

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی شیمی و مواد

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مواد مرکب

## ساخت و بررسی خواص فیزیکی و مکانیکی غشای کامپوزیت پلیمری مسلح با الیاف بافت نشده، بکار رفته در فیلترهای هپا

نگارنده: امیر کمیلی نژاد

استاد راهنما:

دکتر رضا طاهریان

شهریور ۹۷

تقدیم به:

همه‌ی عزیزانم

پدر، مادر، خواهر و برادرانم

بوسه‌ای کم‌رنگ بر دستان محبت‌هایشان

## سپاس خدای را که هرچه دارم از اوست

### با سپاس از!

اساتید ارجمند که در راستای این پایان نامه از هیچ کمکی بر من دریغ ننموده‌اند.

خانواده عزیزم به خصوص پدر و مادرم مهربانم که هر لحظه وجودم را از چشمه سار پر از عشق چشمانشان سیراب می‌کنند...

دوستان عزیزم که در دشواری‌های زندگی به یاری‌ام شتافتند.

باشد که این کمترین قسمتی از زحمات آن‌ها را جبران نموده و سپاس گوید

اینجانب امیر کمیلی نژاد دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مواد (مواد مرکب) دانشکده مهندسی شیمی و مواد دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه ساخت و بررسی خواص فیزیکی و مکانیکی غشای کامپوزیت پلیمری مسلح با الیاف بافت نشده، بکار رفته در فیلترهای هپا تحت راهنمایی دکتر رضا ظاهریان متعهد می‌شوم.

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه ، در مواردی که از موجود زنده ( یا بافتهای آنها ) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

### تاریخ

#### امضای دانشجو

##### مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است ) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .

## چکیده

در صنایع گاز و در تمام خطوط لوله گاز معمولاً ذرات و آلودگی‌های خاصی وجود دارد که شامل ذرات زنگ لوله، رسوبات، میعانات گازی و ذرات جامد ریز است که به دو دلیل عمده باید از گاز ورودی به ایستگاه و نهایتاً از گاز مصرفی حذف گردند: ۱- جهت جلوگیری از صدمات وارده به دستگاه‌های ابزار دقیق ایستگاه نظیر کنتور رگلاتور و...، ۲- تأمین استانداردهای گاز جهت تحویل به مصرف‌کننده. در صنایع دیگر از جمله صنایع هسته‌ای، سیمان و... گازها و آلاینده‌های ذره‌ای در هوا منتشر می‌شوند که این آلودگی‌ها برای محیط زیست بسیار مضرند. به همین دلایل تولید یک بستر مناسب برای استفاده در فیلترها الزامی است. هدف این پژوهش ساخت بستری با بازده مناسب برای استفاده در فیلترهای صنایع گاز است که خواص فیزیکی، مکانیکی مشابه با فیلترهای در حال استفاده شدن در صنایع گاز را داشته باشد.

در این پژوهش برای ساخت بستر از الیاف‌های کربن، سلولز، شیشه و پلی‌پروپیلن و رزین فنولیک استفاده شد. آزمون عبور دهی گاز نشان از برتری نمونه‌ی سلولزی نسبت به دیگر نمونه‌های دیگر الیاف را نشان داد. با توجه به نتایج این آزمایش برترین نمونه‌ها در آزمایش‌های ترشوندگی، آئروسول، مقاومت به پارگی و آنالیز میکروساختار مورد مطالعه قرار گرفتند.

در آزمون ترشوندگی تمام نمونه‌ها آب‌دوست بودند و قطره سریعاً جذب نمونه شد. در آزمون آئروسول بازدهی نمونه‌ی سلولز برای ذرات ۵ میکرون ۱۰۰٪ تخمین زده شد که بازهم به نسبت دیگر الیاف بهتر بود. در مبحث آزمون مقاومت به پارگی برای نمونه‌ی سلولز نتایج بهتری به دست آمد. برای بررسی تخلخل‌ها از آنالیز میکروسکوپ روبشی استفاده شد که با توجه به تصاویر میزان تخلخل‌های نمونه‌ی سلولز بیشتر از دو نمونه‌ی دیگر بود به این دلیل که در نمونه‌ی سلولز از رزین فنولیک استفاده نشده بود و همچنین با افزایش دما الیاف سلولز ذوب نشدند و همچنین اندازه‌ی تخلخل‌ها برای سلولز حدود ۱۵ میکرون و برای دو الیاف دیگر حدود ۹ میکرون است. با توجه به تمامی آزمایش‌های صورت گرفته نمونه‌ی سلولز در مجموع نتایج خوبی را به نمایش گذاشت و می‌توان از آن به‌عنوان بستر در فیلترها مورد استفاده قرار داد.

**واژگان کلیدی:** صنایع گاز، بستر، الیاف سلولز، الیاف کربن، الیاف پلی‌پروپیلن، رزین فنولیک.

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	۱ فصل اول: مقدمه.....
۲	۱-۱ فیلتر و فیلتراسیون.....
۵	۲ فصل دوم: پیشینه تحقیق.....
۶	۱-۲ فیلتراسیون در صنایع مختلف از جمله صنایع گاز.....
۷	۲-۲ فیلترهای هوا.....
۷	۳-۲ انواع فیلترهای هوا.....
۷	۱-۳-۲ فیلترهای کارتریجی.....
۸	۲-۳-۲ فیلترهای لایه‌ای و پنبلی.....
۹	۳-۳-۲ فیلترهای لوله‌ای.....
۱۰	۴-۳-۲ فیلترهای کیسه‌ای و پاکتی.....
۱۲	۵-۳-۲ فیلترهای پنبلی چسبناک.....
۱۴	۶-۳-۲ فیلترهای کربن فعال.....
۱۶	۷-۳-۲ فیلترهای هپا.....
۱۷	۱-۷-۳-۲ مکانیزم عملکرد فیلتر.....
۱۷	۱-۱-۷-۳-۲ جلوگیری کردن.....
۱۸	۲-۱-۷-۳-۲ فشردگی داخلی.....
۱۹	۳-۱-۷-۳-۲ انتشار براونی.....
۲۰	۲-۷-۳-۲ مواد مورد استفاده در فیلتر.....
۲۲	۴-۲ فرایندهای تولید کامپوزیت‌های متخلخل.....
۲۸	۵-۲ فرایندهای تولید فیلتر.....

## فهرست مطالب

صفحه

عنوان

۲۹.....	۱-۵-۲ شکل دهی خشک.....
۲۹.....	۱-۱-۵-۲ هواگذاری.....
۳۰.....	۲-۱-۵-۲ شبکه‌ها و نمدهای خشک.....
۳۰.....	۱-۲-۱-۵-۲ شکل دهی و ترکیب کردن.....
۳۱.....	۲-۲-۱-۵-۲ متصل کردن.....
۳۱.....	۱-۲-۲-۱-۵-۲ سوراخ کردن با سوزن.....
۳۲.....	۲-۲-۲-۱-۵-۲ اسپان لیس.....
۳۳.....	۳-۲-۲-۱-۵-۲ اتصال دهی با کوک.....
۳۴.....	۴-۲-۲-۱-۵-۲ اتصال دهی حرارتی.....
۳۵.....	۵-۲-۲-۱-۵-۲ اتصال دهی شیمیایی.....
۳۶.....	۳-۱-۵-۲ اسپان باند شبکه‌ها.....
۳۸.....	۴-۱-۵-۲ ملت بلون شبکه‌ها.....
۴۰.....	۵-۱-۵-۲ الکترواسپان شبکه‌ها.....
۴۱.....	۲-۵-۲ فرایند چیدن تر.....
۴۱.....	۱-۲-۵-۲ شکل دهی شبکه‌ها در این فرایند.....
۴۱.....	۲-۲-۵-۲ خشک کردن شبکه‌ها.....
۴۲.....	۳-۲-۵-۲ اتصال دهی شبکه‌های بافته نشده.....
۴۴.....	۳-۵-۲ ساختارهای کامپوزیتی.....
۴۴.....	۱-۳-۵-۲ فرایند SMS.....
۴۴.....	۲-۳-۵-۲ ساخت چندلایه.....
۴۴.....	۳-۳-۵-۲ ورقه ورقه قرار دادن.....



## فهرست مطالب

عنوان	صفحه
..... ۴-۳-۵-۲ گیرکردن	۴۵
..... ۶-۲ تولید بستر در مقیاس آزمایشگاهی و مقالات	۴۵
..... ۷-۲ فاکتورهای مؤثر بر گیراندازی ذرات در بستر فیلترها	۴۸
..... ۸-۲ آزمایش‌های مهم فیلترهای گاز	۴۹
..... ۱-۸-۲ آزمایش آئروسول	۴۹
..... ۲-۸-۲ تعیین اندازه و توزیع تخلخل‌ها	۵۲
..... ۱-۲-۸-۲ روش حسابی	۵۲
..... ۲-۲-۸-۲ روش عبور گاز	۵۳
..... ۹-۲ هدف و نوآوری پژوهش	۵۵
<b>..... ۳ فصل سوم: روش تولید و آزمایش‌ها</b>	<b>۵۷</b>
..... ۱-۳ مواد اولیه مصرفی	۵۸
..... ۲-۳ تولید نمونه	۶۲
..... ۱-۲-۳ مخلوط‌سازی مواد	۶۳
..... ۲-۲-۳ قالب‌گیری فشاری	۶۴
..... ۳-۳ آزمایش‌ها	۶۵
..... ۱-۳-۳ آنالیز میکروساختار	۶۵
..... ۲-۳-۳ خواص فیزیکی	۶۶
..... ۱-۲-۳-۳ ترشوندگی	۶۶
..... ۲-۲-۳-۳ اندازه و توزیع تخلخل‌ها	۶۶
..... ۳-۲-۳-۳ آزمون آئروسول	۶۸

## فهرست مطالب

صفحه

عنوان

۶۹	..... خواص مکانیکی ۳-۳-۳
۶۹	..... مقاومت به پارگی ۱-۳-۳-۳
۷۱	..... فصل چهارم: نتایج و بحث
۷۲	..... ۱-۴ تصاویر نمونه‌ها
۸۱	..... ۲-۴ آنالیز میکروساختاری
۸۱	..... ۱-۲-۴ آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی
۸۴	..... ۳-۴ خواص فیزیکی
۸۴	..... ۱-۳-۴ اندازه و توزیع تخلخل‌ها
۹۵	..... ۲-۳-۴ ترشوندگی
۹۶	..... ۳-۳-۴ آزمون آئروسول
۹۸	..... ۴-۴ خواص مکانیکی
۹۸	..... ۱-۴-۴ مقاومت به پارگی
۱۰۱	..... فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها
۱۰۲	..... ۱-۵ نتیجه‌گیری
۱۰۲	..... ۲-۵ پیشنهادها
۱۰۵	..... ۶ مراجع

## فهرست اشکال و جداول

صفحه	عنوان
۳	شکل ۱-۱: فیلتراسیون سطحی.....
۴	شکل ۲-۱: فیلتراسیون عمقی.....
۶	شکل ۱-۲: فرایند فیلتراسیون و جداسازی گاز.....
۷	شکل ۲-۲: فیلترهای کارتریجی بافته شده.....
۸	شکل ۳-۲: کارتریج با الیاف میان تهی.....
۹	شکل ۴-۲: فیلترهای پنلی و لایه‌ای.....
۱۰	شکل ۵-۲: فیلتر لوله‌ای عمودی.....
۱۱	شکل ۶-۲: فیلترهای پاکتی سخت.....
۱۲	شکل ۷-۲: فیلترهای کیسه‌ای و محفظه نگه‌دارنده آن‌ها.....
۱۴	شکل ۸-۲: پنل‌های فلزی.....
۱۵	شکل ۹-۲: پنل‌های کربن فعال.....
۱۶	شکل ۱۰-۲: فیلتر هپا.....
۱۸	شکل ۱۱-۲: مکانیزم قطع کردن مستقیم.....
۱۸	شکل ۱۲-۲: مکانیزم فشردگی داخلی.....
۱۹	شکل ۱۳-۲: مکانیزم انتشار براونی.....
۲۰	شکل ۱۴-۲: نوعی فیلتر کربن فعال.....
۲۰	شکل ۱۵-۲: اجزای فیلتر هپا.....
۲۲	شکل ۱۶-۲: افزایش تخلخل ماکروسکوپی بر روی سطح نمونه‌ها با افزایش میزان ماده گاززا.....
۲۳	شکل ۱۷-۲: نمونه‌های ساخته شده با استفاده از دو عامل گوناگون ایجاد تخلخل، الف) گرافیت، ب) اسفنج پلی‌اورتان.....

## فهرست اشکال و جداول

عنوان	صفحه
شکل ۱۸-۲: مورفولوژی تخلخل‌ها برای کامپوزیت (TiB <sub>2</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )/NiAl با کسر حجمی متفاوت کاربامید، الف) ۴۷٪، ب) ۶۰٪، ج) ۷۵٪.....	۲۴
شکل ۱۹-۲: تصویر SEM غشای کامپوزیتی متخلخل پلیمر/ سیلیکات.....	۲۵
شکل ۲۰-۲: الف) تصویر SEM غشای کامپوزیت گرافن/PET با لایه‌ی PMMA حذف شده بعد از اچ، ب) تصویر SEM غشای کامپوزیت گرافن/PET با لایه‌ی PMMA حذف شده قبل از اچ.....	۲۶
شکل ۲۱-۲: FGPM سه بعدی.....	۲۷
شکل ۲۲-۲: سطح شکست نمونه‌ی ژئوپلیمر.....	۲۷
شکل ۲۳-۲: تصاویر میکروسکوپ نوری از نمونه‌های تولید شده به روش آلیاژسازی مکانیکی، الف) تخلخل ریز، ب) تخلخل درشت.....	۲۸
شکل ۲۴-۲: انواع فرایندهای تولید بستر.....	۲۹
شکل ۲۵-۲: غلتک‌های دنداندار.....	۳۰
شکل ۲۶-۲: کاهش دسته الیاف با غلتک.....	۳۰
شکل ۲۷-۲: دستگاه سوراخ‌سازی با سوزن.....	۳۱
شکل ۲۸-۲: نمونه‌ای از سوزن پیکان‌دار.....	۳۱
شکل ۲۹-۲: سطح مقطع یک شبکه سوراخ‌شده با سوزن با بزرگنمایی ۶۲.....	۳۲
شکل ۳۰-۲: فرایند اسپان‌لیس.....	۳۳
شکل ۳۱-۲: فرایند کوک با سوزن.....	۳۴
شکل ۳۲-۲: کامپوزیت بافته نشده با اتصال کوک.....	۳۴
شکل ۳۳-۲: اتصال شیمیایی.....	۳۶
شکل ۳۴-۲: فرایند اسپان‌باند.....	۳۷
شکل ۳۵-۲: خروج الیاف PET از نخ‌ریس.....	۳۷
شکل ۳۶-۲: فرایند ملت‌بلون.....	۳۹

## فهرست اشکال و جداول

صفحه	عنوان
۳۹.....	شکل ۲-۳۷: نوک قالب.....
۴۰.....	شکل ۲-۳۸: فرایند الکترواسپان.....
۴۰.....	شکل ۲-۳۹: بستر فیلتر با زیر لایه‌ی نانوالیاف سلولز ساخته شده به روش الکترواسپان.....
۴۱.....	شکل ۲-۴۰: شکل‌دهی در فرایند چیدن تر.....
۴۳.....	شکل ۲-۴۱: پرس‌های افقی و عمودی فرایند چیدن تر برای اتصال دهی.....
۴۳.....	شکل ۲-۴۲: بستر نهایی شامل شیار.....
۴۴.....	شکل ۲-۴۳: لایه گذاری شبکه‌ها.....
۴۵.....	شکل ۲-۴۴: ساختار کامپوزیتی ساخته شده به روش واترجت.....
۴۶.....	شکل ۲-۴۵: فوم سیلیکون کاربرد استفاده شده برای زیر لایه.....
۴۷.....	شکل ۲-۴۶: (الف) تصویر الیاف بافته شده کتان قبل از اسپان لیس، (ب) تصویر الیاف بافته شده کتان بعد از اسپان لیس.....
۴۸.....	شکل ۲-۴۷: کامپوزیت متخلخل پلیمری ساخته شده به روش سینترینگ اکستروژن پیوسته.....
۴۸.....	شکل ۲-۴۸: تصویر SEM از سطح مقطع فیلتر.....
۵۰.....	شکل ۲-۴۹: دستگاه ساخت غبار.....
۵۰.....	شکل ۲-۵۰: تونل هوا.....
۵۰.....	شکل ۲-۵۱: انواع دستگاه‌های شمارنده ذرات.....
۵۳.....	شکل ۲-۵۲: روش حبابی.....
۵۳.....	شکل ۲-۵۳: نمونه‌ای از نمودار حالت خشک و خیس.....
۵۵.....	شکل ۲-۵۴: مثالی از نحوه تعیین فرکانس اندازه تخلخل.....
۵۸.....	شکل ۳-۱: فلوجارت فرایند انجام پژوهش.....
۵۸.....	شکل ۳-۲: فلوجارت مواد مصرف شده.....

## فهرست اشکال و جداول

صفحه

عنوان

۵۹.....	شکل ۳-۳: دوک الیاف شیشه.....
۶۰.....	شکل ۴-۳: الیاف پلی پروپیلن.....
۶۱.....	شکل ۵-۳: دوک الیاف کربن.....
۶۱.....	شکل ۶-۳: الیاف سلولز.....
۶۳.....	شکل ۷-۳: دستگاه آسیاب.....
۶۴.....	شکل ۸-۳: قالب استفاده شده در پژوهش.....
۶۵.....	شکل ۹-۳: قالب گیری فشاری.....
۶۵.....	شکل ۱۰-۳: میکروسکوپ الکترونی روبشی.....
۶۶.....	شکل ۱۱-۳: دستگاه آزمایش ترشوندگی.....
۶۷.....	شکل ۱۲-۳: دستگاه آزمون فیلتر.....
۶۷.....	شکل ۱۵-۳: قالب روش حبابی.....
۶۸.....	شکل ۱۶-۳: قالب روش عبور گاز.....
۶۸.....	شکل ۱۷-۳: دستگاه شرکت TSI مدل HHPC-6.....
۶۹.....	شکل ۱۸-۳: دستگاه آزمون مقاومت به پارگی.....
۷۲.....	شکل ۱-۴: (الف) تصویر نمونه‌ی سلولز، (ب) تصویر نمونه‌ی کربن، (ج) تصویر نمونه‌ی پلی پروپیلن.....
۷۳.....	شکل ۲-۴: تصویر نمونه‌ی ۱ شیشه.....
۷۴.....	شکل ۳-۴: (الف) تصویر نمونه‌ی ۱ کربن، (ب) تصویر نمونه‌ی ۲ کربن، (ج) تصویر نمونه‌ی ۳ کربن، (د) تصویر نمونه‌ی ۴ کربن، (ه) تصویر نمونه‌ی ۵ کربن، (و) تصویر نمونه‌ی ۶ کربن، (ز) تصویر نمونه‌ی ۷ کربن، (ح) تصویر نمونه‌ی ۸ کربن.....

## فهرست اشکال و جداول

صفحه

عنوان

- شکل ۴-۴: الف) تصویر نمونه‌ی ۱ پلی‌پروپیلن، ب) تصویر نمونه‌ی ۲ پلی‌پروپیلن، ج) تصویر نمونه‌ی ۳ پلی‌پروپیلن، د) تصویر نمونه‌ی ۴ پلی‌پروپیلن، ه) تصویر نمونه‌ی ۵ پلی‌پروپیلن، و) تصویر نمونه‌ی ۶ پلی‌پروپیلن، ز) تصویر نمونه‌ی ۷ پلی‌پروپیلن، ح) تصویر نمونه‌ی ۸ پلی‌پروپیلن..... ۷۶
- شکل ۴-۵: الف) تصویر نمونه‌ی ۱ سلولز، ب) تصویر نمونه‌ی ۲ سلولز، ج) تصویر نمونه‌ی ۳ سلولز، د) تصویر نمونه‌ی ۴ سلولز، ه) تصویر نمونه‌ی ۵ سلولز، و) تصویر نمونه‌ی ۶ سلولز، ز) تصویر نمونه‌ی ۷ سلولز، ح) تصویر نمونه‌ی ۸ سلولز، ط) تصویر نمونه‌ی ۹ سلولز، ی) تصویر نمونه‌ی ۱۰ سلولز، ک) تصویر نمونه‌ی ۱۱ سلولز، ل) تصویر نمونه‌ی ۱۲ سلولز، م) تصویر نمونه‌ی ۱۳ سلولز، ن) تصویر نمونه‌ی ۱۴ سلولز، س) تصویر نمونه‌ی ۱۵ سلولز..... ۷۸
- شکل ۴-۶: الف) تصویر میکروسکوپی نمونه‌ی سلولزی با بزرگنمایی زیاد..... ۸۱
- شکل ۴-۶: ب) تصویر میکروسکوپی نمونه‌ی سلولزی با بزرگنمایی کم..... ۸۲
- شکل ۴-۷: الف) تصویر میکروسکوپی نمونه‌ی پلی‌پروپیلن با بزرگنمایی زیاد..... ۸۲
- شکل ۴-۷: ب) تصویر میکروسکوپی نمونه‌ی پلی‌پروپیلن با بزرگنمایی کم..... ۸۳
- شکل ۴-۸: الف) تصویر میکروسکوپی نمونه‌ی کربنی با بزرگنمایی زیاد..... ۸۳
- شکل ۴-۸: ب) تصویر میکروسکوپی نمونه‌ی کربنی با بزرگنمایی کم..... ۸۴
- شکل ۴-۹: نمودار دبی-فشار بهترین نمونه سلولز..... ۸۵
- شکل ۴-۱۰: نمودار دبی-فشار بهترین نمونه کربن..... ۸۶
- شکل ۴-۱۱: نمودار دبی-فشار بهترین نمونه پلی‌پروپیلن..... ۸۶
- شکل ۴-۱۲: الف) نمودار دبی-فشار نمونه‌ی ۱ پلی‌پروپیلن، ب) نمودار دبی-فشار نمونه‌ی ۲ پلی‌پروپیلن، ج) نمودار دبی-فشار نمونه‌ی ۳ پلی‌پروپیلن، د) نمودار دبی-فشار نمونه‌ی ۴ پلی‌پروپیلن، ه) نمودار دبی-فشار نمونه‌ی ۵ پلی‌پروپیلن، و) نمودار دبی-فشار نمونه‌ی ۶ پلی‌پروپیلن، ز) نمودار دبی-فشار نمونه‌ی ۷ پلی‌پروپیلن، ح) نمودار دبی-فشار نمونه‌ی ۸ پلی‌پروپیلن..... ۸۸
- شکل ۴-۱۳: الف) نمودار دبی-فشار نمونه‌ی ۱ کربن، ب) نمودار دبی-فشار نمونه‌ی ۲ کربن، ج) نمودار دبی-فشار نمونه‌ی ۳ کربن، د) نمودار دبی-فشار نمونه‌ی ۴ کربن، ه) نمودار دبی-فشار نمونه‌ی ۵ کربن، و) نمودار دبی-فشار نمونه‌ی ۶ کربن، ز) نمودار دبی-فشار نمونه‌ی ۷ کربن، ح) نمودار دبی-فشار نمونه‌ی ۸ کربن..... ۸۹

## فهرست اشکال و جداول

صفحه

عنوان

	شکل ۴-۱۴: الف) نمودار دبی- فشار نمونه‌ی ۱ سلولز، ب) نمودار دبی- فشار ۲ سلولز، ج) نمودار دبی- فشار ۳ سلولز، د) نمودار دبی- فشار ۴ سلولز، ه) نمودار دبی- فشار ۵ سلولز، و) نمودار دبی- فشار ۶ سلولز، ز) نمودار دبی- فشار ۷ سلولز، ح) نمودار دبی- فشار ۸ سلولز، ط) نمودار دبی- فشار ۹ سلولز، ی) نمودار دبی- فشار ۱۰ سلولز، ک) نمودار دبی- فشار ۱۱ سلولز، ل) نمودار دبی- فشار ۱۲ سلولز، م) نمودار دبی- فشار ۱۳ سلولز، ن) نمودار دبی- فشار ۱۴ سلولز، س) نمودار دبی- فشار ۱۵ سلولز.....	۹۱
جدول ۱-۲:	خصوصیات مهم برخی از الیاف مورد استفاده در بستر فیلترها.....	۲۱
جدول ۲-۲:	مزایا و معایب روش حبابی و روش عبور گاز.....	۵۵
جدول ۱-۳:	مشخصات فنولیک.....	۵۹
جدول ۲-۳:	مشخصات الیاف E-Glass.....	۵۹
جدول ۳-۳:	مشخصات الیاف پلی پروپیلن.....	۶۰
جدول ۴-۳:	مشخصات الیاف کربن.....	۶۰
جدول ۵-۳:	مشخصات الیاف سلولز.....	۶۱
جدول ۶-۳:	نوع نمونه و پارامترهای متغیر آن.....	۶۳
جدول ۱-۴:	مشخصات ساخت بهترین نمونه‌ها.....	۷۲
جدول ۲-۴:	مشخصات نمونه‌های شیشه.....	۷۳
جدول ۳-۴:	مشخصات نمونه‌های کربن.....	۷۵
جدول ۴-۴:	مشخصات نمونه‌های پلی پروپیلن.....	۷۷
جدول ۵-۴:	مشخصات نمونه‌های سلولز.....	۷۹
جدول ۶-۴:	اندازه‌ی بزرگترین تخلخل در بهترین نمونه‌ها.....	۹۴
جدول ۷-۴:	اندازه‌ی بزرگترین تخلخل در نمونه‌های سلولز.....	۹۴
جدول ۸-۴:	اندازه‌ی بزرگترین تخلخل در نمونه‌های کربن.....	۹۵
جدول ۹-۴:	اندازه‌ی بزرگترین تخلخل در نمونه‌های پلی پروپیلن.....	۹۵



## فهرست اشکال و جداول

صفحه	عنوان
۹۶.....	جدول ۴-۱۰: بازدهی بستر سلولز.....
۹۷.....	جدول ۴-۱۱: بازدهی بستر کرین.....
۹۷.....	جدول ۴-۱۲: بازدهی بستر پلی پروپیلن.....
۹۸.....	جدول ۴-۱۳: نتایج آزمون مقاومت به پارگی.....



فصل اول:

مقدمه

## ۱-۱ فیلتر و فیلتراسیون

رشد جمعیت و فعالیت‌های صنایع، پتانسیل بالایی را برای آلودگی‌های محیط‌زیستی ایجاد کرده است. لذا استفاده از سیستم‌های فیلتراسیون با کارایی بالا جهت رفع آلودگی کلیه جریانات گازی ضروری است [۱]. این مسائل باعث جستجو و گسترش روزافزون فناوری‌ها و تئوری‌های جدید در زمینه فیلتراسیون و جداسازی<sup>۱</sup> ذرات شده و همچنین باعث بهینه‌سازی و پیشرفت فرایندهای جدید در زمینه حمل منابع سوختی و فرایندهای معدنی شده است [۲]. در سال ۲۰۰۷ بازار جهانی فیلتراسیون و لوازم آن در حدود ۳۸ میلیارد دلار بوده است که در حدود ۲۶ درصد از این بازار مربوط به فرایندهای حذف آلودگی‌ها از هوا بوده است و مابقی آن‌هم برای مایع (آب) استفاده شده است [۳]. در سال ۲۰۱۳ یک گزارش تجاری نشان می‌داد سهم بازار برای فیلتر هوای خانگی حدود ۶/۸ میلیارد دلار بوده است که بخش فیلترهای با بازده بالا حدود ۱۴٪ از آن در حدود ۹۵۲ میلیون دلار را شامل می‌شود [۴].

فیلتر به طور کلی تعریف ساده‌ای دارد وسیله‌ای است فیزیکی که از عبور برخی مواد جلوگیری می‌کند و به برخی دیگر اجازه عبور می‌دهد. می‌توان فیلترها را بر اساس نوع حذف ذرات به دسته‌های زیر تقسیم کرد.

۱- فیلتراسیون یعنی جدا کردن ذرات معلق از سیال مانند الک، فیلترهای گاز، هپا و...

۲- جداسازی یعنی جدا کردن ذرات حل‌شده از سیال مانند فیلترهای اولپا، هپا، کربن فعال<sup>۴</sup> و...

البته می‌توان این را هم اضافه نمود که برخی از فیلترها هر دو حالت را با هم انجام می‌دهند. همچنین

---

۱- Separation

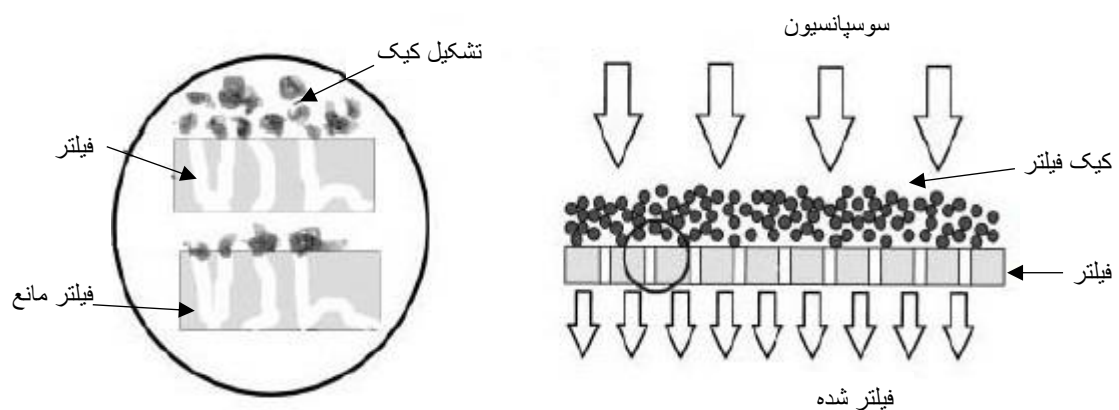
۲- Ultra Low Penetration Air

۳- High Efficiency Particulate Air

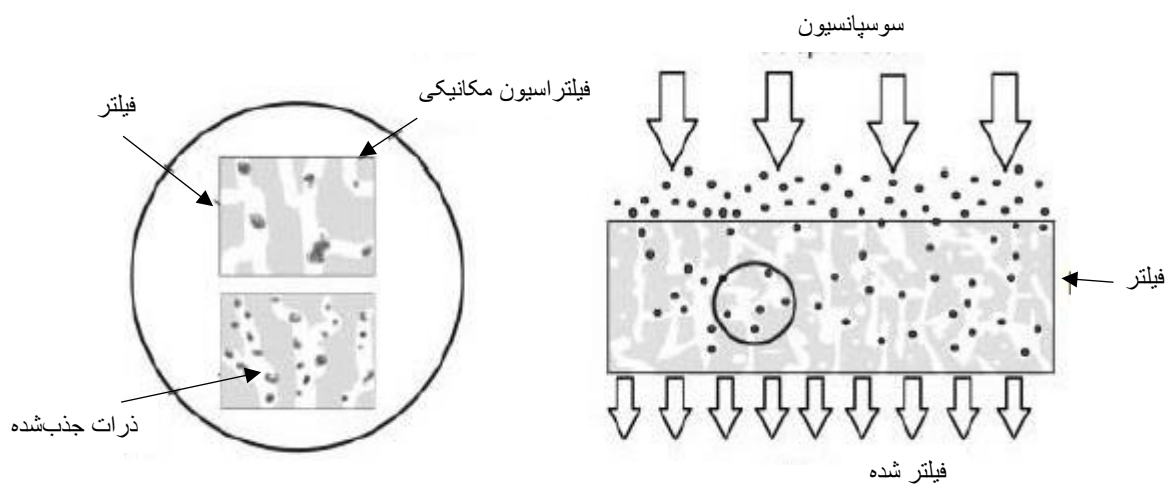
۴- Activated Carbon

تقسیم‌بندی دیگری که می‌توان برای فیلترها ارائه نمود استفاده از نوع ماده‌ای است که حذف ذرات از آن صورت می‌گیرد. در این حالت حذف ذرات می‌تواند از گاز، مایع و یا جامد انجام پذیرد. به عنوان مثال الک که ذرات درشت را از ذرات ریز جدا می‌نماید و یا تصفیه‌کننده‌های خانگی آب که با داشتن چندلایه شن، ماسه و... آب را تصفیه می‌کنند و همچنین پوشال کولرهای آبی که علاوه بر انجام عملیات سرد کردن، تصفیه‌ی هوای مکش‌شده به داخل کولر را بر عهده دارند. مثال‌های ذکرشده ساده‌ترین کاربرد فیلترها در اطراف زندگی ما است [۵].

نوع دیگر طبقه‌بندی بسترها شامل فیلتر سطحی یا عمقی است. فیلترهای عمقی اغلب دارای ساختار سه‌بعدی پرپیچ و خم با شاخه‌های زیاد هستند و ذرات از طریق حبس شدن در عمق فیلتر غربال می‌شوند؛ اما در فیلترهای سطحی معمولاً از یک لایه‌ی نازک با اندازه حفره معین برای غربال کردن ذرات استفاده می‌شود به عبارتی ذراتی که بزرگ هستند از سوراخ‌ها عبور نکرده و در سطح گرفتار می‌شوند که این کار باعث تولید کیک فیلتر می‌شود. در فیلترهای معمولی، به دلیل اینکه فیلتراسیون در عمق صورت می‌گیرد فیلتر دچار افت فشار شده و کارایی خود را از دست می‌دهد [۶، ۷].



شکل ۱-۱: فیلتراسیون سطحی [۷]



شکل ۱-۲: فیلتراسیون عمقی [۷]

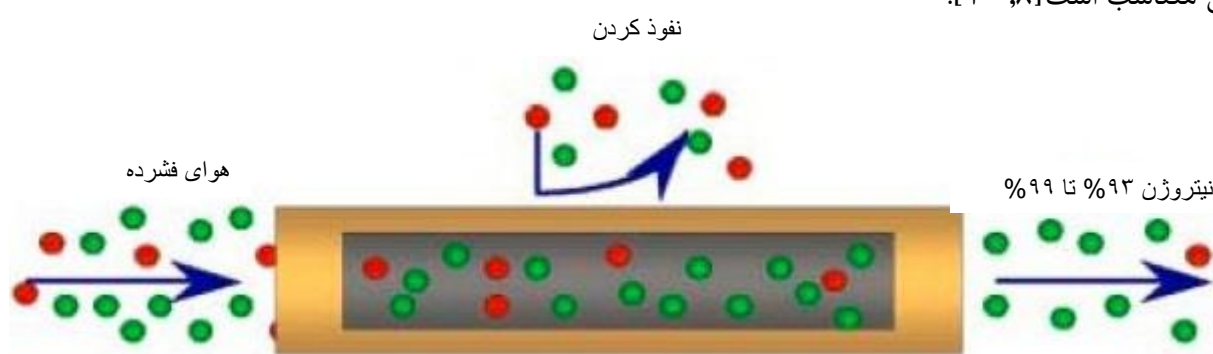
## فصل دوم

### پیشینه تحقیق

## ۲-۱ فیلتراسیون در صنایع مختلف از جمله صنایع گاز

عمده‌ترین متقاضیان تحقیقات در زمینه‌ی جداسازی غشایی گازها در کشور، صنایع نفت، گاز، پتروشیمی و حتی صنایع هسته‌ای هستند. این صنایع فناوری جداسازی غشایی گازها را برای بازیافت هیدروژن و هیدروکربن‌ها در پالایشگاه‌ها، شیرین‌سازی گازهای ترش، بازیافت مونومر در واحدهای پلی‌اولفین، بازیافت بخارات بنزین در انبارها و جایگاه‌های سوخت‌رسانی، خالص‌سازی و استفاده مجدد از گازهای تزریقی به چاه در ازدیاد برداشت از چاه در ازدیاد برداشت از چاه‌های نفت و گاز، جداسازی هوا و تولید نیتروژن، جداسازی هلیوم مورد استفاده قرار می‌دهند [۸، ۹].

