

بررسی ریزساختار و تولید عایق فوم ریز ساختاری کابل‌های هم محور با گاز بوتان

مهدی نظری مرویان^۱، امیر حسین بهروش^۲ و پیمان شاهی^۳
Simamoj@gmail.com

چکیده

در این تحقیق به بررسی تولید کابل هم محور با عایق فوم ریز سلولی پرداخته شده است. ویژگی مهم این تحقیق استفاده از گاز بوتان به عنوان عامل جوانه زای فیزیکی و درعین حال تولید نمونه‌هایی با اندازه سلول ۱۵۰ میکرون می‌باشد. این در حالی است که اکثر کارهای تحقیقاتی انجام شده پیرامون اکستروژن فوم‌های ریز ساختاری، دی اکسید کربن یا نیتروژن را به عنوان عامل جوانه زا انتخاب می‌کنند. در این مقاله ضمن بیان طراحی و ساخت دستگاه اکسترودر فوم ریزساختاری برای مقاطع ضخیم، تاثیر دما و مواد استفاده شده بر ساختار عایق فوم فیزیکی کابل‌های هم محور مورد بررسی قرار گرفته است. تاثیر دما با توجه تاثیر آن بر روی استحکام مذاب بسیار قابل توجه است. دمای بالا سبب رشد بیش از حد سلول‌ها و چگالی سلولی پایین شده و دمای پایین نیز از تعداد سلول‌های جوانه زده شده می‌کاهد. استفاده از مواد ترکیبی نیز با توجه به وابستگی شاخص جریان پذیری مواد با استحکام مذاب تاثیر شدیدی را بر روی ساختار اعمال کرده است. در پایان تضعیف یک کابل تولید شده با عایق فوم فیزیکی با یک کابل تولید شده با عایق فوم شیمیایی مقایسه شده است. نتایج به دست آمده بیان گر کاهش ۱۵٪ تضعیف کابل در فرکانس ۳۰۰۰ MHz در مقایسه با کابل‌های با عایق فوم شیمیایی است.

کلیدواژه:

فوم فیزیکی - کابل هم محور - فرآیند اکستروژن

۱- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، ساخت و تولید، دانشگاه تربیت مدرس

۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، ساخت و تولید، دانشگاه تربیت مدرس

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، ساخت و تولید، دانشگاه تربیت مدرس، psh_mech@yahoo.com

۱- مقدمه

کاهش بیش از حد دما موجب افزایش استحکام مذاب گردیده و تعداد جوانه‌های ایجاد شده را کاهش می‌دهد. در این تحقیق، تاثیر دما و هندسه قالب بر ساختار عایق یک کابل هم محور بررسی شده است.

۲- پیش زمینه

فرآیند فوم کردن پلاستیک‌ها مدت زمان زیادی است که بحث اساسی و پرهزینه‌ای را در زمینه مواد، فرآیند تولید و شیمی فرآیند به همراه داشته است. سیمونز در سال ۱۹۵۸ فوم پلی اتیلنی را که به روش شیمیایی تولید شده بود در یک نوع کابل الکتریکی جریان بالا استفاده کرد. نوع اول کابل کواکسیال در دهه ۱۹۵۰ با عایق فوم پلی اتیلن با عامل فوم زای شیمیایی، تولید شد. به دلیل بخار آبی که در طی فرآیند تولید می‌شد در سلول‌های فوم باقی می‌ماند، ضریب اتلاف این نوع کابل بسیار بالا بود. دانسیته فوم تولیدی در این روش در حدود 0.42 gr/cm^3 بود [۴]. مارک ولف در سال ۱۹۶۷ کابل کواکسیال با عایق فوم پلی اتیلنی را ساخت که ضریب اتلاف آن بین ۱۶۰ تا ۸۰۰ میکرو رادیان بود [۴]. نوع دوم کابل کواکسیال با عایق فومی در سال ۱۹۷۳ معرفی شد که در آن از ترکیب پلی اتیلن، یک نوع عامل جوانه زا (نوعی کاربید) و گاز N_2 به عنوان عامل فوم زا استفاده می‌نمود. دانسیته‌ای فوم تولید شده در این روش در حدود 0.3 تا 0.6 gr/cm^3 بود و ضریب دی الکتریک آن 1.475 تا 1.63 بود [۴].

