

## فصل ششم:

### ۶- بررسی اثر حرارت بر پارچه الیاف شیشه

#### ۱-۶ مقدمه

الیاف شیشه از مواد غیرآلی، غیر فلزی تهیه می شوند، پایداری شیمیایی مناسب، خواص عایق حرارتی خوب، مقاومت حرارتی قوی و استحکام مکانیکی بالایی دارند. یکی از فرآیندهایی که بر روی این الیاف انجام می شود، عملیات تکمیل حرارتی است که در بعضی کاربردها، نظیر بیشترین مقدار استحکام الیاف شیشه از لحاظ تئوری توسط محققین مختلفی، حدود  $10-30 \text{ GPa}$  گزارش شده است. داده های تجربی این پارامتر به هیچ عنوان در این محدوده به دست نمی آید؛ حتی زمانی که با نوع با استحکام بالای الیاف شیشه سر و کار داریم، بالک شیشه حتی عملکرد ضعیف تری در مورد استحکام از خود نشان می دهد و به ندرت به استحکام  $50 \text{ MPa}$  می رسد. این مسئله برای همگان روشن است که استحکام الیاف شیشه می تواند محدوده وسیعی را در بر بگیرد، می تواند الیاف شیشه استحکامی بسیار پایین تا مقادیر بسیار بالا را داشته باشد. تحقیقات اولیه نشان داده که الیاف E-glass می توانند استحکام بالایی (بزرگتر از  $3/5 \text{ GPa}$ ) را داشته باشند. این مقدار با یک ضریب تغییرات کوچک قابل تکرار است [۱].

#### ۶-۲ مطالعه اثر حرارت بر استحکام الیاف شیشه

تحقیقات در مورد اثر توانان دما و زمان بر استحکام الیاف شیشه از چند دهه قبل آغاز شده است. در یکی از اولین گزارش هایی که بر روی الیاف تولید شده در آزمایشگاه انجام گرفت؛ الیاف شیشه به مدت یک ساعت حرارت داده شد و سپس در دمای اتاق خنک شد و در پایان آزمون اندازه گیری استحکام انجام شد. نتایج به دست آمده نشان داد که که استحکام کشش باقیمانده در الیافی که در دمای بالای  $200^\circ \text{C}$  حرارت داده شده بودند، با یک کاهش خطی مواجه شده اند [۱].

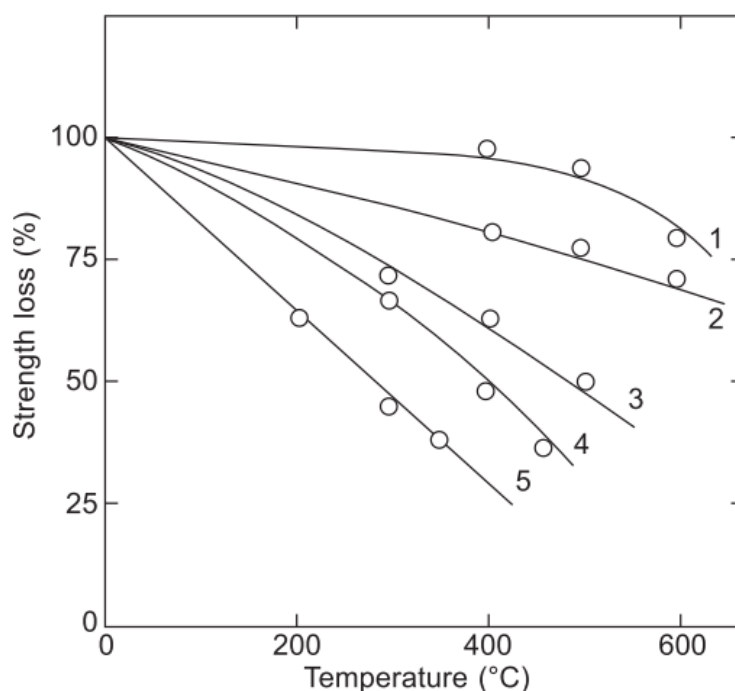
در انگلستان، توماس و همکارانش، الیاف E-glass را به مدت ۴ ساعت در دماهای بین ۱۰۰-۶۰۰ °C حرارت دادند. کاهش نسبتاً ثابتی در استحکام مشاهده شد، البته در رنج دمایی ۳۰۰-۴۰۰ °C این شیب تندتر شد (شکل ۱). زمانی که دمای عملیات حرارتی بالای ۴۰۰ °C بود، استحکام الیاف حرارت دیده در مقایسه با حالت اولیه خود بیش از ۶۰٪ کاهش را نشان دادند. علاوه بر این تحقیق آنها نشان داد که روند کاهش استحکام با افزایش زمان نگهداری الیاف در آن افزایش پیدا می‌کند تا به یک مقدار ثابت حداقلی برسد، این مقدار ثابت در دماهای بالاتر در زمان‌های کوتاه‌تری اتفاق می‌افتد [۱].

پس از انجام عملیات حرارتی، الیاف شیشه دچار کاهش استحکام می‌شوند. شکل ۱ نشان می‌دهد که رفتار الیاف با ترکیب سازنده مختلف در برابر عملیات حرارتی چگونه است. نمودار نشان می‌دهد که الیاف کوارتز دارای بیشترین میزان مقاومت در برابر حرارت هستند و تنها در دماهای بالای ۶۰۰ °C تحت تاثیر قرار می‌گیرند. در حالی که الیاف بورات شیشه حتی در دماهای زیر ۲۰۰ °C نیز یک کاهش خطی در استحکام در مقایسه با افزایش دما را نشان می‌دهد. یک سیکل گرمایشی-سرمایشی می‌تواند از طریق مکانیسم‌های زیر موجب کاهش استحکام الیاف شیشه گردد:

- i. هیدرولیز شبکه
- ii. حرارت دادن لایه‌های آبدیده‌ی فشرده
- iii. واشیشه ای شدن<sup>۱</sup> (تبدیل حالت شیشه ای به حالت بلوری) شیشه.

---

<sup>۱</sup> Devitrification

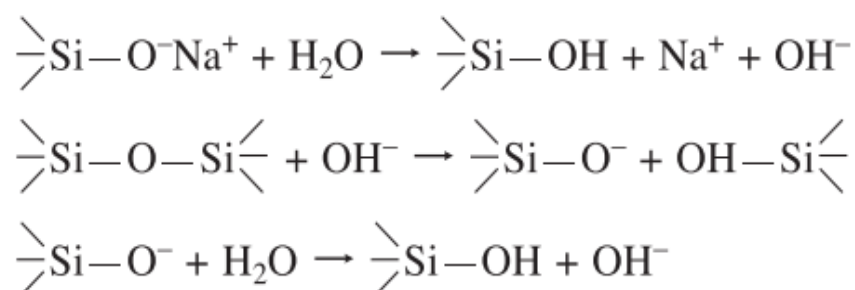


شکل ۱- اثر اجزای شیمیایی تشکیل دهنده شیشه بر استحکام الیاف شیشه پس از عملیات حرارتی: ۱. کوارتز؛ ۲. سیلیکا؛ ۳. آلومینوم بوروسیلیکات عاری از قلیا؛ ۴. سیلیکات کلسیم سدیم؛ ۵. بورات [۲].

شکل ۱ نشان می‌دهد که تابعیت استحکام الیاف شیشه از زمان (فرسودگی استاتیک)، مستقل از دما است، این مسئله نشان می‌دهد که مکانیسم غالب از میان سه مکانیسم گفته شده، هیدرولیز شبکه است. از آنجایی که گروه‌های مختلفی از محققان ثابت کرده‌اند که الیاف شیشه به محض ریسیده شدن، شروع به جذب سطحی ملکول آب می‌کند. از آنجایی که ثابت شده است که مانند بسیاری از مواد مختلف خصوصیات سطح الیاف شیشه با لایه‌های داخلی و بالک آن تفاوت دارد، برای مثال در الیاف شیشه E-glass سطح الیاف حاوی مقادیر زیادی از گروه‌های هیدروکسیل است. این گروه‌ها بسیار آبدوست هستند؛ در مقالات گزارش شده که به مرور زمان وقتی الیاف شیشه در معرض رطوبت هوا قرار می‌گیرند، روی سطح آبدوست E-glass چندین لایه از ملکول آب تشکیل می‌شود. از طرفی گزارش شده است که آب در دمای نزدیک به  $300^{\circ}\text{C}$  از سطح و در دماهای بالاتر از بالک الیاف شیشه از دست می‌رود. مقالات نشان می‌دهد که در معرض رطوبت قرار گرفتن این الیاف موجب