فناوری جداسازی گازی، در حدود ده سال است که توسعه چشمگیری یافته و به یکی از عملیات واحد مهم تبدیل شده است. عمر غشاها در فرایند جداسازی گازها در صورت عبور خوراک تمیز بیش از ده سال است. غشاهای متشکل از پلیمرها و کوپلیمرها به شکل فیلم‌های مسطح و یا الیاف میان‌تهی در جداسازی گازی استفاده می‌شوند. گازهای متفاوت در طول غشا یا نرخ‌های مختلف عبور داده می‌شوند. نرخ نفوذ با اختلاف فشار نسبت مستقیم و با ضخامت غشا نسبت عکس داشته و با نفوذپذیری آن متناسب است [۸، ۱۰].



شکل ۲-۱: فرایند فیلتراسیون و جداسازی گاز [۸]

به صورت عمومی جداسازها به سه شکل عمودی، افقی (مانند شکل ۲-۱)، مارپیچی ساخته می‌شوند. هزینه، حمل و نقل، فضای قابل دسترس برای جداساز و مشخصات جریان تولیدی از عواملی هستند که برای انتخاب یک جداساز مهم است [۱۱].



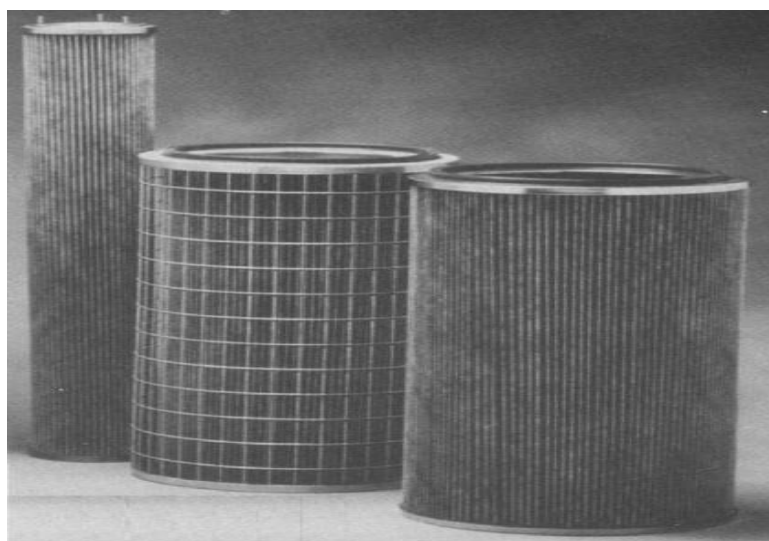
## ۲-۲ فیلترهای هوا

هوا یکی از مهم‌ترین عوامل زیست بشر است و تغییر در آن می‌تواند آن را به ترکیب غیر زیستی تبدیل نماید، همچنین هوا عامل اصلی انتقال آلاینده‌های گازی و ذره‌ای است. به خاطر همین دلایل توسعه و پیشرفت فیلترهای گاز و هوا مورد توجه است [۱]. این فیلترها طبقه‌بندی متفاوتی دارند که بهترین آن استفاده از استانداردهای EN799، ASHRAE52.2 است [۱۲-۱۵].

## ۲-۳ انواع فیلترهای هوا

### ۲-۳-۱ فیلترهای کارتریجی<sup>۱</sup>

عمدتاً برای فیلترهای موتورهای مکش و دستگاه‌های هوای فشرده مورد استفاده قرار می‌گیرد. از مهم‌ترین مزیت‌های پیشنهاد شده برای این‌گونه فیلترها متراکم بودن آنها است به عبارتی نسبت منطقه‌ی فیلتراسیون زیاد به حجم کارتریج که باعث افزایش راندمان فیلتر شده و با فیلتراسیون عمیق<sup>۲</sup> ذرات کوچک‌تری را حذف می‌کند [۱۵-۱۷].



شکل ۲-۲: فیلترهای کارتریجی بافته‌شده [۱۵]

---

۱- Cartridge Filters

۲- Depth Filter Action

با توسعه‌ی این فیلترها گونه‌ای به نام کارتریج با الیاف میان‌تهی<sup>۱</sup> به وجود آمد که کاربردهای گسترده‌ای دارد که نمونه‌ای از آن استفاده برای گندزدایی (استریل کردن) در دستگاه‌های هوای فشرده است [۱۸].



شکل ۲-۳: کارتریج با الیاف میان‌تهی [۸]

## ۲-۳-۲ فیلترهای لایه‌ای و پنلی<sup>۲</sup>

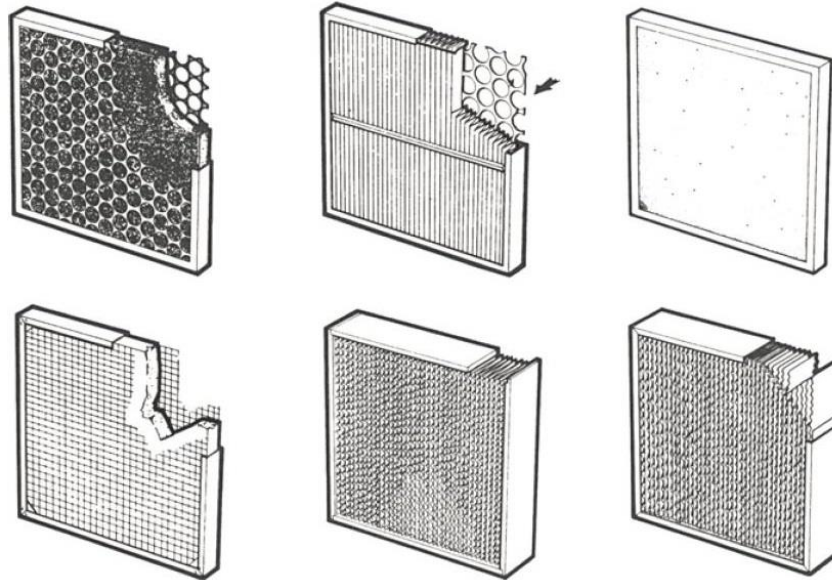
معمول‌ترین نوع فیلترها هستند و ساده‌ترین نوع آن‌ها پنل‌های مسطح، ضخیم است که در محیط‌های با فیلتراسیون عمیق کاربرد دارد. فیلترهای لایه‌ای از لایه‌های مسطح نصب‌شده در چارچوب‌ها و پنل‌ها قابل‌عرضه هستند و معمولاً از فیبرهای سنتزی و شیشه‌های اسپان‌باند تشکیل می‌شوند. فیلترهای پنلی قابل شستشو از فوم پلی‌یورتان یا مواد مشابه ساخته می‌شود، همچنین فیلترهای پنلی ساخته‌شده از سیم فلزات بافته‌شده قابلیت تمیز شدن در حمام روغن را دارند. این فیلترها را به دو دسته موقتی و دائمی می‌توان طبقه‌بندی نمود. در حالت موقتی با افزایش افت فشار و

---

۱- Hollow Fibre Cartridge

۲- Pad and Panel Filters

رسیدن به سطح غیر قابل قبول کل پنل تعویض می شود اما در حالت دائم و یا نیمه موقت تمیزکاری روی پنل انجام خواهد شد به همین دلیل پنل های دائم استحکام بالاتری دارند [۱۵, ۱۶].



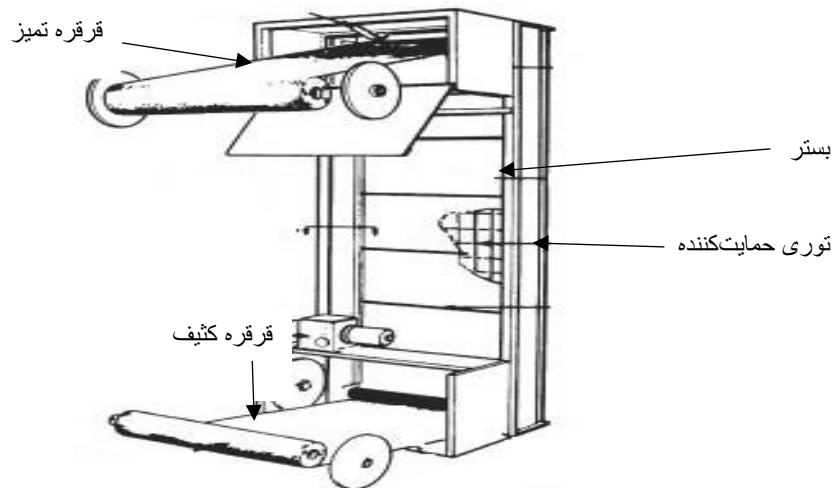
شکل ۲-۴: فیلترهای پنلی و لایه ای [۱۶]

## ۲-۳-۳ فیلترهای لوله ای<sup>۱</sup>

تولید این نوع از فیلترها معمولاً خودکار است. بستر این فیلترها از پارچه مواد سنتزی بافته شده و یا بافته نشده از جمله الیاف شیشه یا مواد مشابه ساخته می شود و امکان دارد پشت بستر با توری و یا آستر برای افزایش استحکام پوشانده شود. بستر فیلتر ممکن است برای افزایش راندمان فیلتراسیون و افزایش گنجایش غبارگیری<sup>۲</sup> آغشته به سیالی مخصوص شود. پارچه ای لوله ای به سادگی از بالا به پایین می پیچد. فیلترهای لوله ای می توانند نصب شوند به صورتی که عمودی و یا افقی حرکت کنند و کنترل خودکار شکل های مختلف حرکت با فشار ناهمسان ممکن است [۱۵].

۱- Roll Filters

۲- Dust Capacity



شکل ۲-۵: فیلتر لوله‌ای عمودی [۱۵]

## ۲-۳-۴ فیلترهای کیسه‌ای و پاکتی<sup>۱</sup>

بسترهای آن‌ها به شکل هرم یا مخروط است. اصولاً غبار در بیرون یا درون سطح با توجه به جریان هوا جمع‌آوری می‌شود. این فیلترها برای فیلتراسیون گاز استفاده دارند اما اصلی‌ترین استفاده‌ی آن‌ها در تعداد زیادی از خانه‌ها برای فیلتراسیون سوسپانسیون<sup>۲</sup> گاز-جامد با محتوای زیاد جامد است. فیلترهای پاکتی به صورت تکی هم قابلیت استفاده دارند البته که در بیشتر اوقات آن‌ها گروهی هستند و ده‌ها فیلتر در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند [۱۵].

فیلترهای پاکتی منطقه‌ی فیلتر بیشتری از پنلهای مسطح را فراهم می‌کنند، همچنین فیلترهای کیسه‌ای مورد استفاده در مایعات در فرایندهای مختلف حذف ذرات آلوده مؤثرتر عمل می‌کنند [۱۶].

پاکت‌ها باید مستحکم‌تر و ساختمانی سخت‌تری از دیگر نوع فیلترها که بستر مسطح دارند داشته باشند، به همین خاطر ورق‌ها با پارچه‌های بافته نشده مصنوعی و طبیعی از جمله پارچه شیشه‌ای مسلح می‌شوند. برای کاربردهای صنعتی و بهبود فیلتراسیون در پاکت‌ها، این پاکت‌ها از فیبرهای مصنوعی یا پشم‌شیشه محافظت‌شده با توری ساخته می‌شوند. در عمل کیسه‌ها از پارچه‌های چند فیلامنتی و تک

۱- Bag and Pocket Filters

۲- Suspensions

بافته شکل می‌گیرند. فناوری بستر فیلترهای نوین قادر ساخته است که فیلترهای کیسه‌ای از مواد مختلف در گستره‌ی ۱ تا ۱۲۰۰ میکرومتر ساخته شوند. این مواد شامل نایلون، پلی‌پروپیلن، پلی‌استر، فیلم نازک PTFE، پلی‌آمیدهای آروماتیکی<sup>۱</sup> و پشم بافته‌شده و پشم نمد شده هستند. فیلتر کیسه‌ای بخش‌های عمومی زیادی برای تصمیم‌گیری دارند اما این محبوبیت هنگام فیلتراسیون عالی به دلیل وجود تخلخل‌های ناهموار از دست می‌رود. پیشرفت در کیسه‌های بدون درز در مواد گوناگون باعث بازگشت محبوبیت فیلتر کیسه‌ای مورداستفاده در مایعات شد. تمام فیلترهای پلاستیکی از جمله پلی‌پروپیلن مسلح شده با شیشه به شدت در برابر خوردگی مقاوم هستند و جایگزین مناسبی برای فیلترهای گران قیمت می‌باشند. این فیلترها تا ۵۰٪ بالاتر از دمای فیلترهای PVC کاربرد دارند [۱۵].

[۱۶].



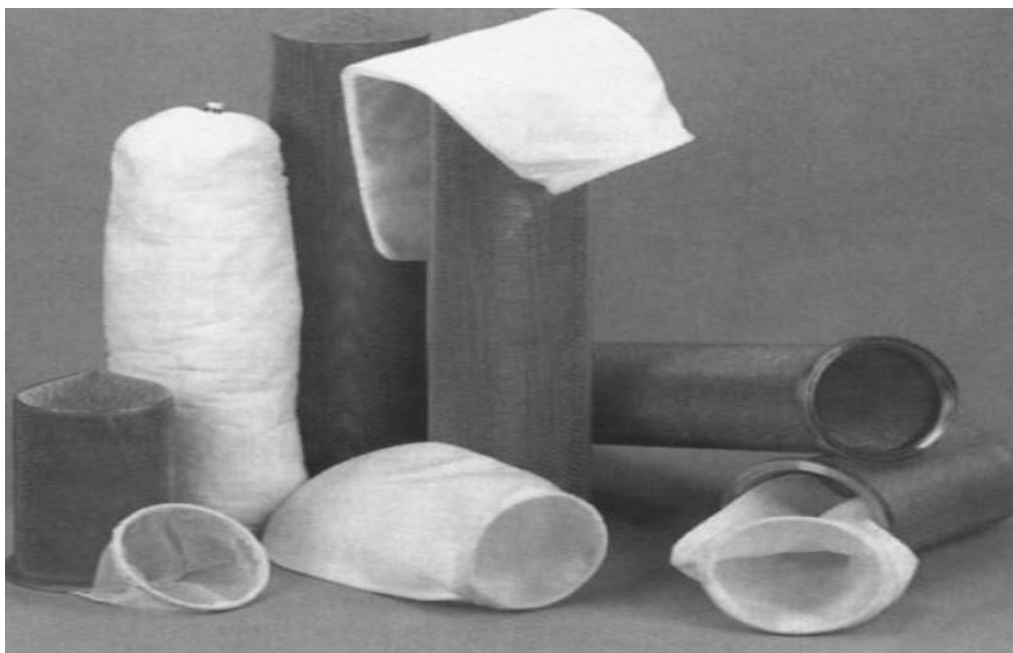
شکل ۲-۶: فیلترهای پاکتی سخت [۱۵]

بهره‌وری فیلتر پاکتی از ۲۵٪ به ۱۵۰٪ در جریان هوای معمولی قابل اجرا، مخصوصاً مناسب برای سیستم‌های هوای متغیر است. فیلترهای پاکتی برای کاربردهای بی‌شمار در ترتیب‌های زیاد قابل استفاده هستند و توانایی نگهداری افت فشار برای چندین ماه یا حتی بیش از یک سال را دارند. فیلترهای پاکتی بخصوص مناسب برای فیلتراسیون یا فیلتراسیون عالی در گردش هوای تأسیسات هستند. همچنین

---

۱- Aromatic Polyamides

کاربرد ویژه‌ی آن‌ها شامل تأسیسات هوایی برای تهویه‌ی کارخانه‌ها، انبارها، فروشگاه‌ها، اداره‌ها، مدارس و... که حتی بهتر از فیلتراسیون مکنده‌های هوا در توربین‌های گازی و موتورها است. یکی از معمول‌ترین کاربردها برای فیلترهای کیسه‌ای استفاده در نیروگاه‌های گازی است که در برخی صنایع به فیلترهای پارچه‌ای و در برخی به فیلترهای بگ‌هاوس<sup>۱</sup> معروف است. آن‌ها در اگزوزهای بزرگ حاوی جریان‌های گاز استفاده می‌شوند که عمدتاً مانع آلودگی گاز از ذرات پس‌ماند می‌شوند اما اغلب برای بازیافت جامدهای با ارزش از اگزوز هم کاربرد دارد. معمول‌ترین شکل فیلترهای گازی کیسه‌ای دراز، استوانه‌ای یا کیسه‌ای است که بر روی یک قفس استوانه‌ای ساخته‌شده از میله‌های فلزی با حلقه‌های حمایتی در طول آن است، نصب می‌شوند [۱۶]



شکل ۲-۷: فیلترهای کیسه‌ای و محفظه نگه‌دارنده آن‌ها [۱۶]

## ۲-۳-۵ فیلترهای پنلی چسبناک<sup>۲</sup>

این فیلترها با یک سطح بزرگ روغنی ذرات را جدا می‌کنند. به همین دلیل آن‌ها عملکرد بالاتری

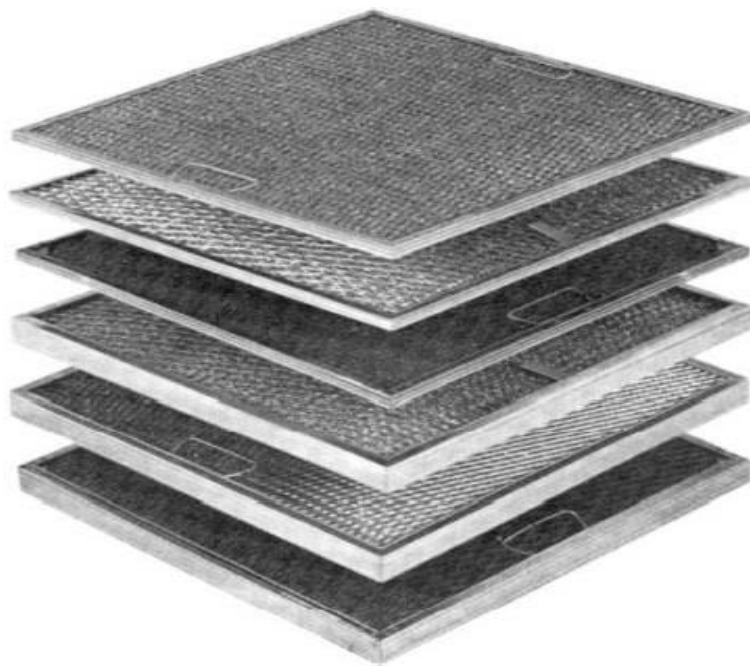
۱- Baghouse Filters

۲- Viscous Panel Filters

نسبت به فیلترهای خشک، به خصوص در اتمسفرهای بسیار آلوده دارند. خواص نگهداری<sup>۱</sup> می‌تواند به طوری تنظیم شود که بازده ثابت بماند یا کاهش یابد که توسط مشخصات عملیاتی پنل چسبناک کنترل می‌شود. اگر مشخصات ترکندگی به اندازه‌ی کافی نگه‌داشته شود، بازده بالا باقی می‌ماند و در واقع ثابت می‌ماند. اگر درجه‌ی ترشوندگی به طور قابل توجهی با مواد آلوده کاهش یابد، خواص نگهداری فیلتر سقوط خواهد کرد به همین ترتیب بازده‌ی فیلتر نیز سقوط می‌کند [۱۵، ۱۸].

فیلترهای پنلی چسبناک ساده از یک یا چند لایه تور سیمی که معمولاً به شکل پیچ‌خورده یا پلیسه‌دار هستند تشکیل می‌شود یا حتی از پشم سیمی قرار داده شده بین دو لایه تور هم ساخته می‌شود. بهترین عملکرد معمولاً با ساندویچ کردن یک لایه‌ی توری نخی یا یک بستر جذب‌کننده مشابه بین لایه‌ها توری سیمی به دست می‌آید. برای افزایش بیشتر بازده فیلتر و همچنین افزایش حجم مؤثر روغن می‌توان تور نخی را مابین پنل‌ها قرار داد که این کار باعث افزایش درجه‌ی ترکندگی نیز می‌شود [۱۵، ۱۸].

پنلهای فیلترها از چند لایه ورق آلومینیوم یا توری فولاد زنگ‌نزن ساخته می‌شوند که اغلب برای تصفیه‌ی روغن یا حذف ذرات و غبار مورد استفاده قرار می‌گیرند. پنل‌ها مقاومت ابتدایی کمی در برابر جریان هوادارند و می‌توانند در محیط‌های با رطوبت زیاد، واحدهای جریان هوای داغ، دستگاه‌های تهویه و در فرایندهای صنعتی برای حذف ذرات از جریان گاز نصب شوند. برای کاربردهای حذف ذرات هر لایه از ورق‌های آلومینیوم یا توری فولاد زنگ‌نزن معمولاً با یک پوشش چسبنده پوشش دهی می‌شود [۱۵، ۱۸].



شکل ۲-۸: پنل‌های فلزی [۱۵]

### ۲-۳-۶ فیلترهای کربن فعال<sup>۱</sup>

این فیلترها به دلیل وجود کربن در بسترشان، با واکنش شیمیایی ذرات معلق در گازها را جذب می‌کنند به همین خاطر به فیلترهای جاذب<sup>۲</sup> نیز معروف هستند. علاوه بر حذف ذرات مانند بقیه‌ی فیلترها، وظیفه‌ی حذف دود و بو را از گازها به صورت جذبی نیز بر عهده دارد. یکی از معمول‌ترین کاربردهای آن‌ها جلوگیری از جابه‌جایی دودها و گازهای مضر در هوا در مناطقی مثل بیمارستان‌ها، فرودگاه‌ها و... است. آن‌ها همچنین برای حذف بخارهای حلال، مواد سمی یا دیگر بوها که توانایی تخریب محیط‌های صنعتی، تجاری و شیمیایی را دارند، مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۹].

برای کاربردهای تهویه هوا، فیلترهای کربن فعال در پنلی مشابه شکل و اندازه‌ی فیلترهای پنلی نگهداری می‌شوند که دانه‌های ریز کربن در آن ثابت هستند و اتصال محتویات به شکل بیسکویتی است

---

۱- Activated Carbon Filters

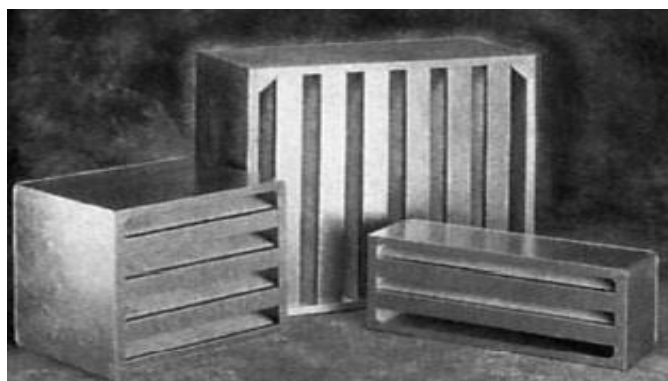
۲- Adsorbent



که روی آن با چارچوب فلزی روکش داده شده است. این مکان‌سازی جلو و کنار پنل‌ها می‌تواند با پیش‌فیلتر، برای حفاظت بیشتر از فیلترهای پنبلی کربن‌فعال طراحی شود [۱۵, ۱۸].

پیشرفت مهم، رشد شیمیایی دانه‌های ریز کربن‌فعال اشباع برای تصفیه و خنثی‌سازی مولکول‌های خاص غیر آلی مثل سولفور دی‌اکسید<sup>۱</sup> و هیدروژن سولفید<sup>۲</sup> است. افزایش نگرانی‌ها درباره‌ی ترکیبات آلی فرار<sup>۳</sup> در محیط کار، امتیاز بزرگی برای فیلترهای کربنی محسوب می‌شود [۱۵, ۱۸].

پیشرفت دیگر در این حوزه استفاده از شکل دیگری از کربن‌فعال است و آن تولید پارچه‌ای از زغال چوب<sup>۴</sup> است، توسعه‌ی اولیه‌ی آن در سال ۱۹۷۷ انجام شد. این شکل از مواد برتری خاصی دارند که شامل افزایش در گنجایش جذب کردن، افزایش در استحکام و انعطاف‌پذیری، مقاومت خوب در برابر شوک و ارتعاش است. به این صورت ساخته می‌شوند که الیاف بافته‌شده سلولز در اتمسفر کنترل شده کوره به ۱۰۰٪ کربن تبدیل می‌شوند. این فرایند وزن پارچه‌ی سلولزی را تا یک‌چهارم وزن اولیه کاهش می‌دهد و محصول آن پارچه‌ی زغال چوب فعال‌شده است که سطح مقطع و تخلخل‌های زیادی دارد. اگرچه به دلیل گران بودن روش تولید، پارچه‌ی زغال چوب کاربردهای خاصی از جمله ماسک‌های گاز و دستگاه‌های تنفس مصنوعی دارد [۱۹].

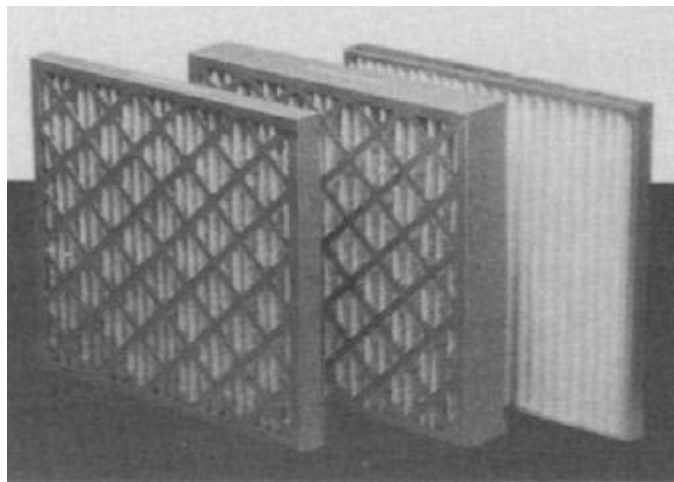


شکل ۲-۹: پنل‌های کربن‌فعال [۱۵]

- 
- ۱- Sulphur Dioxide
  - ۲- Hydrogen Sulphide
  - ۳- Volatile Organic Compounds
  - ۴- Charcoal Cloth

## ۲-۳-۷ فیلترهای هپا<sup>۱</sup>

شاخه‌ای از فیلترهای هوا هستند که افت فشار خیلی پایین تا خیلی بالا قابل قبولی دارند. برای بهتر شدن جریان در این فیلترها می‌توان منطقه فیلتر را افزایش داد تا به اندازه‌ی گنجایش بحرانی برسد. بازده‌ی این فیلترها در اغلب منابع بالای ۸۵٪ درصد بیان شده است اما در برخی منابع ۹۹/۹۹٪ نوشته شده است [۲۰، ۱۸].



شکل ۲-۱۰: فیلتر هپا [۲۱]

توسعه‌ی فیلترهای هپا با ماسک‌های گاز در جنگ جهانی دوم شروع شد. پس از جنگ جهانی با توسعه‌ی صنایع از جمله صنعت هسته‌ای، صنعت نفت و گاز و... که باعث آزادسازی ذرات در هوا می‌شدند فیلترهای هپا اختراع شدند. با پیشرفت مواد جدید در دهه‌ی ۵۰ میلادی الیاف شیشه به‌عنوان مهم‌ترین ماده‌ی سازنده تا به امروز مورد استفاده قرار می‌گیرد. از دهه‌ی ۶۰ میلادی این فیلترها کاربرد تصفیه هوا در صنایع الکترونیکی، دارویی، بیمارستان‌ها و... نیز پیدا کردند. امروزه این فیلترها در به‌صورت گسترده در اماکن مختلف از جمله ساختمان‌ها و اتومبیل‌ها استفاده می‌شوند [۲۲]. در طراحی و توسعه فیلترهای هپا سه جنبه مهم را ترکیب می‌کند که اولین آن وجود یک یا چند فیلتر بیرونی است تا مثل الک از عبور ذرات درشت گردو خاک را جلوگیری کند. جنبه دوم وجود یک توری متراکم است که برای

---

۱- High Efficiency Particulate Air Filters

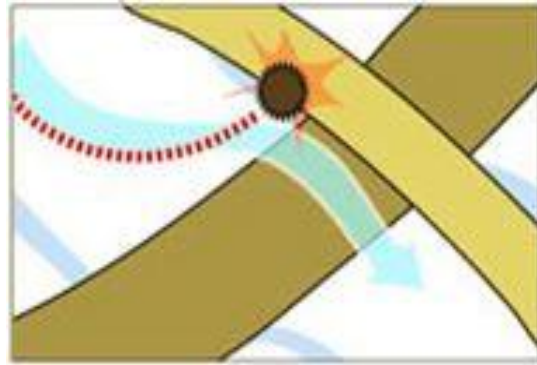
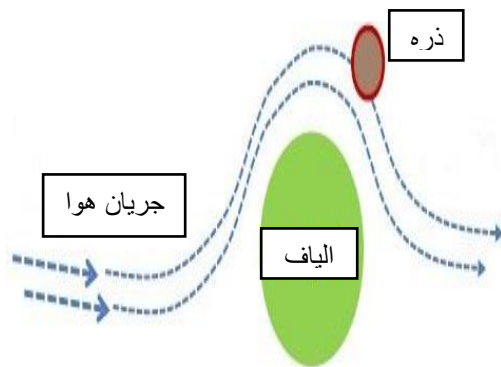
به دام انداختن ذرات ریزتر به کار می‌رود، این پیش فیلترها برای حذف ۹۰٪ ذرات از هوای ورودی طراحی می‌شود. در نهایت سومین جنبه قسمت داخلی است که در سرعت بالای هوا، برخی از ذرات با برخورد مستقیم به الیاف به دام می‌افتند و در سرعت پایین هوا، حرکت ذرات از میان فیلتر تمایل بیشتری به تصادفی شدن پیدا می‌کند و امکان دارد به الیاف بچسبند. این سه جنبه با هم اجازه می‌دهند به فیلترهای هپا تا ذرات کوچک تا بزرگ را جداسازی کنند [۲۳].

## ۲-۳-۷-۱ مکانیزم عملکرد فیلتر

برخلاف تصور عامیانه عملکرد جذب ذرات توسط فیلترها و به خصوص فیلتر هپا مانند الک کردن نیست. در فیلترهای هپا ذرات سوار بر شعاعی از جریان هوا با عبور از فیلتر در لایه‌های لایه‌های آن گیر می‌کنند و شعاع جریان هوا با انعطاف خود از میان شبکه فیلتر عبور می‌کند. فیلتر هپا توان جذب ذرات با اندازه‌های بسیار ریز و درشت را در لایه‌های مختلف خود دارا است و خیلی دیرتر مسدود شده و مانع عبور جریان هوای سالم نمی‌گردد. هدف استفاده از فیلتر هپا جذب ذرات فوق‌العاده ریز آلاینده است و طراحی آن به نوعی است که با سه روش هم زمان به این هدف دست می‌یابد [۲۴، ۵].

## ۲-۳-۷-۱-۱ جلوگیری کردن<sup>۱</sup>

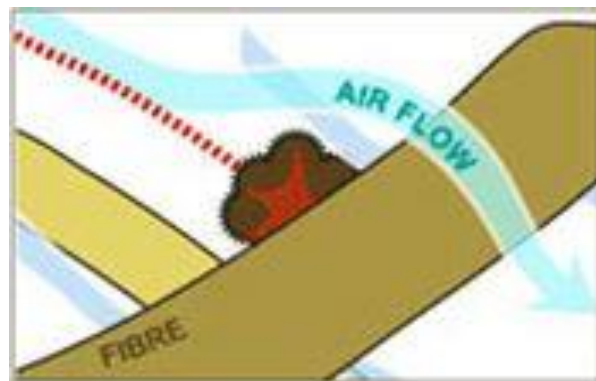
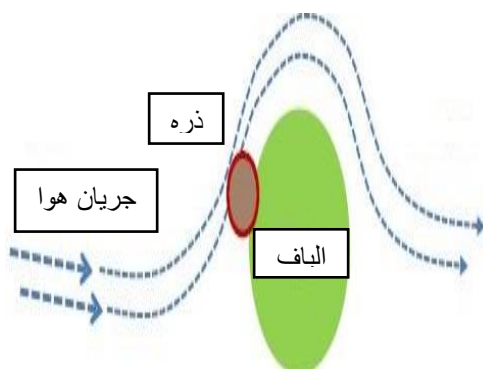
این مکانیزم هنگامی که شعاع ذرات کوچک‌تر از الیاف فیلتر باشد، رخ می‌دهد به عبارت دیگر اگر ذرات کوچک‌تر از ۱۰۰ نانومتر باشند این مکانیزم فعال خواهد شد. ذرات با لمس توسط الیاف گرفته می‌شوند و بدین صورت از جریان گاز حذف می‌شوند و جریان هوا عبور می‌کند [۲۴].



شکل ۲-۱۱: مکانیزم قطع کردن مستقیم [۲۵]

### ۲-۳-۷-۱-۲ فشردگی داخلی<sup>۱</sup>

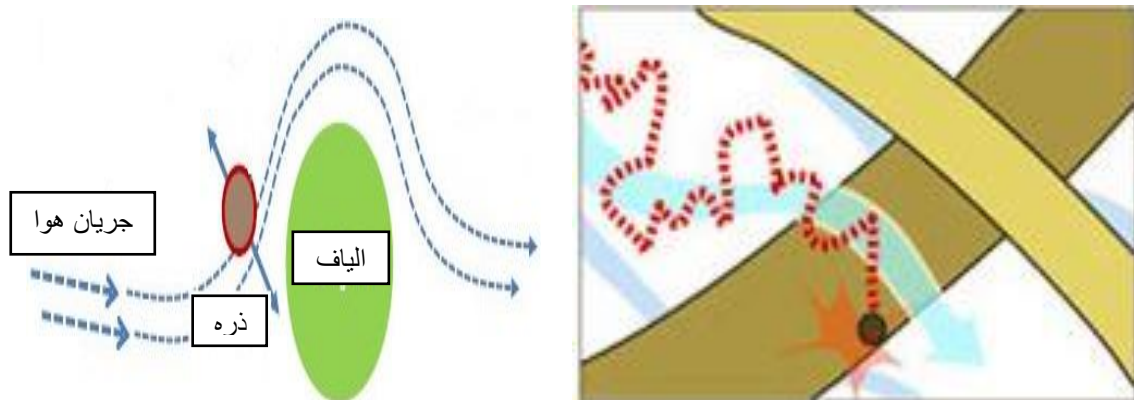
اگر ذرات بزرگتر باشند و قادر به تطبیق سریع با جریان هوا در نزدیکی الیاف فیلتر نباشند، به علت کندی ذرات در مسیر اصلی حرکت کرده و در ادامه با برخورد به الیاف فیلتر، بر روی بستر سقوط می‌کنند. می‌توان این را اضافه نمود که ذرات بزرگتر از ۱ میکرون، به علت بافت بسیار متراکم فیلتر، در آن گیر می‌کنند و جریان هوا با حرکت منحنی از راه‌های باز میان فیلتر عبور می‌کند. این مکانیزم با پخش شدن و از هم بازمان الیاف، کاهش می‌یابد و با سرعت جریان هوا افزایش می‌یابد [۲۴].