یوشیمورا و همکارانش در سال ۱۹۶۷ روشی برای تولید عایق فومی پلی استایرنی با استفاده از گاز پنتان به عنوان عامل فوم ساز به کار بردند. دی الکتریک ساخته شده از فوم پلی استایرنی گرچه خواص الکتریکی خوبی داشت (ضریب دی الکتریک در محدوده $1/1$ تا $1/2$ و ضریب اتلاف آن 180 تا 350 میکرو رادیان) اما بدلیل سخت و شکننده بودن فوم پلی استایرنی، خواص مکانیکی آن مطلوب نبود. برای افزایش انعطاف پذیری این نوع کابل، نوار پلی اتیلنی به دور عایق فومی پلی استایرنی کشیده می‌شد [۴و۵]. ویکانلو و همکارانش در سال ۱۹۷۸ فوم پلی اولفینی را ارائه دادند که خواص مکانیکی و الکتریکی آن خوب بود. در این کابل کواکسیال از گاز فریون $11, 12, 114, 113$ و نیز ترکیب آنها به عنوان عامل فوم زا استفاده می‌شد. ضریب دی الکتریک این نوع کابل در محدوده $1/1$ تا 1.32 بود [۶و۷].

فاکس و همکارانش در سال ۱۹۸۴ کابل کواکسیالی را معرفی کردند که قابلیت انعطاف و جابجایی آن به طور چشمگیری بهبود یافته بود. به دلیل ملاحظات زیست محیطی و قوانین بین المللی استفاده از مواد فلور کربن ممنوع و تحقیقات گسترده‌ای برای جایگزین آن

ساختار کابل‌های کواکسیال شامل یک رسانای داخلی، عایق دی الکتریک، رسانای خارجی و در نهایت یک روکش می‌باشد. این دسته از کابل‌ها کاربرد روزافزونی را در انتقال سیگنال با فرکانس بالا و یا با پهنای باند وسیع یافته‌اند. علاوه بر این، کابل‌های کواکسیال در انتقال سیگنال‌ها با فرکانس پایین نظیر فرکانس‌های صوتی نیز استفاده می‌شوند. از ویژگی‌های عمده این دسته از کابل‌های انتقال می‌توان به میزان تضعیف پایین، استحکام مکانیکی خوب، خمش عالی و وزن پایین اشاره نمود.

کابل‌های کواکسیال سنتی با استفاده از عوامل پف زا به روش شیمیایی تولید می‌شوند. گاهی عامل پف زای شیمیایی به صورت کامل تجزیه نمی‌گردد که این امر باعث افزایش افت در کابل می‌شود و با واکنش تجزیه مقداری آب در عایق فومی به وجود می‌آورد و باعث بالا بردن میزان تضعیف کابل می‌گردد. در روش فیزیکی از گازهایی نظیر دی اکسید کربن، بوتان، نیتروژن و ... به عنوان عامل فوم زای فیزیکی استفاده می‌گردد و همچنین ساختار فوم حاصله بسیار ریزتر از فوم‌های تولید شده به روش شیمیایی است. ریزتر شدن سلول‌ها تاثیر قابل توجهی بر میزان افت کابل و خواص فیزیکی و الکتریکی کابل دارد.

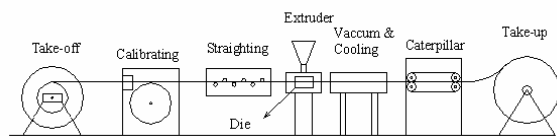
فوم‌های ریزسلولی با ایجاد افت فشار بالا قابل دست یافتن می‌باشند. هرچه میزان افت فشار اعمال شده بالاتر باشد، فوم حاصله ریزساختارتر و دارای انبساط بیشتری می‌باشد. معادله (۱) وابستگی میزان افت فشار را نشان می‌دهد. یکی از مهمترین پارامترها جهت ریزتر کردن و افزایش تعداد سلول‌ها در فوم‌های پلیمری ریز ساختاری اعمال افت فشار ناگهانی به سیستم می‌باشد. از مطالعات انجام شده در این زمینه می‌توان به کارهای انجام شده توسط پارک [۱] و بهروش [۲] اشاره نمود. جهت دست یابی به یک فوم ریز ساختاری نرخ افت فشار 1 GPa/Sec لازم می‌باشد [۱]. فرمول زیر جهت محاسبه میزان افت فشار در یک قالب با طول L و شعاع R پیشنهاد شده است [۳].