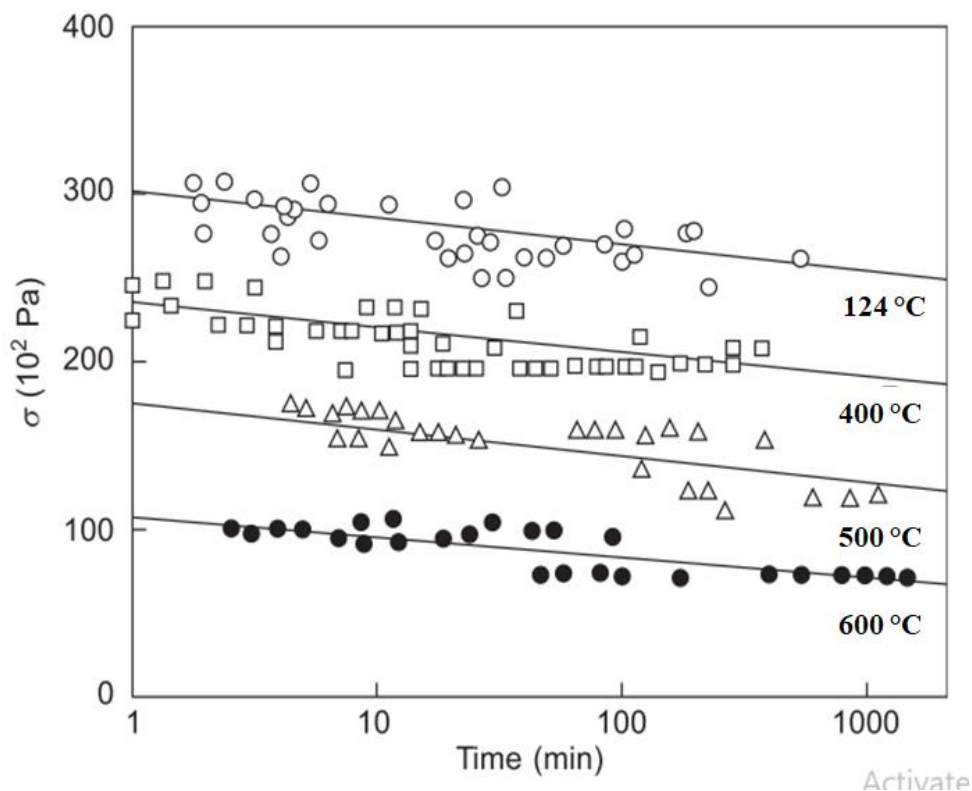
کاهش استحکام با گذشت زمان خواهد شد؛ این مشاهده سبب شده که یکی از دلایل این امر را مرتبط با افزایش مساحت سطح ماکرو حفره - که عنوان حفره‌هایی با شعاع بیشتر از ده نانومتر تعریف می‌شود- بدانند [۱].

بنابراین، الیاف شیشه تجاری در نتیجه‌ی برهمکنش با آب، کاهش استحکام دارند [۱][۲]. شکل ۲ نشان می‌دهد که سدیم و پتاسیم به عنوان کاتالیست‌هایی برای هیدرولیز الیاف شیشه عمل می‌کنند، بنابراین الیاف شیشه تجاری که اخیراً به بازار ارائه شده‌اند، نظیر شیشه S-۲، می‌توان اینطور انتظار داشت که در استحکام این الیاف حساسیت بیشتری نسبت به دماهای بالاتر داشته باشد.



شکل ۲- تخریب ساختار سیلیکا که در نتیجه حضور ملکول آب و هیدرولیز شبکه اتفاق می‌افتد [۲].

گروهی از محققین در سال ۲۰۰۷، اثر دما را بر استحکام باقیمانده در الیاف شیشه تجاری E-glass در آتش مورد بررسی مجدد قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که دردمای بالای ۲۵۰ °C، استحکام الیاف به شدت تحت تاثیر قرار می‌گیرد. این مشاهده بار دیگر مکانیسم هیدرولیز شبکه را تایید می‌کند. گروه دیگری نیز استحکام الیاف E-glass را در دماهای ۱۲۴ تا ۶۰۰ °C و در زمان‌های مختلف اندازه‌گیری کردند و نتایج در شکل ۳ قابل مشاهده است؛ مشخص است، به نظر می‌رسد که دما در مقایسه با زمان تاثیر بیشتری بر استحکام باقیمانده نهایی الیاف دارد.



شکل ۳- تابعیت زمان استحکام الیاف شیشه نوع E- در دماهای مختلف [۱].

در دمای پایین حدود  $300^{\circ}\text{C}$  گروه‌های سیلانول سطح تمایل دارند که متراکم شده و به پیوندهای سیلوکسان تبدیل شوند، در حالی که در دماهای بالاتر مکانیسم هیدرولیز مهم ترین اتفاقی بود که صورت می‌پذیرفت. در رنج دمایی پایین‌تر، میزان پایداری استحکام الیاف به ترمودینامیک واکنش‌های شیمیایی مرتبط است. در واقع نرخ هیدرولیز، تابعی از کتالیزورها خواهد بود. از آنجایی که فلزات قلیایی اصلاح کننده‌ی به عنوان کتالیزور هیدرولیز عمل می‌کند، شیشه‌هایی که دارای این ترکیبات نیستند مقاومت بیشتری در دماهای بالاتر خواهند داشت [۲].

### ۳-۶ اثر دمای عملیات حرارتی بر واهلش<sup>۲</sup> آنتالپی

<sup>۲</sup> Relaxation

توضیحات دقیقی در مورد ارتباط میان تغییرات فیزیکی حاصل از افزایش دما و خواص مکانیکی الیاف شیشه باید وجود داشته باشد که تا کنون چندان به آن پرداخته نشده است. در یکی از مقالات منتشر شده، به همراه مقادیر استحکام کششی واهلش آنتالپی و آنترופی آن نیز اندازه گرفته شده است. در ابتدا این مسئله رو باید در نظر گرفت که، دمای بحرانی که بعد از آن کاهش استحکام و واهلش آنتالپی اتفاق می افتد، حدود دمای ۳۰۰ °C است. طی دو پروسه‌ی تولید، از دو نوع E-glass الیاف شیشه استفاده شد؛ الیاف کشیده شده و همینطور الیاف شیشه spun wool fiber (SWF). در فرآیند تولید SWF کشش بسیار کمی برای تولید استفاده شده است که منجر به انیزوتروپی کمتر آن خواهد شد؛ از طرفی کنترل کمتری در فرآیند تولید آن نسبت به الیاف کشیده شده وجود دارد در نتیجه این مسئله منجر به آسیب‌های سطحی بیشتری خواهد شد. استحکام الیاف شیشه SWF حدود ۱/۵ GPa اندازه گیری شد. انیزوتروپی الیاف ممتد E-glass پس از اینکه به مدت ۳ ساعت در دمای ۵۰۰ °C حرارت داده شد به صفر می‌رسد، این عملیات حرارتی موجب کاهش در استحکام از حدود ۳ به ۱/۵ GPa رسید. بر اساس مشاهدات به دست آمده می‌توان فرضیات زیر را مطرح کرد:

i. کاهش استحکام مرتبط با واهلش آنتالپی است یا،

ii. کاهش استحکام مرتبط با واهلش انیزوتروپی است.

پژوهشگران نیز به قطعیت علت این مسئله را ذکر نمی‌کنند و نمی‌توانند با سطح اطمینان بالایی این پدیده را به فرآیند واهلش ربط دهند و یا اینکه به قطعیت برسند که کدام یک از این دو احتمال ذکر شده می‌تواند عامل اصلی کاهش استحکام در اثر حرارت باشد [۱].

## ۶-۴ اثر اتمسفر عملیات حرارتی

اثر عملیات حرارتی بر استحکام یاقیمانده الیاف شیشه به خوبی تا به امروز تبیین شده و ثابت شده است. اثر جو عملیات حرارتی نیز مورد بررسی قرار گرفته است. گزارشات اولیه گروهی از پژوهشگران به صورت آزمایشگاهی نشان داد که اختلافی میان استحکام باقیمانده در الیاف E-glass زمانی که عملیات حرارتی تحت جو هوا یا

آرگون انجام می‌گیرد، وجود ندارد. تحقیقات جدید نیز اثرگذار بودن نوع اتمسفر بر استحکام مکانیکی باقیمانده را رد می‌کند [۱].

## ۵-۶ اثر عملیات حرارتی تحت تنش کششی بر خصوصیات الیاف

اثر دما، زمان و اتمسفر عملیات بر استحکام الیاف شیشه تحت شرایطی که الیاف رها از تنش و به صورت آزاد هستند پیش از این توضیح داده شد. مسئله‌ای که کمتر مورد بحث و بررسی قرار گرفته است، اثر عملیات حرارتی، زمانی که الیاف تحت تنش کششی هستند، است.

پژوهشگران اولین گزارش‌ها را در مورد الیاف شیشه‌ای که از اجزای تشکیل دهنده قلیایی و غیر قلیایی تشکیل شده‌اند، منتشر کرد. نتایج آزمایش‌ها بر روی الیاف قلیایی جالب توجه است، زیرا این الیاف در مقایسه با مقادیر الیافی که در حالت بدون تنش تحت عملیات حرارتی قرار گرفتند، ارزیابی شدند. با استحکام اولیه نسبتاً پایین، کمی بیشتر از ۱ GPa، نویسندگان یک کاهش تقریباً خطی در استحکام با گرمایش بدون تنش را گزارش کردند. از سوی دیگر، الیاف حرارت دیده تحت تنش، حفظ استحکام بهتری را نشان دادند. با اعمال بار برابر با ۲٪ استحکام نهایی، استحکام نسبتاً بالاتری در سراسر محدوده دما اندازه‌گیری شد. با این حال، اعمال ۷۰٪ از پیش تنش نهایی، نتایج بهتری را ایجاد کرد: تا ۱۰۰٪ استحکام بیشتری در مقایسه با نمونه حرارت داده شده بدون تنش حفظ شد [۱].