شکل ۲-۱۲: مکانیزم فشردگی داخلی [۲۵]

## ۲-۳-۷-۱-۳ انتشار براونی<sup>۱</sup>

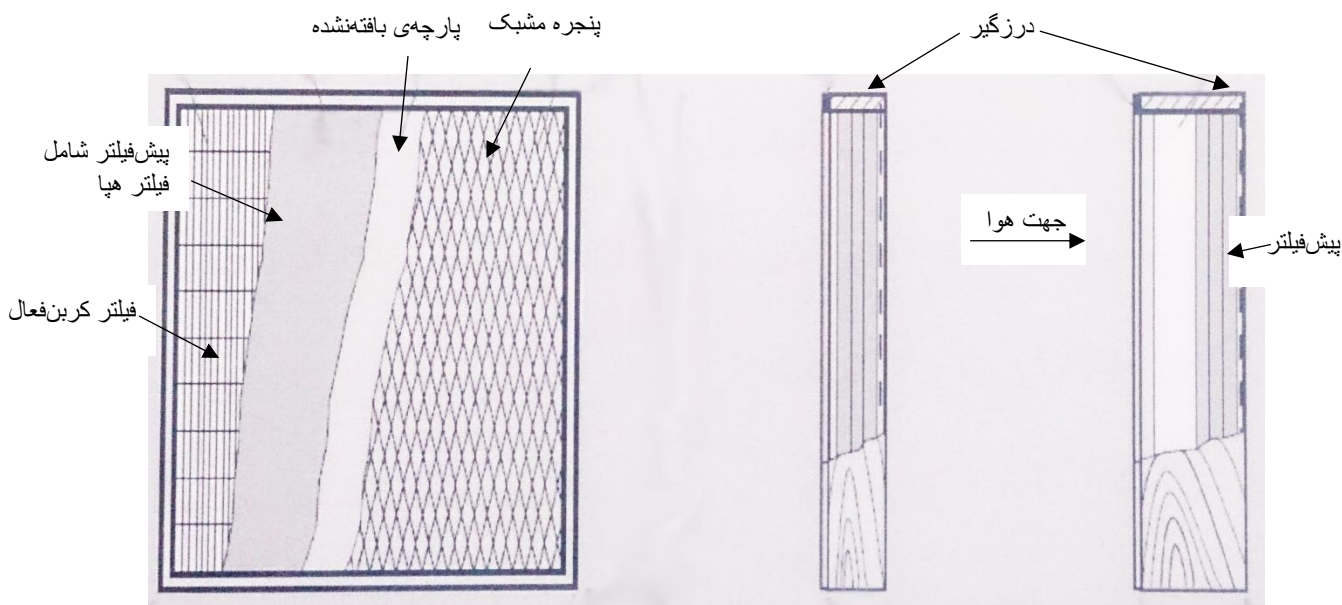
به علت برخورد ذرات ریز با مولکول‌های گازی به طور مداوم جهت حرکت آن‌ها تغییر می‌کند و یک مسیر نامنظم و پراز انحنا و زیگزاگ را طی می‌کنند که باعث کاهش سرعت آن‌ها شده و این تأخیر باعث بالا رفتن احتمال توقف و گیرکردن ذرات معلق در درون فیلتر می‌شود. این روش در جذب ذرات معلق با قطر کمتر از  $0.4$  میکرون، بسیار مؤثر است. ذرات در حدود  $0.1$  تا  $0.4$  میکرون بیشترین آمار جذب‌شوندگی در لابه‌لای الیاف فیلتر توسط این مکانیزم را دارند. حرکت زیگزاگی و نامنظم ذرات که احتمال جذب آن‌ها توسط فیلتر را افزایش می‌دهد به انتشار براونی موسوم است [۲۴].



شکل ۲-۱۳: مکانیزم انتشار براونی [۲۵]

نکته‌ای که باید به آن توجه داشت این است که با اینکه مکانیزم‌های فوق در فیلترها و به خصوص فیلترهای هپا بیشتر ذرات را جذب می‌کنند اما امروزه برای افزایش بازده و جذب کامل ذرات، فیلترها به صورت ترکیبی در صنایع استفاده می‌شوند. برای مثال در صنعت گاز و نفت از ترکیب فیلترهای هپا و کارتریجی و یا در صنایع هسته‌ای و شیمیایی از ترکیب فیلترهای هپا و کربن فعال که بو و بخارها و گازهای سمی را جذب می‌کند استفاده می‌شود [۵].

۱- Brownian Diffusion

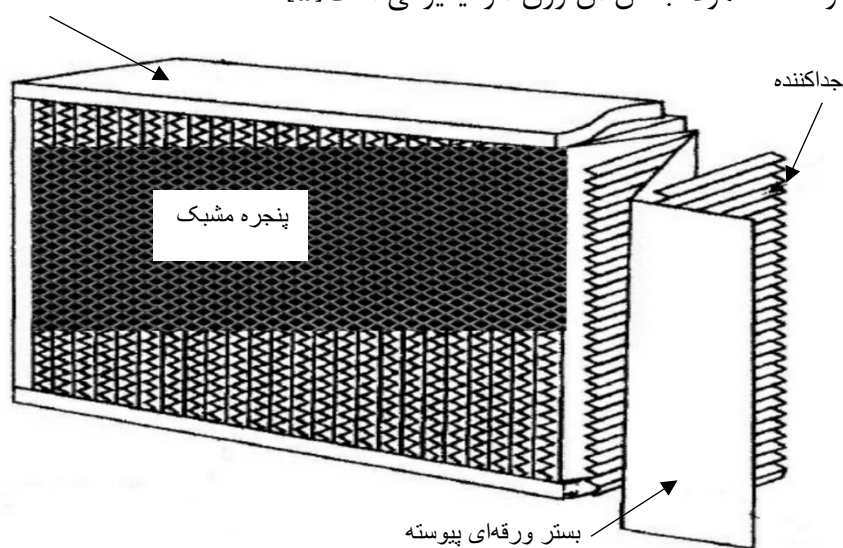


شکل ۲-۱۴: نوعی فیلتر کربن فعال [۵]

### ۲-۷-۳-۲ مواد مورد استفاده در فیلتر

تمامی فیلترها دارای سه بخش شامل پنجره مشبک<sup>۱</sup> که توری از جنس فلز یا پلاستیک است، درزگیر<sup>۲</sup> که معمولاً جنس آن پلاستیک است و بستر که مهم‌ترین قسمت فیلترها می‌باشند و در ادامه به مواد سازنده‌ی آن اشاره خواهد شد می‌باشند. در فیلتر هپا بخش دیگری به نام جداکننده<sup>۳</sup> نیز مورد استفاده می‌شود که معمولاً جنس آن ورق آلومینیومی است [۵].

قاب و درزگیر بستر



شکل ۲-۱۵: اجزای فیلتر هپا [۲۲]

- ۱- Grille
- ۲- Gasket
- ۳- Separator

متداولترین بستر فیلترها از الیاف مصنوعی، معدنی به صورت بافته‌نشده و یا بافته‌شده است. معمولترین الیاف برای ساخت بستر، الیاف مصنوعی هستند که به دلیل قیمت پایین، مقاومت خوب در برابر مواد شیمیایی، تحمل دمایی بالا و امکان تولید الیاف با قطر بسیار کم مورد استفاده قرار می‌گیرند. الیاف حاصل از استات‌ها، آکریل‌ها، پلی‌آمیدها، پلی‌استرها، پلی‌الفین‌ها و پلی‌وینیل کلرایدها از جمله الیاف مصنوعی به حساب می‌آیند. برای کاربرد در دماهای خیلی بالا از موادی مثل تفلون، ریتون و کربن نیز استفاده می‌گردد. الیاف معدنی شیشه، نقش پررنگی در تولید بسترها دارند که این امر به دلیل خصوصیات بارز آنها مانند غیر قابل احتراق بودن، جاذب رطوبت نبودن، ضریب کم انبساط خطی، مقاومت کششی مناسب، عدم انعطاف‌پذیری و مقاومت خوب برابر اسیدها نشات می‌گیرد [۵، ۲۶].

بسترهای تولید شده از الیاف زیر میکرون دارای کارایی بالایی در ربایش ذرات از جریان هوا هستند. برخی از الیاف مورد استفاده در این فیلترها و خصوصیات آنها در جدول آمده است [۵، ۲۶].

جدول ۲-۱: خصوصیات مهم برخی از الیاف مورد استفاده در بستر فیلترها [۵، ۲۶، ۲۷]

نوع الیاف	مقاومت در برابر اسیدهای آلی	مقاومت در برابر اسیدهای قلیایی	مقاومت در برابر اسیدهای معدنی	مقاومت در برابر خم کردن	مقاومت در برابر دمای قابل تحمل (°C)
شیشه	خوب	متوسط	متوسط	متوسط	۲۶۰
نامکس <sup>۱</sup>	متوسط	خوب	عالی	عالی	۲۰۰
پلی پروپیلن	عالی	عالی	عالی	خوب	۹۰
کتان	خوب	خوب	ضعیف	خیلی خوب	۸۰
تفلون	عالی	عالی	عالی	متوسط	۲۳۰
پلی استر	خوب	خوب	خوب	خیلی خوب	۱۳۵

۱- Nomex

## ۴-۲ فرایندهای تولید کامپوزیت‌های متخلخل

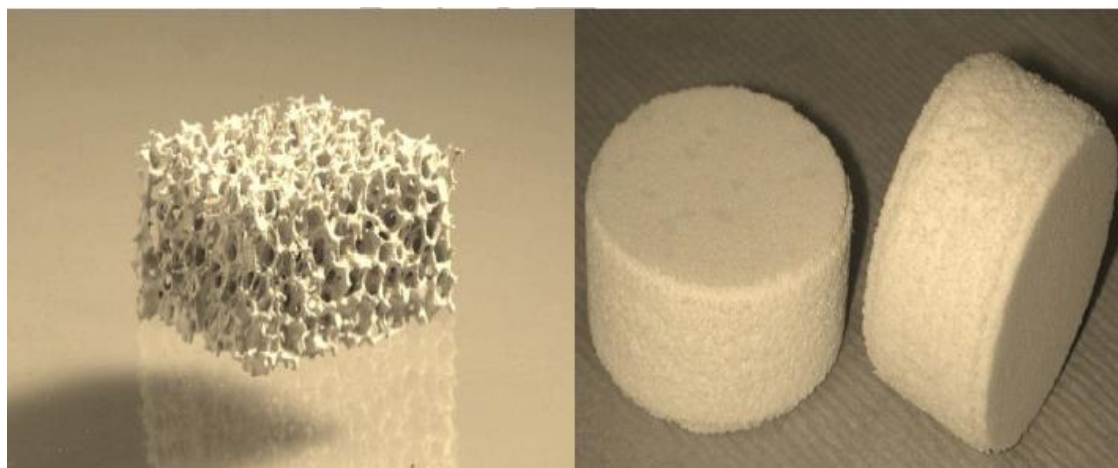
خانم شمس و همکاران در سال ۲۰۱۱ در پژوهشی اقدام به تولید کامپوزیت متخلخل  $TiC/Al_2O_3$  به روش سنتز احتراقی در حضور ماده‌ای گاززا کردند و نمونه‌هایی با تخلخل بیش از ۷۰٪ تولید شد. مواد اولیه شامل اکسید تیتانیوم، آلومینیوم، گرافیت و کربنات کلسیم به عنوان عامل گاززا بود. پس از مخلوط‌سازی پودرها، مقدار مشخصی از مخلوط برداشته و تحت پرس با فشارهای مختلف قرار گرفت سپس وارد ماکروبو شده و با اتمام واکنش اجزا آزمایش‌های مورد نظر انجام شد. در این پژوهش تاثیر میزان عامل گاززا و مقدار فشار پرس بر میزان تخلخل مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد که با افزایش میزان عامل گاززا تخلخل‌ها افزایش می‌یابد [۲۸].



شکل ۲-۱۶: افزایش تخلخل ماکروسکوپی بر روی سطح نمونه‌ها با افزایش میزان ماده گاززا [۲۸]

در سال ۱۳۹۳ خانم صفا بخش و همکاران به بررسی عوامل موثر بر خواص کامپوزیت‌های متخلخل بر پایه کاربید سیلیسیم دارای اتصال کوردیریتی تهیه شده به روش اتصال-واکنشی پرداختند. در این روش از کاربید سیلیسیم، تالک و کائولن به عنوان ماده‌ی اولیه و از گرافیت و اسفنج پلی‌اورتان به عنوان عوامل ایجاد کننده‌ی تخلخل استفاده شد. برای تهیه‌ی کامپوزیت از دو روش استفاده شد. در روش اول گرافیت پودری پس از سوختن ایجاد تخلخل نموده و کامپوزیت شکل گرفت و در روش دوم از ساخت دوغابی از مواد اولیه و اسفنج پلیمری کامپوزیت تهیه شد. نتایج نشان داد که ترکیب حاوی ۳۰ درصد وزنی گرافیت و ۶۰ درصد وزنی کاربید سیلیسیم از خواص مناسب‌تری برخوردارند که این تاثیر زیاد نوع و مقدار عامل ایجاد تخلخل بر استحکام مکانیکی را بیان نمود [۲۹].





(ب)

(الف)

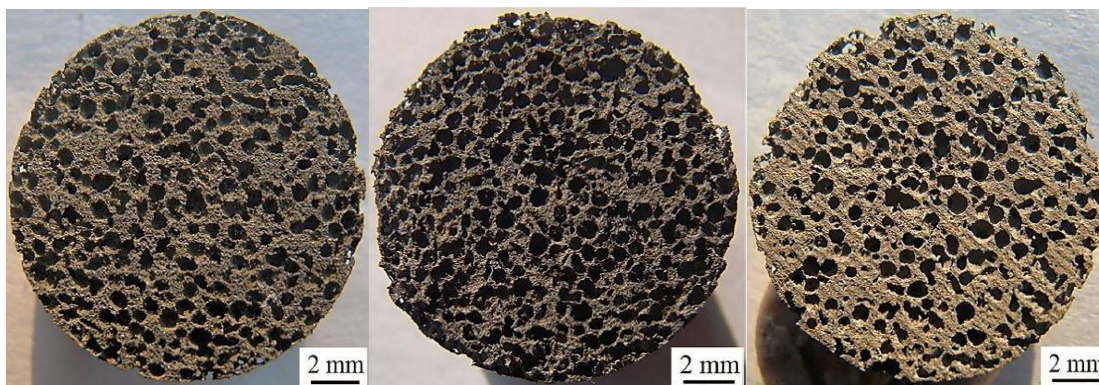
شکل ۲-۱۷: نمونه‌های ساخته شده با استفاده از دو عامل گوناگون ایجاد تخلخل، الف) گرافیت، ب) اسفنج پلی‌اورتان [۲۹]

آقای وو<sup>۱</sup> در سال ۲۰۱۷ با همکاری کامپوزیت متخلخل  $(TiB_2-Al_2O_3)/NiAl$  را تولید نموده و به بررسی ساختار متخلخل و خواص مکانیکی آن پرداختند. با پودرهای نیکل، آلومینیوم،  $B_2O_3$  و  $TiO_2$  و اضافه نمودن کاربامید<sup>۲</sup> به آن‌ها و به روش سنتز احتراقی دمای بالا<sup>۳</sup> کامپوزیت متخلخل  $(TiB_2-Al_2O_3)/NiAl$  را تولید شد. سپس با بررسی نتایج این نکته به دست آمد که مورفولوژی و اندازه‌ی تخلخل‌ها می‌تواند با ذرات کاربامید کنترل شود، به طوری که با کنترل کسر حجمی آن تخلخل‌ها می‌توانند به ۸۵٪ برسند. هنگامی که محتوای پودر  $10Al-3B_2O_3-3TiO_2$  از ۲۰٪ کمتر باشد در ساختار کامپوزیت دو نوع مختلف از تخلخل یکی پیوسته و دیگری میکروتخلخل پیدا می‌شود. درباره‌ی استحکام فشاری بیان شد که استحکام فشاری کامپوزیت با  $NiAl$  متخلخل بین فلزی قابل مقایسه است. این به دلیل ترکیب دو شکست بین دانه‌ای و درون دانه‌ای است [۳۰].

۱- Wu

۲- Carbamide

۳- Self-propagating High-temperature Synthesis



(ج)

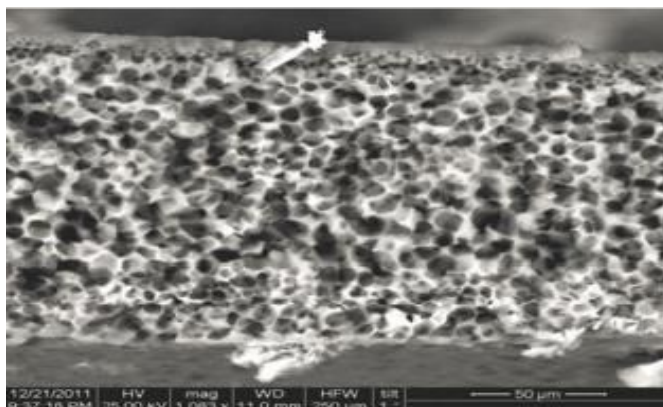
(ب)

(الف)

شکل ۲-۱۸: مورفولوژی تخلخل‌ها برای کامپوزیت  $\text{TiB}_2\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{NiAl}$  با کسر حجمی متفاوت کاربامید، الف) ۴۷٪، ب) ۶۰٪، ج) ۷۵٪ [۳۰]

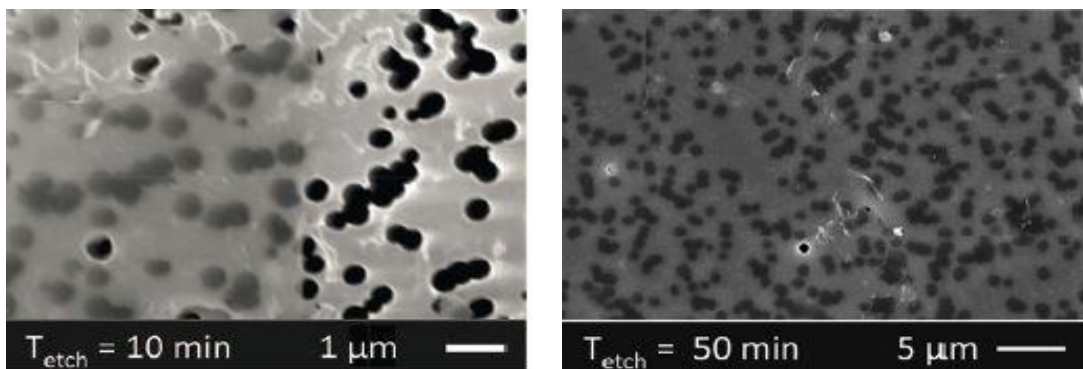
در سال ۲۰۱۸ کولیا و همکاران بر روی تولید تک مرحله‌ای غشای کامپوزیتی متخلخل پلیمر/سیلیکات با استفاده از القاساز معکوس فاز آب- شیشه به مطالعه پرداختند. مواد مورد استفاده در این مطالعه عبارت بودند از: نایلون ۶، پلی سولفون<sup>۱</sup>، غشاهای PMMA، سدیم سیلیکات محلول<sup>۲</sup> با ۲۷%  $\text{SiO}_2$  و ۱۰% NaOH، دی متیل فرمامید<sup>۳</sup>، اسید فرمیک<sup>۴</sup> و سدیم هیدروکسید. در این روش انعقاد نایلون ۶ با فرمیک اسید همراه با آب- شیشه در غلظت‌های مختلف بر روی مورفولوژی تاثیرگذار است. ذرات سیلیکات بزرگ موجود در کامپوزیت کوچکتر از چند میکرون و به حالت خطی هستند و به این ترتیب ذراتی که شکل می‌گیرند توزیع یکنواختی دارند. غشاهای کامپوزیتی شکل گرفته با تخلخل‌های حجیم برای کاربردهای جداسازی یا برای پیش‌سازهای مواد کامپوزیتی فشرده با زمینه‌ی پلیمر ترموپلاستیک و ذرات پراکنده‌ی سیلیکات مناسب هستند [۳۱].

- 
- ۱- Polysulfone
  - ۲- Sodium Silicate
  - ۳- Dimethylformamide
  - ۴- Formic Acid



شکل ۲-۱۹: تصویر SEM غشای کامپوزیتی متخلخل پلیمر/ سیلیکات [۳۱]

آقای مادای و همکاران در سال ۲۰۱۷ به ساخت غشای کامپوزیت پلیمر/ گرافن با تخلخل‌های نانویی پرداختند. آن‌ها دو نمونه را مورد بررسی قرار دادند: نمونه‌ی ۱ که PMMA قبل از تابش حذف شده بود و نمونه‌ی ۲ که PMMA به کار گرفته شد به عنوان محافظ لایه در مدت تابش و اچ کردن و پس از آن حذف شد. با تشکیل کامپوزیت PMMA/graphene/PET، این محصول وارد محلول NaOH و آب دیونیزه شده و بدین ترتیب فرایند اچ به پایان رسید. با توجه به تصاویر SEM دو نمونه، نمونه‌ای که لایه‌ی PMMA آن قبل از تابش حذف شده بود، دارای تخلخل‌هایی با قطر در حدود ۴۰۰ نانومتر بود اما نمونه‌ای که پس از تابش لایه‌ی PMMA آن حذف شده بود، دارای تخلخل‌هایی با قطر در حدود ۷۰۲ نانومتر بود. این روش سه مزیت مهم را فراهم نمود: ۱- گرافن CVD شده با کیفیت بالا منتقل می‌شود بر روی سطح سالم PET بدون هیچ تخلخلی و پوشش بسیار خوبی از گرافن می‌سازد. ۲- در این روش نقایص گرافن در راستای منفذ زیرین PET قرار گرفته و نتیجه‌ی آن غشایی شکل می‌گیرد که مناسب برای نانوفیلتراسیون و فیلتراسیون پیشرفته است. ۳- به دلیل وجود لایه‌ی محافظتی PMMA در حین ساخت، این روش با ساخت به صورت نوردی سازگار است [۳۲].



(ب)

(الف)

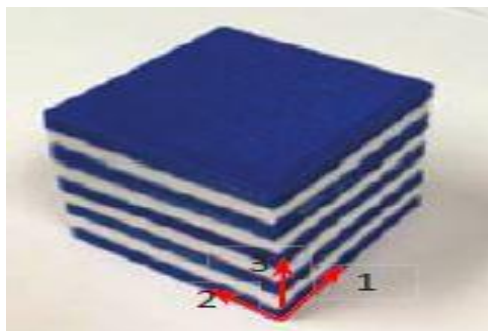
شکل ۲-۲۰: الف) تصویر SEM غشای کامپوزیت گرافن/PET با لایه‌ی PMMA حذف شده بعد از اچ، ب) تصویر SEM غشای کامپوزیت گرافن/PET با لایه‌ی PMMA حذف شده قبل از اچ [۳۲]

در سال ۲۰۱۷ آقای ژانگ و همکاران اقدام به ساخت سازه‌های پلیمری متخلخل طبقه‌بندی شده<sup>۱</sup> با استفاده از روش اتصال لایه لایه‌ها<sup>۲</sup> کردند. FGPM ها موادی هستند که به تدریج تخلخل‌ها در سراسر حجم آن‌ها تغییر می‌یابد و کاربردهای زیادی در صنایع از جمله صنایع هوافضا و بیوپزشکی دارند. در این پژوهش از اسید پلی لاکتیک<sup>۳</sup> به عنوان ماده‌ی اصلی استفاده شد. با روش اتصال حرارتی لایه‌ها FGPM تولید شد که تحت فشار اعمال شده، حرارت کنترل شده و زمان نگهداری مناسب می‌تواند تخلخل‌های سه بعدی با اتصال لایه‌های پلیمری ایجاد کرد. پس از تولید FGPM اثرات عوامل مختلف بر مقاومت برشی اتصال مورد بررسی قرار گرفت، مشخص شد که قدرت اتصال را می‌توان با تنظیم مناسب فشار، درجه حرارت و زمان در فرایند کنترل کرد. نتایج نشان می‌دهد که روش‌های توسعه می‌تواند برای به دست آوردن FGPM‌هایی با مدول‌های موثر مختلف مورد استفاده قرار گیرد [۳۳].

۱- Functionally Graded Porous Polymer Structures

۲- Bonding Lamination Techniques

۳- Polylactic acid



شکل ۲-۲۱: FGPM سه بعدی [۳۳]

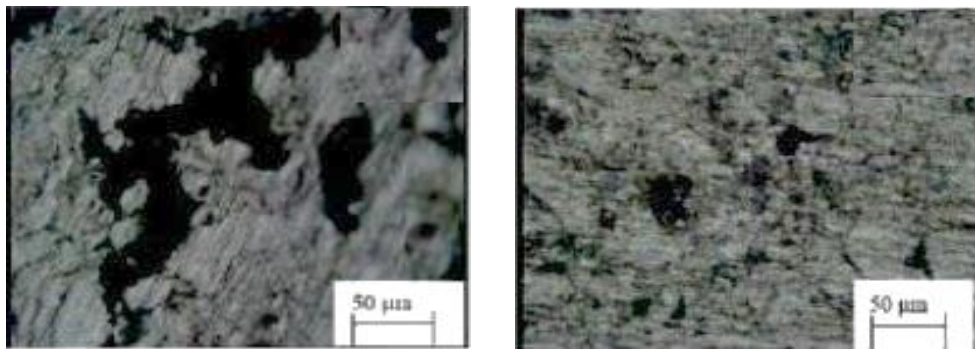
آقای جمیل و همکارانش در سال ۲۰۱۷ به ساخت نمونه‌ی سرامیک-ژئوپلیمر متخلخل که ماده‌ی اصلی بهتر شدن جذب و نگهداری آب در مواد ساختمانی است، پرداختند. ژئوپلیمر یک کامپوزیت پلیمری غیر معدنی است که به دلیل انرژی کم و کربنی بودن پتانسیل تحمل مواد ساختمانی را دارد و با سیمان پرتلند مقایسه می‌شود. سرامیک متخلخل نیز از دیاتومیت و خاکستر ذغال سنگ تشکیل شده است که به روش سینترینگ فشاری سرامیک تولید می‌شود. در این پژوهش نشان داده شد که سرامیک متخلخل و ژئوپلیمر جذب و نگهداری آب را بهبود می‌دهند و به علاوه با توجه به نتایج به دست آمده جذب و نگهداری آب به ساختار منافذ وابسته است. در حالت ایده‌آل، ناحیه تماس کوچک هر منفذ برای بهبود خواص جذب آب در تخلخل‌های زیاد موثر است [۳۴].



شکل ۲-۲۲: سطح شکست نمونه‌ی ژئوپلیمر [۳۴]

در پژوهشی که در سال ۲۰۱۷ توسط خانم صابری و همکاران انجام شد، آن‌ها به بررسی خواص کامپوزیت متخلخل زمینه آلومینیوم تقویت شده با نانوذرات کاربید سیلیسیم پرداختند. در این پژوهش

از پودر آلومینیوم با قطر کمتر از ۴۵ میکرون و نانوذرات کاربید سیلسیم به قطر ۶۰ نانومتر و پودر استاریک اسید استفاده شد. برای تهیه کامپوزیت از روش آلیاژسازی مکانیکی استفاده شد بدین صورت که ابتدا از آسیاب برای مخلوطسازی پودرها استفاده شده و سپس آسیاب کاری در گاز آرگون برای پودرها انجام شد. در نهایت فشار اعمال شده و پس از آن تفجوشی صورت می‌گیرد. در این پژوهش کامپوزیت‌هایی که ذرات درشت‌تری داشته‌اند حفرات باقی‌مانده در آن‌ها نیز بزرگ‌تر است دلیل آن تفجوشی ناقص ذرات است و کامپوزیت‌هایی که ذرات ریزتری داشته‌اند حفرات تشکیل شده در آن‌ها ریزتر است به این دلیل که تفجوشی در آن‌ها به طور کامل انجام شده است. از دیگر نتایج حاصل شده در این پژوهش این است که توزیع غیریکنواخت ذرات پودر حاصل از فرایند آلیاژسازی مکانیکی منجر به غیریکنواختی توزیع در نمونه‌های حاصل از پرس و تفجوشی می‌شود [۳۵].



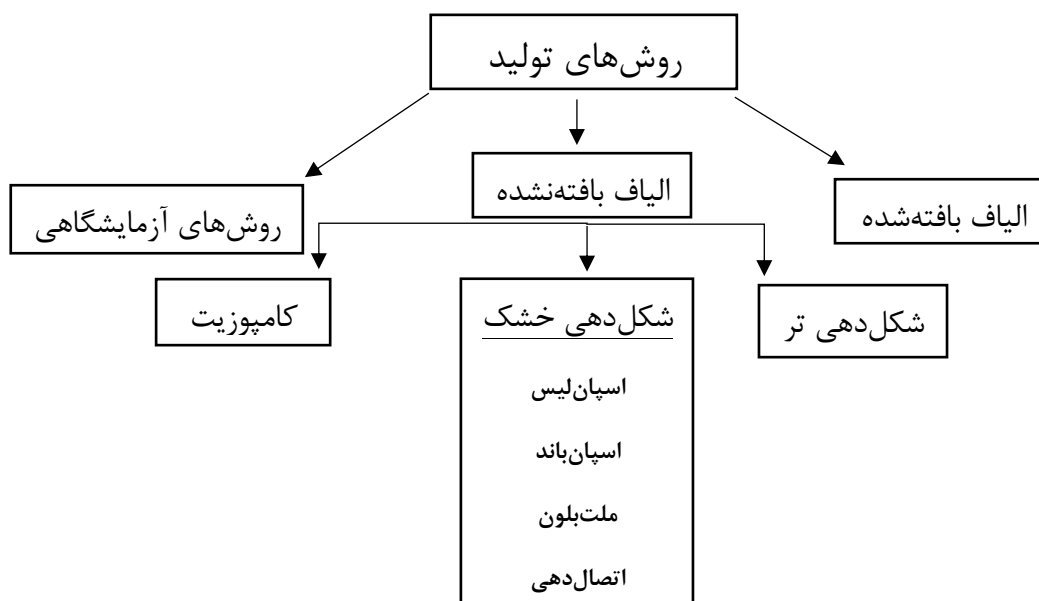
(ب)

(الف)

شکل ۲-۲۳: تصاویر میکروسکوپ نوری از نمونه‌های تولید شده به روش آلیاژسازی مکانیکی، (الف) تخلخل ریز، (ب) تخلخل درشت [۳۵]

## ۲-۵ فرایندهای تولید فیلتر

در این قسمت به فرایندهای تولید فیلترها به روش‌های بدون بافت می‌پردازیم. البته لازم به ذکر است که منظور از تولید فیلتر منظور همان تولید بستر آن است که قسمت اصلی یک فیلتر را شامل می‌شود. فرایندهای تولید فیلتر به شرح زیر هستند [۳۶].



شکل ۲-۲۴: انواع فرایندهای تولید بستر

## ۲-۵-۱ شکل دهی خشک<sup>۱</sup>

### ۲-۵-۱-۱ هواگذاری<sup>۲</sup>

فرایند اساسی در این قسمت قرار دادن الیاف خمیری شکل در جریان هوا و سپردن آن به جمع کننده محصول است. مهم ترین محصولات این فرایند پاک کننده ها و مواد جاذب برای محصولات بهداشتی است. در این روش مواد فوق جاذب با فیبرها می تواند مخلوط شود و همچنین این فرایند سیستم سنجش فیبرها برای تولید فیبرهای مصنوعی را فراهم می کند. اسپری لاستیک<sup>۳</sup> اتصال شبکه را میسر می سازد و شبکه رزین دار توسط یک سطح خشک کننده، خشک می شود. شبکه های هواگذاری شده توسط اتصال حرارتی<sup>۴</sup>، سوراخ کردن با سوزن<sup>۵</sup> و... به هم متصل می شوند. تولید فیلتر کاربراتور خودرو برای اولین بار توسط این فرایند گزارش شد [۳۶].

۱- Dry Formed

۲- Air laid

۳- Latex

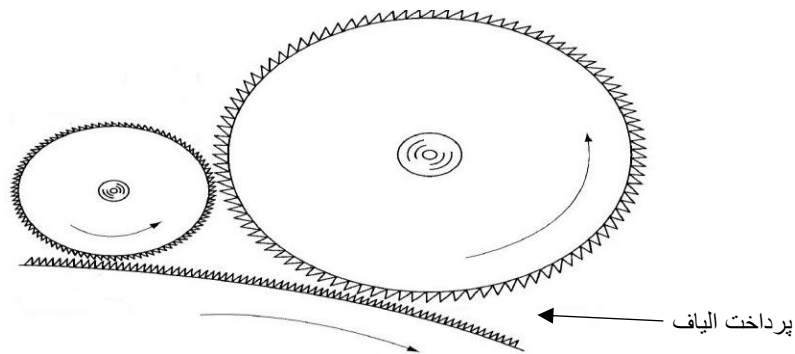
۴- Thermal Bonding

۵- Needle Punching

## ۲-۵-۱-۲ شبکه‌ها و نمدهای خشک<sup>۱</sup>

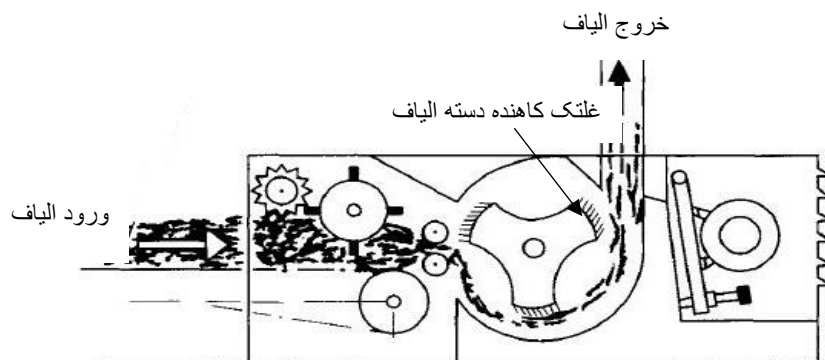
### ۲-۵-۱-۲-۱ شکل‌دهی و ترکیب کردن<sup>۲</sup>

در این روش ابتدا الیاف به نسخه‌های اصلاح شده تغییر می‌کنند تا بتوان تولیدات بافته نشده را توسعه داد. بدین صورت که الیاف ما بین غلتک‌هایی مارپیچی و دندانه‌دار که ارتفاع، زاویه و محل نصب دندانه‌ها روی غلتک با محاسبه و اندازه‌گیری انجام شده است، قرار می‌گیرند. غلتک‌ها در سرعت‌های متفاوت به حرکت در می‌آیند. در نتیجه الیاف به طور کامل با هم مخلوط می‌شوند [۳۶].



شکل ۲-۲۵: غلتک‌های دندانه‌دار [۳۶]

یکی دیگر از مراحل لازم برای شکل‌دهی الیاف شامل ترکیب کردن است. در این مرحله یک غلتک دسته‌های الیاف را باز کرده و اندازه‌ی دسته‌ها را کاهش می‌دهد و در نهایت یک صفحه متحرک توزیع الیاف را یکنواخت می‌کند [۳۶].