$$P = \frac{12\eta LQ}{2\pi RH^3} \quad (1)$$

که در این فرمول η ویسکوزیته مذاب، Q میزان دبی خروجی و H گپ (فضای ایجاد شده برای خروجی مواد) می‌باشد. همچنین در کنار میزان نرخ افت فشار، دما نیز نقش قابل توجهی را بر اندازه و چگالی سلول‌ها ایفا می‌کند. دمای بیش از حد مواد سبب کاهش مقاومت زمینه پلیمری و رشد بیش از حد حباب‌ها می‌گردد و

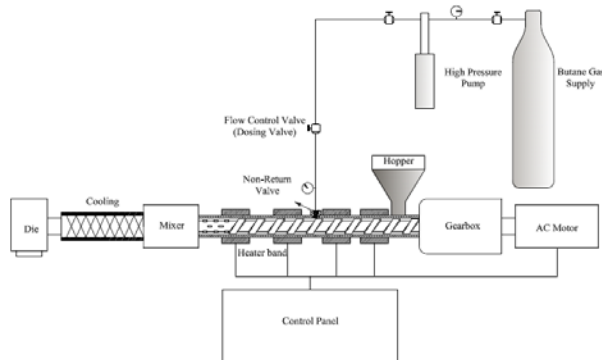
۴- تجهیزات و روش کار

شکل (۱) شماتیکی از خط تولید کابل کواکسیال را نشان می دهد. ابتدا لوله مسی از دستگاه take off باز شده و پس از عبور از دستگاه سایزینگ و صاف کن و عبور از داخل قالب دستگاه اکستروژن، عایق فومی بر روی لوله مسی قرار می گیرد و ضمن عبور از دستگاه خنک کننده توسط دستگاه Cutterpillar کشیده شده و در نهایت توسط دستگاه کابل جمع کن دور قرقره جمع می شود.



شکل(۱): شماتیک خط تولید کابل کواکسیال

شکل (۲) دستگاه اکسترودر ساخته شده جهت تولید کابل هم محور ۷/۸ اینچ را نشان می دهد. گاز بوتان از طریق یک پمپ فشار بالا به درون سیلندر اکسترودر تزریق می گردد. میزان حجم گاز تزریق شده از طریق یک شیر کنترل دبی تعیین می گردد. تعدادی مخلوط کننده جهت افزایش حلالیت گاز بوتان در ناحیه جلوی ماردون طراحی و تعبیه شده است. پس از ماردون، یک میکسر جهت افزایش انحلال گاز بوتان در پلی اتیلن مذاب کار گذاشته شده است. جهت جلوگیری از افزایش بیش از حد فشار، دمای پلیمر در این ناحیه به میزان قابل ملاحظه‌ای بالا برده می شود. همچنین بالا بردن دما باعث افزایش نفوذ و در نتیجه افزایش حلالیت می گردد. با افزایش حلالیت گاز در زمینه پلیمری می توان به سلول های ریزتر و چگالی سلول بالاتری دست یافت. در نهایت مذاب پلیمری از درون یک خنک کن عبور داده شده و با عبور از قالب بر روی مغزی مسی کشیده می شود. روکش مسی بیرونی و روکش نهایی پلی اتیلنی تحت فرآیندهای جداگانه بر روی کابل کشیده می گردد.



شکل (۲): شماتیک تجهیزات استفاده شده در تولید کابل هم محور

صورت گرفت و متعاقب آن گازهای خنثی به عنوان جایگزین مناسب مورد توجه قرار گرفت [۸].

فاکس و همکارانش در سال ۲۰۰۰ روشی را برای تولید کابل کواکسیال بایک عایق فومی با استفاده از مخلوط پلی اتیلن سنگین و سبک ارائه دادند. آنها مواد فوم را همراه با ماده گرما زایی مثل آزودی کربن آمید و ماده گرماگیری مانند کربنات سدیم یا اسید سیتریک، به عنوان عامل جوانه زا استفاده نمودند. دانسیته فوم تولید شده بین ۰/۱۷ تا ۰/۲۲ گرم بر سانتی متر مکعب بود. فوم تولید شده با دانسیته ۰/۱۷ گرم بر سانتی متر مکعب دارای استحکام پایینی بود و برای تولید کابل کواکسیال مورد توجه قرار نگرفت [۷و۹]. بیشترین اندازه سلول در فوم تولید شده توسط آنها ۱۷۰ میکرون گزارش شده است.

