبب تبدیل انرژی مکانیکی به انرژی گرمایی می‌گردد و نتیجه آن افزایش سریع دمای آمیزه است.کنترل افزایش دما با تغییر در سرعت چرخش بخش چرخان سره برشی ممکن می‌شود.دمای مورد نیاز در آمیزه و سرعت مارپیچ (چون سرعت نسبی مارپیچ و بخش چرخان تعیین کننده سرعت برشی است) از عوامل مؤثر در تعیین سرعت چرخش بخش چرخان می‌باشند.میزان افزایش دمای آمیزه به مقدار انرژی داده شده به واحد حجم آمیزه بستگی دارد.

در شکل ۵ سطح محور صاف است ،ولی در برخی موارد ممکن است محور دارای زایده‌هایی برای انجام اختلاط باشد که یکنواختی دمای آمیزه را به هنگام خروج از حدیده سبب می‌شوند.استفاده از سره برشی در اکسترودر دارای مزیت گرمادهی یکنواخت همانند سیستم UHF است ولی به مواد قطبی و آمیزه‌های دوده‌ای محدود نمی‌باشد.

محصول پس از خروج از حدیده باید در دمای پخت به مدت کافی قرار گیرد تا پخت کامل شود.ممکن است در این مرحله از تونل هوای داغ یا یک تسمه نقاله استفاده شود.برای محصولی با دیواره نازک یا مواردی که احتمال تغییر ابعاد محصول وجود دارد می‌توان از بستر سیال استفاده کرد.به هر حال در صورت به کارگیری سره برشی طول بستر خیلی کمتر می‌شود [5].



شکل ۵ - سره برشی در یک اکسترودر [5]

وولکانش به وسیله تابش دهی

وولکانش توسط پرتودهی مسئله تازه‌ای نیست.نخستین ثبت اختراع در این مورد به سال ۱۹۲۹ مربوط می‌شود.بعدها در دهه ۵۰ و ۶۰ مقاله‌هایی در مورد وولکانش انواع لاستیکها توسط پرتوهای الکترونی و پرتوهای گاما انتشار یافت.نکته مهم این است که روش یاد شده هم اکنون روشی کاملاً عملی برای تولید بسیاری از محصولات است.در مقاله‌ای که در سال ۱۹۵۹ توسط دیل هارمن (Dale Harman) انتشار یافت این عبارت به چشم می‌خورد: "تنها در صورتی استفاده از روش پرتودهی برای وولکانش طی ده سال آینده عملی خواهد بود که یا شتاب دهنده‌های الکترونی با هزینه کمتری ساخته شوند یا موادی کشف گردند که افزودن آنها به آمیزه‌های لاستیکی باعث کاهش انرژی لازم برای وولکانش شود." این عبارت کوتاه وضعیت این سیستم در گذشته و سیر پیشرفت آن را به خوبی نشان می‌دهد.از آن زمان تلاشها در این جهت متمرکز شد که هزینه‌های انجام این روش وولکانش را تا حد امکان کاهش دهند و سرانجام بعد از چند دهه هر دو مسئله‌ای که هارمن به آنها اشاره کرده بود ، تحقق یافت.امروزه هم شتاب دهنده‌ها با هزینه بسیار کمتری ساخته می‌شوند و هم موادی شناخته شده‌اند که به عنوان حساس کننده به پلیمر افزوده می‌شوند تا انرژی لازم برای وولکانش را کاهش دهند.

در این سیستم انرژی لازم برای وولکانش توسط تابش دهی فراهم می‌شوند.در اینجا انرژی باعث تولید رادیکالهای آزاد و یونها در سیستم می‌شود ،ولی آنچه در ارتباط با وولکانش اهمیت دارد رادیکالهای آزاد تولید شده است.این رادیکالهای آزاد باعث ایجاد پیوندهای کربن-کربن بین زنجیرهای پلیمر می‌شوند.در واقع ،اینجا یک سیستم وولکانش غیر گوگردی وجود دارد.در این روش به وجود گرما نیازی نیست.

اثر پرتوها بر پلیمر را می‌توان از نظر سینتیکی مورد بررسی قرار

داد و نیز می‌توان آن را به عنوان انرژی داده شده به سیستم در نظر گرفت.بحث سینتیکی پیرامون این مسئله بسیار پیچیده است ولی از نظر انرژی می‌توان آن را با گرمای داده شده به سیستم مقایسه کرد.هنگامی که از گرمای مستقیم استفاده می‌شود ،مقدار گرمای جذب شده برای انجام واکنش مورد نظر در مقایسه با کل انرژی داده شده به سیستم ناچیز است ، زیرا در این حالت مقدار زیادی از انرژی گرمایی صرف گرم شدن محیط می‌گردد و در واقع اتلاف انرژی زیاد است.بیشتر انرژی جذب شده نیز صرف ایجاد تحرک در ساختار مولکولی جسم می‌شود و مقدار کمی از آن برای ایجاد پیوندهای شیمیایی مورد استفاده قرار می‌گیرد.در صورت استفاده از روش پرتودهی مکانیسم عمل به کلی متفاوت است و در واقع پرتوها به طور مستقیم روی خود اتمها تأثیر می‌گذارد و بدین ترتیب ، رادیکالهای آزاد ایجاد شده تحرک کافی برای یافتن یک پیوند دوگانه و واکنش با آن را خواهند داشت.