شکل ۲-۲۶: کاهش دسته الیاف با غلتک [۳۶]

۱- Dry laid webs and felts

۲- Forming and Blending

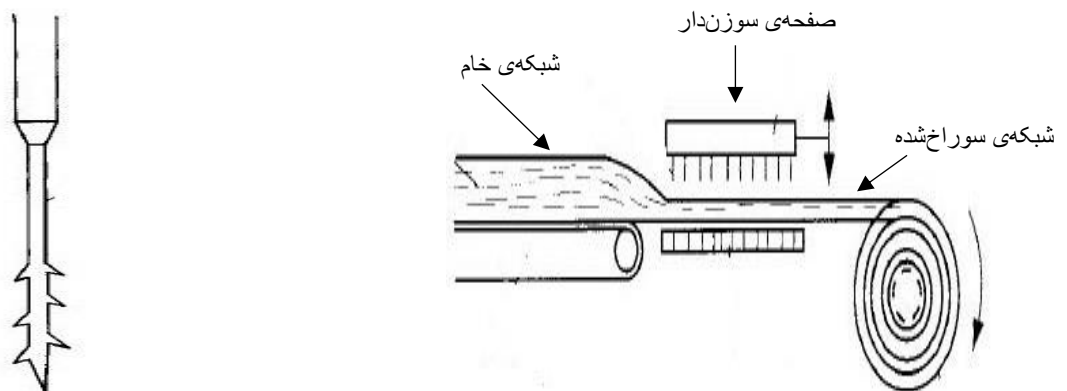


## ۲-۵-۱-۲-۲ متصل کردن

آخرین مرحله در تولید بستر فیلترها، اتصال است که در این مرحله شبکه‌ی خام مراحل قبل به محصول نهایی تبدیل خواهد شد. این مرحله به چند شکل قابل انجام است که در ادامه به آن خواهیم پرداخت [۳۶].

## ۲-۵-۱-۲-۲-۱ سوراخ کردن با سوزن

این روش برترین شکل‌دهی الیاف بافته‌نشده برای استفاده در بستر فیلتر است و بسترهای برجسته‌ای برای عملیات فیلتراسیون بگ‌هاوس<sup>۱</sup> هستند. این فرایند بدین صورت است که الیاف، پیچ‌خورده و به صورت مکانیکی به هم قفل می‌شوند توسط سوراخ‌کننده شبکه که از مجموعه‌ای از سوزن‌های پیکان‌دار تشکیل شده است. چگالی و استحکام شبکه می‌تواند با قدرت ضربه زدن به شبکه، سرعت پیشروی شبکه و درجه‌ی نفوذ سوزن‌ها تنظیم شود [۳۶].



شکل ۲-۲۷: دستگاه سوراخ‌سازی با سوزن [۳۶]

شکل ۲-۲۸: نمونه‌ای از سوزن پیکان‌دار [۳۶]

۱- Baghouse



شکل ۲-۲۹: سطح مقطع یک شبکه سوراخ شده با سوزن با بزرگنمایی ۶۲ [۳۶]

## ۲-۵-۱-۲-۲-۲ اسپان لیس<sup>۱</sup>

این فرایند برای اولین بار در سال ۱۹۷۳ توسط دوپنت<sup>۲</sup> معرفی شد و نام تجاری محصول اسپان لیس آن سانتارا<sup>۳</sup> نامیده شد. این فرایند از پرتاب کننده های<sup>۴</sup> آب خیلی سریع به جای سوزن های پیکان دار برای پیچاندن الیاف استفاده می کنند. در پرتاب کننده ها از سرهای با فشار زیاد استفاده می شود، این فشار در گستره ی ۰/۵ تا ۲۵ مگاپاسکال است. قطر سوراخ پرتاب کننده در قسمت سر حدود ۱۰۰ تا ۱۲۰ میکرومتر است [۳۶].

فرایند اسپان لیس شامل مراحل است که عبارتند از: ۱- تشکیل یک شبکه ی بافته نشده پیشگام، ۲- پیچاندن شبکه با پرتاب کننده آب، ۳- حذف آب اضافی با سیستم خلاء، ۴- گردش مجدد<sup>۵</sup> و فیلتراسیون آب، ۵- خشک کردن شبکه، ۶- پیچاندن شبکه روی غلتک ها برای حمل یا دیگر فرایندها [۳۶].

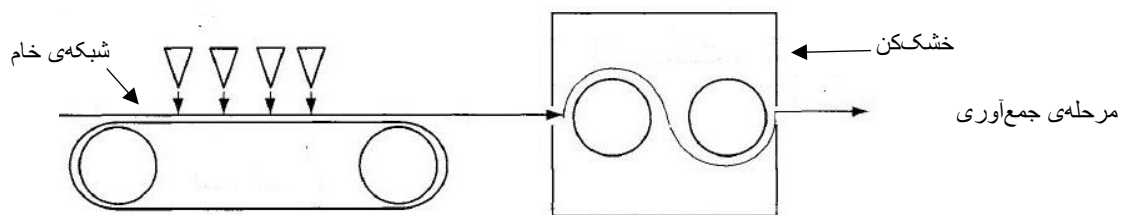
یک یا دو طرف شبکه ها ممکن است تحت پرتاب کننده آب قرار گیرد. اگر محصول مهم باشد با یک پارچه ی بافته شده حمایت می شود. طراحی محصول بر چطور و چگونه انجام شدن این فرایند بر

---

۱- Spunlace  
 ۲- DuPont  
 ۳- Sontara  
 ۴- Jets  
 ۵- Recirculation

شبکه‌ها اثرگذار است. خواص فیزیکی و ظاهر شبکه به ساختار و سوراخ‌های ایجاد شده وابسته است و همچنین عواملی که روی ساختار ایجاد شده مؤثر هستند شامل سرعت و فشار پرتاب‌کننده، تعداد لوله‌ها و سرها، سرعت شبکه و زاویه‌ی پرتاب‌کننده است. خواص بهترین شبکه لزوماً از پرتاب‌کننده عمودی (اصابت عمودی آب) به دست نمی‌آید بلکه نتیجه‌ی بهتر هنگامی است که پرتاب‌کننده‌ها در بعضی از زوایا نسبت به عمود جهت‌دار باشند [۳۶].

خواص الیاف بر چگونگی بهتر پیچ خوردن آن‌ها در شبکه مؤثر است. به طور کلی الیاف دراز و نرم نسبت به الیاف کوچک و سخت پیچ خوردن بهتری دارند و همچنین الیاف نازک از الیاف درشت بهتر پرتاب‌کننده آب هستند [۳۶].



شکل ۲-۳۰: فرایند اسپان لیس [۳۶]

## ۲-۵-۱-۲-۲-۳ اتصال دهی با کوک<sup>۱</sup>

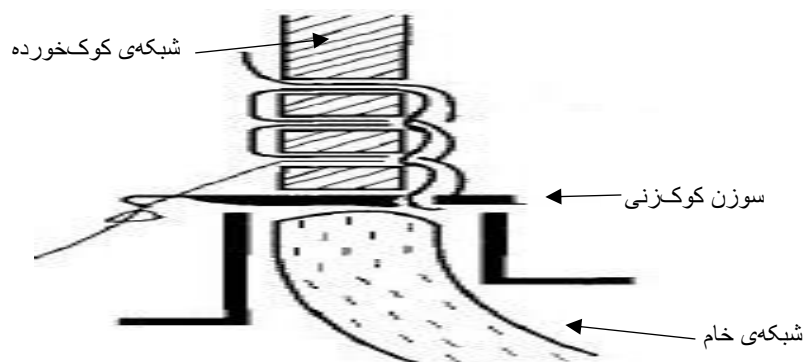
یک روش مکانیکی برای محکم‌سازی شبکه‌ای از الیاف است که از عناصر بافندگی<sup>۲</sup> برای قفل کردن الیاف استفاده می‌کند. کرک‌ها<sup>۳</sup> برای تغذیه‌ی ماشین کوک زنی وارد منطقه‌ی کوک می‌شوند و سوزن کوک زنی شب که را محکم کرده و آن را به یک پارچه‌ی بافته نشده تبدیل می‌نماید. همچنین اتصال دهی با کوک می‌تواند توسط تنیده شدن الیاف به هم انجام شود. ساختارهای لایه‌ای<sup>۴</sup> اغلب توسط این روش ساخته می‌شوند [۳۶].

۱- Stitch Bonding

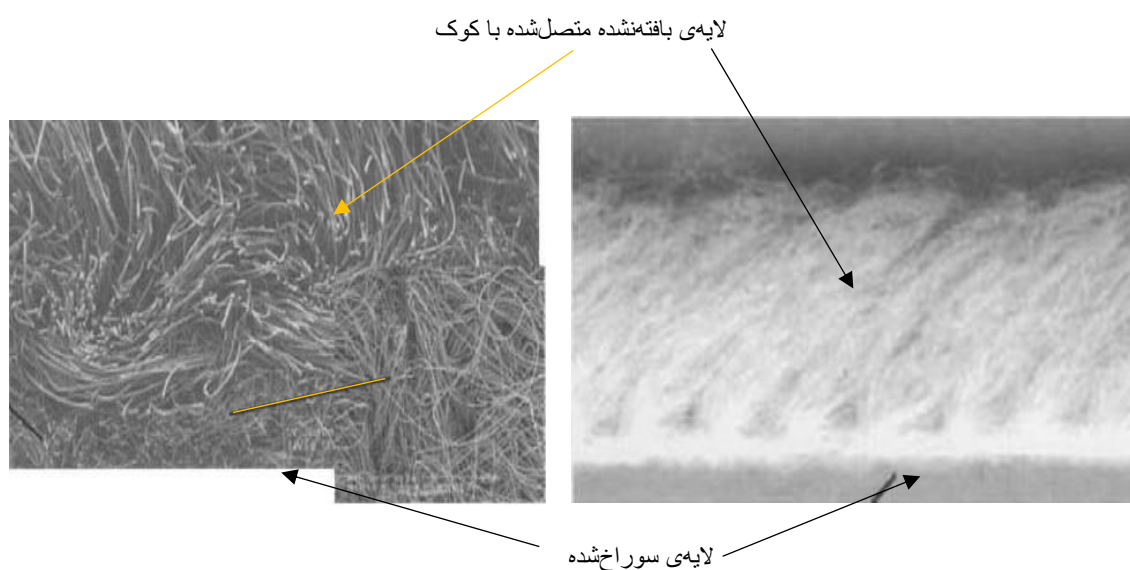
۲- Knitting

۳- Fleeces

۴- Quilted



شکل ۲-۳۱: فرایند کوک با سوزن [۳۶]



لایه‌ی بافته‌نشده متصل‌شده با کوک

لایه‌ی سوراخ‌شده

شکل ۲-۳۲: کامپوزیت بافته نشده با اتصال کوک [۳۶]

## ۲-۵-۱-۲-۴ اتصال دهی حرارتی<sup>۱</sup>

شبه‌کمی‌های شامل مواد ترموپلاستیک با نقطه‌ی ذوب کم می‌توانند با اتصال حرارتی محکم شوند. معمولاً مواد با نقطه‌ی ذوب کم، الیاف یا الیاف دوجزئی<sup>۲</sup> هستند. اگرچه پودرهای ترموپلاستیک هم در برخی کاربردها استفاده می‌شود [۳۶].

در ادامه انواع اتصال دهی حرارتی بیان می‌شود:

۱- Thermal Bonding

۲- Bicomponent

۱- نوردکاری یا برجسته‌کاری<sup>۱</sup>: شبکه‌ی گرم شده بین دو غلتک فشرده می‌شود که این نیرو اتصال الیاف ذوب شده و دیگر الیاف در شبکه را در بردارد. اگر غلتک‌ها نرم باشند، اتصال شبکه یکنواخت می‌شود اما اگر غلتک‌ها طرح دار شوند، نتیجه شبکه‌ای برجسته است که در مناطق متراکم اتصالی سخت اتفاق می‌افتد [۳۶].

۲- از طریق اتصال دهی هوایی<sup>۲</sup>: با عبور شبکه از میان خشک‌کن یا گرم‌کن اتصال حرارتی در شبکه ایجاد می‌شود که نتیجه‌ی آن شبکه‌ای حجیم است. اتصال شبکه‌های فیلترهای HAVC<sup>۳</sup> اغلب به این روش انجام می‌شود [۳۶].

۳- اتصال دهی آلتراسونیک<sup>۴</sup>: این فناوری جدید از قدرت انرژی آلتراسونیک برای ذوب و اتصال الیاف ترموپلاستیک استفاده می‌کند. این روش مشابه اتصال دهی با کوک است به این دلیل که در امتداد خطوط باریک شبکه اتفاق می‌افتد. همچنین این روش راهی برای تولید ساختارهای لایه‌ای است [۳۶].

۴- اتصال دهی مذاب داغ<sup>۵</sup>: مذاب داغ ترموپلاستیک اکستروود می‌شود تا اینکه شبکه و اتصال‌های آن ایجاد شوند [۳۶].

## ۲-۵-۱-۲-۲-۵ اتصال دهی شیمیایی

این روش شامل استفاده از چسب یا رزین برای اتصال دادن شبکه است. چسب‌های لاستیکی یکی از عمومی‌ترین چسب‌های مورد استفاده در این روش هستند [۳۶].

---

۱- Calendaring or Embossing

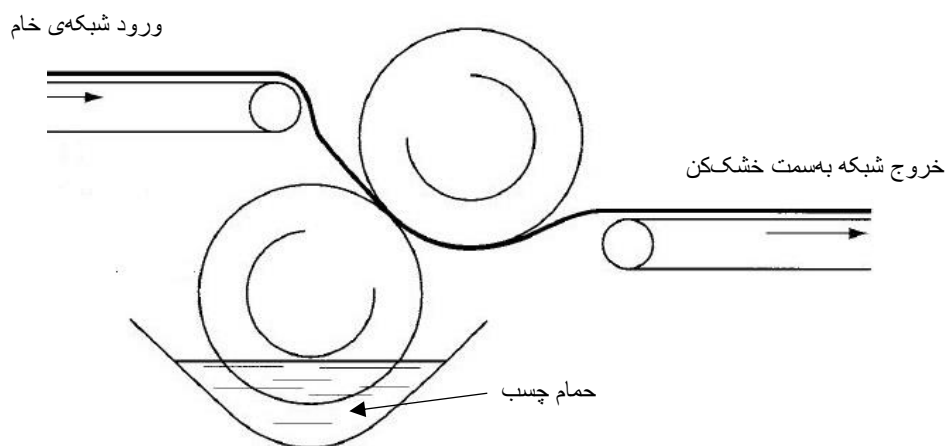
۲- Through Air Bonding

۳- Heat Ventilation Air Conditioning

۴- Ultrasonic Bonding

۵- Hot Melt Bonding

در این روش ابتدا شبکه بر روی غلتک‌های آغشته به رزین قرار می‌گیرد سپس غلتک‌ها فشاری وارد می‌کنند که کمک کند تا رزین به داخل شبکه نفوذ کرده و یک اتصال یکنواخت به دست آید و همچنین رزین اضافی حذف شود. در نهایت شبکه آغشته به رزین به سمت خشک‌کن می‌رود. البته می‌توان مراحل دیگری نیز ما بین آغشته شدن شبکه به رزین تا خشک‌کن اضافه نمود از جمله استفاده از لوله‌های حاوی چسب که چسب را اسپری کرده که این راه مؤثری برای اتصال شبکه‌های نازک و یا با استحکام کم است [۳۶].



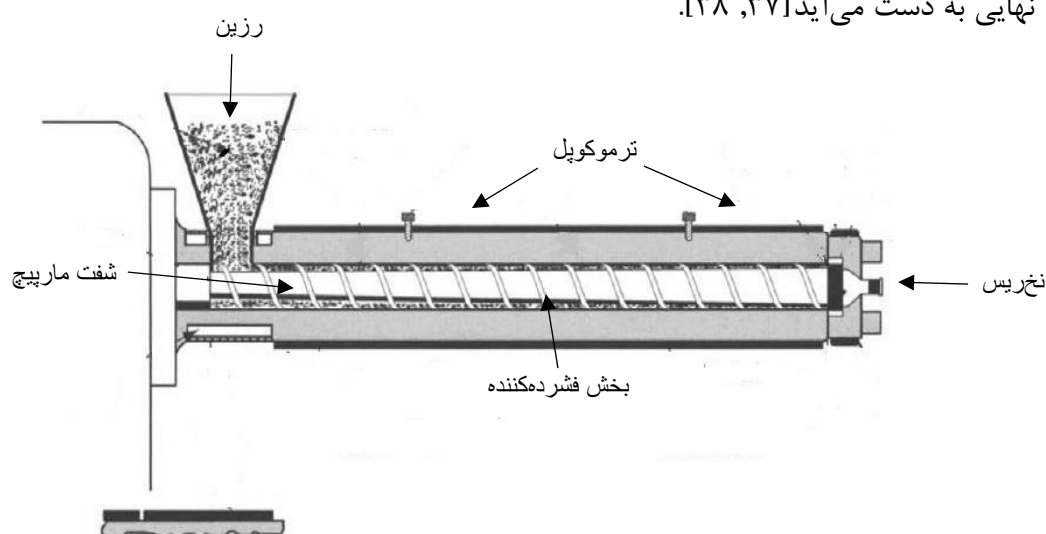
شکل ۲-۳۳: اتصال شیمیایی [۳۶]

### ۳-۱-۵-۲ اسپان باند شبکه‌ها<sup>۱</sup>

این فرایند به طور کلی شامل ذوب پلیمر، حمل پلیمر مذاب، فیلتراسیون پلیمر مذاب، اکستروژن رشته، کشش رشته، ته‌نشینی رشته و اتصال است. پلیمرهایی مثل پلی‌استر، پلی‌پروپیلن، نایلون و پلیمرهایی که بتوان آن‌ها را به الیاف شکل‌دهی کرد [۳۶].

این فرایند با پلیمری شروع می‌شود که به شکل پودری، گرانولی و گلوله‌ای باشد. با وارد شدن پلیمر به درون قیف هوای گرم دمیده می‌شود تا پلیمرهای باقی‌مانده در قیف تخلیه شود. با ورود پلیمر به اکسترودر، پلیمر مذاب شده و با شفتی مارپیچی به سمت صفحه‌ی تصفیه می‌رود. این صفحه وظیفه‌ی

حذف مواد جامد از مذاب را بر عهده دارد. سپس وارد قالبی می‌شود که شامل جز است. اولین جز توزیع‌کننده پلیمر است که نقش ایجاد تعادل بین جریان و زمان نگهداری را دارد. دومین جز نخ‌ریس است<sup>۱</sup> که شامل هزاران سوراخ با قطر در حدود  $0/6$  میلی‌متر است. پس ورود رشته‌ها به محفظه‌ای عمودی و دراز جریان هوا باعث سرد شدن رشته‌ها می‌شود. با متلاطم شدن هوا در محفظه‌ی توزیع، رشته‌های موجود پیچ می‌خورند با مکش و ته‌نشین شدن الیاف پیچ‌خورده روی تسمه‌ی جمع‌کننده شبکه تشکیل می‌شود. با عبور شبکه‌ها از درون غلتک‌های گرم و انتقال آن به یک خنک‌کننده محصول نهایی به دست می‌آید [۳۷, ۳۸].



شکل ۲-۳۴: فرایند اسپان باند [۳۶]



شکل ۲-۳۵: خروج الیاف PET از نخ‌ریس [۳۶]

۱- Spinnerette

## ۲-۵-۱-۴ ملت بلون شبکه‌ها<sup>۱</sup>

به طور کلی فرایندی یک مرحله‌ای است که در آن هوا با سرعت بالا در مذاب ترموپلاست دمیده می‌شود و با عبور مذاب از اکسترودر الیاف نازک شکل می‌گیرد. فرایندی که رزین‌ها را به الیاف بدون بافت تبدیل می‌کند. پلی‌پروپیلن، پلی‌اتیلن، نایلون ۶، نایلون ۱۱، پلی‌کربنات، پلی‌استر، PBT<sup>۲</sup> و... از جمله پلیمرهایی هستند که در این فرایند مورد استفاده قرار می‌گیرند [۳۶].

فرایندهای ملوت بلون و اسپان باند از دید تجهیزات و اپراتورها یکسان و مشابه هستند، اما دو تفاوت عمده بین این دو فرایند وجود دارد: ۱- دما و حجم هوای به کار رفته در نازک کردن رشته‌ها. ۲- مکانی که رشته‌ها کشیده می‌شوند یا نیروی نازک‌کننده. فرایند ملت بلون مقدار زیادی هوا با دمای بالا را برای نازک کردن تارها به کار می‌برد. دمای هوا برابر یا اندکی بیشتر از دمای ذوب پلیمر است. در مقابل، فرایند اسپان باند عموماً یک حجم کمتری از هوای نزدیک به دمای محدوده را به کار می‌برد تا ابتدا فیبرها را سرد و سپس نازک کند. در فرایند ملت بلون، کشیدن یا نیروی نازک کردن در نوک قالب به کار برده می‌شود، وقتی پلیمر هنوز در حالت مذاب باشد، ولی در فرایند اسپان باند این نیرو بعد از اینکه پلیمر سرد و جامد شده باشد به کار می‌رود [۳۹].

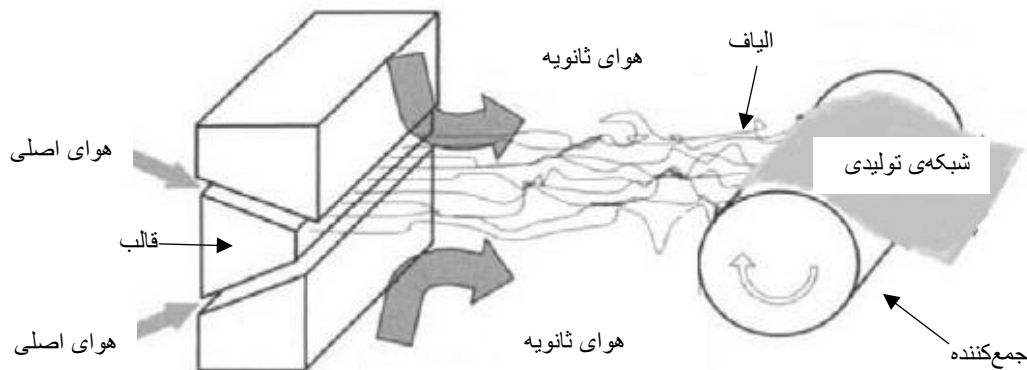
این فرایند همان‌طور که گفته شد شباهت فراوانی به فرایند اسپان باند دارد به همین دلیل به توضیح بخش‌های متفاوت آن خواهیم پرداخت. شکل (۲-۳۶) شمای کلی این فرایند را نشان می‌دهد.

---

۱- Melt-blown Webs

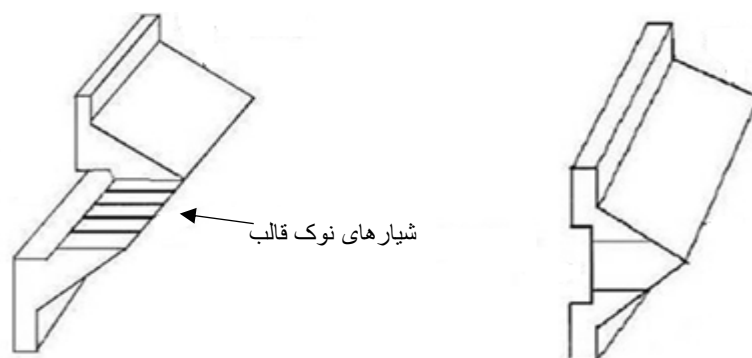
۲- Poly Butylene Terephalate





شکل ۲-۳۶: فرایند ملت‌بلون [۳۶]

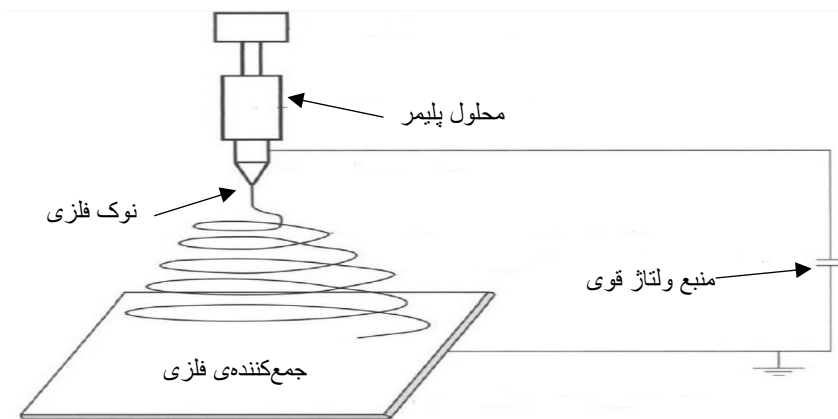
تفاوت این دو فرایند در بخش آخر یعنی تولید رشته‌های پلیمری است که شامل مهم‌ترین بخش فرایند ملت‌بلون یعنی قالب است و همچنین مهم‌ترین قسمت آن نوک قالب است. یکنواختی شبکه کاملاً به طراحی و ساخت نوک قالب بستگی دارد. نوک قالب پهن، توخالی و دارای صدها روزنه در سرتاسر آن است. پلیمر مذاب از درون روزنه‌ها عبور کرده تا رشته‌ها شکل بگیرند و سپس دمیدن هوای داغ از شیارهای بالا و پایین سبب نازک شدن رشته‌ها در حدود میکرو می‌شود. قطر روزنه‌ها در حدود  $0/4$  میلی‌متر و شتاب هوا در حدود  $0/5$  تا  $0/8$  سرعت صوت است. میکروالیاف پس از بیرون آمدن روی جمع‌کننده به صورت تصادفی قرار گرفته و سرد می‌شوند. بدین صورت شبکه‌ی بدون بافت تولید می‌شود. سرعت و فاصله‌ی جمع‌کننده از نوک قالب می‌تواند در تولید شبکه‌های مختلف تأثیرگذار باشد [۳۶، ۳۹، ۴۰].



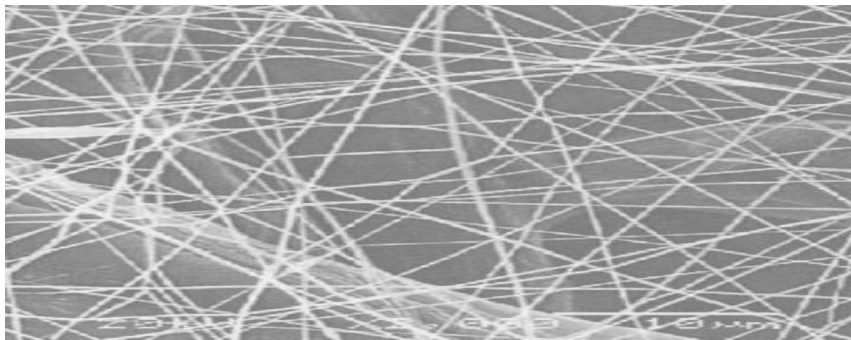
شکل ۲-۳۷: نوک قالب [۳۲]

## ۲-۵-۱-۵ الکترواسپان شبکه‌ها<sup>۱</sup>

در ۱۹۳۴ توسط آنتون فورمهالز<sup>۲</sup> فرایند الکترواسپینینگ<sup>۳</sup> اختراع شد. فرایندی که در آن شبکه‌هایی با نانوالیاف تولید می‌شوند. این فرایند با اعمال ولتاژ بالا بر روی محلول یا مذاب پلیمر و استفاده از بار برای کشیدن محلول از نوک باریک و سپس تولید شبکه با جمع‌آوری الیاف انجام می‌گیرد. قطر الیاف در حدود ۰/۲۵ میکرومتر است و گستره‌ی ولتاژ در حدود ۵ تا ۳۰ کیلوولت است. الیاف کشیده شده با نزدیک شدن به جمع‌کننده با سرعت منجمد می‌شوند. جمع‌کننده یک صفحه مسطح است که ممکن است قابل چرخش و حرکت باشد. پلیمرهای قابل استفاده در این روش شامل نایلون ۶، پلی‌یورتان، سلولز استر و سیلیکا می‌باشند [۳۶، ۴۱، ۴۲].



شکل ۲-۳۸: فرایند الکترواسپان [۳۶]



شکل ۲-۳۹: بستر فیلتر با زیر لایه‌ی نانوالیاف سلولز ساخته شده به روش الکترواسپان [۳۶]

۱- Electrospun Webs

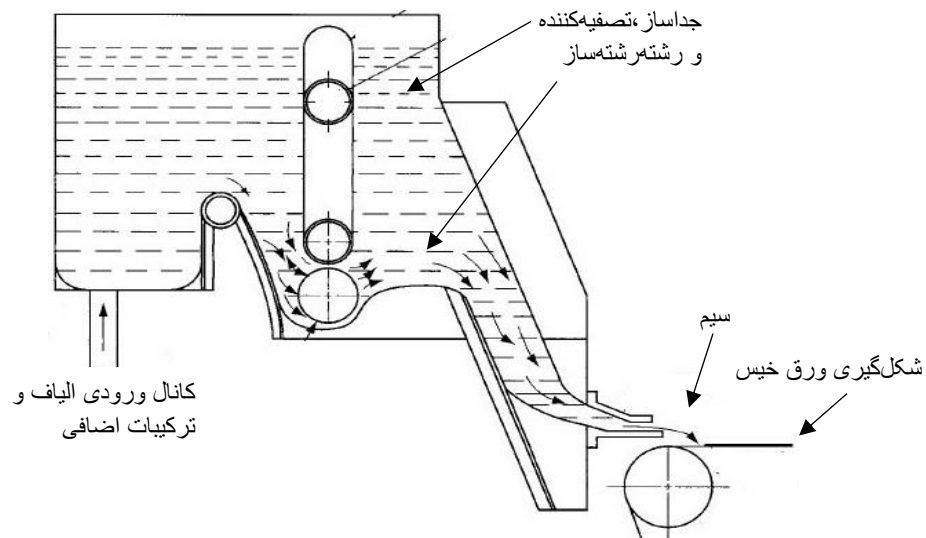
۲- Anton Formhals

۳- Electrospinning

## ۲-۵-۲ فرایند چیدن تر<sup>۱</sup>

### ۱-۲-۵-۲ شکل دهی شبکه‌ها در این فرایند

این فرایند با اضافه شدن ترکیبات و الیاف به آب در ظرف پراکنده کننده شروع می‌شود. با تشکیل محلول<sup>۲</sup>، چندین فرایند روی آن انجام می‌شود که شامل تصفیه و رشته‌رشته کردن الیاف برای کمک به بهترشان اتصال می‌شود. قبل از ورود محلول بر روی ماشین ورق ساز، آب اضافی برای رقیق‌سازی آن اضافه می‌شود. سپس الیاف موجود در محلول توسط سیم جدا شده و ورقه خیس شکل می‌گیرد [۳۶].



شکل ۲-۴۰: شکل دهی در فرایند چیدن تر [۳۶]

### ۲-۲-۵-۲ خشک کردن شبکه‌ها

برای حذف آب اضافی و خشک کردن ورق اغلب از وسایل مکانیکی از جمله دستگاه فشار و شکاف مکش استفاده می‌شود، اگرچه در بهترین حالت ۵۰٪ تا ۶۰٪ رطوبت با این روش‌ها کاهش می‌یابد. بیشتر بسترهای تولیدی به این روش پرس نمی‌شوند، چون پرس باعث متراکم شدن ورق‌ها می‌شود [۳۶].

آب باقی‌مانده به روش حرارتی حذف می‌شود که شامل خشک‌کن‌های هوای گرم، وسایل دارای

۱- Wet Lay Process

۲- Slurry

مادون قرمز، گرم‌کن‌های ماکروویو و یا ترکیبی از آن‌ها است. اغلب خشک‌کن‌ها دراز، مستقیم و مسطح هستند و ممکن است به بخش‌های مختلف برای خشک‌کردن تقسیم شوند، امکان پخته شدن رزین موجود در شبکه هم به وجود می‌آید [۳۶].

## ۲-۵-۲-۳ اتصال دهی شبکه‌های بافته‌نشده

این مرحله به روش‌های مختلفی انجام می‌شود. در روش اول الیاف خمیری سلولز در آب به هم متصل می‌شوند با مکانیزم شیمیایی که به اتصال دهی هیدروژن<sup>۱</sup> شناخته می‌شود. این مکانیزم اساسی در تولید کاغذ است. بیشتر شبکه‌های بافته‌نشده دارای درصدی خمیر سلولز هستند که استحکام و بی‌عیبی شبکه را فراهم می‌کند. در روش دوم چندین نوع رزین یا عامل شیمیایی می‌تواند به محلول الیاف اضافه شود تا خواص استحکام شبکه را افزایش دهد. عامل افزودنی کاتدی، باعث جذب الیاف آندی می‌شوند و آن را خنثی می‌کنند. افزودنی‌های شیمیایی همچنین برای نگه داشتن پرکننده‌های جامد مثل خاک و پودر کربن فعال استفاده می‌شوند. عمومی‌ترین افزودنی‌های کاتدی شامل ملامین فرمالدهید<sup>۲</sup>، پلی‌آمید اپیکلوروهایدرین<sup>۳</sup>، فرمالدهید است. روش سوم اضافه کردن الیاف چسبناک است که شامل الیاف پلی‌ونیل‌الکل و الیاف با نقطه ذوب کم است [۳۶].

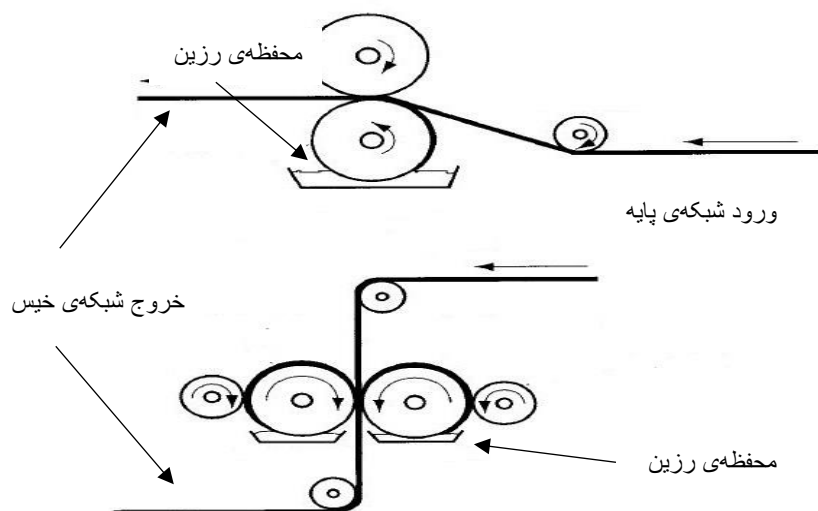
بیشتر ساختارهای بافته‌نشده برای بستر فیلترها پس از شکل‌گیری شبکه به رزین آغشته می‌شوند. با توجه به شکل (۲-۴۱) می‌توان مراحل آغشته‌سازی را مشاهده نمود. این مرحله مانند فرایند اتصال دهی شیمیایی که قبلاً توضیح داده شده است [۳۶].

---

۱- Hydrogen Bonding

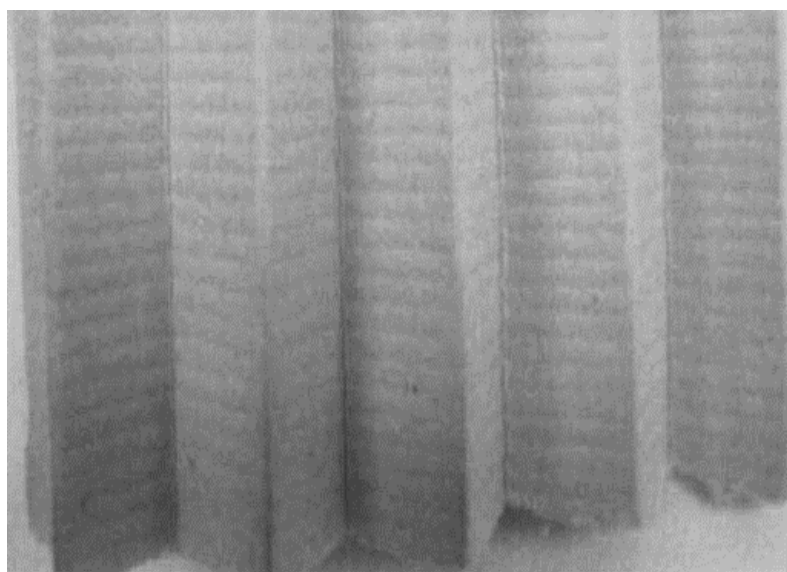
۲- Melamine Formaldehyde

۳- Polyamide Epichlorohydrin



شکل ۲-۴۱: پرس‌های افقی و عمودی فرایند چیدن تر برای اتصال دهی [۳۶]

در نهایت مراحل پایانی این فرایند که شامل شیاردار کردن<sup>۱</sup> برای افزایش سطح بستر است. برشکاری بستر در اندازه‌های مختلف، ساخت کیسه<sup>۲</sup> که این مرحله مخصوص ساخت بستر فیلترهای کیسه‌ای و پاکتی است [۳۶].