ماساهیرو و همکارانش در سال ۲۰۰۳ یک نوع عایق فومی با خواص الکتریکی عالی جهت کابل کواکسیال ارائه دادند. مقدار تضعیف کابل کواکسیال ساخته شده ۱۰ درصد کمتر از کابل های قبلی بود. آنها از یک نوع عامل جوانه زا شیمیایی جهت جوانه زنی و ترکیبی از مواد پلی اتیلن سبک و سنگین استفاده نمودند. آن ها برای تولید عایق فومی از دستگاه کواکستروژن و روش فیزیکی همراه با گاز N_2 به عنوان عامل فوم زا استفاده کردند [۹]. بوفاندو و همکارانش در سال ۲۰۰۵ از ترکیب مواد پلیمری و سیال فوق بحرانی به عنوان عامل فوم زا در تولید فوم ریز سلولی استفاده کردند. برای پایداری فوم تولیدی در شرایط عملکردی، از مواد پلیمری استفاده شد که T_g آن ها خارج از محدوده ۴۰- تا ۱۰۰ درجه سانتیگراد باشد. همچنین از آنتی اکسیدانت ها شامل پایدار کننده های فنولیکی و پایدار کننده های فسفاتنی جهت جلوگیری از تخریب فوم استفاده نمودند. دانسیته فوم تولید شده با این روش تا ۰/۲ گرم بر سانتی متر مکعب کاهش یافت [۹].

۳- مشخصات ماده و پارامتر های فرآیند

پلیمر استفاده شده در این تحقیق شامل پلی اتیلن سبک (LDPE) و پلی اتیلن سنگین (HDPE) بوده و از گاز بوتان به عنوان عامل جوانه زا استفاده شده است. در این تحقیق، دو پارامتر دما و مواد استفاده شده به عنوان متغیرهای اصلی فرآیند در نظر گرفته شده است. جدول زیر پارامترهای ثابت لحاظ شده در حین انجام آزمایش ها را نشان می دهد.

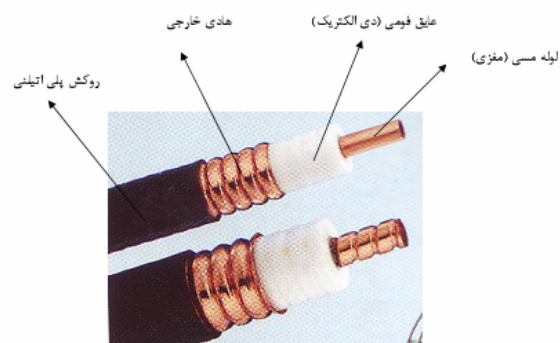
جدول (۱): پارامترهای ثابت لحاظ شده در حین آزمایش ها