پژوهشگران آزمایش دیگری نیز انجام دادند، آنها عملیات حرارت دادن را رو الیافی که پیش از آن تحت تنش قرار گرفته بودند انجام دادند، البته نوع الیاف شیشه‌ای استفاده کردند که از نوع E-glass ای بود که به میزان زیادی عاری از نقص و ایراد بود. تفاوت میان شرایط اولیه الیاف - الیاف اولیه و همینطور الیاف که عملیات ویژه‌ای روی آن انجام شده باشد- اثر قابل توجهی بر مقادیر استحکام به دست آمده دارد. آنها، دو دسته از الیاف را دو ساعت تحت عملیات حرارتی قرار دادند، در حالت اول الیاف تحت هیچگونه اعمال تنش واقع نشده بودند و در حالت دیگر الیاف تحت اعمال نیرویی معادل ۲-۲۰٪ از استحکام الیاف در دمای لتاق بود ( که در این مورد

حدود  $3/8 \text{ GPa}$  بود)، قرار گرفته بودند. مشخص شد که به طور کل عملیات حرارتی منجر به کاهش استحکام باقیمانده الیاف در دمای اتاق شده است. هرچند، در دماهای بالای  $250^\circ \text{C}$  و به طور ویژه در بیشترین دمای مورد بررسی قرار گرفته،  $450^\circ \text{C}$ ، استحکام باقیمانده در نمونه‌هایی که قبل از انجام آزمون حرارتی تحت تنش قرار گرفته‌اند، بیشتر از نمونه‌هایی بود که تحت تنش اولیه قرار نگرفته بودند؛ بیشترین میزان اختلاف حدود  $0.75 \text{ GPa}$  بود [۱].

در تحلیل نتایج این دو پژوهش انجام شده، چه در حالت اول که الیاف مستحکم‌تر شده‌اند و چه در حالتی که ضعیف‌تر می‌شود، اثر به وجود آمده به تغییرات هندسی اطراف شکاف‌ها و یا نقص‌های ساختاری روی سطح الیاف نسبت داده شده‌اند. محققین روی تغییر شکل الاستیک و پلاستیک و همین‌طور جریان inelastic مواد در شکاف‌ها بحث کرده‌اند. در هر دو مورد آنها این‌طور فرض کردند که جریان تنش اعمال شده منجر به یک وضعیت شکاف کمتر بحرانی شده که نهایتاً منجر به کاهش تمرکز تنش توسعه یافته شده در زمانی که آزمون استحکام در حال انجام است خواهد شد.

در تحقیق جدیدتری که انجام شده است، محققان گزارش کردند که الیاف شیشه سیلیکا با قطر تقریبی  $125 \mu\text{m}$  مورد بررسی قرار گرفت. الیاف به صورت تک لیف تحت تنشی معادل  $60\%$  از مقدار تنش پارگی قرار گرفت و در حالی که تحت این تنش بود به مدت  $60$  ثانیه در معرض جریانی از گاز داغ در دماهای میان  $100-500^\circ \text{C}$  قرار گرفت. پس از انجام عملیات حرارتی، تنش اعمالی از روی الیاف برداشته شد و در شرایط دمایی و رطوبت لتاق مورد بررسی قرار گرفت. آنها گزارش کردند که استحکام باقیمانده در الیافی که در حین اعمال حرارت تحت تنش بودند بیشتر بود نسبت به نمونه‌هایی که به صورت آزادانه در معرض این عملیات حرارتی قرار گرفتند. توضیحی که در مورد این مشاهده ارائه شده است به این شرح است که زمانی که الیاف تحت تنش حرارت داده می‌شوند و در معرض بخار آب قرار می‌گیرند، در نتیجه‌ی واهش تنش سطحی یک لایه نازک تنش فشاری باقیمانده روی سطح الیاف تشکیل می‌شود.

باید این مسئله را در نظر داشت که به طور قطع نمی‌توان مطمئن بود که شکاف‌ها یا نقص‌های فیزیکی روی سطح الیاف شیشه همیشه منشاء تمرکز تنش بحرانی هستند و منجر به از میان رفتن الیاف شیشه‌ای حرارت داده شده می‌شوند؛ هرچند این توضیح خشنود کننده به نظر می‌رسد. برای تجمع آهار یا مواد ماتریس و یا بعضی از ذرات خارجی که به سطح الیاف متصل شده‌اند، می‌توانند به عنوان نقاطی که تنش را افزایش می‌دهند عمل کرده و موجب از بین رفتن الیاف شوند.

## ۶-۶ تغییرات فیزیکی به وجود آمده در نتیجه‌ی عملیات حرارتی

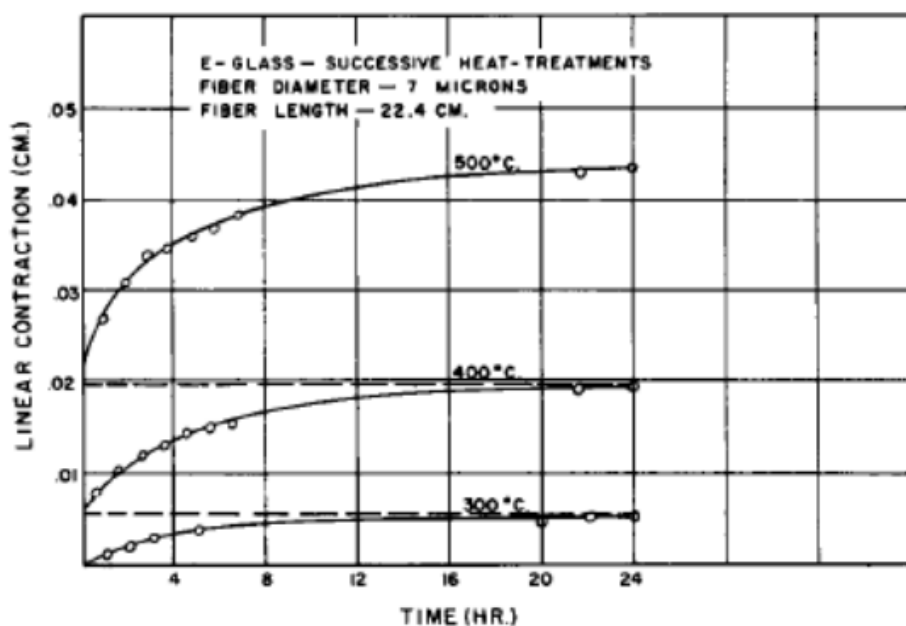
مکانیسم و یا مکانیسم‌های دقیقی که درگیرند تا یک کاهش استحکام در نتیجه‌ی عملیات حرارتی اتفاق بیفتد به طور کامل در مراجع تبیین نشده‌اند. هرچند، تغییراتی که در حین عملیات حرارتی اتفاق می‌افتد به صورت دقیق مورد بررسی قرار گرفته است. در بعضی از موارد این پدیده‌ها به صورت کامل شناخته شده نیستند، و در بعضی دیگر مشاهدات گزارش شده اند ولی توضیحات بیشتری نیاز است تا موضوع به طور دقیق و کامل توجیه گردد [۱].

## ۷-۶ تراکم حرارتی با واهلش آنتالپی

تغییرات فیزیکی که در حین عملیات حرارتی الیاف شیشه اتفاق می‌افتد به دو قسمت تقسیم می‌شود؛ پدیده‌های وابسته به سطح و پدیده‌های مرتبط با بالک الیاف. یکی از پدیده‌هایی که می‌توان وابسته به تغییرات بالک الیاف در نظر گرفت، تراکم حرارتی است.

غالب تحقیقات اولیه‌ای که بر روی این پدیده انجام گرفته است، بر روی الیاف شیشه E-glass انجام شده و مهم‌ترین نتیجه به دست آمده این بوده که وقتی عملیات حرارتی در درجه حرارت و زمان کافی اتفاق بیفتد، فرآیند متراکم شدن و اصطلاحاً تراکم حرارتی اتفاق می‌افتد. همانطور که انتظار می‌رود، در دماهای پایین‌تر (بین دما اتاق و  $300^{\circ}\text{C}$ ) انبساط حرارتی اتفاق می‌افتد؛ هرچند دمای بالاتر از این دما پدیده‌ی تراکم حرارتی (همراه با کاهش طول) در مقایسه با انبساط حرارتی پدیده‌ی غالب است. متعاقباً، نگه داشتن لیف در دمای  $500^{\circ}\text{C}$

موجب تراکم لیف به مقداری کمتر از طول اولیه لیف خواهد شد. علاوه بر این، تحت یک فرآیند حرارت دهی ایزوترمال (شکل ۴) حتی در دمای پایینی مانند  $300^{\circ}\text{C}$ ، اگر زمان کافی به لیف داده شود، تراکم قابل اندازه گیری در نمونه به وجود می آید؛ این پدیده در دماهای بالاتر در زمان های بسیار کوتاه تری اتفاق می افتد. به موازات این تراکم، پژوهشگران تغییرات دیگری را نیز در بالک شناسایی کرده اند، مانند افزایش چگالی و به طور غیر مستقیم مدول یانگ. مدول یانگ به طور مستقیم متأثر از دمای عملیات حرارتی نیز است. محققان اعلام کردند که این نتیجه تنها برای این نوع از الیاف شیشه به دست نیامده است برای سایر انواع آن نیز قابل تعمیم است [۱].