شکل ۲-۴۲: بستر نهایی شامل شیار [۳۶]

- 
- ۱- Corrugating
  - ۲- Bag Making

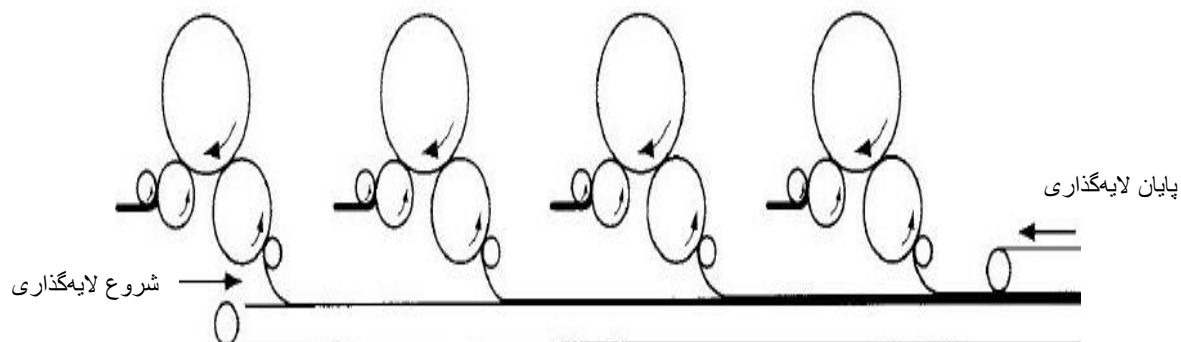
## ۲-۵-۳ ساختارهای کامپوزیتی

### ۲-۵-۳-۱ فرایند SMS

در این فرایند یک شبکه ملتبلون در بین دو شبکه‌ی اسپان باند قرار گرفته و از میان دو غلتک گرم عبور می‌کند. بدین صورت کامپوزیتی مستحکم به وجود می‌آید [۳۶].

### ۲-۵-۳-۲ ساخت چندلایه

برخی از فرایندهای ساخت قابلیت ساخت بسترهای چندلایه را دارند. خطوط پرداخت با ماشین‌های پرداخت متوالی یکی از این روش‌هاست. برخی از ماشین‌های چیدن تر قابلیت ساخت بسترهای دو و سه لایه را دارند [۳۶].



شکل ۲-۴۳: لایه گذاری شبکه‌ها [۳۶]

### ۲-۵-۳-۳ ورقه ورقه قرار دادن<sup>۲</sup>

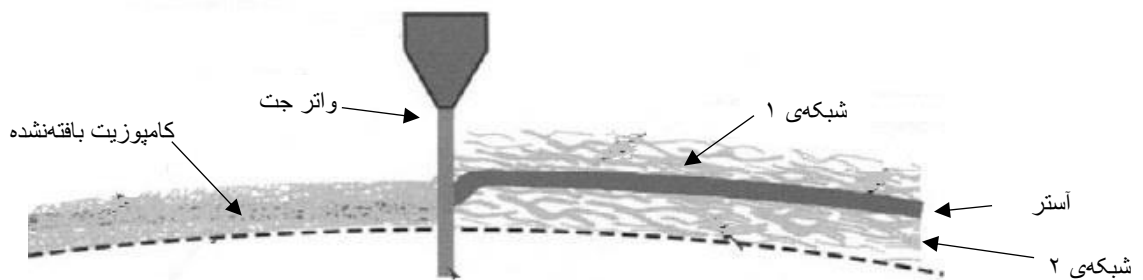
یکی از ساده‌ترین روش‌ها برای تولید ساختار کامپوزیتی با ترکیب دو یا چندلایه است. لایه‌ها با چسب‌های لاستیکی یا چسب‌های مذاب داغ به هم چسبانده می‌شوند [۳۶].

۱- Spunbond-Meltblown-Spunbond

۲- Laminating

## ۲-۵-۳-۴ گیر کردن<sup>۱</sup>

سوراخ کردن با سوزن و اتصال با کوک از راههایی برای ترکیب تک لایه‌ها هستند. در این روش‌ها آستری در بین شبکه‌های بافته نشده قرار می‌گیرد و گیر انداختن الیاف با یکی از دو روش بالا انجام می‌گیرد. آستر اغلب از پارچه بافته شده است و افزایش استحکام را در بردارد [۳۶].



شکل ۲-۴۴: ساختار کامپوزیتی ساخته شده به روش واتر جت<sup>۲</sup> [۳۶]

## ۲-۶ تولید بستر در مقیاس آزمایشگاهی و مقالات

در پایان بخش فرایندهای تولید فیلتر لازم به ذکر است که فرایندهای فوق تجاری شده‌اند و تولیدکننده‌های فیلتر از این روش‌ها برای تولید انبوه انواع فیلترها استفاده می‌کنند؛ اما روش‌های دیگری نیز برای تولید بستر وجود دارد که در حد آزمایشگاهی و مقالات می‌باشند که به برخی از آنها اشاره خواهد شد.

آقای قادر خان‌بابایی و همکاران در سال ۲۰۰۸ با استفاده از پلیمر پلی دی‌متیل سیلوکسان<sup>۳</sup> و پلیمر سوپر شیشه‌ای و ذرات سیلیکا غشایی (بستری) تهیه نموده و با بررسی نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام گرفته بر روی غشا، بهبود در خواص مکانیکی، عبور دهی حاصل گردید. البته افزودن نانوذرات در این تحقیق مورد توجه قرار گرفته بود [۴۳].

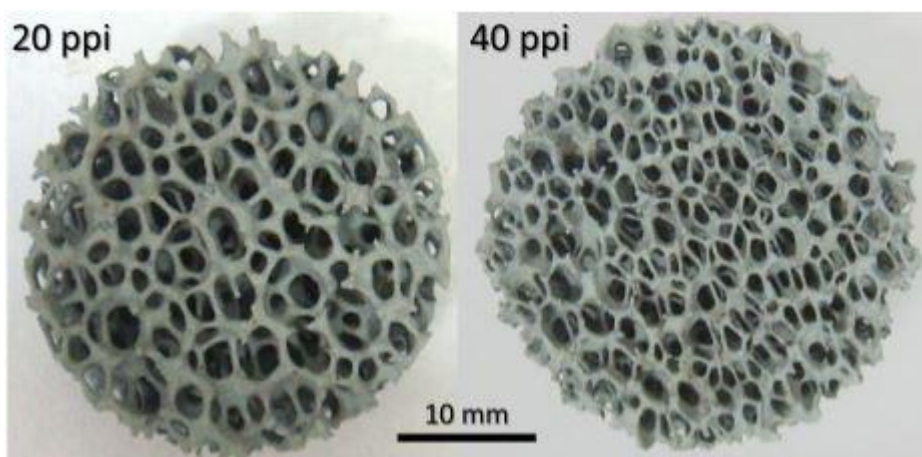
۱- Entanglement

۲- Water Jet

۳- Poly Dimethyl Siloxane

خانم گلبابایی و همکارانش در پژوهشی که در سال ۱۳۹۴ انجام گرفت بسترهای نانولیفی حاوی نانوذرات را توسعه دادند. در این پژوهش با تهیه محلول با غلظت‌های مختلف از پلیمر پلی آکریلو نیتریل و حلال دی متیل فرمالدهید و نانوذرات اکسید منیزیم و سپس ساخت الیاف از این محلول، بسترهای مختلف با توجه به غلظت محلول اولیه تولید می‌شود. با ارزیابی نتایج آزمون‌ها غلظت محلول تأثیر زیادی بر ویژگی‌های فیلتر دارد. در پایان کارایی فیلتر بهینه شده و قابل قیاس با فیلترهای هپا بوده و همچنین افت فشار کمتری در آن به وقوع پیوست [۴۴].

در سال ۲۰۱۵ آقای اینوستینی<sup>۱</sup> و همکاران با ساخت فوم‌های سیلیکون کاربرد پوشش داده شده با نانوسیم‌های سرامیکی که شامل  $\text{Si}_2\text{N}_2\text{O}$  بود، فیلترهایی با بازده بالا تولید نمودند. روش ساخت فیلتر فرایند رشد درجای<sup>۲</sup> نانوسیم‌ها بر روی دیواره‌ی سلول‌های فوم بود. با انجام آزمایش‌های نفوذپذیری، آئروسول<sup>۳</sup> و آنالیز میکروساختار نتیجه بر این اساس رقم خورد که افت فشار مطلوب و در حد فیلترهای هپا به دست آمد و همچنین بازده فیلتر هم به خوبی فیلترهای هپا بود [۴].



شکل ۲-۴۵: فوم سیلیکون کاربرد استفاده شده برای زیرلایه [۴]

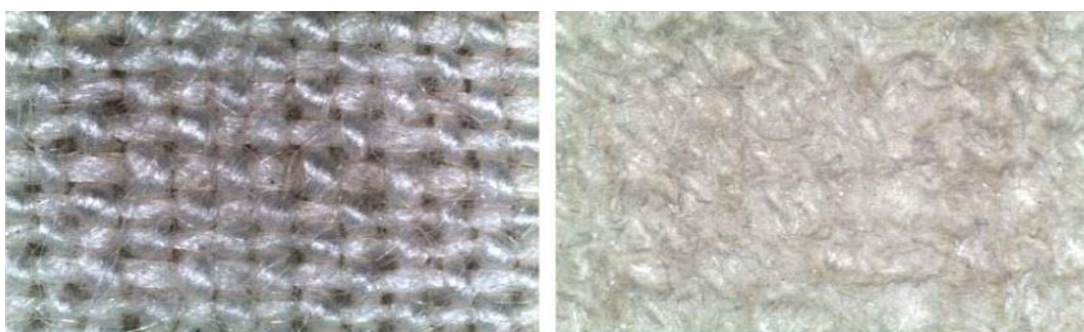
۱- Innocentini

۲- In Situ

۳- Aerosol



آقای میاو<sup>۱</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۱ با استفاده از یک ماشین اسپان لیس با سه تزریق کننده، الیاف کتان بافته شده که با پارچه حمایت شده بود را اسپان لیس نموده و این عملیات روی دو طرف بستر انجام پذیرفت. سپس با انجام آنالیز میکروساختار و آزمایش‌های فیلتراسیون متوجه عوض شدن خواص محصول حاصل از عملیات فوق شدند. به عنوان مثال شکاف بزرگ بین الیاف بافته شده با فشار بالای واترجت به شکاف‌های ریز تبدیل شد که بر روی بازده فیلتر تأثیرگذار بود و همچنین با تولید شبکه‌ای نانویی از الیاف بافته شده استحکام افزایش یافت [۴۵].



(الف)

(ب)

شکل ۲-۴۶: (الف) تصویر الیاف بافته شده کتان قبل از اسپان لیس، (ب) تصویر الیاف بافته شده کتان بعد از اسپان لیس [۴۵]

در سال ۱۹۹۹ آقای آن<sup>۲</sup> و همکارانش با استفاده از کامپوزیت‌های متخلخل پلیمری تولید شده به روش سینترینگ اکستروژن پیوسته از پودرهای پلیمرهای پلی پروپیلن به عنوان ماده‌ی اصلی و پلی اتیلن به عنوان متصل کننده، بسترهایی ساخته و مورد آزمایش قرار دادند. با توجه به اختلاف نقطه‌ی ذوب دو پلیمر، هرچه خواص ذوبی افزایش یافت اندازه‌ی تخلخل‌ها کاهش و همچنین استحکام کششی افزایش پیدا کرد. با وجود افزایش افت فشار اما بازده فیلتراسیون ۹۷٪ بود که کامپوزیت ساخته شده به این روش را مناسب برای استفاده در صنایع مختلف می‌نمود. مشخصات فیلترسازی در این روش رابطه‌ی نزدیکی با حجم و محتوای اکستروژن، دمای قالب، نقاط ذوب پلیمرها دارد [۴۶].

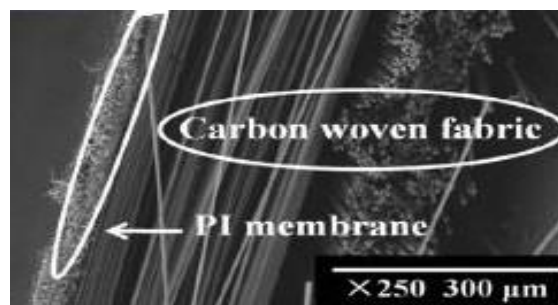
۱- Miao

۲- Ahn



شکل ۲-۴۷: کامپوزیت متخلخل پلیمری ساخته شده به روش سینترینگ اکستروژن پیوسته [۴۶]

آقای ونگ<sup>۱</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۵ خواص فیلتراسیون غشای نانوالیاف پلی‌ایمید<sup>۲</sup> که بین دو پارچه‌ی بافته‌شده‌ی کربن ساندویچ شده و با استفاده از گاز داغ تولیدشده بودند را مورد بررسی قرار دادند. با توجه به نتایجی که به دست آمد مشخص شد که بازدهی آن تا ۹۶٪ افزایش یافته و در نتیجه می‌تواند رقیب خوبی برای فیلترهای هیپا باشد [۴۷].



شکل ۲-۴۸: تصویر SEM از سطح مقطع فیلتر [۴۷]

## ۲-۷ فاکتورهای مؤثر بر گیراندازی ذرات در بستر فیلترها

نکته‌ای که قابل ذکر در این قسمت است و به نوعی این قسمت را با قسمت ۲-۸ مرتبط می‌سازد پارامترهایی است که در بستر و گاز وجود دارند و قابل اندازه‌گیری هستند و به نوعی بر روی بازدهی فیلترها تأثیرگذار می‌باشند. فاکتورهای مؤثر بر جذب ذرات عبارتند از:

۱- Wang

۲- Polyimide

- ۱- خواص فیزیکی بستر فیلتر که شامل پارامترهای فیزیکی مثل اندازه فیبرها، ضخامت فیلتر، توزیع تخلخلها و اندازهی تخلخلها است و اثرات زیادی بر روی عملکرد بستر دارد.
- ۲- شرایط گاز که شامل دمای گاز، دمای گاز، جریان گاز و ویسکوزیته گاز است.
- معمولاً افزودن نانوفیبرها به میکروفیبرها سبب بهبود عملکرد فیلتر می‌شود [۵، ۲۷].

## ۲-۸ آزمایش‌های مهم فیلترهای گاز

با توجه به قسمت ۲-۷ در حالی که عوامل گوناگونی در بازدهی فیلترها مؤثر هستند اما در این بخش به شرح دو آزمایش مهم و استانداردهای آنها، برای فیلترها به خصوص فیلترهای گاز خواهیم پرداخت. آزمایش‌ها بر اساس استانداردهای شرکت گاز شامل IGS-M-PM-111(0):2013 Dry Gas Filter Cartridge, IGS-PM-103(0):1990 Filter-Separator و IGS-PM-105(0):1990 Dry Gas Filter هستند و همچنین دو استاندارد جهانی که اسامی آنها در مباحث بعد آمده، انتخاب و بررسی شده‌اند [۴۸-۵۰].

### ۲-۸-۱ آزمایش آئروسول<sup>۱</sup>

مهم‌ترین آزمایشی که برای بسترهای فیلترها به خصوص فیلترهای گاز انجام می‌شود این آزمایش است. این آزمایش با توجه به استاندارد EN799 انجام می‌شود. ابتدا نحوه‌ی انجام شرح داده می‌شود و سپس برخی کلمات مهم و پرکاربرد تعریف خواهند شد [۴۸].

با توجه به استاندارد ابتدا دستگاه بدون نمونه به کار گرفته می‌شود سپس نمونه در تونل قرار گرفته و ذره‌ساز<sup>۲</sup> در چند مرحله ذرات با اندازه‌ی متفاوت را تولید می‌کند. اندازه‌ی ذرات از حدود ۰/۲ تا ۵ میکرون است که بر اساس نوع ذره‌ساز متفاوت است. مقدار وزنی مشخصی از ذرات وارد تونل می‌شود. ذره شمار<sup>۳</sup> شروع به رصد ذرات پشت و جلوی می‌کند و بازدهی نمونه را برای ذرات با اندازه‌ی متفاوت

---

۱- Aerosol

۲- Aerosol Generation

۳- Particle Counter

تعیین می‌کند. دستگاه ذره شمار مهم‌ترین قسمت این آزمون است که با استفاده از لیزر خیلی دقیق تعیین بازده و راندمان فیلتر را انجام می‌دهد. ذره شمار هم باید حداقل گستره‌ی بین ۰/۲ تا ۵ میکرون را بتواند پوشش دهد. در ادامه تصاویری از دستگاه‌های این آزمایش آورده شده است [۴۸, ۱۲].

لازم به ذکر است با توجه به استانداردهای شرکت گاز بسترها باید قابلیت حذف ذرات بیشتر از ۵ میکرون را داشته باشند [۵۱].



شکل ۲-۴۹: دستگاه ساخت غبار



شکل ۲-۵۱: انواع دستگاه‌های شمارنده ذرات



شکل ۲-۵۰: تونل هوا

در بخش دوم این آزمایش به تعریف برخی واژگان خواهیم پرداخت:

۱- بازدهی<sup>۱</sup> فیلتر: میزان غبار عبوری از فیلتر که با درصد بیان می‌شود و با توجه به اندازه‌ی غبار مقدار آن برای یک فیلتر متفاوت خواهد بود. تعریف دیگری که برای بازده بیان می‌شود تقسیم تعداد ذرات عبور نکرده از بستر بر تعداد کل ذرات است. مهم‌ترین ویژگی برای یک فیلتر که با آزمایش آئروسول قابل اندازه‌گیری است [۱۲, ۴۸].

۲- گیراندازی<sup>۲</sup>: وزنی از غبار که پشت فیلتر گیر می‌کند و با درصد نشان داده می‌شود [۱۲].

۳- DEHS: مایع Diethylsebacate را گویند که برای تولید غبار در آزمایش از آن استفاده می‌شود [۱۲].

۴- ظرفیت<sup>۳</sup>: میزان غبار گیر افتاده در پشت فیلتر تا ماکزیمم افت فشار<sup>۴</sup> در فیلتر رخ دهد. برحسب گرم قابل بیان است [۱۲].

۵- افت فشار: با گیر افتادن غبارها در پشت فیلتر در طی زمان، بین جلو و پشت فیلتر اختلاف فشار پیش می‌آید، به عبارتی منافذ فیلتر بسته شده و فیلتر باید تعویض شود. با توجه به افت فشار ایجاد شده می‌توان زمان تعویض فیلتر را متوجه شد. در جریان‌های متفاوت این افت تغییر می‌کند. واحد آن Pa است. افت فشار بستگی به خواص فیلتر، سرعت و ویسکوزیته گاز دارد، پس تعیین افت فشار یکی از راه‌های اندازه‌گیری مقدار راندمان فیلتر است [۱۲, ۴۸].

۶- نفوذ<sup>۵</sup>: نسبت غلظت ذراتی که به فیلتر نزدیک می‌شوند به غلظت ذراتی که از فیلتر عبور می‌کنند گویند و به درصد بیان می‌شود [۱۲].

---

۱- Efficiency  
۲- Arrestance  
۳- Capacity  
۴- Pressure Drop  
۵- Penetration

۷- عمر مفید: عمر مفید یک بستر نقطه‌ای است که ذرات و آلودگی‌ها حفرات بستر را طوری ببندند که باعث نرخ جریان پایین، راندمان کم و افت فشار زیادتر از حد بحرانی شود [۴۸].

## ۲-۸-۲ تعیین اندازه و توزیع تخلخل‌ها

برای بررسی اندازه و توزیع تخلخل‌های غشاهای نازک استانداردهایی وجود دارد. برای غشاهای پلیمری و کامپوزیتی بهتر است از استاندارد ASTM-F316 استفاده شود. این استاندارد دو نوع روش را پیشنهاد می‌دهد که یکی روش حبابی<sup>۱</sup> و دیگری روش عبور گاز است. در ادامه نحوه انجام آزمون مشخصه یابی اندازه تخلخل بیان خواهد شد [۴۸, ۵۲].

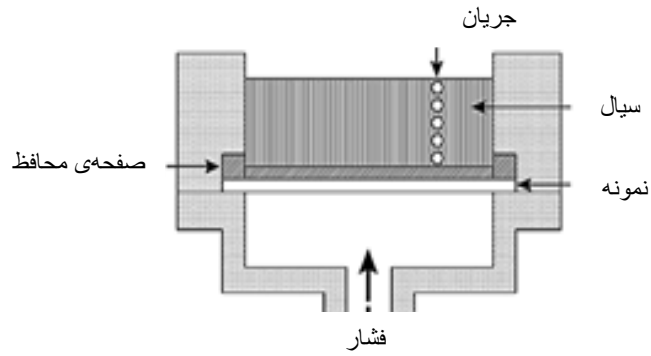
### ۲-۸-۲-۱ روش حبابی

در این آزمون غشا با یک سیال مثل ایزوپروپانل<sup>۲</sup>، آب و یا حتی روغن مرطوب می‌شود. سپس گاز به یک طرف غشا وارد می‌شود. (منظور از گاز، سیال با ماهیت گازی است که می‌تواند حتی هوای فشرده شده محیط باشد) فشار گاز تا جایی بالا می‌رود تا گاز از داخل نمونه شروع به خارج شدن کند. به نقطه‌ای که گاز از فیلتر شروع به خارج شدن می‌کند نقطه bubble point می‌گویند و فشار پشت فیلتر در اولین لحظه خارج شدن گاز را فشار bubble point می‌گویند. این محلول‌ها به گونه‌ای اند که انرژی آزاد سطحی مایع/ جامد (فیلتر) کمتر از انرژی آزاد سطحی گاز/ جامد (فیلتر) است؛ بنابراین مایع ترکننده به صورت خود به خودی حفره‌های موجود در فیلتر را پر خواهد کرد ولی این امکان وجود ندارد که به صورت خود به خودی از فیلتر خارج شود؛ بنابراین کار انجام شده توسط گاز برای جابجا کردن مایع درون حفره، می‌تواند افزایش انرژی آزاد ناشی از افزایش سطح جامد/ گاز را جبران کند. در شکل (۲-۵۲) این موضوع نشان داده شده است [۵۲].

---

۱- Bubble Point

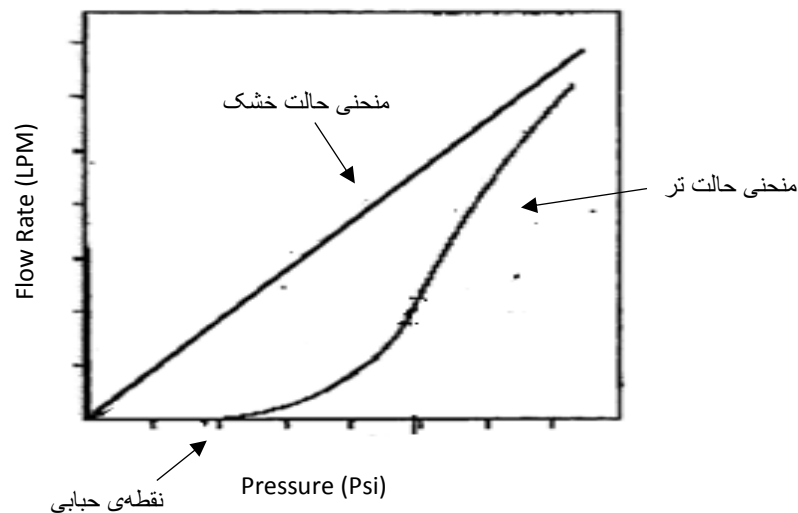
۲- Isopropanol



شکل ۲-۵۲: روش حبابی [۵۲]

## ۲-۲-۸-۲ روش عبور گاز

این آزمون به صورتی انجام می‌گیرد که یک بار فیلتر به صورت خشک در قالب قرار می‌گیرد و منحنی فشار گاز بر حسب دبی گاز خروجی از فیلتر رسم می‌شود. در مرحله بعد از همان فیلتر که توسط محلول مشخصی تر شده است مجدداً این آزمون انجام می‌شود و منحنی فشار گاز بر حسب دبی خروجی از فیلتر رسم می‌گردد. در حالت تر، فشاری که فیلتر در آن شروع به عبور جریان هوا کند را فشار از *bubble point* گویند که مربوط به خارج شدن محلول از بزرگ‌ترین حفره فیلتر است [۵۲].



شکل ۲-۵۳: نمونه‌ای از نمودار حالت خشک و خیس [۵۲]

مزایا	معایب
<b>حبایی</b>	
<p>به صورت چشمی قابل دید است</p> <p>نقطه شروع فشار اندازه بزرگترین تخلخل، در آن قابل محاسبه است</p> <p>نحوه خروج هوا از فیلتر قابل مشاهده است</p> <p>اطلاعات در مورد سیل بودن دستگاه و یا معیوب بودن فیلتر را می دهد</p>	<p>فشار ورودی بعد فیلتر را نمی دهد</p> <p>اختلاف فشار دو طرف فیلتر را نمی دهد</p>

### روش عبور گاز

<p>فشار بعد از فیلتر را می دهد</p> <p>اختلاف فشار و دبی را می دهد</p> <p>تعیین توزیع اندازه تخلخل های یک فیلتر</p> <p>بررسی فرآیندهای انجام گرفته روی فیلتر که می تواند روی اندازه تخلخل فیلتر اثرگذار باشد</p> <p>اندازه گیری بیشترین اندازه تخلخل</p> <p>تعیین نرخ سیلان فیلتر و میزان توانایی عبور گاز فیلتر</p>	<p>اطلاعات در مورد نحوه خارج شدن گاز از فیلتر را نمی دهد</p> <p>سیل بودن یا خراب بودن فیلتر قابل بررسی نیست</p>
---	---

تعیین قطر بزرگترین تخلخل و میانگین اندازه تخلخل های موجود در یک فیلتر با یک مثال توضیح داده می شود. برای مثال می خواهیم بدانیم چند درصد از گاز عبور کرده از فیلتر از گستره ی اندازه  $2 \mu\text{m}$  تا  $8 \mu\text{m}$  عبور کرده است. این کار با اندازه گیری مقدار دبی برای دو حالت تر و خشک بر حسب فشار و با توجه به فرمول (۲-۱) و (۲-۲) قابل انجام است. در شکل (۲-۵۴) این امر با ذکر یک مثال مشخص شده است [۵۲].

اگر کشش سطحی محلول ترکننده مشخص باشد می توان با استفاده از فرمول (۲-۱) فشار را در تخلخل ها با قطرهای مختلف محاسبه نمود:

$$D = C \gamma / P \quad (2-52)$$

$$D = C \gamma / P$$

$$D = \text{قطر تخلخل } (\mu\text{m})$$



$\gamma =$  کشش سطحی (dynes/cm) mN/m

$P =$  فشار

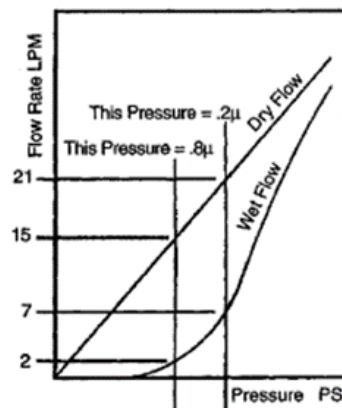
$C =$  عددی ثابت است. این عدد ۲۸۶۰ زمانی که فشار برحسب Pa، ۲/۱۵ زمانی که فشار برحسب

mm Hg، ۰/۴۱۵ زمانی که فشار برحسب psi است.

با جایگذاری فشار در نمودار دبی - فشار، مقدار جریان در حالت خشک و تر به دست آمده و در

فرمول (۲-۲) قرار داده می‌شود.

$$Q = \left[ \left( \frac{\text{wet flow}_h}{\text{dry flow}_h} \right) - 1 \right] \times 100 \quad [52](2-2)$$
$$Q = \left[ \left( \frac{7}{21} \right) - \left( \frac{2}{15} \right) \right] \times 100 = 20\% \left( \frac{\text{wet flow}_h}{\text{wet flow}_h} \right) \times 100$$



شکل ۲-۵۴: مثالی از نحوه تعیین فرکانس اندازه تخلخل [۵۲]

پس از حل مسئله، این موضوع نمایانگر این است که به طور مثال ۲۰٪ از گاز عبور کرده از

تخلخل‌های بین ۲-۸  $\mu\text{m}$  عبور کرده است.

## ۲-۹ هدف و نوآوری پژوهش

نیاز صنایع داخل کشور به فیلترها از طریق واردات این محصول تامین می‌شود، همچنین این نیاز

هر روز رو به افزایش است که نیازمند این است که برای توسعه و تولید داخلی این محصول تلاش‌هایی

صورت گیرد. در این پژوهش از روش قالب‌گیری فشاری استفاده شده است که روش جدیدی در تولید

بسترها به شمار می‌آید و همچنین در مبحث مواد مصرف شده از ترکیب الیاف کربن با رزین فنولیک استفاده شده است.

فصل سوم:

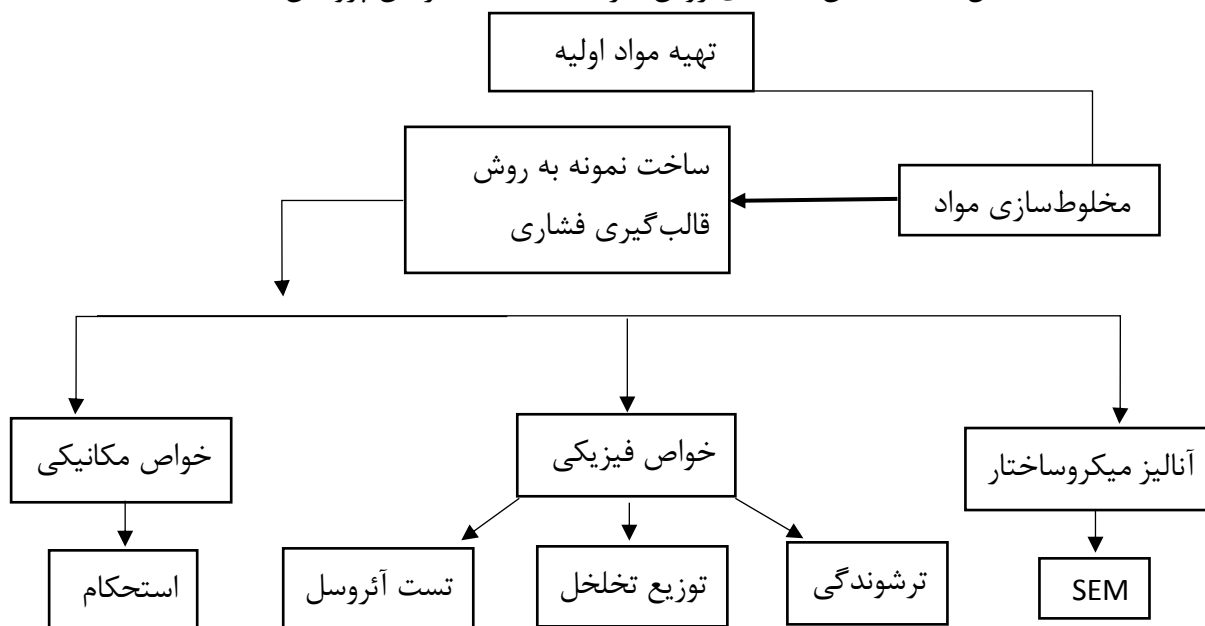
روش تولید و آزمایش‌ها

در این فصل مواد اولیه مصرفی، تجهیزات لازم و دستگاه‌های آنالیز استفاده شده بررسی خواهد

شد.

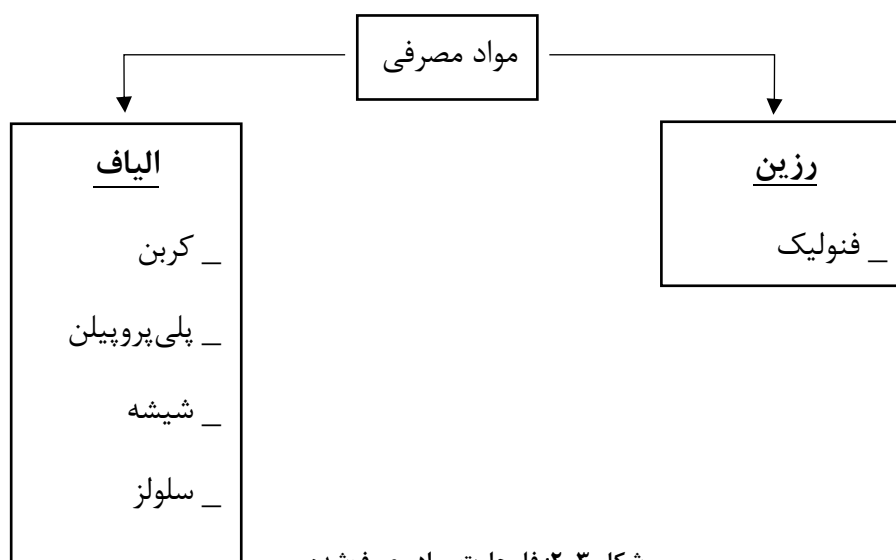
### ۱-۳ مواد اولیه مصرفی

شکل (۱-۳) نشان دهنده روش کار استفاده شده در این پژوهش است.



شکل ۱-۳: فلوجارت فرایند انجام پژوهش

در ادامه به معرفی مواد مصرفی و مشخصات آن‌ها خواهیم پرداخت.



شکل ۲-۳: فلوجارت مواد مصرف شده

رزین فنولیک حدود ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی به الیاف کربن و شیشه اضافه می‌شود. رزین

فنولیک از نوع نوالاک است که دانسیته، نقطه‌ی نرم شدن و ذوب آن اهمیت دارد.

جدول ۳-۱: مشخصات فنولیک

اندازه‌ی دانه ( $\mu\text{m}$ )	Ph	قابلیت حل	نقطه‌ی ذوب ( $^{\circ}\text{C}$ )	نقطه‌ی نرم شدن ( $^{\circ}\text{C}$ )	دانسیته ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )	رنگ
۶۰	۷ تا ۸/۵	محلول در استون، اتیل الکل، اتیلن	۱۰۰ تا ۱۱۵	۷۵ تا ۹۰	۱/۱	پودر زرد

الیاف شیشه پیوسته بوده و برای نمونه‌سازی این الیاف به اندازه‌های ۶، ۱۲ و ۱۵ میلی‌متر چاپد شدند. دانسیته، ماکزیمم دمای عملیاتی از ویژگی‌های مورد استفاده در این پژوهش است.