پارامتر	عامل جوانه زا	درصد جوانه زا	دور دستگاه
توضیحات	بوتان	۲.۵٪	۵ rpm

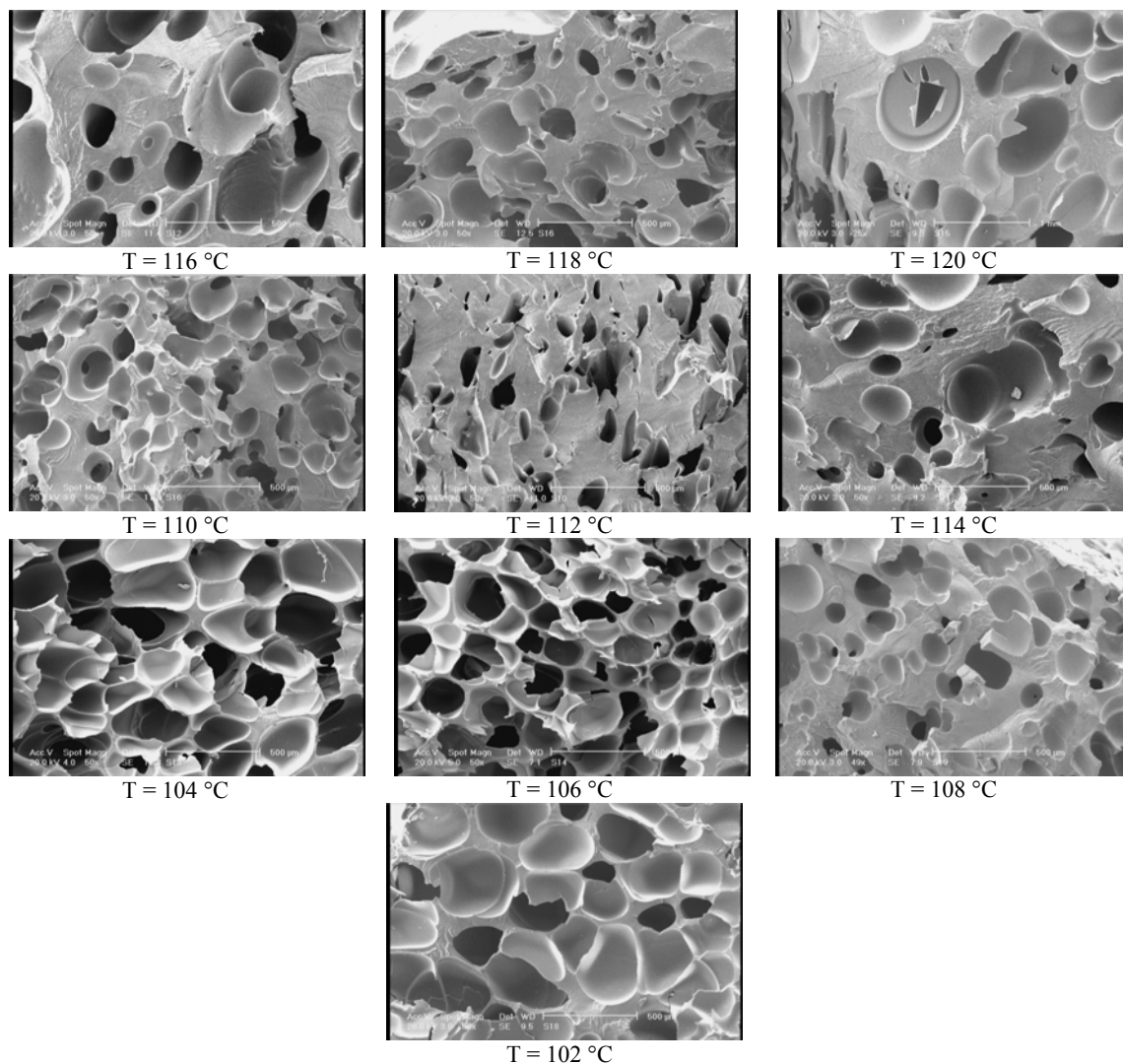
۵- بررسی اثر دما بر میکروساختار فوم ریزساختاری

تأثیر دما بر ساختار فوم ریز ساختاری بسیار قابل توجه است. چرا که دما تأثیر مستقیم بر ویسکوزیته مذاب داشته و در نتیجه تعداد جوانه‌های ایجاد شده و میزان رشد سلول ها را تحت تأثیر قرار خواهد داد [۱۰]. جهت بررسی تأثیر دما بر ساختار فوم ریز سلولی، دمای مذاب و ناحیه خنک کاری از ۱۲۰ درجه تا ۱۰۲ درجه سانتی گراد تغییر داده شد. شکل (۴) میکروساختار فوم های تولید شده را در دماهای مختلف نشان می‌دهد.

شکل (۳)، کابل هم محور تولید شده را نشان می‌دهد.

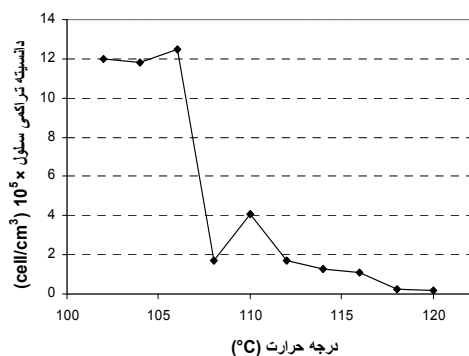


شکل (۳): کابل هم محور تولید شده با عایق فوم ریزساختاری به روش اکستروژن



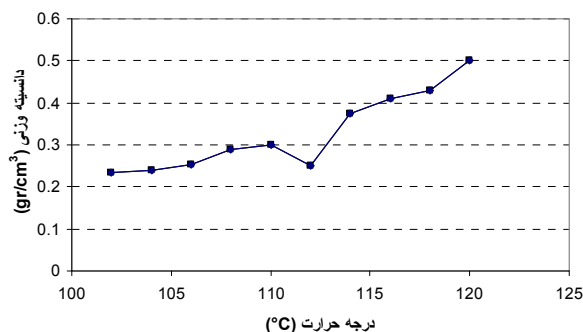
شکل (۴): بررسی تأثیر دما بر میکروساختار نمونه های اکستروژد شده

۱۰۲ درجه، استحکام مذاب به طور بیش از حد افزایش یافته و مقاومت زمینه پلیمری در برابر رشد حباب های جوانه زده شده افزایش می یابد. شکل (۵) چگالی نسبی فوم های اکستروود شده و چگالی سلول ها را در هر سانتی متر مکعب از پلیمر فوم شده نشان می دهد.