شکل ۴- نتیجه حرارت دادن ایزوترمال بر متراکم شدن طول الیاف با گذشت زمان [۱].

در تحقیق دیگری، واهلش الیاف شیشه با استفاده از آنالیز کالریمتری روبشی تفاضلی ( $\text{DSC}^3$ ) مورد بررسی قرار گرفت. آزاد سازی گرما از نمونه های الیاف در حین فرآیند اسکن حرارتی در رنج وسیعی از زمان و دما اندازه گیری شد. نتایج روی الیاف شیشه حاوی بورون نشان داد که حرارت دادن به نمونه در دمای نزدیک به دمای  $T_g$ ، ولی

<sup>3</sup> Differential scanning calorimetry

کمتر از آن سبب آزاد سازی چیزی می‌شود که این محققین از آن با عنوان آنتالپی اضافه‌ی الیاف یاد می‌کنند. این فرآیند گرمازا آنتالپی واهلش نام‌گذاری شد. نشان داده شده است که آنتالپی واهلش مربوط به خنک سازی الیاف شیشه در حین فرآیند تولید می‌باشد؛ زمانی که فرآیند خنک سازی در نرخ بالاتری انجام بگیرد، مقدار بزرگ‌تری از انرژی (آنتالپی اضافه) درون ساختار الیاف شیشه ذخیره می‌شود. توضیحی که برای این پدیده پیشنهاد داده می‌شود، "بازآرایی مشترک شبکه ایزوتروپیک منجمد شده است. با در نظر گرفتن E-glass این بازآرایی تنها زمانی اتفاق می‌افتد که دمای عملیات حرارتی ز دمای حدود  $300^{\circ}\text{C}$  عبور کند و در دماهای بالاتر نرخ افزایش دما نیز افزایش یابد [۱].

با توجه به نتایج گزارش شده اینگونه می‌توان در نظر گرفت که در دمای بالای  $30^{\circ}\text{C}$ ، پدیده‌ی تراکم حرارتی اتفاق می‌افتد. منطقی به نظر می‌رسد که این گونه نتیجه بگیریم که واهلش و بازآرایی شبکه شیشه عامل ایجاد این پدیده هستند [۱].

#### ۸-۶ اثر بلوری شدن بر کاهش استحکام

بلوری شدن الیاف شیشه به عنوان منشاء کاهش استحکام در نتیجه‌ی عملیات حرارتی معرفی شده است. تحقیقات نشان داده که در نتیجه عملیات حرارتی، روی سطح الیاف و یا درون ساختار الیاف شبکه‌های بلوری نسبتاً کامل شده‌اند. ساختارهای بلوری شکل گرفته است ولی نتایج نشان داده که برای تحقق این امر زمان طولانی (بیش از یک روز) لازم است. هنوز ماهیت این پدیده و صحت وقوع آن برای پژوهشگران در هاله‌ای از ابهام قرار دارد [۱].

#### ۹-۶ بررسی سطح پارچه الیاف شیشه با کمک آنالیز SEM

با استفاده از تصاویر SEM، مورفولوژی سطحی پارچه‌ها را مورد بررسی قرار دادیم. با توجه به تصاویر SEM شکل ۵ الف، پارچه چینی بافته شده از الیاف شیشه با نخ تار به صورت فلت<sup>۴</sup> و نخ پود به صورت تکسچره<sup>۵</sup> با طرح بافت تافته بافته شده است. تفاوت ظاهری تار و پود در تصویر کاملاً به وضوح دیده می‌شود.

همانطور که در تصاویر زیر مشاهده می‌شود، پارچه الیاف شیشه ساخت چین با اندازه قطر نخ تار آن  $0.66 \text{ mm}$  و قطر نخ پود آن  $1.54 \text{ mm}$  و همچنین قطر الیاف در نخ‌ها  $5.5 \mu \text{m}$  است. الیاف در نخ‌های تار به صورت جداگانه قرار ندارند بلکه به هم چسبیده‌اند یا به عبارتی دیگر به نظر می‌رسد که با یک روش تکمیلی، ماده‌ای روی سطح آنها اعمال شده است.

علاوه بر پارچه الیاف شیشه وارد شده از چین، مورفولوژی سطح پارچه الیاف شیشه‌ای که در ایران نیز تولید شده است به کمک آنالیز SEM مورد بررسی قرار گرفت؛ از این نمونه به عنوان نمونه شاهد یاد خواهیم کرد. همان طور که در تصاویر SEM نمونه شاهد، قابل مشاهده است، سطح نخ‌ها و الیاف مطابق انتظار صاف است. در نمونه شاهد قطر نخ تار  $0.73 \text{ mm}$  و قطر نخ پود  $1.41 \text{ mm}$  و قطر الیاف نخ‌ها  $6/9 \mu \text{m}$  است. با توجه به تصاویر SEM هر دو نمونه، در نمونه شاهد الیاف آن به صورت مستقل از یکدیگرند و بدون هیچ اتصالی کنار هم قرار گرفته‌اند.

## ۶-۱۰ اثر عملیات تکمیل حرارتی بر روی مورفولوژی سطح پارچه الیاف شیشه

آهار، یک لایه پوشش بسیار نازک از مواد آلی است که با هدف ایجاد قابلیت رسیدن الیاف شیشه و کاهش مقاومت خمشی نخ‌های تولیدی روی سطح تمامی الیاف اعمال شده است. با هدف خارج کردن آهار احتمالی اعمال شده بر روی الیاف شیشه نمونه‌ها را در دماهای مختلف تکمیل حرارتی انجام داده شد تا تاثیر اعمال حرارت را بر روی پارچه الیاف شیشه تولید شده در ایران و نمونه ساخت چین مورد بررسی قرار گیرد، تصاویر SEM به دست آمده

---

<sup>۴</sup> flat  
<sup>۵</sup> texture

در شکل ۵ قابل مشاهده است. به همین منظور دو فاکتور اثر دما و زمان مورد ارزیابی قرار گرفت، در جدول ۱ شرایط دمایی و زمانی اعمال شده به نمایش درآمده است. نمونه شاهد، پارچه الیاف شیشه‌ای که در ایران بافته شده است که هیچ عملیات تکمیل حرارتی روی آن اعمال نشده است در دما و زمان‌های مختلف تکمیل حرارتی شد. لازم به ذکر است که برای آماده سازی نمونه‌های ۴، ۵، ۶ و ۷، نمونه شماره ۳ به مدت ۵ دقیقه تحت عملیات حرارتی در دماهای مذکور قرار گرفت.

جدول ۱- مشخصات تکمیل حرارتی انجام شده بر روی پارچه الیاف شیشه و قطری نمونه‌ها.

| شرایط تکمیل حرارتی | دما (°C) | زمان (h) | قطر نخ تار (mm) | قطر نخ پود (mm) | قطر الیاف شیشه (nm) |
|--------------------|----------|----------|-----------------|-----------------|---------------------|
|                    |          |          |                 |                 |                     |
| نمونه ساخت چین     | -        | -        | ۰.۶۶            | ۱.۵۴            | ۵/۵                 |
| نمونه شاهد         | -        | -        | ۰.۷۳            | ۱.۴۱            | ۶/۹                 |
| نمونه اول          | ۳۵۰      | ۲۴       | ۰.۸۱            | ۰.۹۷            | ۶/۳                 |
| نمونه دوم          | ۳۵۰      | ۴۸       | ۰.۷۴            | ۱.۱۵            | ۶/۷                 |
| نمونه سوم          | ۳۵۰      | ۷۲       | ۰.۸۸            | ۱.۳۲            | ۶/۱۰                |
| نمونه چهارم        | ۴۵۰      | ۵ min    | ۰.۹۲            | ۱.۳             | ۷/۴                 |
| نمونه پنجم         | ۵۵۰      | ۵ min    | ۰.۹             | ۱.۳۷            | ۶/۱                 |
| نمونه ششم          | ۶۵۰      | ۵ min    | ۰.۷۹            | ۱.۳             | ۶/۳                 |
| نمونه هفتم         | ۷۵۰      | ۵ min    | ۱.۳۲            | ۱.۳۲            | ۶/۵                 |