جدول ۳-۲: مشخصات الیاف E-Glass

ماکزیمم دمای عملیاتی ( $^{\circ}\text{C}$ )	هدایت حرارتی ( $\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}$ )	انبساط حرارت طولی ( $10^{-6}$ $^{\circ}\text{C}$ )	دانسیته ( $\text{gr}/\text{cc}$ )	درصد ازدیاد طول (%)	استحکام کششی (GPa)	مدول (GPa)	رنگ
۵۵۰	۱/۰۵	۵/۴ تا ۵/۰۴	۲/۵۹ تا ۲/۵	۴/۴	۳/۴۵	۷۲/۳۴۵	سفید



شکل ۳-۳: دوک الیاف شیشه

الیاف پلی‌پروپیلن به صورت چاپد شده به اندازه‌های ۶، ۱۲ و ۱۵ میلی‌متر خریداری شده و مورد استفاده قرار گرفت. وزن مخصوص، نقطه‌ی نرم شدن و ذوب از مشخصات مهم مورد استفاده از این

الیاف در این پژوهش بود.

جدول ۳-۳: مشخصات الیاف پلی پروپیلن

رنگ	وزن مخصوص (gr/cm <sup>3</sup> )	نقطه‌ی نرم شدن (°C)	نقطه‌ی ذوب (°C)	مقاومت در برابر اسیدها، قلیاها، نمک‌ها	درصد ازدیاد طول (%)	مقاومت کششی (MPa)	شرایط نگهداری
سفید	۰/۹۱	۱۴۰ تا ۱۵۰	۱۶۰ تا ۱۷۰	زیاد	۸۰	۴۰۰	تا سه سال



شکل ۳-۴: الیاف پلی پروپیلن

الیاف کربن هم به صورت پیوسته بوده و از نوع Toray 300 هستند که برای استفاده در این پژوهش به اندازه‌های ۶، ۱۲ و ۱۵ میلی‌متر چاپد شدند. دانسیته ویژگی از کربن است که مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول ۳-۴: مشخصات الیاف کربن

رنگ	استحکام کششی (MPa)	مدول کششی (GPa)	درصد ازدیاد طول (%)	دانسیته (gr/cc)
سیاه	۴۸۶۰	۳۴۲	۱/۵	۱/۷۵ تا ۱/۸



شکل ۳-۵: دوک الیاف کربن

الیاف سلولز موجود دارای اندازه‌ی ۱۲ میلی‌متر بوده که دمای سوختن و دانسیته آن مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۳-۵: مشخصات الیاف سلولز

رنگ	درصد ازدیاد طول (%)	دانسیته ( $gr/cm^3$ )	دمای سوختن ( $^{\circ}C$ )	شکل سوختن	مقاومت در برابر نور خورشید
سفید	۳ تا ۶	۱/۵	۲۲۰	مثل کاغذ	متوسط



شکل ۳-۶: الیاف سلولز

## ۲-۳ تولید نمونه

با توجه به اینکه روش تولید نمونه‌ها در این پژوهش جدید است. ابتدا برای مشخص شدن رفتار الیاف مختلف در هنگام تولید نمونه‌ها، تعدادی نمونه‌ی اولیه ساخته شد. پس از ساخت نمونه‌های اولیه نکاتی در رفتار الیاف به کار رفته در نمونه‌ها جلب توجه نمود که عبارتند از: ۱- الیاف شیشه چپد شده که اندازه‌ی آن در قسمت پیشین بیان شد هنگام آسیاب به تکه‌های کوتاه‌تر تقسیم شده و همچنین کاملاً مخلوط نمی‌شدند. پس از قالب‌گیری نیز پودر شده بودند. در نتیجه متوجه شدیم که الیاف شیشه برای این روش مناسب نیستند. ۲- الیاف سلولز و پلی‌پروپیلن هم قابلیت اضافه نمودن رزین را نداشتند، به این دلیل که پس از قالب‌گیری مشاهده شد که نمونه‌ای بدون تخلخل تولید شده است. به عبارت بهتر الیاف پلی‌پروپیلن به دلیل این‌که پلیمری هستند و نقطه‌ی نرم شدن و ذوب پایینی دارند، با حرارتی که در این روش ایجاد می‌شود ذوب شده و تعداد تخلخل‌ها در نمونه کاهش می‌یابد. بر همین اساس با توجه به تجربه‌ای که از ساخت نمونه‌های اولیه به دست آمد و همچنین مشاهده‌ی رفتار و خواص الیاف، متغیرها برای هر کدام از الیاف متفاوت است. به همین دلیل جدولی برای ساخت نمونه‌های اصلی تهیه شد که در جدول (۳-۶) قابل مشاهده است.



جدول ۳-۶: نوع نمونه و پارامترهای متغیر آن

پارامترهای متغیر	نوع نمونه
دما (°C): ۲۵، ۸۰، ۱۵۰، ۲۰۰ فشار (Bar): ۵، ۱۵، ۳۰، ۸۰	نمونه‌ی سلولز
اندازه‌ی الیاف (mm): ۶، ۱۲، ۱۵ مقدار پلیمر (%wt): ۱۰، ۱۵، ۲۰ فشار (Bar): ۵، ۲۰، ۵۰	نمونه‌ی کربن
اندازه‌ی الیاف: ۶، ۱۲، ۱۵ دما (°C): ۶۰، ۹۰، ۱۲۰ فشار (Bar): ۵، ۱۰، ۳۰	نمونه‌ی پلی‌پروپیلن

پس از تهیه‌ی جدول فوق تولید نمونه‌های اصلی آغاز شد که مراحل آن به شرح زیر است.

### ۳-۲-۱ مخلوط‌سازی مواد

در این مرحله الیاف شیشه، کربن، سلولز و پلی‌پروپیلن به صورت جداگانه با آسیاب شات می‌شوند، این شات حدود ۶۰ تا ۹۰ ثانیه به طول می‌انجامد. سپس به الیاف کربن و شیشه رزین فنولیک اضافه شد که برای توزیع بهتر رزین دوباره این الیاف در آسیاب قرار گرفته و حدود ۳۰ ثانیه شات می‌شوند. الیاف سلولز و پلی‌پروپیلن همان‌طور که در قسمت قبل گفته شد نیازی به رزین نداشته و پس شات اولیه وارد مرحله‌ی قالب‌گیری شدند.



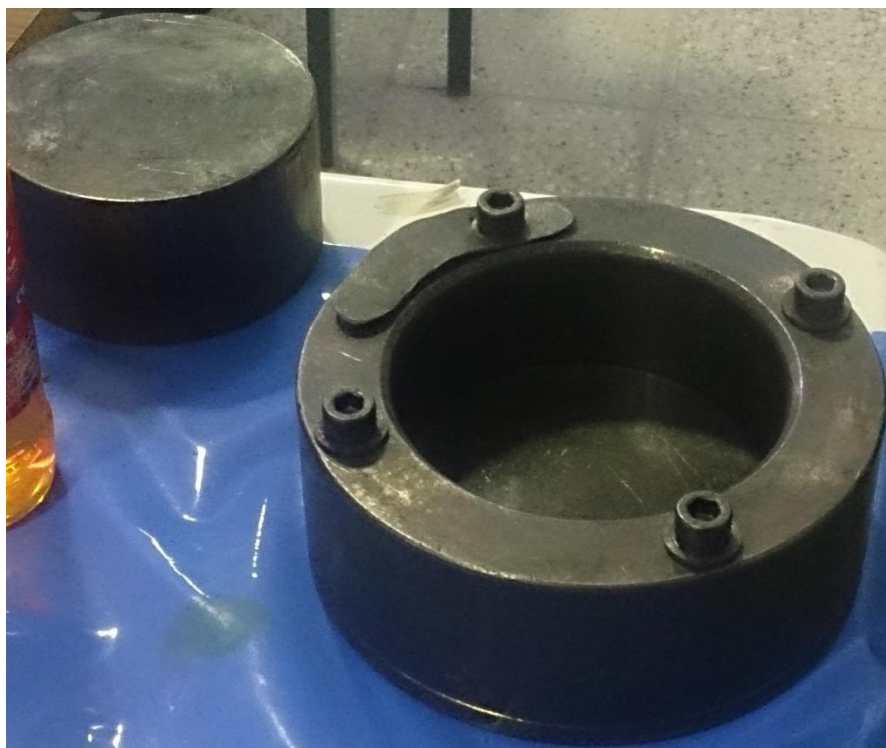
شکل ۳-۷: دستگاه آسیاب

### ۳-۲-۲ قالب‌گیری فشاری

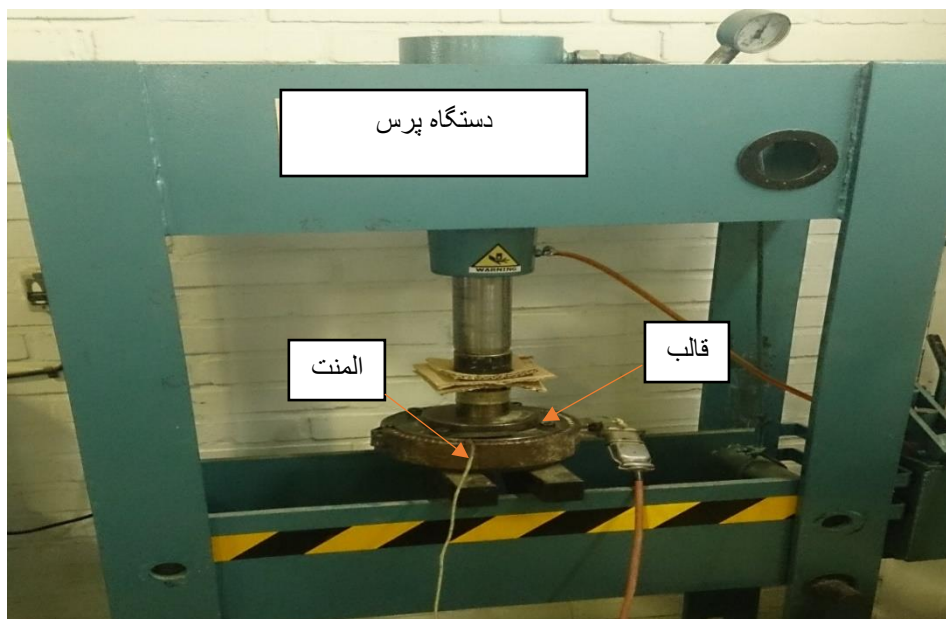
برای انجام این روش، ابتدا قالب تمیز شده و سپس الیاف شات شده درون قالب قرار می‌گیرد. بر اساس محاسبات انجام شده با توجه به متغیرهای هر الیاف، ۱۶ نمونه برای الیاف سلولز، ۹ نمونه برای الیاف کربن و ۹ نمونه هم برای پلی‌پروپیلن باید ساخته شود. فشار پرس براساس نوع الیاف متفاوت است که جدول (۳-۶) مقدار فشار را در هر الیاف نشان داده است. مدت پرس حدود ۱۵ دقیقه است و هنگام رسیدن دمای قالب به دمای مورد نظر هر الیاف که در جدول (۳-۶) نشان داده شده است انجام شد.

شکل قالب و دستگاہی که با آن روش قالب‌گیری فشاری انجام شده است در تصاویر (۳-۸) و

(۳-۹) نشان داده شده‌اند.



شکل ۳-۸: قالب استفاده شده در پژوهش



شکل ۳-۹: قالب‌گیری فشاری

### ۳-۳ آزمایش‌ها

#### ۱-۳-۳ آنالیز میکروساختار

به منظور تصویربرداری از اندازه‌ی تخلخل‌ها و مشاهده‌ی ریزساختار از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. برای انجام این آنالیز از میکروسکوپ الکترونی روبشی با مدل LEO VP 1450 ساخت آلمان واقع در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه فردوسی مشهد استفاده شد.



شکل ۳-۱۰: میکروسکوپ الکترونی روبشی

### ۳-۳-۲ خواص فیزیکی

#### ۳-۳-۱ ترشوندگی

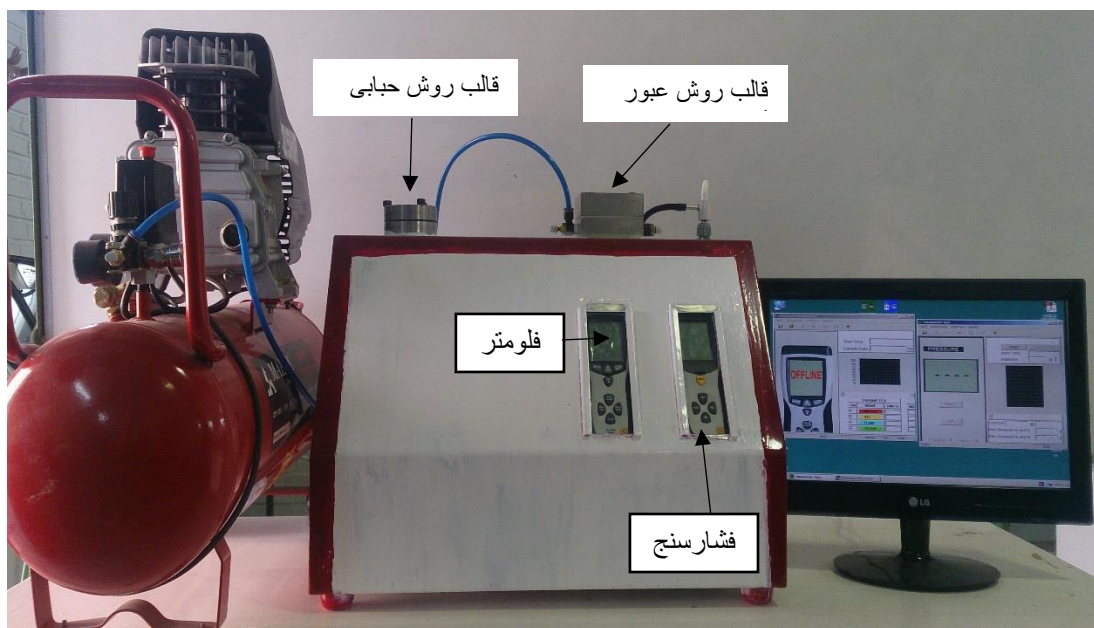
برای آزمون ترشوندگی یا زاویه تماس از دستگاه اندازه‌گیری زاویه تماس و کشش سطحی واقع در آزمایشگاه سنگ و سیالات دانشکده معدن به روش قطره آویزان نشان داده شده در شکل (۳-۱۱) استفاده شد، این دستگاه توسط اساتید و دانشجویان دانشکده‌ی معدن تولید شده بود. در این روش از یک سرنگ با قطر ۱/۰۷۷ میلی‌متر استفاده شد. قطره با سرعت تنظیم شده از طریق لوله باریک به سمت سرنگ و در نهایت روی سطح نمونه افتاد.



شکل ۳-۱۱: دستگاه آزمایش ترشوندگی

### ۳-۳-۲ اندازه و توزیع تخلخل‌ها

برای این آزمایش‌ها از دستگاهی که ساخت و طراحی آن توسط خود استاد این دانشکده انجام شده بود و واقع در کارگاه ریخته‌گری دانشکده مهندسی شیمی و مواد استفاده شد. در این دستگاه سعی شده است که هر دو روش را با دو قالب مختلف و در ساختار یک دستگاه به همراه یک ابزار دقیق ثابت شامل شود. این دستگاه به صورت تلفیق دو روش حبایی و روش عبور گاز ساخته شده است و در هیچ منبع خارجی و یا داخلی نیز نظیر آن مشاهده نشده است.



شکل ۳-۱۲: دستگاه آزمون فیلتر

## الف- روش حبابی

برای انجام این آزمون از روغن استفاده شد و هوای ورودی با استفاده از کمپرسور تأمین شد. دستگاه روش حبابی در تصویر (۳-۱۳) مشاهده می‌شود.

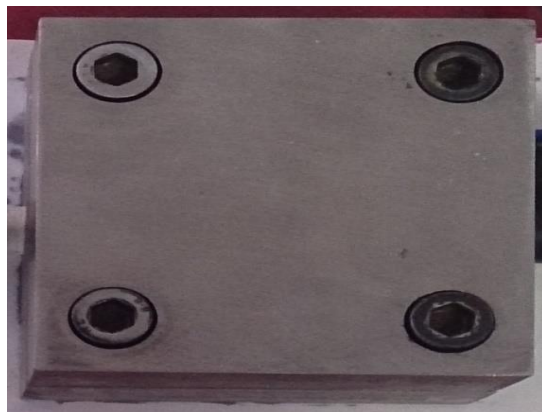
نکات مهمی که در این آزمون باید رعایت شود: ۱- این است که حباب‌ها نباید از کناره‌های المنت خارج شود چون این ناشی از خروج گاز از کنار گسکت است. لذا باید مانند آنچه در استاندارد F316 گفته شده از وسط خارج شود. ۲- یکنواختی فیلتر باید کامل باشد و نباید در حین آزمون شکستی در داخل آن اتفاق بیفتد.



شکل ۳-۱۳: قالب روش حبابی

## ب-روش عبور گاز

برای حالت خیس این روش از روغن روغن حیابی استفاده شد. با فشارسنج و فلومتر فشارهای ورودی و خروجی هوا، جریان هوا، سرعت هوا ثبت می‌شود؛ مانند روش قبل هوای مورد نیاز با استفاده از کمپرسور تأمین شد. تصویر زیر شکل قالب روش عبور گاز را به نمایش می‌گذارد.



شکل ۳-۱۴: قالب روش عبور گاز

## ۳-۲-۳-۳-۳ آزمون آئروسول

این آزمون با دستگاهی که شامل یک تونل، ذره‌ساز و ذره‌شمار است انجام می‌شود. در آزمایشگاه آزادفیلتر با دستگاه Laser Particle Counter شرکت TSI ذرات شمرده شده و بازده تعیین شد.



شکل ۳-۱۵: دستگاه شرکت TSI مدل HHPC-6

### ۳-۳-۳ خواص مکانیکی

#### ۳-۳-۳-۱ مقاومت به پارگی

آزمون با دستگاه ED30 شرکت Ceast ایتالیا انجام شد. این دستگاه برای اندازه‌گیری مقاومت به پارگی نمونه‌های صفحه‌ای طراحی گردیده است، محدوده انرژی قابل اعمال توسط دستگاه برای انجام آزمون از ۴۰۰۰ میلی نیوتن تا ۱۰۰ نیوتن است. این مدل از دستگاه جهت انجام آزمون بر روی کاغذ، آلومینیوم، فیلم‌های پلاستیکی، بسته‌بندی‌های چندلایه منعطف، پارچه‌های بافته‌نشده، مواد با استحکام پایین دیگر طراحی شده است.

در این آزمون که Elmendorf test نیز نامیده می‌شود، ده نمونه از فیلم پلاستیکی به شکل مربع با اندازه‌ی ۶۰ میلی‌متر بریده می‌شود. یک نمونه (شامل یک یا چند ورق) در دستگاه قرار می‌گیرد. یک چاقوی برنده برای ایجاد شکاف در نمونه استفاده می‌شود که این شکاف ۴۳ میلی‌متر از لبه نمونه فاصله دارد. با رها شدن یک پاندول شکاف در طول ۴۳ میلی‌متر باقی‌مانده گسترش یافته و انرژی مصرف شده توسط پاندول برای محاسبه نیروی پارگی میانگین استفاده می‌شود. نتایج به صورت نیروی پارگی با واحد میلی نیوتن ارائه می‌شود. این آزمون با توجه به استاندارد ASTM D1922 انجام می‌شود [۵۳].



شکل ۳-۱۶: دستگاه آزمون مقاومت به پارگی





فصل چهارم:

نتایج و بحث

## ۴-۱ تصاویر نمونه‌ها

در ابتدای این فصل تصاویر مربوط به نمونه‌های نهایی همراه با معرفی از نمونه‌ها بیان شده است سپس به نتایج حاصل از آزمایش‌ها خواهیم پرداخت. شکل (۴-۱) و جدول (۴-۱)، تصاویر و مشخصات بهترین نمونه‌ها را نشان داده‌اند. در این قسمت ملاک از بهترین نمونه‌ها، نمونه‌ای است که نتایج حاصل از تمامی آزمایش‌های انجام گرفته روی آن قابل قبول بوده است.



(ج)

(ب)

(الف)

شکل ۴-۱: (الف) تصویر نمونه‌ی سلولز، (ب) تصویر نمونه‌ی کربن، (ج) تصویر نمونه‌ی پلی پروپیلن

جدول ۴-۱: مشخصات بهترین نمونه‌ها

نام نمونه	مشخصات ساخت
سلولز	دما (°C): ۲۵ فشار (Bar): ۱۵ ضخامت (mm): ۱/۴
کربن	اندازه‌ی الیاف (mm): ۱۲ مقدار پلیمر (%wt): ۲۰ فشار (Bar): ۵ ضخامت (mm): ۱
پلی پروپیلن	اندازه‌ی الیاف (mm): ۱۵ دما (°C): ۶۰ فشار (Bar): ۳۰ ضخامت (mm): ۱/۰۵

در ادامه تصویر نمونه‌ی الیاف شیشه و جدول مربوط به مشخصات آن آورده شده است.



شکل ۴-۲: تصویر نمونه‌ی ۱ شیشه

جدول ۴-۲: مشخصات نمونه‌های شیشه

مشخصات ساخت	نام نمونه
اندازه‌ی الیاف (mm): ۱۲	نمونه‌ی ۱
مقدار پلیمر (%wt): ۱۵	
فشار (Bar): ۱۵	
ضخامت (mm): ۰/۲۹	
اندازه‌ی الیاف (mm): ۱۲	نمونه‌ی ۲
مقدار پلیمر (%wt): ۰	
فشار (Bar): ۱۵	
ضخامت (mm): ۰	

در تصویر (۳-۴) نمونه‌های الیاف کربن نشان داده شده‌اند و مشخصات ساخت هر کدام از آن‌ها در

جدول (۳-۴) آمده است.



(ج)

(ب)

(الف)



(و)

(هـ)

(د)



(ح)

(ز)

شکل ۳-۴: الف) تصویر نمونه‌ی ۱ کربن، ب) تصویر نمونه‌ی ۲ کربن، ج) تصویر نمونه‌ی ۳ کربن، د) تصویر نمونه‌ی ۴ کربن، هـ) تصویر نمونه‌ی ۵ کربن، و) تصویر نمونه‌ی ۶ کربن، ز) تصویر نمونه‌ی ۷ کربن، ح) تصویر نمونه‌ی ۸ کربن

جدول ۴-۳: مشخصات نمونه‌های کربن

نام نمونه	مشخصات ساخت
نمونه ۱	اندازه‌ی الیاف (mm): ۶ مقدار پلیمر (%wt): ۱۰ فشار (Bar): ۵ ضخامت (mm): ۱/۳
نمونه ۲	اندازه‌ی الیاف (mm): ۱۲ مقدار پلیمر (%wt): ۱۰ فشار (Bar): ۲۰ ضخامت (mm): ۱/۲
نمونه ۳	اندازه‌ی الیاف (mm): ۱۵ مقدار پلیمر (%wt): ۱۰ فشار (Bar): ۵۰ ضخامت (mm): ۰/۸
نمونه ۴	اندازه‌ی الیاف (mm): ۶ مقدار پلیمر (%wt): ۱۵ فشار (Bar): ۲۰ ضخامت (mm): ۱/۲۵
نمونه ۵	اندازه‌ی الیاف (mm): ۱۲ مقدار پلیمر (%wt): ۱۵ فشار (Bar): ۵۰ ضخامت (mm): ۰/۸۸
نمونه ۶	اندازه‌ی الیاف (mm): ۱۵ مقدار پلیمر (%wt): ۱۵ فشار (Bar): ۵ ضخامت (mm): ۱/۲
نمونه ۷	اندازه‌ی الیاف (mm): ۶ مقدار پلیمر (%wt): ۲۰ فشار (Bar): ۵۰ ضخامت (mm): ۰/۸۱
نمونه ۸	اندازه‌ی الیاف (mm): ۱۵ مقدار پلیمر (%wt): ۲۰ فشار (Bar): ۲۰ ضخامت (mm): ۰/۹۵

در ادامه تصاویر نمونه‌های پلی‌پروپیلن و مشخصات آن‌ها آمده است.



(الف)

(ب)

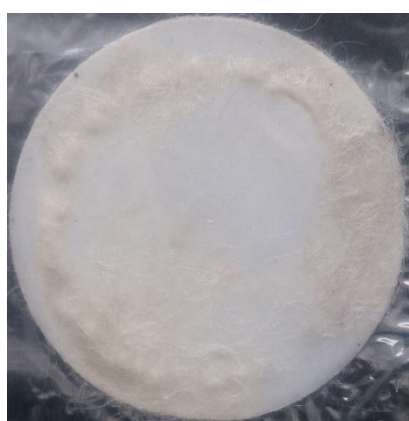
(ج)



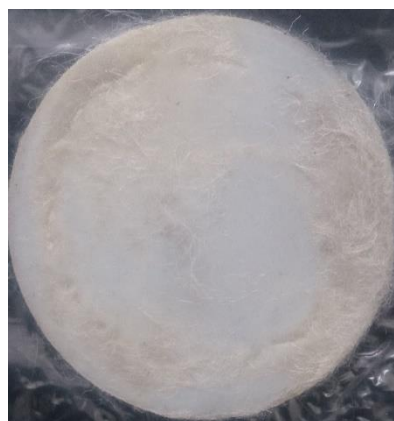
(د)

(ه)

(و)



(ح)



(ز)

شکل ۴-۴: الف) تصویر نمونه‌ی ۱ پلی‌پروپیلن، ب) تصویر نمونه‌ی ۲ پلی‌پروپیلن، ج) تصویر نمونه‌ی ۳ پلی‌پروپیلن، د) تصویر نمونه‌ی ۴ پلی‌پروپیلن، ه) تصویر نمونه‌ی ۵ پلی‌پروپیلن، و) تصویر نمونه‌ی ۶ پلی‌پروپیلن، ز) تصویر نمونه‌ی ۷ پلی‌پروپیلن، ح) تصویر نمونه‌ی ۸ پلی‌پروپیلن

جدول ۴-۴: مشخصات نمونه‌های پلی‌پروپیلن

نام نمونه	مشخصات ساخت
نمونه‌ی ۱	اندازه‌ی الیاف (mm): ۶ دما (°C): ۶۰ فشار (Bar): ۵ ضخامت (mm): ۱/۲
نمونه‌ی ۲	اندازه‌ی الیاف (mm): ۶ دما (°C): ۹۰ فشار (Bar): ۱۰ ضخامت (mm): ۰/۷۵
نمونه‌ی ۳	اندازه‌ی الیاف (mm): ۶ دما (°C): ۱۲۰ فشار (Bar): ۳۰ ضخامت (mm): ۰/۶۵
نمونه‌ی ۴	اندازه‌ی الیاف (mm): ۱۲ دما (°C): ۶۰ فشار (Bar): ۱۰ ضخامت (mm): ۱
نمونه‌ی ۵	اندازه‌ی الیاف (mm): ۱۲ دما (°C): ۹۰ فشار (Bar): ۳۰ ضخامت (mm): ۰/۷۷
نمونه‌ی ۶	اندازه‌ی الیاف (mm): ۱۲ دما (°C): ۱۲۰ فشار (Bar): ۵ ضخامت (mm): ۰/۶۷
نمونه‌ی ۷	اندازه‌ی الیاف (mm): ۱۵ دما (°C): ۹۰ فشار (Bar): ۵ ضخامت (mm): ۰/۹۵
نمونه‌ی ۸	اندازه‌ی الیاف (mm): ۱۵ دما (°C): ۱۲۰ فشار (Bar): ۱۰ ضخامت (mm): ۰/۶۲

تصاویر نمونه‌های سلولز و مشخصات آن‌ها در تصویر (۵-۴) و جدول (۵-۴) نشان داده شده‌اند.



(ج)



(ب)



(الف)



(و)



(ه)



(د)



(ط)

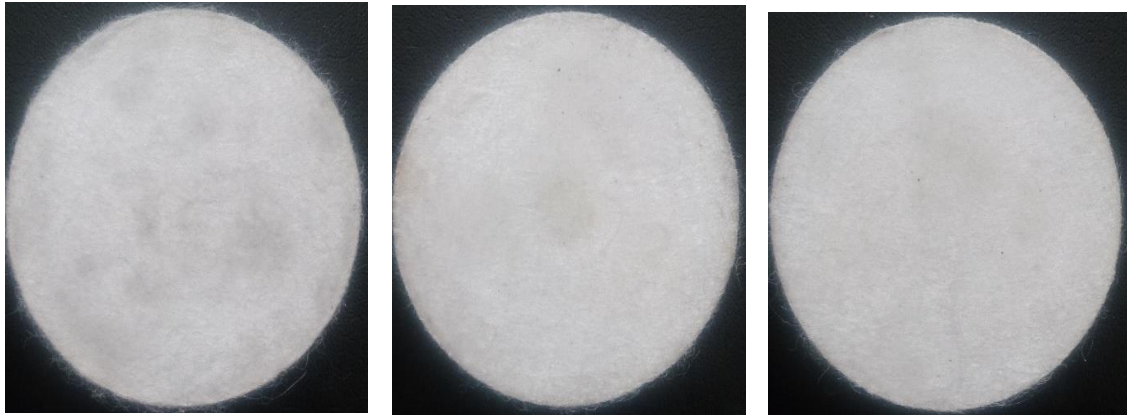


(ح)



(ز)

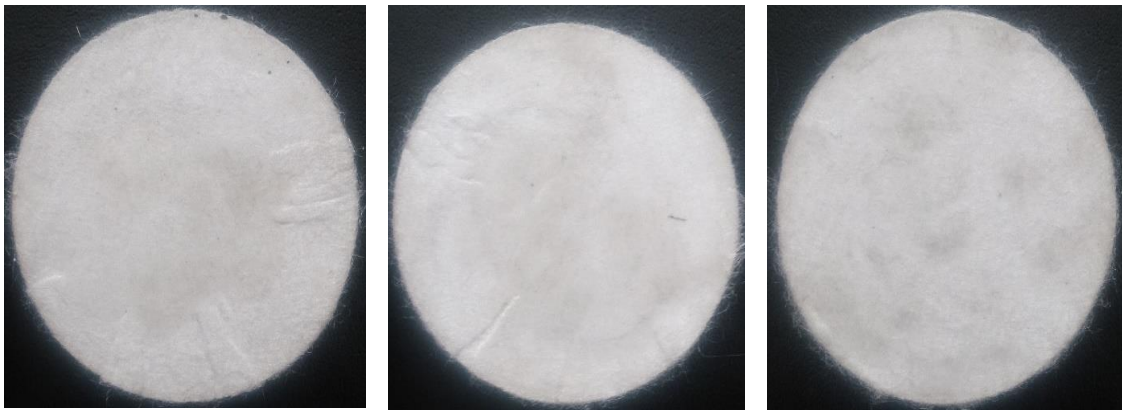




(ج)

(ب)

(ا)



(د)

(هـ)

(و)

شکل ۴-۵: الف) تصویر نمونه‌ی ۱ سلولز، ب) تصویر نمونه‌ی ۲ سلولز، ج) تصویر نمونه‌ی ۳ سلولز، د) تصویر نمونه‌ی ۴ سلولز، هـ) تصویر نمونه‌ی ۵ سلولز، و) تصویر نمونه‌ی ۶ سلولز، ز) تصویر نمونه‌ی ۷ سلولز، ح) تصویر نمونه‌ی ۸ سلولز، ط) تصویر نمونه‌ی ۹ سلولز، ی) تصویر نمونه‌ی ۱۰ سلولز، ک) تصویر نمونه‌ی ۱۱ سلولز، ل) تصویر نمونه‌ی ۱۲ سلولز، م) تصویر نمونه‌ی ۱۳ سلولز، ن) تصویر نمونه‌ی ۱۴ سلولز، س) تصویر نمونه‌ی ۱۵ سلولز

جدول ۴-۵: مشخصات نمونه‌های سلولز

نام نمونه	مشخصات ساخت
نمونه‌ی ۱	دما (°C): ۲۵ فشار (Bar): ۵ ضخامت (mm): ۱/۴۵
نمونه‌ی ۲	دما (°C): ۲۵ فشار (Bar): ۳۰ ضخامت (mm): ۱

نام نمونه	مشخصات ساخت
نمونه ۳	دما (°C): ۲۵ فشار (Bar): ۸۰ ضخامت (mm): ۰/۹
نمونه ۴	دما (°C): ۸۰ فشار (Bar): ۵ ضخامت (mm): ۰/۸۶
نمونه ۵	دما (°C): ۸۰ فشار (Bar): ۱۵ ضخامت (mm): ۰/۸۳
نمونه ۶	دما (°C): ۸۰ فشار (Bar): ۳۰ ضخامت (mm): ۰/۸۲
نمونه ۷	دما (°C): ۸۰ فشار (Bar): ۸۰ ضخامت (mm): ۰/۷۹
نمونه ۸	دما (°C): ۱۵۰ فشار (Bar): ۵ ضخامت (mm): ۰/۵۷
نمونه ۹	دما (°C): ۱۵۰ فشار (Bar): ۱۵ ضخامت (mm): ۰/۵۵
نمونه ۱۰	دما (°C): ۱۵۰ فشار (Bar): ۳۰ ضخامت (mm): ۰/۵۴
نمونه ۱۱	دما (°C): ۱۵۰ فشار (Bar): ۸۰ ضخامت (mm): ۰/۵۱
نمونه ۱۲	دما (°C): ۲۰۰ فشار (Bar): ۵ ضخامت (mm): ۰/۴۹
نمونه ۱۳	دما (°C): ۲۰۰ فشار (Bar): ۱۵ ضخامت (mm): ۰/۴۸

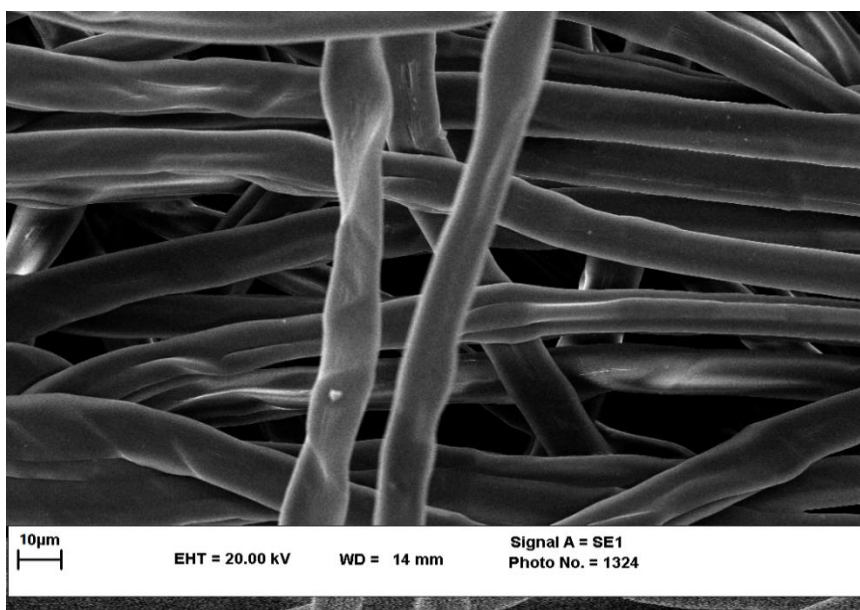
مشخصات ساخت	نام نمونه
دما (°C): ۲۰۰ فشار (Bar): ۳۰ ضخامت (mm): ۰/۴۵	نمونه‌ی ۱۴
دما (°C): ۲۰۰ فشار (Bar): ۸۰ ضخامت (mm): ۰/۴۴	نمونه‌ی ۱۵

## ۲-۴ آنالیز میکروساختاری

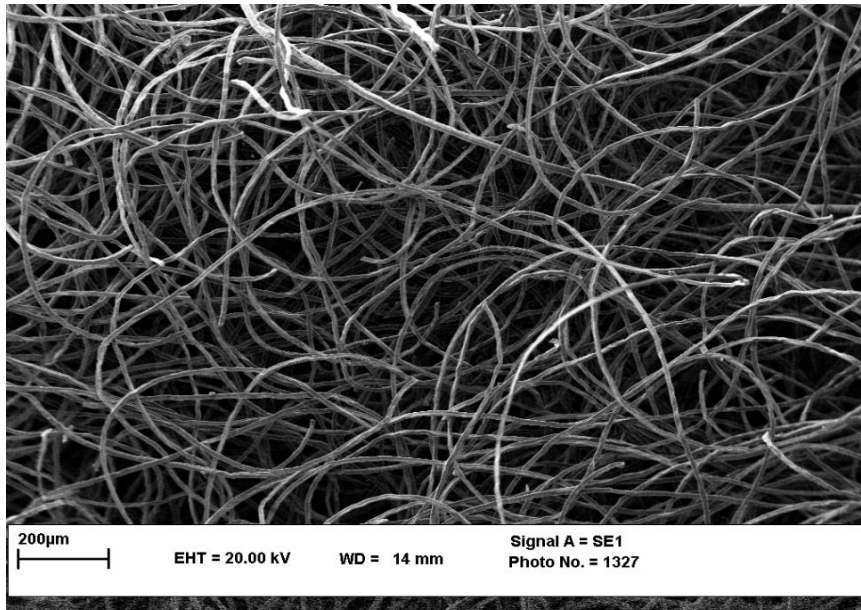
### ۱-۲-۴ آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی

بررسی خواص ریزساختاری یکی از آزمایش‌های انجام شده است. این آزمایش به منظور مشاهده‌ی تخلخل‌ها و سطح انجام گرفت. آماده‌سازی برای نمونه‌ها برای انجام آنالیز صورت نگرفته است و نمونه‌ها با توجه به نتیجه‌ی روش‌های حیایی، تر و خشک انتخاب شدند.