در بررسی مسائل اقتصادی این روش ،مقایسه بین دستگاه وندگراف (Vande Graff) که یک شتاب دهنده الکترونی مربوط به دهه ۵۰ است با دستگاه دینامیترون (Dynamitron) که یک شتاب دهنده متعلق به دهه ۷۰ است نشان می‌دهد که قدرت دستگاه اخیر حدود بیست برابر افزایش یافته است.در صورتی که هزینه‌های مربوط به تولید و نگهداری آن شش برابر کاهش را نشان می‌دهد.از سوی دیگر ،میزان انرژی لازم برای پخت لاستیک از (۱۰^{۴}J/kg)۳۰MR در دهه ۵۰ به ۵MR در دهه ۷۰ کاهش یافته است و این امر به دلیل استفاده از مواد شیمیایی مناسب در آمیزه است.باتوجه‌به‌کاهش هزینه‌ها در قسمت ماشین آلات می‌توان نتیجه گرفت هزینه تولید در دهه ۷۰ نسبت به دهه ۵۰ ، ۳۶۰۰ برابر کاهش داشته است.بنابراین اکنون می‌توان این روش را به عنوان یک روش عملی و کاربردی مورد استفاده قرار داد [14].

روش ناپیوسته اتوکلاو

از آنجاکه سیستم وولکانش مرسوم در ایران ،استفاده از اتوکلاو به روش ناپیوسته است ،برای مقایسه با روشهای پیش گفته ،مزایا و معایب این سیستم نیز در جدول ۶ ارائه شده است.

نتیجه‌گیری

با توجه به معایب یاد شده برای سیستم اتوکلاو ،به ویژه مسئله کند بودن پخت و در نتیجه سرعت کم تولید و همچنین محدودیت در طول محصول ،استفاده از این روش برای نوارها ،کابلها و لوله‌های با طول زیاد در عمل مقدور نیست.بنابراین در این موارد باید از سیستم وولکانش پیوسته استفاده کرد.برای انتخاب سیستم وولکانش پیوسته مناسب نیز باید عوامل متعددی را در نظر داشت که مهمترین آنها عبارت‌اند از:

۱ - اجزای سازنده آمیزه و نقش آنها در هنگام تولید ،

۲ - سرعت تولید مورد نیاز ،

۳ - مساحت یا فضای لازم جهت استقرار ماشین آلات ،به ویژه در مورد کارگاههایی که با محدودیت فضا روبرو هستند ،

۴ - میزان دسترسی به دانش فنی مورد نیاز برای کاربرد مؤثر هر سیستم،

۵ - سرمایه گذاری اولیه مورد نیاز و هزینه نگهداری سیستم ،

۶ - فرایندهای جانبی مورد نیاز برای هر سیستم ،هزینه سرمایه گذاری و نگهداری ،میزان فضای لازم جهت استقرار آن سیستم ،

۷ - منبع انرژی قابل استفاده با توجه به امکانات منطقه و هزینه آن.

در واقع پیشنهاد یک سیستم وولکانش خاص برای به دست آوردن یک محصول بدون بررسی و توجه به موارد یاد شده ناممکن است.

جدول ۶ - مزایا و معایب سیستم وولکانش اتوکلاوی [4]

مزایا	معایب
۱ - برای محصولات با طول کم مناسب است. ۲ - به جز در مورد نوارهای لاستیکی بزرگ در سایر موارد کارآیی دارد. ۳ - مشکل ایجاد تخلخل ندارد. ۴ - برای همه پلیمرها قابل استفاده است. ۵ - محصول خواص فیزیکی خوبی دارد.	۱ - عدم امکان کاربرد برای لاستیک متخلخل. ۲ - محدود بودن طول محصول. ۳ - کند بودن پخت. ۴ - احتمال تغییر شکل محصول. ۵ - بالا بودن هزینه کارگر. ۶ - عدم استفاده کامل از انرژی. ۷ - ایجاد ضایعات زیاد در دو انتهای محصول. ۸ - انجام تخریب اکسایشی.

مراجع

[1]Gregory C.H.-Continuous Vulcanization of Solid and Cellular Profiles, Rubber Journal, September, 1966, P.66-74.

[2]Hofmann.W. Vulcanization and Vlcanizing Agents. 1967.

[3]Capelle.G - Hunziker, P. Profile Extrusion and Vulcanization Rubber World March 1988 P.16-23.

[4]James.J. Antony - Comparative Aspects of CV Systems Rubber Division ACS Chicago 4, May 1977.

[5]Philip, R.Freakley "Rubber Processing and Production Organization Plenum Press, New York, 1985, pp 172-181.

بقیه در صفحه ۲۲۵