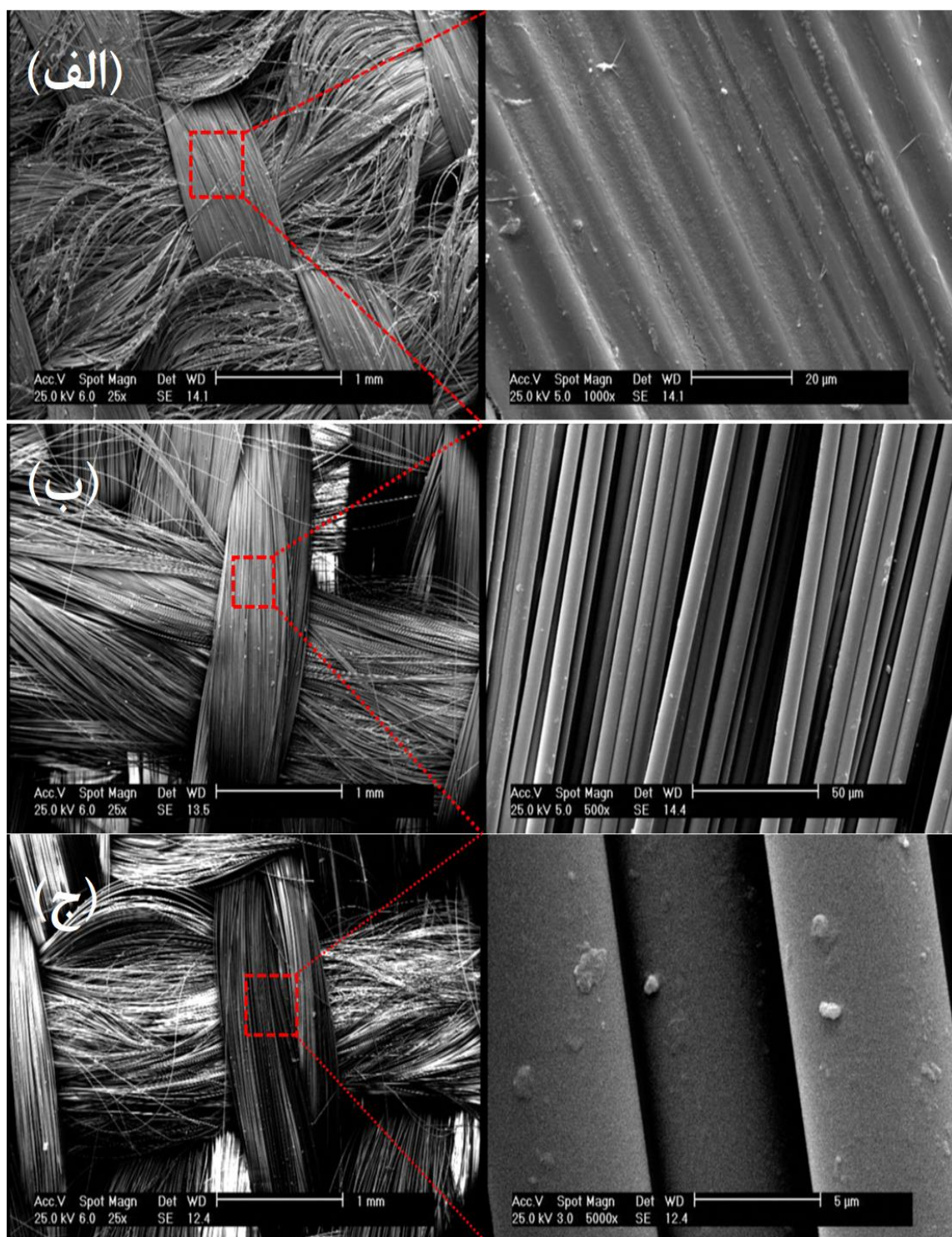
## ۶-۱۰-۱ اثر زمان

نمونه اول به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۳۵۰ °C قرار داده شد. با توجه به تصاویر قطر نخ تار ۰.۸۱ mm و قطر نخ پود ۰.۹۷ mm و قطر الیاف نخ تار ۶/۳ mm است. نمونه دوم پارچه الیاف شیشه در دمای ۳۳۰ °C و به مدت ۴۸ ساعت قرار گرفته است. قطر نخ تار ۰.۷۳ mm و قطر نخ پود ۱.۴۱ mm است. قطر الیاف شیشه ۶/۹ mm است. نمونه سوم به منظور ایجاد عملیات تکمیل فیزیکی بهتر زمان اعمال حرارت را به ۷۲ ساعت افزایش دادیم. در نمونه سوم قطر نخ تار ۰.۸۸ mm و قطر نخ پود ۱.۳۲ mm است. قطر الیاف شیشه ۶/۱۰ mm است. با اعمال

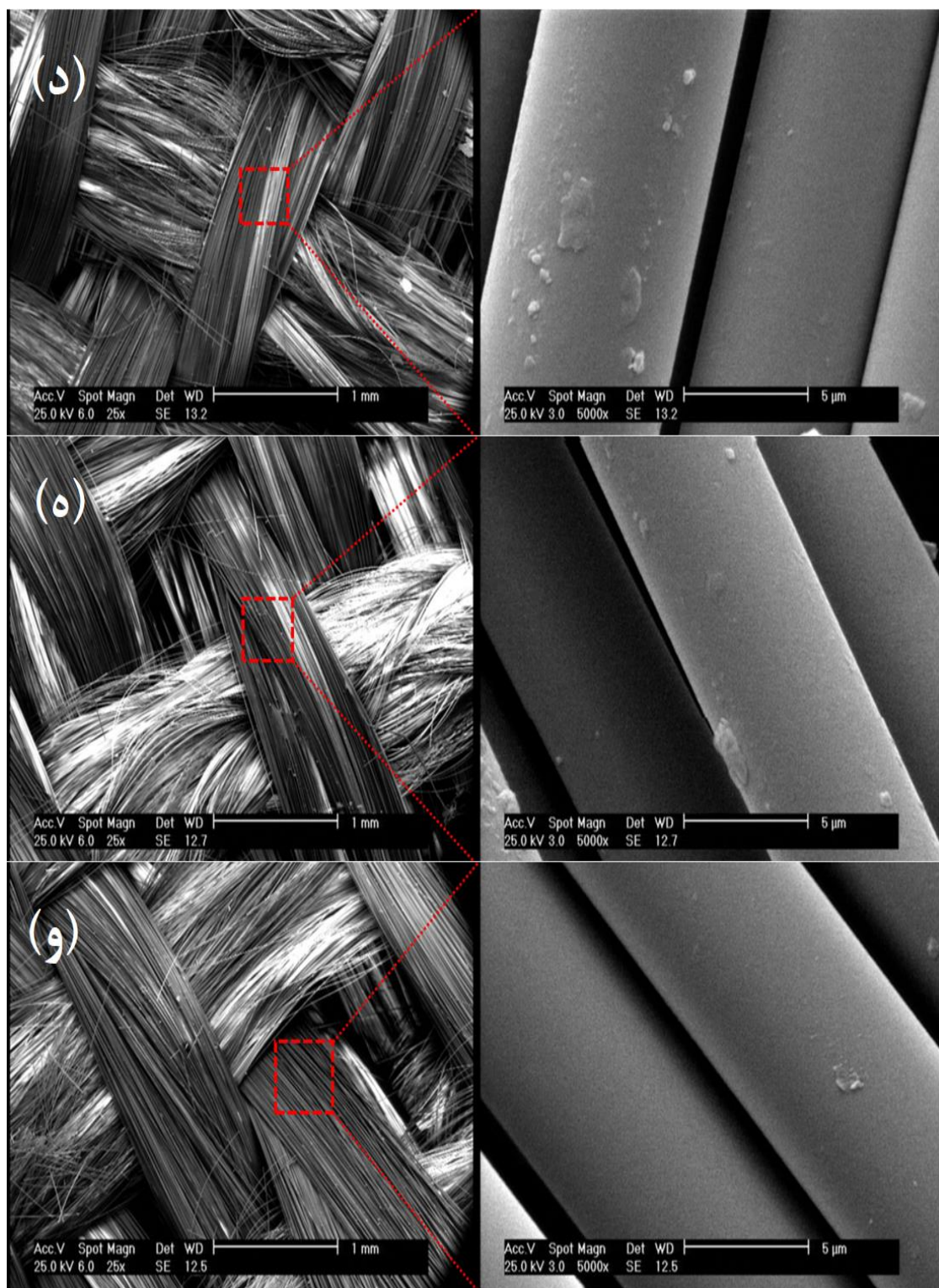
حرارت یکسان در زمان‌های متفاوت به نظر می‌رسد انجام عملیات حرارتی به صورت جزئی موجب کاهش قطر الیاف شیشه شده است. این تغییر، به تغییر ساختار داخلی الیاف شیشه مرتبط است [۳]. اما بر اثر دما، سطوح الیاف شیشه ناهموار شده و یکسری برآمدگی‌های کوچک بر روی الیاف مشاهده می‌شود. این برآمدگی‌های کوچک بر اثر حرارت می‌تواند مرتبط با آهار خارج شده از الیاف شیشه باشد که به صورت برآمدگی‌های ناهموار روی الیاف دیده می‌شوند [۳].