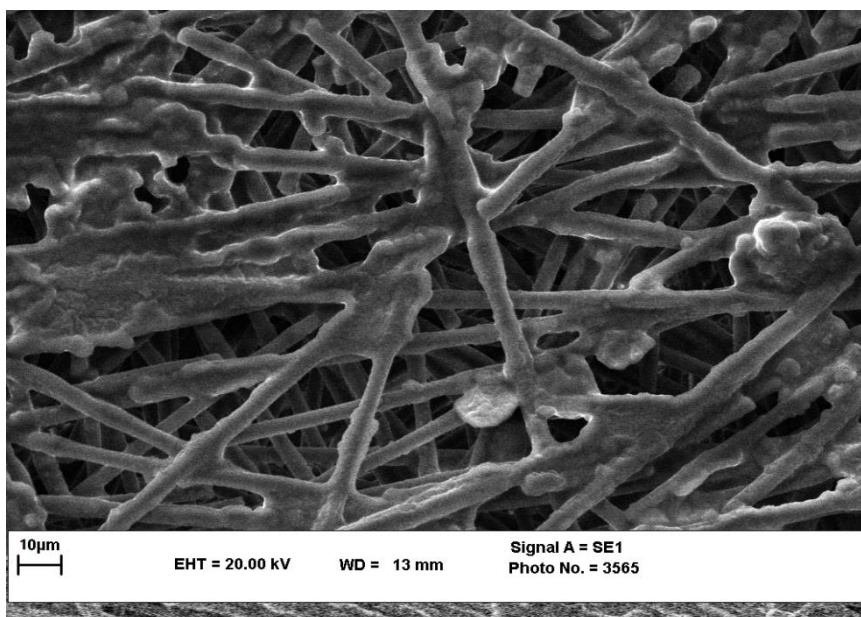
در این آزمایش از سه نمونه‌ی سلولز، کربن و پلی‌پروپیلن در بزرگنمایی‌های عکس‌برداری شد که به ترتیب شکل‌های (۶-۴)، (۷-۴) و (۸-۴) این عکس‌ها را نشان داده است.



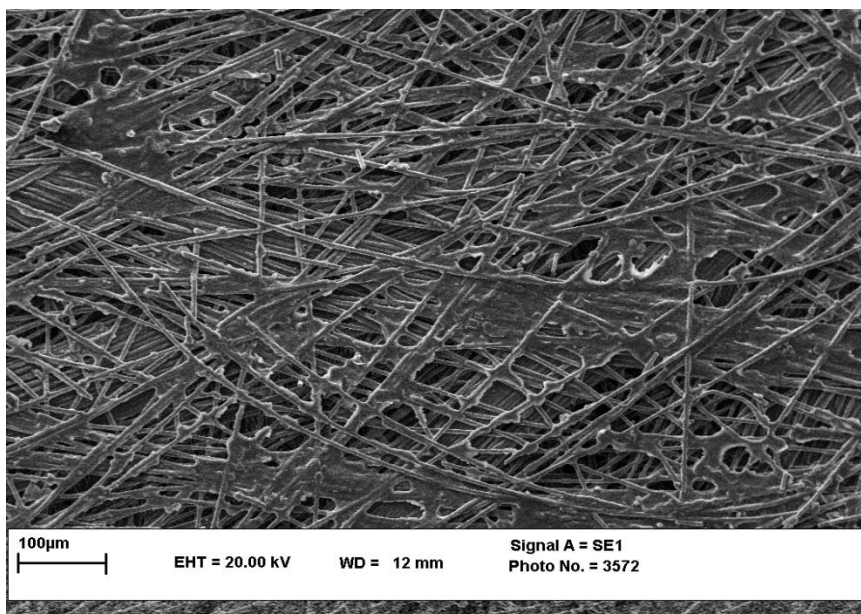
شکل ۶-۴: الف) تصویر میکروسکوپی بستر سلولزی با بزرگنمایی زیاد



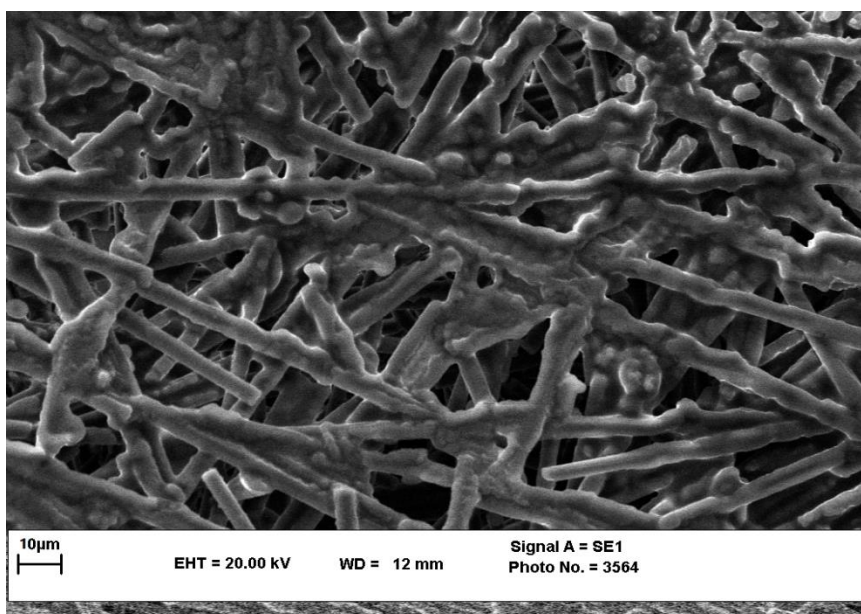
شکل ۴-۶: ب) تصویر میکروسکوپی بستر سلولزی با بزرگنمایی کم



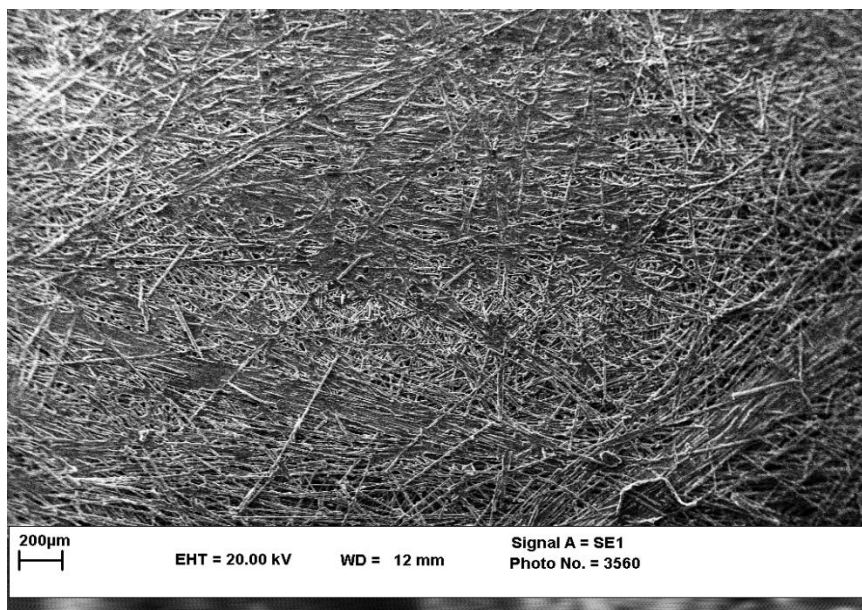
شکل ۴-۷: الف) تصویر میکروسکوپی بستر پلی پروپیلن با بزرگنمایی زیاد



شکل ۴-۷: ب) تصویر میکروسکوپی بستر پلی پروپیلن با بزرگنمایی کم



شکل ۴-۸: الف) تصویر میکروسکوپی بستر کربن با بزرگنمایی زیاد



شکل ۴-۸: (ب) تصویر میکروسکوپی بستر کربن با بزرگنمایی کم

با توجه به تصاویر گرفته شده مشاهده می‌شود که در نمونه‌ی کربنی به علت نفوذ فنولیک در بافت الیاف تخلخل‌ها بسته می‌شوند و به عبارتی تخلخل‌های باز کاهش می‌یابد و تخلخل‌های بسته افزایش می‌یابند. این اتفاق در نمونه‌ی پلی‌پروپیلن به علت ذوب شدن برخی الیاف رخ می‌دهد. تنها نمونه‌ی سلولز است که حرارت روی آن تأثیر کمی دارد و تخلخل‌های باز بیشتری نسبت به دو نمونه‌ی دیگر دارد. همچنین اندازه‌ی تخلخل‌ها در نمونه‌ی سلولزی حدود ۱۵ میکرون تخمین زده می‌شود که این عدد برای دو نمونه‌ی دیگر کاهش دارد و تا حدود ۹ میکرون هم کاهش می‌یابد.

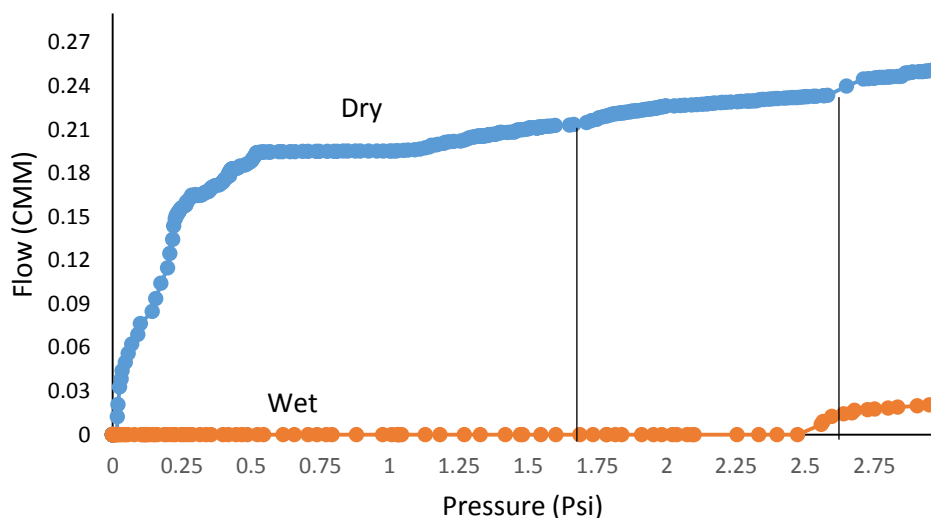
## ۴-۳ خواص فیزیکی

### ۴-۳-۱ اندازه و توزیع تخلخل‌ها

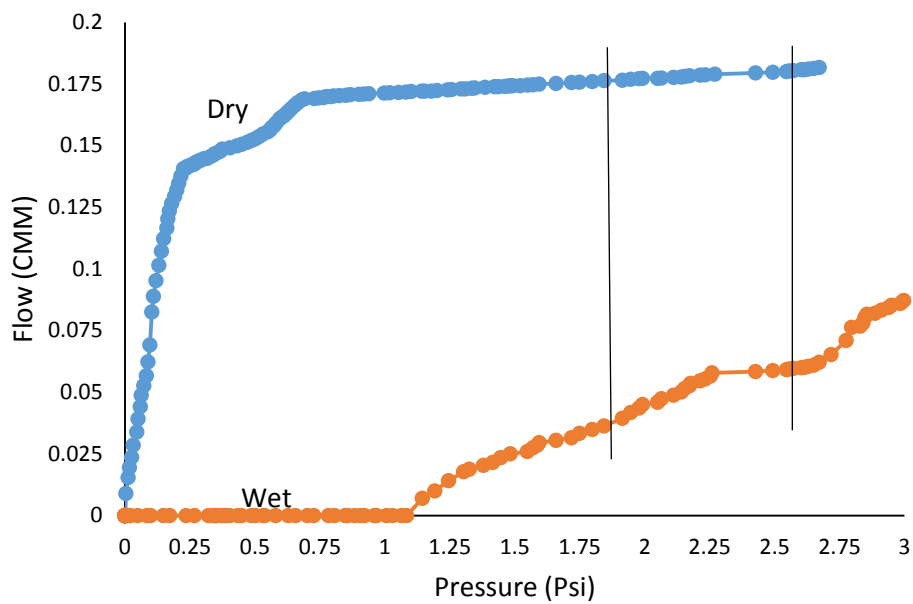
از دیگر آزمون‌هایی این پژوهش است که با توجه به استاندارد ASTM F316 انجام شد. در آزمون تمام نمونه‌های ساخته شده مورد آزمایش قرار گرفتند و نمودارهای دبی - فشار آن‌ها رسم گردید. سپس با توجه به روابطی که در فصل اول گفته شد توزیع تخلخل‌ها حاصل گردید. در ادامه نمودارهای نمونه‌های قابل قبول آورده شده است، این نمودارها مربوط به بهترین نمونه‌ها است.

نکته‌ی قابل توضیح برای این قسمت عبارت بهترین نمونه است. بهترین نمونه برای توزیع تخلخل‌ها، نمونه‌ای است که کمترین میزان عبور گاز را در بازه‌ی ۵ تا ۸ میکرون را داشته باشد که این قسمت با توجه به نمودار دبی-فشار قابل محاسبه است. بهترین نمونه برای اندازه تخلخل، نمونه‌ای است که کوچک‌ترین اندازه‌ی تخلخل را با توجه به روش حبابی و تر داشته باشد، که مقدار مدنظر در این پژوهش ۵ میکرون است.

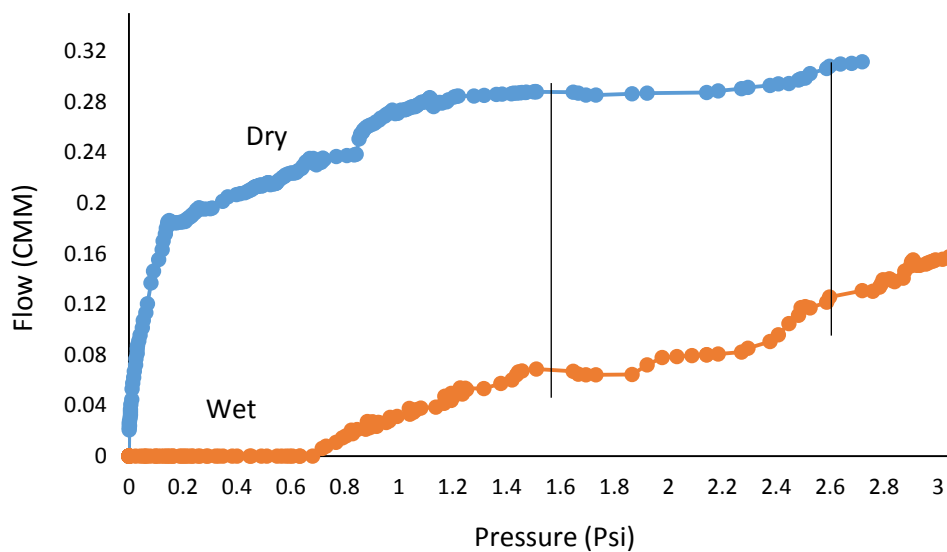
با توجه به توضیحات پارگراف‌های قبلی از بین تمامی نمونه‌های هریک از الیاف‌های مختلف، یک نمونه که در سه روش حبابی، تر و خشک عملکرد مناسبی داشت به عنوان بهترین نمونه انتخاب شد.



شکل ۴-۹: نمودار دبی-فشار بهترین نمونه سلولز



شکل ۴-۱۰: نمودار دبی-فشار بهترین نمونه کربن



شکل ۴-۱۱: نمودار دبی-فشار بهترین نمونه پلی پروپیلن

همان‌طور که در جداول محدوده‌ای از جداول با خطوط مشکی محصور شده است، این محدوده مربوط به فشارهای ۱/۶۶ Psi تا ۲/۶۵ است. این فشارها مربوط به تخلخل‌های ۵ تا ۸ میکرومتر می‌باشند که با استفاده از فرمول (۱-۲) که در فصل دوم بیان شد، محاسبه شده‌اند. با توجه به شکل (۲-۵۴)



فشار پایین تر یعنی ۱/۶۶ Psi مربوط به تخلخل‌های ۸ میکرومتری و فشار ۲/۶۵ Psi مربوط به تخلخل‌های ۵ میکرومتری است.

در این آزمایش قطر تخلخل‌ها ۵ و ۸ میکرومتر، کشش سطحی روغن ۳۲ dynes/cm و عدد ثابت ۰/۴۱۵ در نظر گرفته شده است.

$$p = \left[ \frac{0.415 \times 32}{5} \right] = 2.65 \text{ Psi} \qquad p = \left[ \frac{0.415 \times 32}{8} \right] = 1.66 \text{ Psi}$$

پس از به دست آوردن خطوط مورد نظر با استفاده از فرمول (۲-۲)، درصد عبور گاز در بازه‌ی ۵ تا ۸ میکرومتر از نمونه‌ها محاسبه می‌شود.

برای نمونه‌ی سلولز (شکل (۴-۹)) با توجه به خطوط و فرمول (۲-۲) به شکل زیر محاسبه می‌شود:

$$Q = \left[ \left( \frac{0.0143}{0.24} \right) - \left( \frac{0}{0.2137} \right) \right] \times 100 = 6 \%$$

برای نمونه‌ی کربن (شکل (۴-۱۰)) نیز این چنین می‌شود:

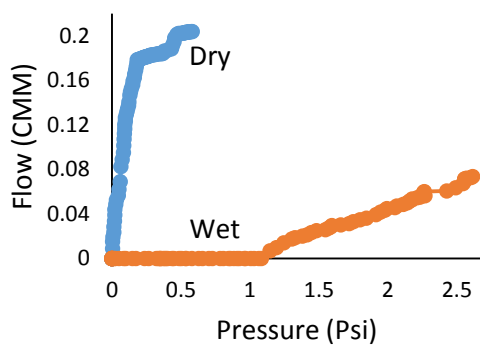
$$Q = \left[ \left( \frac{0.061}{0.183} \right) - \left( \frac{0.0304}{0.1751} \right) \right] \times 100 = 16.28 \%$$

و در نهایت برای نمونه‌ی پلی‌پروپیلن خواهیم داشت:

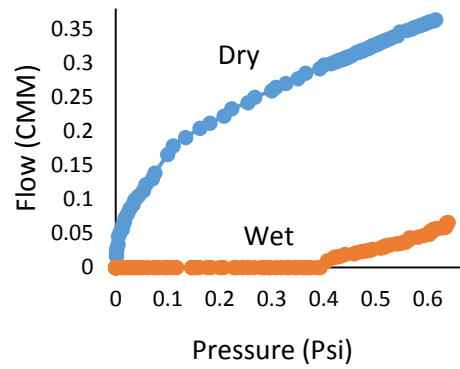
$$Q = \left[ \left( \frac{0.128}{0.31} \right) - \left( \frac{0.0648}{0.2868} \right) \right] \times 100 = 19.29 \%$$

پس از محاسبه‌ی درصد‌های سه نمونه به ترتیب سلولز با ۶ درصد، کربن با ۱۶/۲۸ درصد و پلی‌پروپیلن با ۱۹/۲۹ درصد کمترین میزان عبور را در بازه‌ی ۵ تا ۸ میکرومتر دارند. به این ترتیب نمونه‌ی سلولز کمترین میزان عبور گاز را داراست و مناسب‌ترین گزینه برای بستر فیلترهای گاز است.

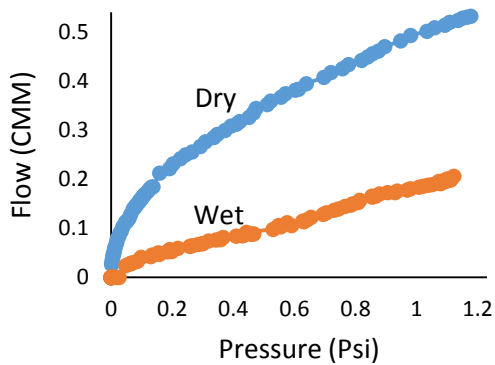
در ادامه نمودارهای نمونه‌هایی که قابل قبول نبوده‌اند نشان داده شده‌اند. شکل (۴-۱۲) مربوط به نمونه‌های پلی‌پروپیلن، شکل (۴-۱۳) مربوط به نمونه‌های کربن و شکل (۴-۱۴) مربوط به نمونه‌های سلولز هستند.



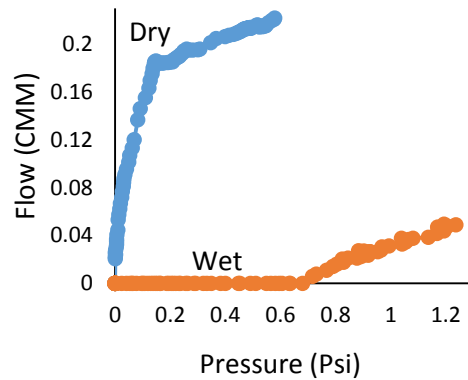
(ب)



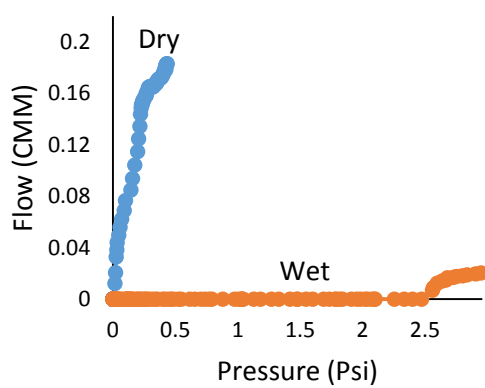
(الف)



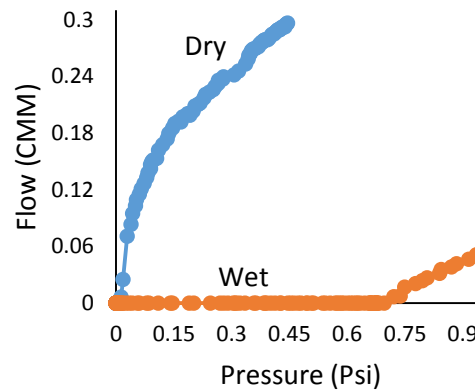
(د)



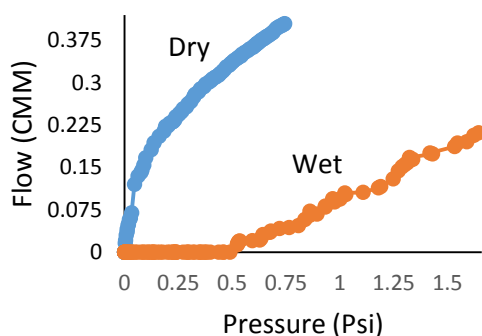
(ج)



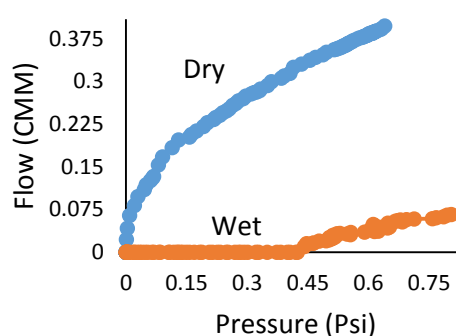
(و)



(ه)



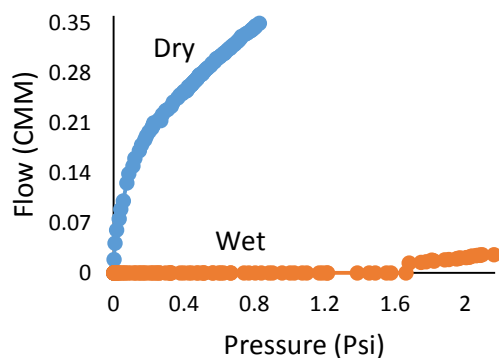
(ج)



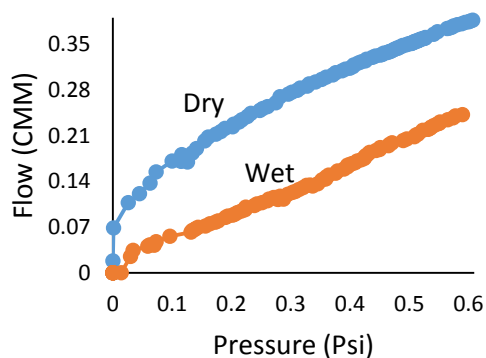
(ز)

شکل ۴-۱۲: الف) نمودار دبی- فشار نمونه‌ی ۱ پلی پروپیلن، ب) نمودار دبی- فشار نمونه‌ی ۲ پلی پروپیلن، ج) نمودار دبی- فشار نمونه‌ی ۳ پلی پروپیلن، د) نمودار دبی- فشار نمونه‌ی ۴ پلی پروپیلن، ه) نمودار دبی- فشار نمونه‌ی ۵ پلی پروپیلن، و) نمودار دبی- فشار نمونه‌ی ۶ پلی پروپیلن، ز) نمودار دبی- فشار نمونه‌ی ۷ پلی پروپیلن، ح) نمودار دبی- فشار نمونه‌ی ۸ پلی پروپیلن

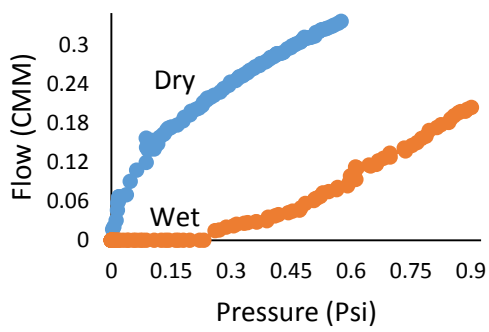
با توجه به شکل (۴-۱۲) موارد (الف) تا (ح) دلایل غیر قابل قبول بودن به شرح زیر است. ۱- در نمودارهای حالت خشک موارد (ب)، (د) و (و) یک پرش ناگهانی وجود دارد که نشان از استحکام کم نمونه‌ها در برابر فشار هوا است و الیاف نمونه در محل ورود هوا از هم باز می‌شوند. ۲- در بقیه‌ی نمودارها تنها مشکل به وجود آمده، ادامه پیدا نکردن هر دو منحنی خشک و تر تا فشار  $1/66$  Psi تا  $2/65$  است.



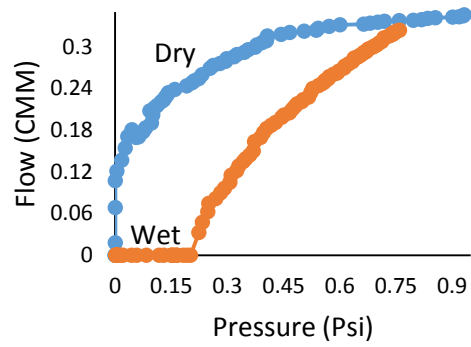
(ب)



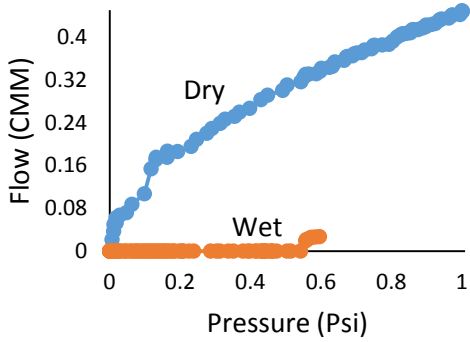
(الف)



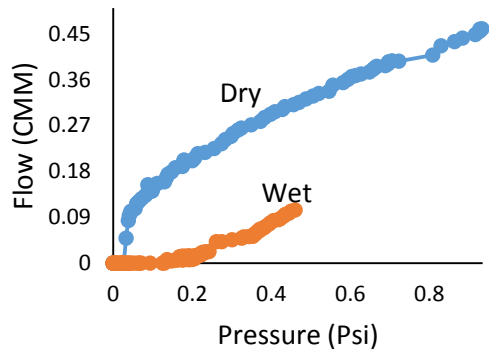
(د)



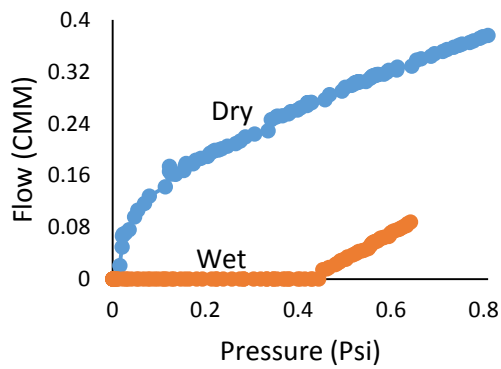
(ج)



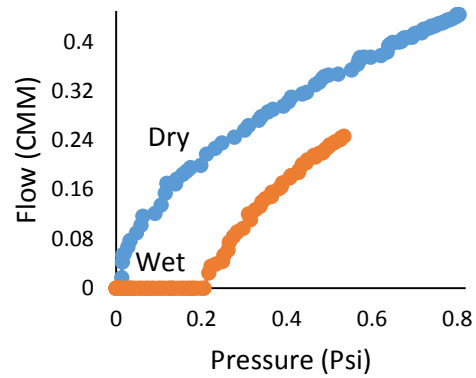
(و)



(ه)



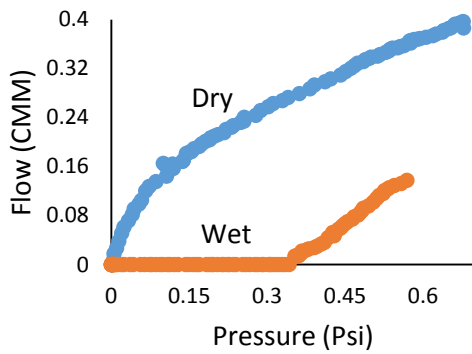
(ح)



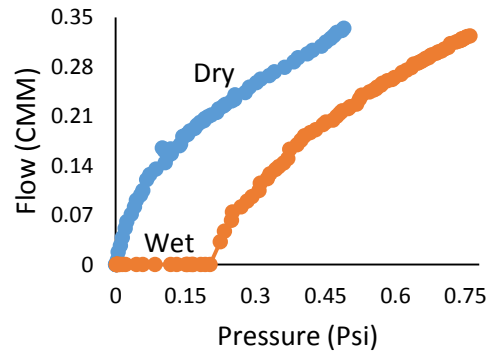
(ز)

شکل ۴-۱۳: الف) نمودار دبی- فشار نمونه‌ی ۱ کربن، ب) نمودار دبی- فشار نمونه‌ی ۲ کربن، ج) نمودار دبی- فشار نمونه‌ی ۳ کربن، د) نمودار دبی- فشار نمونه‌ی ۴ کربن، ه) نمودار دبی- فشار نمونه‌ی ۵ کربن، و) نمودار دبی- فشار نمونه‌ی ۶ کربن، ز) نمودار دبی- فشار نمونه‌ی ۷ کربن، ح) نمودار دبی- فشار نمونه‌ی ۸ کربن

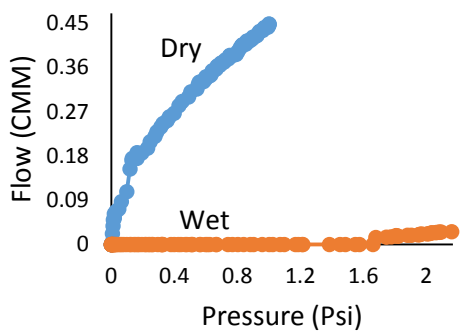
شکل (۴-۱۳) موارد (الف) تا (ح) نمودارهای دبی - فشار نمونه‌های کربن را نشان داده است. با توجه به نمودارها هیچ‌کدام از آن‌ها به فشار ۱/۶۶ Psi نرسیده‌اند. که می‌توان این عامل را علت اصلی غیر قابل قبول بودن این نمونه‌ها دانست. اما پرش ناگهانی در نمونه‌ها مشاهده نمی‌شود که نشان از استحکام بالاتر نسبت به نمونه‌های پلی‌پروپیلن است.