شکل (۵): تاثیر دما بر چگالی نسبی و چگالی سلولی فوم ریز ساختاری

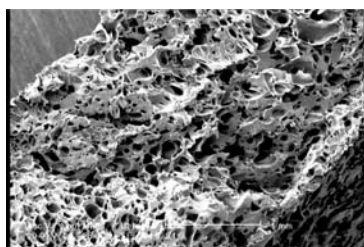
همانطور که از تصاویر SEM برمی آید، با کاهش یافتن دما از ۱۲۰ تا ۱۰۶ درجه سانتیگراد، سلول ها یکنواخت تر و چگالی سلول ها افزایش یافته است. همچنین اندازه سلول ها نیز کاهش قابل توجهی را نشان می دهد. چرا که در دمای بالاتر پدیده فرار گاز از مذاب پلیمری باعث کاهش حلالیت گاز بوتان در پلیمر شده و تعداد جوانه های ایجاد شده را کاهش می دهد. با کاهش دما از ۱۰۶ تا



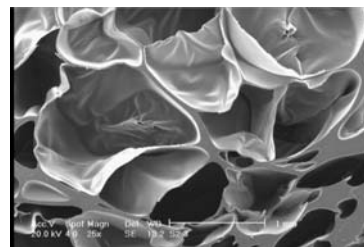
گرید اکستروژن پلی اتیلن سبک استفاده شده در این تحقیق دارای MFI نسبتاً بالا می باشد. در شکل (۶-الف) تصویر SEM گرفته شده از پلی اتیلن سبک فوم شده ارائه شده است. همان طور که از تصویر برمی آید، این نمونه دارای سلول های نسبتاً درشت و چگالی بسیار پایینی می باشد. جهت افزایش استحکام مذاب، پلی اتیلن سنگین با MFI پایین به میزان ۱۰٪ به پلی اتیلن سبک اضافه شد. نتایج گویای این واقعیت است که با افزایش استحکام مذاب سلول ها رشد کمتری را در مقایسه با نمونه اکستروود شده با پلی اتیلن سبک داشته اند. تصویر SEM فوم ترکیبی در شکل (۶-ب) تأییدی بر این واقعیت می باشد.

۶- بررسی اثر استفاده ترکیبی از مواد بر ساختار فوم ریز سلولی

پلی اتیلن فوم پذیری خوبی را از خود نشان می دهد و این امر سبب شده است تا این پلیمر به صورت وسیع در تولید قطعات فوم شده مورد استفاده قرار گیرد. پلی اتیلن سبک به دلیل دارا بودن زنجیره های فرعی متصل به زنجیره های اصلی به خوبی می تواند حباب های ایجاد شده را در درون زمینه خود نگه دارد. در این میان پارامتر دیگری که تاثیر چشمگیری بر میزان رشد سلول دارد، پارامتر استحکام مذاب می باشد. اغلب از شاخص جریان پذیری مذاب (MFI) برای تخمین میزان استحکام مذاب استفاده می گردد.



ب



الف

شکل (۶): میکروساختار نمونه فوم اکستروود شده (الف) از جنس پلی اتیلن سبک در دمای ۱۰۸ درجه سانتی گراد (X25) (ب) از جنس ترکیبی (ترکیب پلی اتیلن سنگین و پلی اتیلن سبک) (X25)

درجه سانتی‌گراد، به دلیل افزایش بیش از حد استحکام مذاب، چگالی سلول‌ها به میزان کمی کاهش خواهد یافت. به همین ترتیب، استفاده ترکیبی از مواد سبب افزایش استحکام مذاب در برابر پلی اتیلن سبک شده است و در نهایت منجر به افزایش شدیدی در میزان چگالی سلول‌ها شده است. در حالیکه با استفاده از تجهیزات تهیه شده اندازه متوسط سلول‌ها به ۱۵۰ میکرون رسیده است، میزان تضعیف کابل تولید شده در فرکانس ۳۰۰۰ MHz، به میزان ۱۵٪ کاهش یافته است.