#### ۶-۱۰-۲ اثر دما

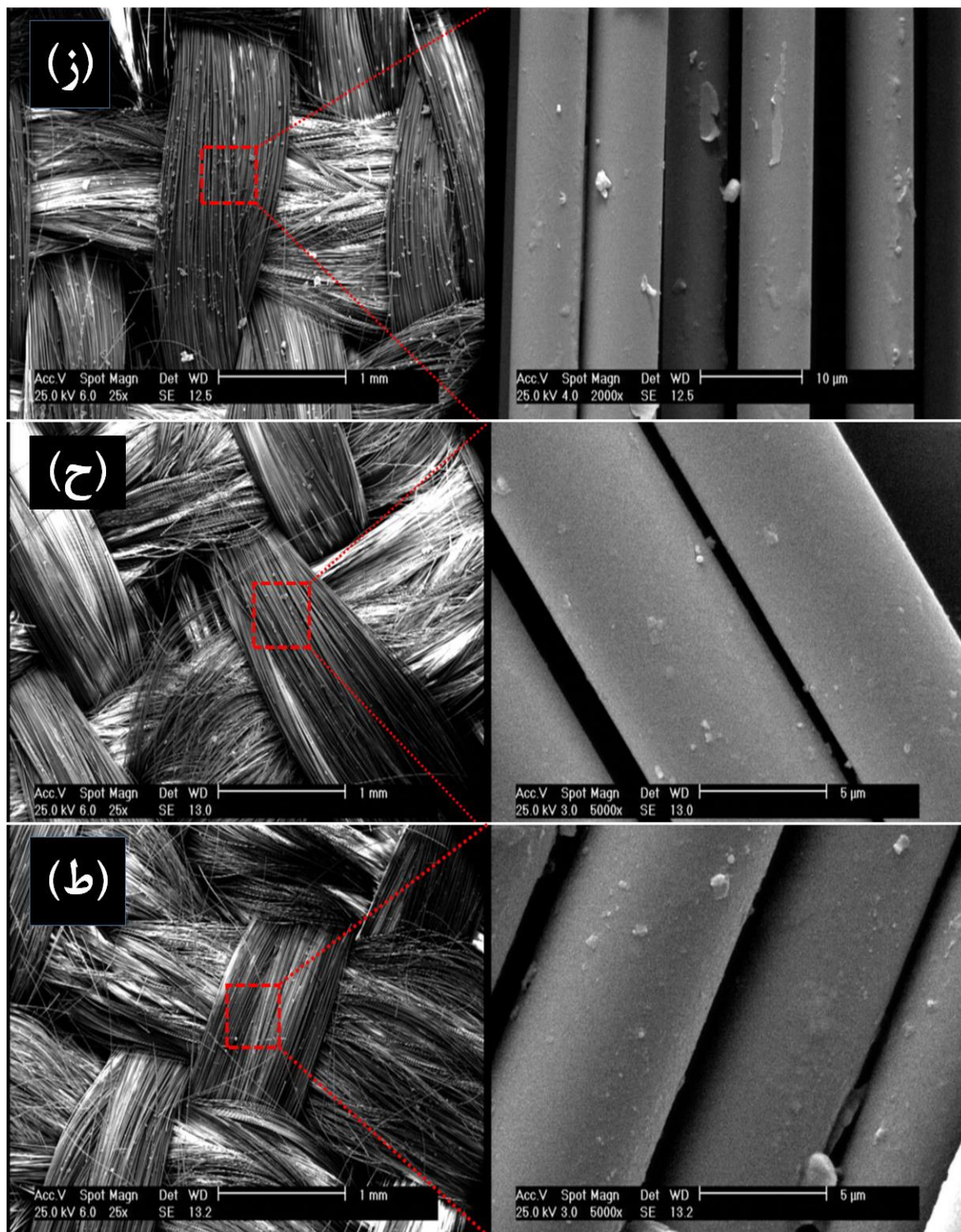
نمونه چهارم را در در دمای  $450^{\circ}\text{C}$  قرار دادیم که دارای قطر نخ تار  $0.92\text{ mm}$  و قطر نخ پود  $1.3\text{ mm}$  و قطر الیاف شیشه  $4.5\text{ }\mu\text{m}$  است. نمونه پنجم را در دمای  $550^{\circ}\text{C}$  قرار دادیم که قطر نخ تار آن  $0.9\text{ mm}$  و قطر نخ پود آن  $1.37\text{ mm}$  و قطر الیاف شیشه  $1.6\text{ }\mu\text{m}$  است. در دمای  $550^{\circ}\text{C}$  مقدار برآمدگی‌ها و گلوله‌های روی الیاف شیشه به مقدار چشمگیری افزایش پیدا کرده است. در دماهای کمتر که در بالا مشاهده کردید مقدار این برآمدگی‌ها کمتر بوده اما در دمای  $550^{\circ}\text{C}$  افزایش یافته است. عملیات حرارتی بر روی نمونه ششم با دما  $650^{\circ}\text{C}$  انجام شد. در نمونه ششم قطر نخ تار  $0.79\text{ mm}$  و قطر نخ پود  $1.3\text{ mm}$  و قطر الیاف شیشه  $6/3\text{ }\mu\text{m}$  است. نمونه هفتم که در دمای  $750^{\circ}\text{C}$  تحت عملیات حرارتی قرار گرفت، قطر نخ تار آن  $1.32\text{ mm}$  و قطر نخ پود  $1.32\text{ mm}$  و قطر الیاف شیشه  $6/5\text{ }\mu\text{m}$  است. با توجه ثبات حرارتی بالای الیاف شیشه که صورت ذاتی در آنها وجود دارد، مشاهده می‌شود که ساختار الیاف در این دما نیز به خوبی حفظ شده است. مقدار برآمدگی‌ها بر روی الیاف شیشه نمونه ششم و هفتم در مقایسه با نمونه پنجم که در دمای  $550^{\circ}\text{C}$  بود تقریباً به یک میزان است.



شکل ۵- تصاویر SEM از نمونه های (الف) پارچه الیاف شیشه وارد شده از چین (Zonel)، (ب) پارچه الیاف شیشه بافته شده در ایران (ج) حرارت داده شده در دمای  $350^{\circ}\text{C}$  به مدت ۲۴ ساعت.



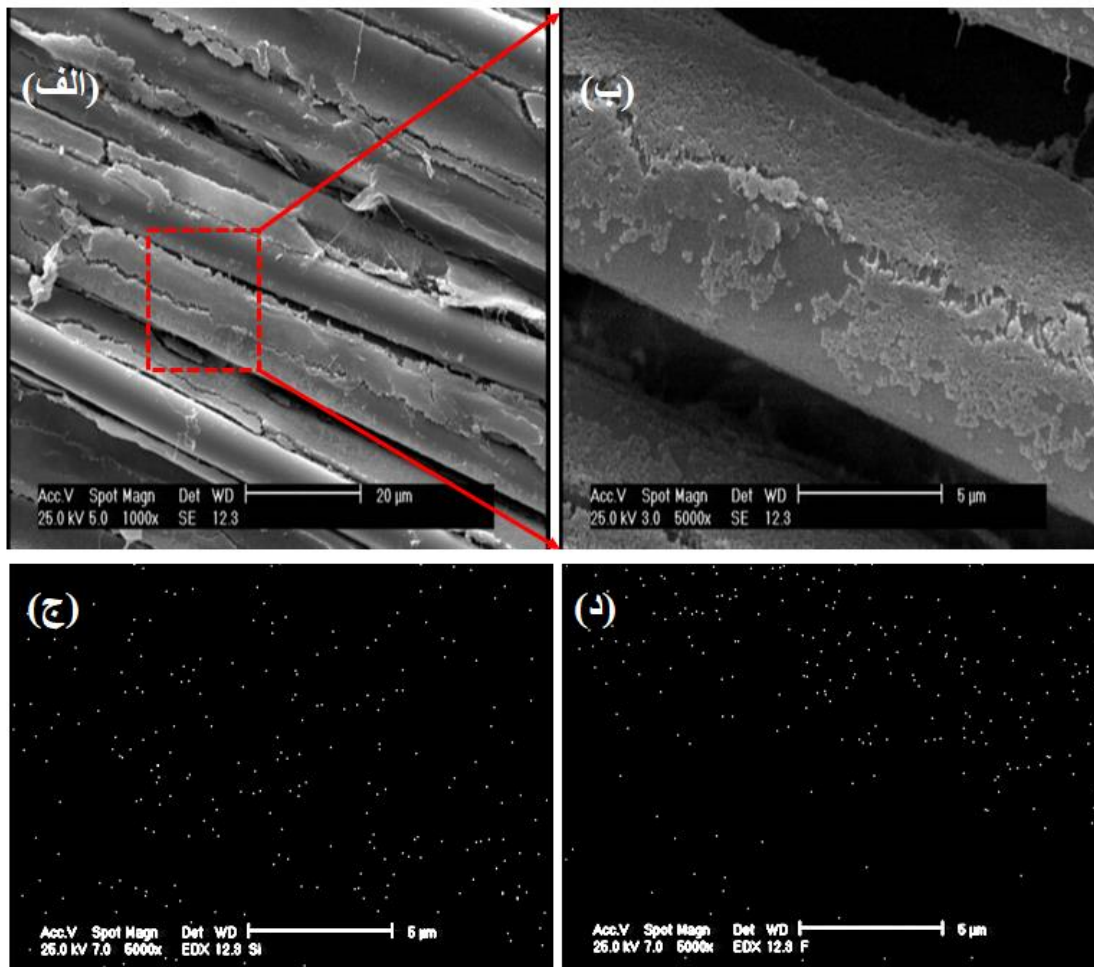
ادامه شکل ۵- تصاویر SEM از نمونه های پارچه الیاف شیشه حرارت داده شده در دمای (ز) ۳۵۰ °C به مدت ۴۸ ساعت (ه) ۳۵۰ °C به مدت ۷۲ ساعت، (و) ۴۵۰ °C.



ادامه شکل ۵- تصاویر SEM از نمونه های پارچه الیاف شیشه حرارت داده شده به مدت ۷۲ ساعت در دمای (ز) ۵۵۰ C°، (ح) ۶۵۰ C° و (ط) ۷۵۰ C°.