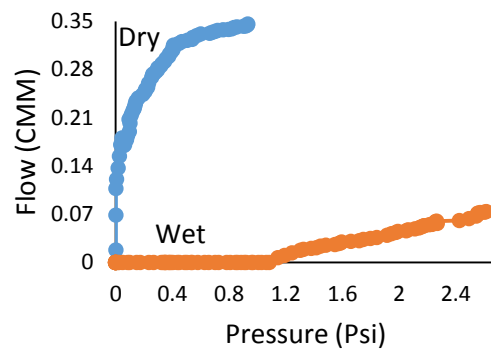
(ب)



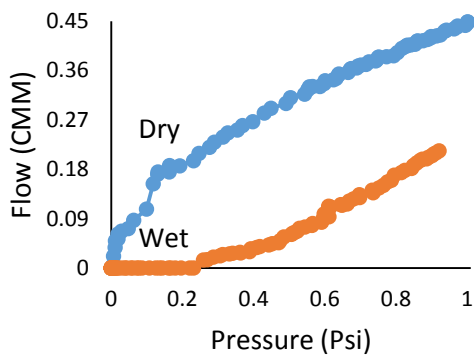
(الف)



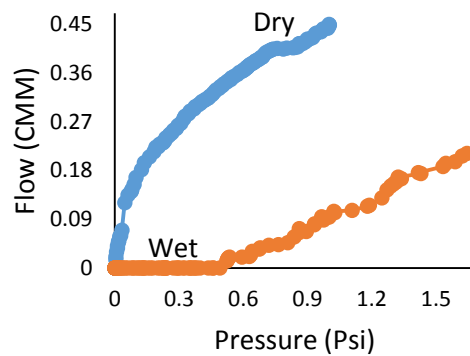
(د)



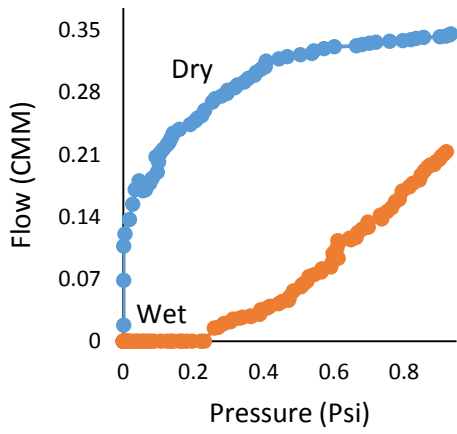
(ج)



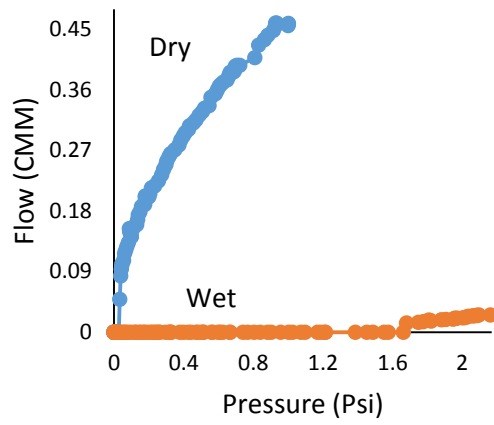
(و)



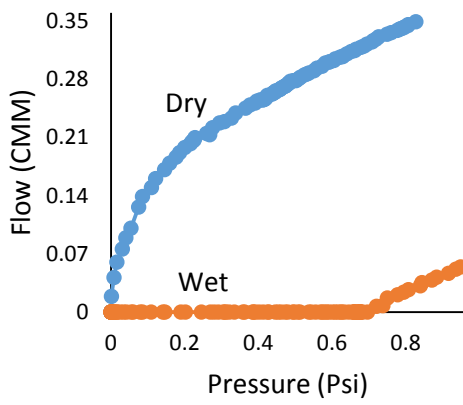
(ه)



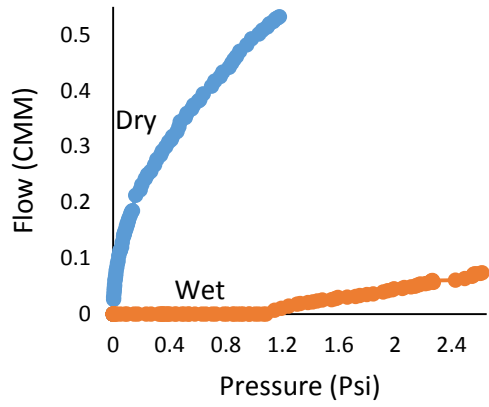
(z)



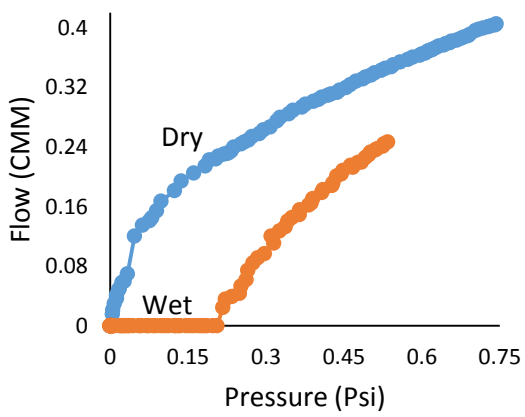
(j)



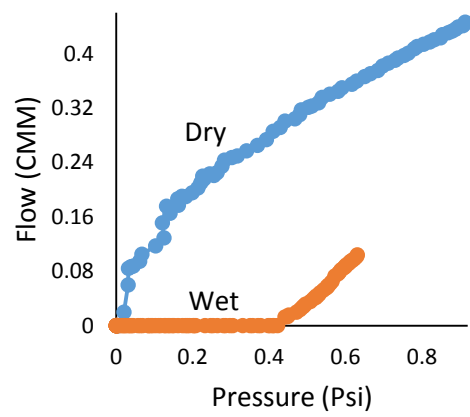
(g)



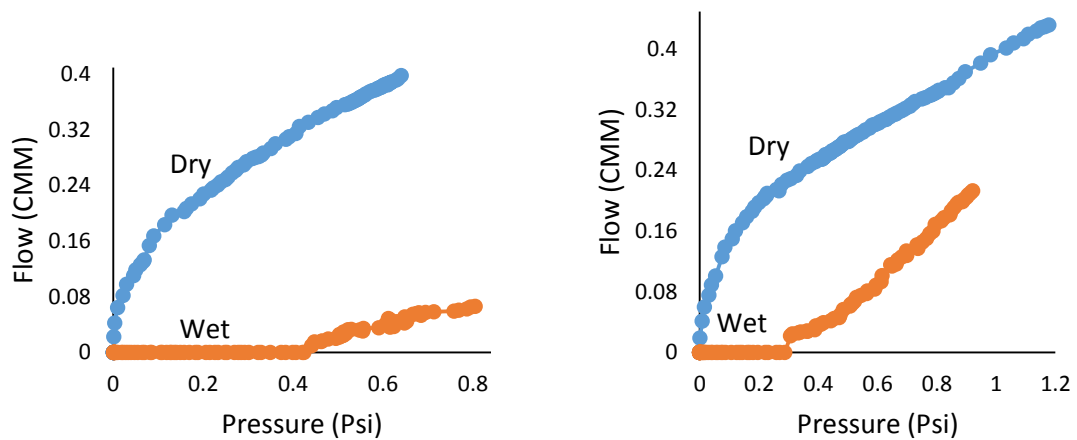
(b)



(j)

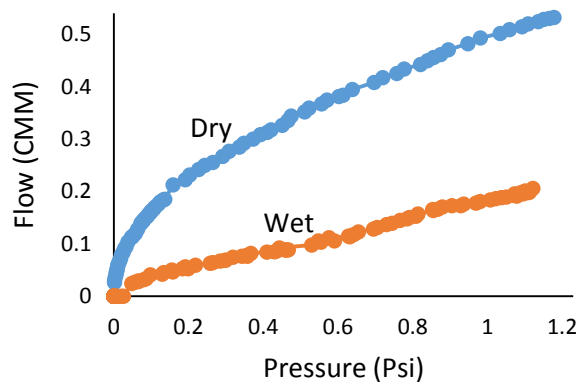


(k)



(ن)

(م)



(س)

شکل ۴-۱۴: الف) نمودار دبی- فشار نمونه‌ی ۱ سلولز، ب) نمودار دبی- فشار ۲ سلولز، ج) نمودار دبی- فشار ۳ سلولز، د) نمودار دبی- فشار ۴ سلولز، ه) نمودار دبی- فشار ۵ سلولز، و) نمودار دبی- فشار ۶ سلولز، ز) نمودار دبی- فشار ۷ سلولز، ح) نمودار دبی- فشار ۸ سلولز، ط) نمودار دبی- فشار ۹ سلولز، ی) نمودار دبی- فشار ۱۰ سلولز، ک) نمودار دبی- فشار ۱۱ سلولز، ل) نمودار دبی- فشار ۱۲ سلولز، م) نمودار دبی- فشار ۱۳ سلولز، ن) نمودار دبی- فشار ۱۴ سلولز، س) نمودار دبی- فشار ۱۵ سلولز

با توجه به شکل (۴-۱۴)، که نمودار نمونه‌های سلولز را نشان داده است. بهبود هم در پرش نداشتن

منحنی‌های خشک و هم در ادامه پیدا کردن منحنی‌ها در فشارهای بالا حاصل شده است، اما این بهبود

عملکرد برای قابل قبول شدن نمونه‌ها مناسب نیست.

در مجموع با توجه به اشکال (۴-۱۲) تا (۴-۱۴) در اکثر نمودارهای حالت خشک یک پرش

ناگهانی وجود دارد که نشان از استحکام کم نمونه‌ها در برابر فشار هوا است و الیاف نمونه در محل ورود

هوا از هم باز می‌شوند، اما در حالت تر با نفوذ روغن به درون نمونه‌ها و ایجاد چسبندگی بین روغن و الیاف این استحکام افزایش پیدا می‌کند، و پرشی در نمودارها دیده نمی‌شود. عامل دیگر در افزایش استحکام، تحمل مقداری از فشار هوای وارده توسط روغن است.

نکته‌ی دیگر در حین انجام آزمایش این است که نمی‌توان از یک حمایت‌کننده مثل توری فلزی یا جسم دیگری بر روی نمونه‌ها استفاده نمود، به دلیل اینکه درزگیری قالب سخت شده و هوا از کنارهای قالب خروج می‌کند و خطا در نتایج آزمایش رخ خواهد داد. برای تعیین بزرگترین تخلخل از روش حسابی و تر استفاده شد که نتایج آن شامل جداول (۴-۶) تا (۴-۹) است.

جدول ۴-۶: اندازه‌ی بزرگترین تخلخل در بهترین نمونه‌ها

نام نمونه	روش تر	روش حسابی
سلولز	۵/۱۸	۱۱/۶۶
کربن	۱۱/۵۹	۱۵/۴۲
پلی‌پروپیلن	۱۸/۵۲	۱۹/۵۷

جدول ۴-۷: اندازه‌ی بزرگترین تخلخل در نمونه‌های سلولز

نام نمونه	روش تر	روش حسابی
نمونه‌ی ۱	۵۹/۲۸	۵۷/۷۷
نمونه‌ی ۲	۳۷/۴	۴۳/۸۳
نمونه‌ی ۳	۱۱/۵۹	۲۰/۱۱
نمونه‌ی ۴	۷/۹	۱۲/۶
نمونه‌ی ۵	۲۵/۳۹	۳۰/۳۴
نمونه‌ی ۶	۵۱/۲۷	۵۷/۵۳
نمونه‌ی ۷	۷/۹	۱۲/۷
نمونه‌ی ۸	۵۱/۲۷	۵۶/۹۵
نمونه‌ی ۹	۱۱/۵۹	۱۹/۸۳
نمونه‌ی ۱۰	۱۸/۴۱	۲۵/۸۶
نمونه‌ی ۱۱	۲۹/۶۴	۳۵/۲۹
نمونه‌ی ۱۲	۶۱/۱۹	۶۷/۵۲
نمونه‌ی ۱۳	۴۳/۳۹	۴۶/۰۹
نمونه‌ی ۱۴	۳۰/۱۱	۳۴/۲۹
نمونه‌ی ۱۵	۲۷۶/۶۶	۱۹۵/۷۷



جدول ۴-۸: اندازه‌ی بزرگترین تخلخل در نمونه‌های کربن

نام نمونه	روش تر	روش حبابی
نمونه‌ی ۱	۴۴۲/۶۶	۳۸۲/۰۵
نمونه‌ی ۲	۵۹/۲۸	۵۷/۵۳
نمونه‌ی ۳	۵۱/۲۷	۵۶/۹۸
نمونه‌ی ۴	۶۸/۴۵	۷۰/۹۶
نمونه‌ی ۵	۲۳/۸۴	۲۵/۸۶
نمونه‌ی ۶	۶۱/۱۹	۷۰
نمونه‌ی ۷	۲۹/۳۱	۳۳/۷۴
نمونه‌ی ۸	۳۰/۰۴	۳۶/۶۶

جدول ۴-۹: اندازه‌ی بزرگترین تخلخل در نمونه‌های پلی‌پروپیلن

نام نمونه	روش تر	روش حبابی
نمونه‌ی ۱	۳۲/۶۲	۳۸/۰۶
نمونه‌ی ۲	۱۱/۵۹	۲۳/۸۸
نمونه‌ی ۳	۳۲/۶۲	۳۸/۰۶
نمونه‌ی ۴	۲۷۶/۶۶	۱۹۵/۷۷
نمونه‌ی ۵	۱۸/۴۱	۲۳/۱۴
نمونه‌ی ۶	۵/۱۸	۲۲
نمونه‌ی ۷	۳۰/۱۱	۳۴/۲۹
نمونه‌ی ۸	۲۵/۳۹	۲۸/۴۹

با توجه به نتایج آزمون تعدادی از نمونه‌ها در هر دو روش یا در یکی از روش‌ها دارای اندازه‌ی تخلخل مناسبی در بازه‌ی ۵ تا ۸ میکرون هستند، اما نمونه‌ی مناسب آن نمونه‌ای است که در هر دو روش به اندازه‌ی تخلخل آن به ۵ نزدیک‌تر باشد. به این نحو بهترین نمونه‌ها انتخاب شده و در جدول (۴-۶) آمده است.

نتایج این آزمون با نتایج میکروسکوپ الکترونی روبشی تا حدودی تطبیق دارند.

#### ۴-۳-۲ ترشوندگی

آزمایش زاویه‌ی تماس برای بررسی میزان ترشوندگی و در نتیجه چسبندگی ذرات به بستر فیلترها

با دستگاه اندازه‌گیری زاویه‌ی تماس و کشش سطحی به روش شرح داده شده در فصل قبل انجام شد. این آزمایش نشان داد که نمونه‌ها کاملاً آب‌دوست هستند. قطره‌ی آب در مدت کمی وارد نمونه شده و انجام آزمایش ممکن نیست.

### ۳-۳-۴ آزمون آئروسول

برای این آزمایش سه نمونه از بسترهای مختلف برای آزمایش فرستاده شد. با انجام این آزمون بازدهی بسترها به دست آمده است. قابل قبول بودن یا غیرقابل قبول بودن نمونه‌ها از مقایسه‌ی نتایج به دست آمده با استاندارد IGS-ES-PM-105(0)-1999 قابل تعیین است. نتایج سه نمونه در جداول زیر قابل مشاهده است.

جدول ۴-۱۰: بازدهی بستر سلولز

اندازه‌ی ذرات	بدون فیلتر	مرحله‌ی ۱	مرحله‌ی ۲	مرحله‌ی ۳	بازده (%)
۰/۳ μ	۵۶۷۲۶	۴۱۶۵۷	۴۱۸۴۹	۴۱۳۰۶	۲۶/۶۶
۰/۵ μ	۸۷۵۹	۴۵۱۷	۴۵۴۵	۴۶۰۹	۴۷/۹۷
۰/۷ μ	۳۶۴۲	۱۳۱۲	۱۳۲۵	۱۳۶۴	۶۳/۳۸
۱ μ	۲۰۹۹	۵۲۷	۵۲۸	۶۰۱	۷۳/۷۰
۲ μ	۸۰۳	۷۸	۷۲	۸۷	۹۰/۱۶
۵ μ	۴۴	۰	۰	۰	۱۰۰

جدول ۴-۱۱: بازدهی بستر کربن

اندازه‌ی ذرات	بدون فیلتر	مرحله‌ی ۱	مرحله‌ی ۲	مرحله‌ی ۳	بازده (%)
۰/۳ μ	۵۸۹۹۹	۴۲۲۳۹	۴۲۳۱۱	۴۲۰۹۶	۲۸/۳۹
۰/۵ μ	۱۰۱۷۷	۵۵۹۷	۵۴۳۷	۵۷۰۴	۴۵/۱۷
۰/۷ μ	۴۶۳۴	۱۷۷۳	۱۸۲۰	۱۸۹۵	۶۰/۵۱
۱ μ	۲۴۷۵	۷۲۳	۶۸۶	۷۴۱	۷۱/۰۴
۲ μ	۸۵۲	۱۳۹	۱۳۴	۱۴۴	۸۳/۶۸
۵ μ	۴۱	۲	۳	۲	۹۴/۳

جدول ۴-۱۲: بازدهی بستر پلی پروپیلن

اندازه‌ی ذرات	بدون فیلتر	مرحله‌ی ۱	مرحله‌ی ۲	مرحله‌ی ۳	بازده (%)
۰/۳ μ	۶۱۲۷۲	۴۲۸۲۰	۴۲۷۷۳	۴۲۸۸۶	۳۰/۱۲
۰/۵ μ	۱۱۱۳۴	۶۹۸۳	۶۹۰۱	۷۰۶۶	۳۷/۲۸
۰/۷ μ	۴۳۰۳	۲۱۳۱	۲۱۰۱	۲۱۹۴	۵۰/۲۱
۱ μ	۲۶۹۸	۱۰۹۱	۱۰۱۳	۱۱۰۲	۶۰/۳۸
۲ μ	۸۸۱	۲۵۲	۲۲۳	۲۹۰	۷۱/۰۵
۵ μ	۴۲	۵	۴	۲	۹۱/۲۶

همان‌طور که در جداول قابل مشاهده است ابتدا دستگاه بدون بستر (فیلتر) راه‌اندازی شد سپس بستر در جایگاه قرار گرفته و سه مرحله از آن آزمون گرفته شد و پس از آن دستگاه بازدهی بستر را مشخص می‌نماید. نکته‌ی دیگر این است که دستگاه ذره‌ساز در این آزمون ۵ ذره با اندازه‌ی متفاوت تولید می‌نماید.

برای شرح بیشتر جداول ابتدا با ستون دوم یعنی بدون فیلتر شروع می‌کنیم، عدد قرار داده شده در جدول تعداد کل ذرات عبور کرده از فیلتر است به عبارت دیگر چون دستگاه فاقد فیلتر است می‌توان نتیجه گرفت این عدد نشان‌دهنده‌ی تمام ذرات تولید شده توسط دستگاه است. ستون‌های سوم، چهارم و پنجم شامل مرحله‌ی ۱، ۲ و ۳ که همان‌طور که در بالا ذکر شد، تعداد ذرات عبور کرده از فیلتر است. در نهایت ستون آخر که بازده نام گرفته است. در این ستون میانگین بازده‌ی سه ستون قبلی محاسبه و در آن جایگذاری می‌شود.

با توجه به نتایج این آزمایش مشخص شد که نمونه‌ی سلولز بهترین نتیجه را در برداشته است و پس از آن نمونه‌های کربن و پلی‌پروپیلن قرار می‌گیرند.

دو نکته در بهتر شدن بازده‌ی نمونه‌ی سلولزی نقش مهمی ایفا می‌کنند که با قسمت ۲-۷ و قسمت ۴-۲-۱ می‌توان به آن‌ها اشاره نمود اول بیشتر بودن تخلخل‌ها و دوم بحث ضخامت نمونه‌ی سلولز که نسبت به دو نمونه‌ی دیگر بیشتر است.

## ۴-۴ خواص مکانیکی

### ۴-۴-۱ آزمون مقاومت به پارگی

برای بررسی خواص مکانیکی از این آزمون استفاده شد که مطابق با استاندارد ASTM D1922 است. نتایج این آزمون در جدول (۴-۱۳) آورده شده است.

جدول ۴-۱۳: نتایج آزمون مقاومت به پارگی

جنس بستر	سلولز	کربن	پلی‌پروپیلن
مقاومت به پارگی (mIN)	۴۶۳۱/۷۱	۴۴۱۰/۳۳	۴۱۵۹/۵۶

آقای امان التاهان<sup>۱</sup> در سال ۲۰۱۶ به بررسی تأثیر پارامترهای ساختاری پارچه‌ها بر آزمون استحکام پارگی پرداخت. در این مقاله یکی از پارامترهای مورد بررسی جنبش<sup>۲</sup> الیاف بود، به این صورت که الیافی به رزین آغشته شدند و با انجام آزمون مشخص شد که استحکام پارگی آن‌ها کاهش یافته است [۵۴].

آقای شارما<sup>۳</sup> و همکاران در سال ۱۹۸۴ در مقاله‌ای مقایسه‌ای بین آزمون‌های مختلف مقاومت به پارگی انجام داد. در قسمت دانسیته‌ی محصول بیان شد که هرچه دانسیته‌ی محصول افزایش یابد، استحکام پارگی در بعضی از آزمون‌های پارگی افزایش می‌یابد [۵۵].

از مقایسه‌ی نتایج این پژوهش با نتایج دیگران می‌توان نتیجه گرفت که نمونه‌ها تا حد زیادی از نتایج دیگران پیروی می‌کنند. البته از این نکته‌ای که وجود دارد افزایش ضخامت است که می‌تواند پاره شدن نمونه را سخت‌تر کند، نکته‌ای که امکان دارد برای نمونه‌ی سلولز رخ داده باشد.

---

۱- Eman Eltahan

۲- Mobility

۳- Sharma



فصل پنجم:

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

## ۵-۱ نتیجه گیری

- ۱- تصاویر SEM نشان می‌دهد که سلولز تخلخل‌هایی در حدود ۱۵ میکرون دارد و دو الیاف دیگر تخلخل‌های کوچک‌تری دارند، اما تخلخل‌های باز نمونه‌ی سلولزی بیشتر است، به دو دلیل: ۱- ذوب نشدن الیاف، ۲- ساخت نمونه‌ی سلولز بدون داشتن رزین
  - ۲- آزمایش ترشوندگی نشان داد که نمونه‌ها به قدری جاذب آب هستند که قطره شکل گرفته روی نمونه به سرعت جذب نمونه شده و آزمایش را نمی‌توان به پایان رساند.
  - ۳- در آزمایش آئروسول با توجه به حذف ۱۰۰ درصدی ذرات ۵ میکرون توسط نمونه‌ی سلولز، این نمونه نسبت به بقیه‌ی نمونه‌ها بهتر بود.
  - ۴- نتایج حاصل از آزمایش و محاسبات اندازه و توزیع تخلخل‌ها نشان داد که کمترین عبور دهی گاز و کوچک‌ترین اندازه‌ی تخلخل به ترتیب مربوط به نمونه‌ی الیاف سلولز، نمونه‌ی الیاف کربن و نمونه‌ی الیاف پلی‌پروپیلن است.
  - ۵- در آزمون مقاومت به پارگی نتایج نشان داد که نمونه‌ی سلولزی نسبت به دو نمونه‌ی دیگر بهتر است.
- با توجه به نتایج حاصل از آزمایش‌ها اگرچه نمونه‌ها در مباحث خواص فیزیکی و مکانیکی قوت و ضعف مربوط به خود را دارند، اما در مجموع نمونه‌ی سلولز و کربن عملکرد مناسبی داشته و گزینه‌های مناسب‌تری برای استفاده در بستر فیلترها هستند.

## ۵-۲ پیشنهادها

- \_ استفاده از الیاف دیگری از جمله الیاف پلی‌استر، نایلون و...
- \_ ساخت نمونه طوری طراحی شود تا ضخامت نمونه‌ها ثابت باشد.
- \_ ساخت فیلتر با الیاف استفاده شده در همین پژوهش و انجام آزمایش‌ها و مقایسه‌ی آن با نتایج

این پژوهش



\_ استفاده از موادی که خاصیت ضد آب بودن را برای نمونه فراهم نمایند تا بتوان آنها را در

محیطهای مرطوب استفاده نمود.

\_ استفاده از الیاف با قطرهای متفاوت

\_ استفاده از رزینهای مختلف

\_ ساخت بسترهای جاذب با استفاده از کربن فعال در نمونههای ساخته شده در این پژوهش



مراجع

۱. صدیق‌زاده، ا. و دیگران، فصل ۱ - خواص و مشخصات آلاینده‌های آئروسل، در مطالعه و طراحی نمونه فیلترهای مورد استفاده در نیروگاه‌های هسته‌ای. ۱۳۸۸: پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای. ص. ۱۲-۳۶.
۲. Sparks, T. and G. Chase, *Section 1 - Filtration – Introduction, Physical Principles and Ratings*, in *Filters and Filtration Handbook (Sixth Edition)*, T. Sparks and G. Chase, Editors. 2016, Butterworth-Heinemann: Oxford. p. 1-54.
۳. Sutherland, K., *Section 1 - Basic Principles*, in *Filters and Filtration Handbook (Fifth Edition)*, K. Sutherland, Editor. 2008, Elsevier: Oxford. p. 1-40.
۴. Innocentini, M.D.d.M., *High-efficiency aerosol filters based on silicon carbide foams coated with ceramic nanowires*. *Separation and Purification Technology*, 2015. **152**: p. 180-191.
۵. صدیق‌زاده، ا. و دیگران، فصل ۳ - سیستم‌های فیلتراسیون نیروگاه اتمی، در مطالعه و طراحی نمونه فیلترهای مورد استفاده در نیروگاه‌های هسته‌ای. ۱۳۸۸: پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای. ص. ۶۱-۹۵.
۶. ستاد ویژه توسعه فناوری نانو، نانو فیلترهای لیفی، در نساجی امروز. ۱۳۹۵. ص. ۸۲-۸۸.
۷. Zobel, S. and T. Gries, *The use of nonwovens as filtration materials*. 2010. 160-183.
۸. عسگری، ن. مطالعه‌ای بر فرایندهای غشایی، در نشریه الکترونیکی انجمن علمی مهندسی شیمی دانشگاه صنعتی سهند. ۱۳۸۷. ص. ۱-۱۹.
۹. سراجیان، ح. جداسازی گاز توسط تکنولوژی غشایی، در ماهنامه علمی، آموزشی، پژوهشی نفت پارس. ۲۰۰۸.
۱۰. Srikanth, G. *Membrane Separation Processes Technology and Business Opportunities, Water Conditioning & Purification*. 2008: p. 1-4.
۱۱. Guo, B. and A. Ghalambor, *Chapter 7 - Separation*, in *Natural Gas Engineering Handbook (Second Edition)*, B. Guo and A. Ghalambor, Editors. 2005, Gulf Publishing Company. p. 113-141.
۱۲. *Particulate air filters for general ventilation- Determination of the filtration performance*. EN799, 2012.
۱۳. *Method of Testing General Ventilation Air-Cleaning Devices for Removal Efficiency by Particle size*. ASHRAE Standard 52-1 2012.
۱۴. Schroth, T., *New HEPA/ULPA filters for clean-room technology*. *Filtration & Separation*, 1996. **33**(3): p. 245-244.
۱۵. Sparks, T. and G. Chase, *Section 3 - Air and Gas Filtration*, in *Filters and Filtration Handbook (Sixth Edition)*, T. Sparks and G. Chase, Editors. 2016, Butterworth-Heinemann: Oxford. p. 117-198.
۱۶. Sutherland, K., *Section 3 - Types of Filter*, in *Filters and Filtration Handbook (Fifth Edition)*, K. Sutherland, Editor. 2008, Elsevier: Oxford. p. 97-207.
۱۷. Purchas, D.B. and K. Sutherland, *CHAPTER 5 - Air and Gas Filter Media*, in *Handbook of Filter Media (Second Edition)*, D.B. Purchas and K. Sutherland, Editors. 2002, Elsevier Science: Amsterdam .p. 153-200.
۱۸. Sutherland, K., *Section 6 - Gas Filtration*, in *Filters and Filtration Handbook (Fifth Edition)*, K. Sutherland, Editor. 2008, Elsevier: Oxford. p. 369-450.
۱۹. Sutherland, K., *Section 2 - Filter Media*, in *Filters and Filtration Handbook (Fifth Edition)*, K. Sutherland, Editor. 2008, Elsevier: Oxford. p. 41-95.
۲۰. Morris, K., *Testing of HEPA and ventilation filters*. Elsevier, 1994.
۲۱. Purchas, D.B. and K. Sutherland, *CHAPTER 9 - Replaceable Filter Elements*, in *Handbook of Filter Media (Second Edition)*, D.B. Purchas and K. Sutherland, Editors. 2002, Elsevier Science: Amsterdam .p. 365-410.

۲۲. Hutten, I.M., *CHAPTER 8 - Air Filter Applications*, in *Handbook of Nonwoven Filter Media*, I.M. Hutten, Editor. 2007, Butterworth-Heinemann: Oxford. p. 325-367.
۲۳. Sandle, T., *13 - Cleanrooms, isolators and cleanroom technology*, in *Sterility, Sterilisation and Sterility Assurance for Pharmaceuticals*, T. Sandle, Editor. 2013, Woodhead Publishing. p. 189-207.
۲۴. Vaughn, E. and G. Ramachandran, *Fiberglass Vs. Synthetic Air Filtration Media*. 2002.
۲۵. Vallero, D., *Chapter 30 - Air Pollution Control Technologies*, in *Fundamentals of Air Pollution (Fifth Edition)*, D. Vallero, Editor. 2014, Academic Press: Boston. p. 829-879.
۲۶. Edward I. Wedman, J., W. L. Gore & Associates Inc, *A Practical Guide to Filter Media Failure Analysis*, in *First Presented at Powder & Bulk Solids Conference and Exhibition Donald E. Stephens Convention Center*. 2001: Rosemont, Illinois, USA.
۲۷. صدیق‌زاده، ا. و دیگران، فصل ۲ - مطالعات نظری و آزمایشگاهی سیستم‌های پالایش ذره‌ای و گازی هوا، در مطالعه و طراحی نمونه فیلترهای مورد استفاده در نیروگاه‌های هسته‌ای. ۱۳۸۸: پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای. ص. ۳۷-۶۱.
۲۸. شمس، س.ف. و وحدتی خاکی، ج. تولید کامپوزیت متخلخل *TiC/Al2O3* به روش سنتز احتراقی در حضور ماده گاز زا. ۲۰۱۱.
۲۹. صفابخش، ا. اطرح، س. و نیلفروشان، م. بررسی عوامل موثر بر خواص کامپوزیت‌های متخلخل بر پایه کاربید سیلیسیم دارای اتصال کوردیریتی تهیه شده به روش اتصال-واکنشی، مجله مواد نوین. ۱۳۹۳. ص. ۵۷-۷۰.
۳۰. Wu, J., *Fabrication, Pore Structures and Mechanical Properties of (TiB<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)/NiAl Porous Composites*. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2017. **30**(12): p. 1145-1154.
۳۱. Kollia, E., *Single step fabrication of polymer/silicate porous composite membranes via water-glass induced phase inversion*. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 2018: p. 1-10.
۳۲. Madauß, L., *Fabrication of nanoporous graphene/polymer composite membranes*. *Nanoscale*, 2017. **9**(29): p. 10487-10493.
۳۳. Zhang, Y. and J. Wang, *Fabrication of Functionally Graded Porous Polymer Structures using Thermal Bonding Lamination Techniques*. *Procedia Manufacturing*, 2017. **10**: p. 866-875
۳۴. Jamil, N., *Fabrication of Porous Ceramic-Geopolymer Based Material to Improve Water Absorption and Retention in Construction Materials: A Review*. in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017. IOP Publishing.
۳۵. صابری کاخکی، ی. ناطق، س. و میردامادی، ش.ا. بررسی خواص کامپوزیت متخلخل زمینه آلومینیوم تقویت شده با نانوذرات کاربید سیلیسیم با روش‌های مختلف ارزیابی خزشی. فرآیندهای نوین در مهندسی مواد. ۲۰۱۷. ص. ۴۱-۵۶.
۳۶. Hutten, I.M., *CHAPTER 5 - Processes for Nonwoven Filter Media*, in *Handbook of Nonwoven Filter Media*, I.M. Hutten, Editor. 2007, Butterworth-Heinemann: Oxford. p. 195-244.
۳۷. Lim, H., *A review of spun bond process*. Vol. 6. 2010. 1-13.
۳۸. Midha, V. and A. Dakuri, *Spun bonding Technology and Fabric Properties: a Review*. Vol. 1. 2017.
۳۹. Wehmann, M. and W.J.G. McCulloch, *Melt blowing technology*, in *Polypropylene: An A-Z reference*, J. Karger-Kocsis, Editor. 1999, Springer Netherlands: Dordrecht. p. 415-420.
۴۰. Duckett, K., R. Kotra, and H. Rong. *Melt Blown Technology*.
۴۱. Hasan, M., A.K.M.M. Alam, and K. Abu Nayem, *Application of electrospinning techniques for the production of tissue engineering scaffolds: A Review*. Vol. 10. 2014.

۴۲. Bhardwaj, N. and S.C. Kundu, *Electrospinning: A fascinating fiber fabrication technique*. *Biotechnology Advances*, 2010. **28**(3): p. 325-347.
۴۳. خان‌بابایی، ق.، و دیگران، طراحی و ساخت غشاهای نانوکامپوزیت پلیمری و بررسی خواص عبور دهی گاز آن‌ها، در اولین کنفرانس پتروشیمی ایران. ۱۳۸۷.
۴۴. Farhang Dehghan, S., B. Maddah, and F. Golbabaei, *The Development of Nanofibrous Media Filter Containing Nanoparticles for Removing Particles from Air Stream*. *ijhe*, 2016. **8**(4): p. 509-524.
۴۵. Miao, M., et al., *Improvement of filtration efficiency by fibre surface nanofibrillation*. *The Journal of The Textile Institute*, 2012. **103**(7): p. 719-723.
۴۶. Ahn, B.-G., U.-S. Choi, and O.-K. Kwon, *Filtrating Characteristics of Polymeric Porous Composites Composed of Polypropylene and Polyethylene*. *Polymer Journal*, 1999. **31**: p. 851.
۴۷. Wang, Q., et al., *Synthesis and filtration properties of polyimide nanofiber membrane/carbon woven fabric sandwiched hot gas filters for removal of PM 2.5 particles*. *Powder Technology*, 2016. **292**: p. 54-63.
۴۸. IGS-M-PM-111(0), S., *Dry Gas Filter Cartridge*. 2013. امور تدوین استانداردها: شرکت ملی گاز ایران. p. 21.
۴۹. IGS-PM-1(0)05, S., *Dry Gas Filter*. 1999. امور تدوین استانداردها: شرکت ملی گاز ایران. p. 21.
۵۰. IGS-PM-103(0), S., *Filter - Separator*. 1990. امور تدوین استانداردها: شرکت ملی گاز ایران. p. 16.
۵۱. IGS-ES-PM-105(0), S., *Sاخت بازرسی و تست بدنه فیلتر ۱۹۹۹، امور تدوین استانداردها: شرکت ملی گاز ایران*.
۵۲. *Standard Test Methods for Pore Size Characteristics of Membrane Filters by Bubble Point and Mean Flow Pore Test*. 2003, ASTM F316-03. p. 7.
۵۳. *Standard Test Method for Propagation Tear Resistance of Plastic Film and Thin Sheeting by Pendulum Method*. 2004, ASTM D1922. p. 9.
۵۴. Eltahan, E., *Structural parameters affecting tear strength of the fabrics tents*, 2016, Alexandria Engineering Journal, P. 97-105.
۵۵. Shamara, I. C. and Adhikary, D., *Comparison of different tearing test methods*, 1984, Indian Journal of Textile Research, Vol.9, p.46-54.



## **Abstract**

In the gas industry and in all gas pipelines, there are usually certain particulates and contaminants that include tungsten particles, sediments, gas condensates and fine particulate matter which, for two main reasons, should be eliminated from the gas entering the station and, ultimately, the gas consumed: 1- To prevent damage to the instrumentation devices of the station such as regulator knife and etal, 2- Providing gas standards for delivery to the consumer. In other industries, including nuclear industry, cement and etal, gases and particulate pollutants are released in the air, which pollute the environment very harmful. For this reason, the production of a suitable media for use in filters is mandatory. The purpose of this study is to fabrication a media with good efficiency for use in gas industry filters that have the same physical and mechanical properties as the filters used in the gas industry.

Cellulose, glass and polypropylene fibers and phenolic resin were used to make the media. By examining the gas passing test, it showed the superiority of the cellulosic sample compared to other fibers. According to the results of this experiment, the most common specimens were examined for wetting, aerosol, tear test and microstructural analysis.

In the wettability test, all samples were hydrophilic and drops were rapidly absorbed. In an aerosol test, the cellulose sample yield was estimated at 100% for 5 microns, which was still better than other fibers. In tear test results, better results were obtained for cellulose samples. For porosity checking, scanning microscope analysis was used. According to the images, the cellulose porosity was higher than the other two samples, because the phenolic resin cellulose sample was not used and also increased. The temperature of the cellulose fiber was not melted and also the porosity was about 15 microns for cellulose and about 9 microns for two other fibers. Due to all the experiments conducted, the cellulose sample has a good result and can be used as a media in the filters.

**Key words:** Gas Industrial, Media, Cellulose Fiber, Carbon Fiber, Polypropylene Fiber, Phenolic Resin.





**Shahrood University of Technology**  
**Faculty of Chemical and Material Engineering**  
**M.Sc. Thesis in Composite Engineering**

**Fabrication and Physical, Mechanical Properties of Polymer  
Membrane Reinforced by Nonwoven Fibers Used for HEPA  
Filters**

By: Amir Komeili Nejad

Supervisor:

Dr.Reza Taherian (ph.D)

September 2018