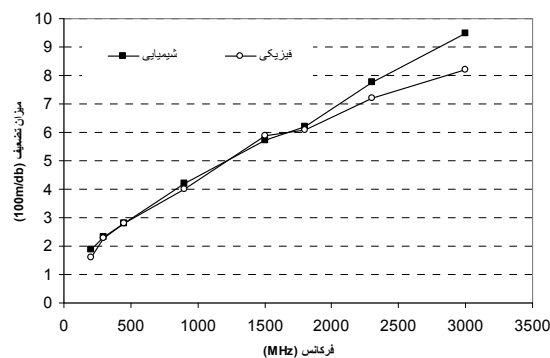
همان طور که در ابتدا اشاره شد، کابل‌های هم محور تولید شده به روش فیزیکی دارای خواص الکتریکی و هدایتی بسیار بهتری نسبت به کابل‌های شیمیایی می‌باشند. چراکه آب باقی مانده که حاصل از واکنش شیمیایی می‌باشد، تاثیر بسیار نامطلوبی را بر هدایت الکتریکی خواهد داشت. جهت بررسی این مطلب، میزان تضعیف کابل تولید شده از این تحقیق با کابل تولید شده به روش شیمیایی با استفاده از مواد فوم زای گلارینت مقایسه شده است [۱۱]. جدول (۲) پارامترهای مهم مربوط به دو نوع کابل تولید شده را نشان می‌دهد.

۸- مراجع

- [1] C. B. Park, The Role of Polymer/Gas Solution in Continuous Processing of Microcellular Polymers, Ph.D., Thesis, Massachusetts institute of technology, 1993.
- [2] A. H. Behraves, "Extrusion Processing of Low-Density Microcellular Foam", Ph.D., Thesis, University of Toronto, 1997.
- [3] R. J. Crawford, Plastic Engineering, Third Edition, Butterworth-Heinemann Publication, 1998.
- [4] US Patent, No: 4104481." Coaxial cable with improved properties and process of making same", 1978.
- [5] US Patent, No: 4107354." Coating electrically conductive wire with", 1978.
- [6] US Patent, No: 4107354."Coating electrically conductive wire with", 19786 - Sydney levy, P.E. Pasties Extrusion Technology Hand Book, 1981.
- [7] US Patent, No: 6037545."Coaxial cable", 2000.
- [8] US Patent, No: 6956068."Microcellular foam Dielectric for Use in Transmission Lines", 2005.
- [9] A. et.al Masahiro, "Development of Low-loss Highly-foamed Polyethylene Coaxial Cable (LHPX) for Base Stations for Cellular Phones", Hitachi cable review No. 22, 2003.
- [10] S. T. Lee, N. S. Ramesh and C. B. Park, Polymeric Foams, Taylor & Francis Pub., 2006.
- [11] M. Nazari Marvian, A. H. Behraves and M. Golzar, "Extrusion Foam Coating of Coaxial Cables Using Chemical Blowing Agent", Cellular Polymers, Vol. 27, No 1, 2008.

جدول (۲): مشخصات ساختار عایق فوم شیمیایی و فیزیکی کابل هم محور

نوع عایق کابل هم محور	میانگین اندازه سلول‌ها	چگالی عایق ریز سلولی gr/cm ³	چگالی سلولی (cells/cm ³)
شیمیایی	۷۰۰ میکرون	۰/۴	۱۰ ^۴
فیزیکی	۱۵۰ میکرون	۰/۲۵	۵ × ۱۰ ^۷



شکل (۷): مقایسه میزان تضعیف کابل تولید شده با عایق ریزساختاری فیزیکی و کابل با عایق تولید شده به روش شیمیایی

۷- نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی تولید کابل‌های هم محور (کواکسیال) با عایق ریزسلولی فیزیکی پرداخته شده است. بررسی‌های انجام شده نشان داد که دما تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر ساختار نمونه‌های فوم شده دارد. با کاهش دما از ۱۲۰ تا ۱۰۶ درجه سانتی‌گراد، استحکام مذاب افزایش یافته به طوری که این پدیده منجر به کاهش اندازه سلول‌ها و افزایش چگالی سلول‌ها شده است. با کاهش دما از ۱۰۶ تا ۱۰۲