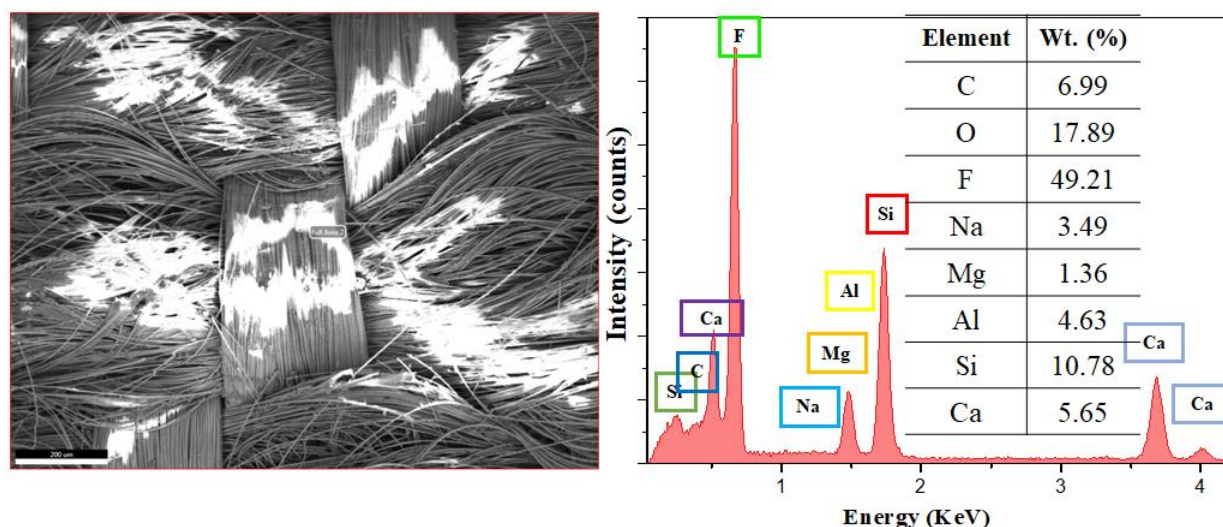
## ۱۱-۶ آنالیز عنصری سطح نمونه‌های پارچه الیاف شیشه Zonel

زمانی که سطح پارچه الیاف شیشه چینی با SEM مورد بررسی قرار گرفت، همانطور که پیش از این ذکر شد روی سطح الیاف پارچه شاهد وجود موادی بودیم که می‌توانست ناشی از انجام یک تکمیل شیمیایی روی سطح این پارچه باشد. به همین منظور به دنبال بررسی بیشتر این پارچه، آنالیز عنصری EDS روی سطح نمونه‌ها انجام شد. همانطور که در تصاویر شکل ۶ ج با توجه به ماهیت الیاف شیشه حضور عنصر سیلیسیوم روی سطح این پارچه تایید می‌شود. از طرفی عنصر فلئور به صورت ویژه مورد بررسی قرار گرفت و همانگونه که در تصویر شکل ۶د مشخص است، حضور این عنصر نیز روی سطح پارچه الیاف شیشه تایید شد.



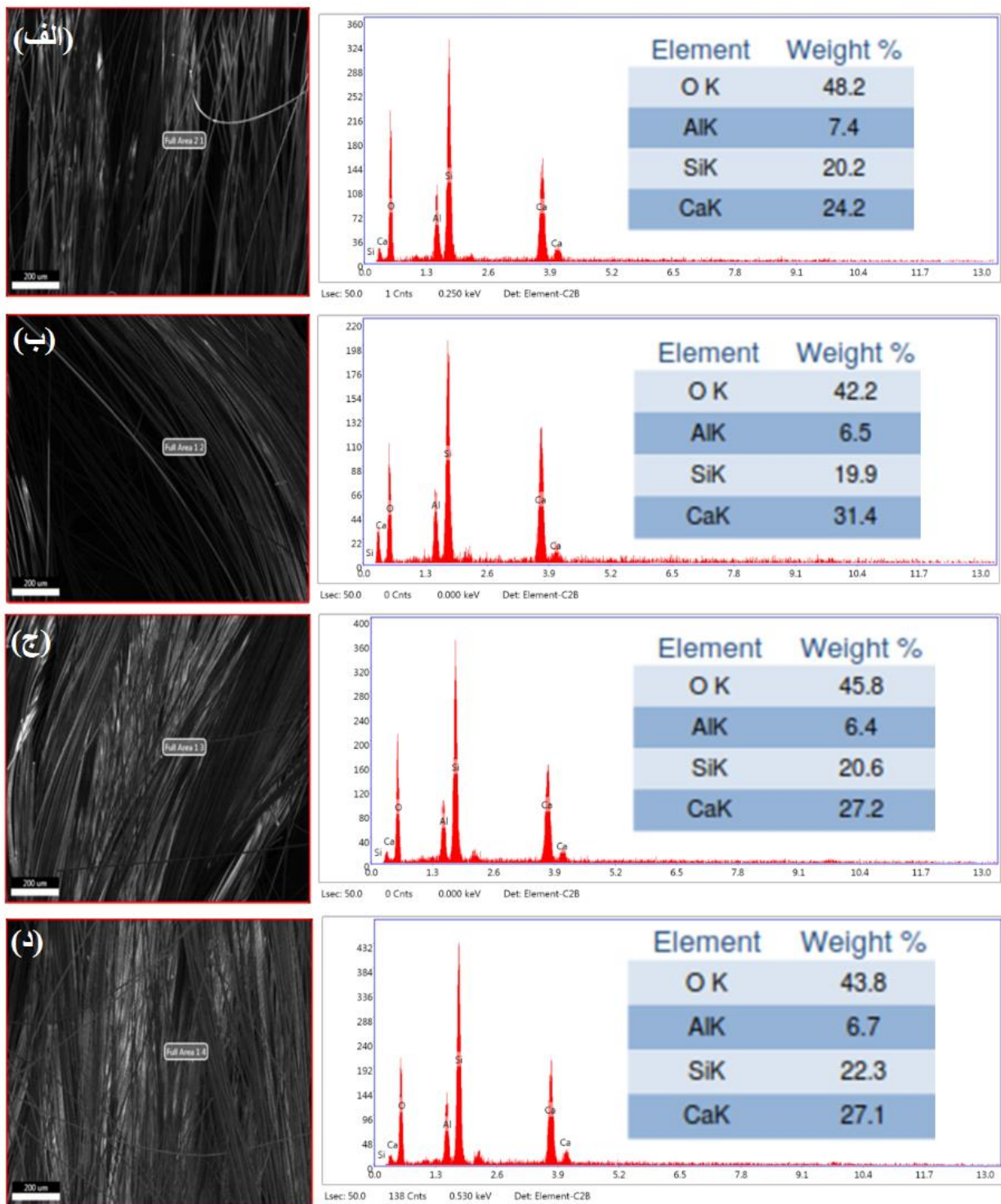
شکل ۶- تصاویر SEM از سطح پارچه الیاف شیشه (الف)، سطح الیاف شیشه با بزرگنمایی بیشتر (ب)، توزیع عنصر سیلیسیوم با استفاده از آنالیز EDS (ج) و توزیع عنصر فلئور با استفاده از آنالیز EDS (د).

در ادامه به منظور بررسی بیشتر و تکمیل مطالعه آنالیز عنصری سطح این پارچه، با استفاده از آنالیز EDS، توزیع عناصر مختلف روی سطح الیاف پارچه اندازه‌گیری شد. نتایج به دست آمده از این آنالیز در شکل ۷ قابل مشاهده است. همانطور که جدول قرار داده شده در شکل ۷ قابل مشاهده است، عناصری که روی سطح پارچه الیاف شیشه چینی حضور دارند به ترتیب درصد وزنی به دست آمده، فلئور، اکسیژن، سیلیسیوم، کربن، کلسیوم، آلومینیوم، سدیم و منیزیم هستند. با توجه به ماهیت شیمیایی الیاف شیشه و همینطور نتیجه آنالیز XRF انجام شده، وجود تمامی عناصر شناسایی شده روی سطح پارچه شیشه قابل توجیه و منطقی است به غیر از دو عنصر فلئور و کربن که با درصد بالایی نیز روی سطح این پارچه شناسایی شده‌اند. به نظر می‌رسد که این دو عنصر مرتبط با حضور ماده‌ای است که در تصاویر SEM به صورت جرمی روی سطح الیاف شیشه خود را نشان می‌دهد. جهت بررسی بیشتر سطح الیاف پارچه و شناسایی ماهیت ماده تکمیلی اضافه شده به سطح آن، در ادامه از آنالیز FTIR استفاده خواهد شد.

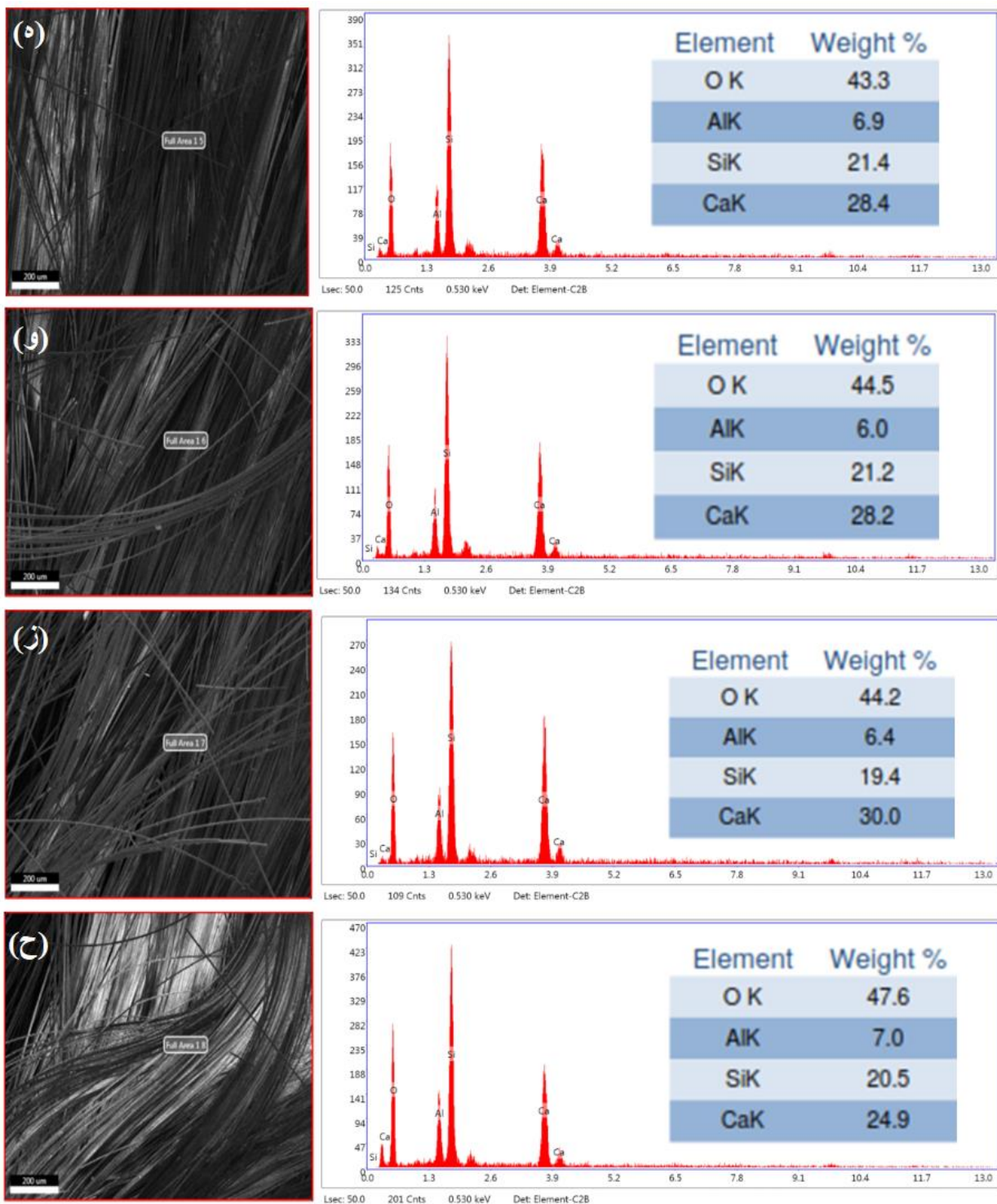


شکل ۷ - اندازه‌گیری درصد عناصر C, O, F, Na, Mg, Al, Si و Ca روی سطح پارچه الیاف شیشه چینی با استفاده از آنالیز EDS.

در ادامه آنالیز EDS بر روی پارچه الیاف شیشه تهیه شده؛ تصاویر و نتایج به دست آمده در شکل ۸ نشان داده شده است. در ایران و همینطور نمونه‌های تکمیل حرارتی شده‌ی آن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حضور چهار عنصر Al، O، Si و Ca روی سطح این پارچه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده حضور این عناصر را روی همه این نمونه‌ها تایید کرد که از عناصر تشکیل دهنده الیاف شیشه هستند.



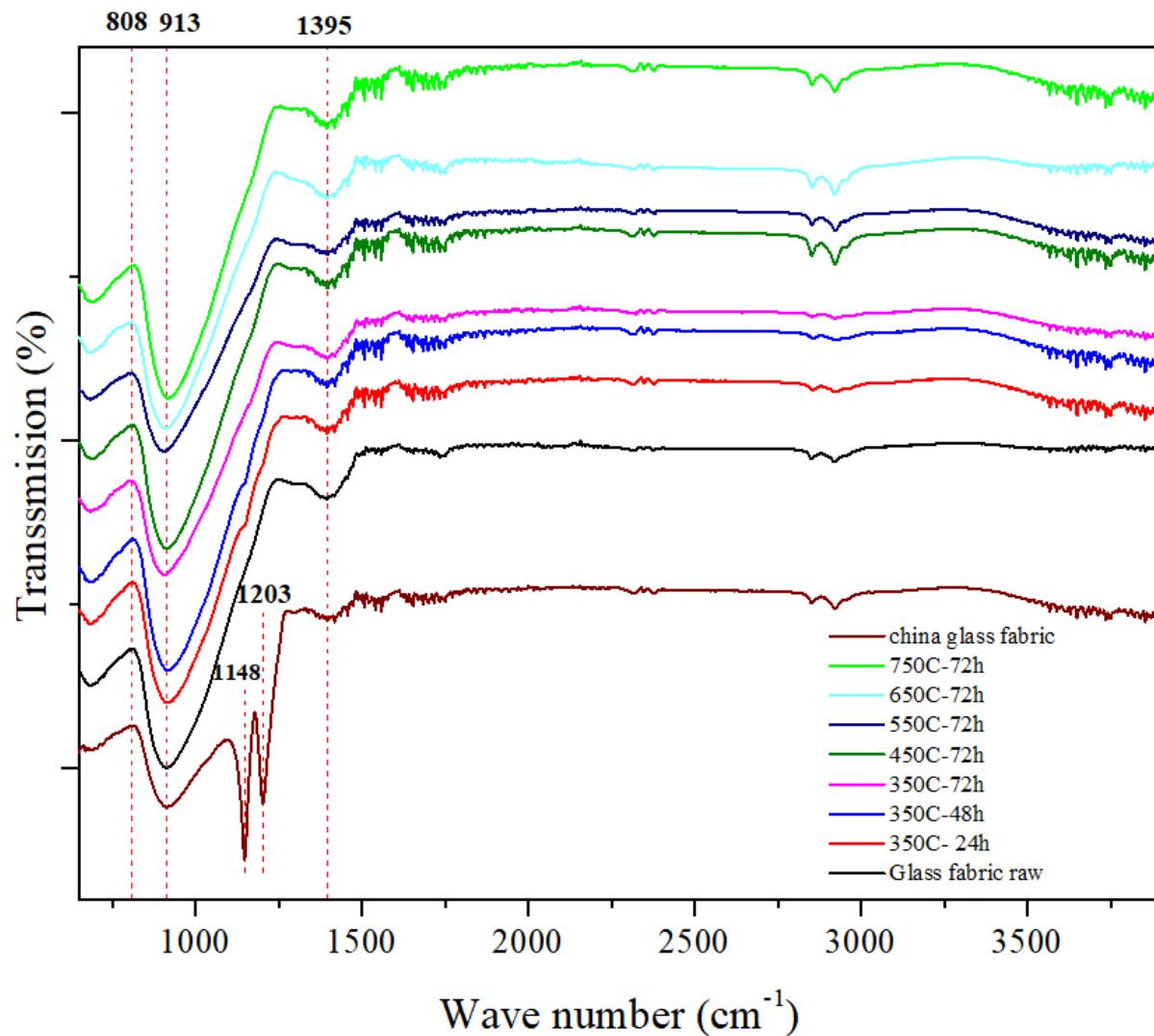
شکل ۸- آنالیز EDS انجام شده روی نمونه‌های (الف) پارچه الیاف شیشه ایرانی و پارچه الیاف شیشه ایرانی تحت عملیات حرارتی قرار گرفته در (ب) ۳۵۰ °C و به مدت ۲۴ ساعت، (ج) ۳۵۰ °C و ۴۸ ساعت، (د) ۳۵۰ °C و به مدت ۷۲ ساعت.



ادامه شکل ۸- آنالیز EDS انجام شده روی پارچه الیاف شیشه ایرانی تحت عملیات حرارتی قرار گرفته در (e) ۴۵۰ °C و به مدت ۷۲ ساعت، (g) ۵۵۰ °C و به مدت ۷۲ ساعت، (z) ۶۵۰ °C و به مدت ۷۲ ساعت و (ch) ۶۵۰ °C و به مدت ۷۲ ساعت.

## ۶-۱۲ تحلیل FTIR نمونه های پس از تکمیل حرارتی

اثر عملیات حرارتی بر ساختار ملکولی نمونه های الیاف شیشه بافته شده با کمک آنالیز FTIR مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل ۹ طیف FTIR به دست آمده از نمونه پارچه شیشه بافته شده خام و همینطور نمونه های قرار گرفته تحت عملیات حرارتی و نمونه پارچه تهیه شده از شرکت Zonel چین را نشان می دهد. در نمونه ی پارچه الیاف شیشه خام، طیف FTIR سه مشخصه در طول موج های ۸۰۸، ۹۱۳ و  $1395\text{ cm}^{-1}$  نشان می دهد که به ترتیب مرتبط با حرکت های متقارن و نامتقارن لرزشی کشش در پیوند Si-O و لرزش های خمشی پیوند Si-O-Si هستند. پیک های شارپ و قوی  $\text{SiO}_2$  ماهیت شیمیایی الیاف را تایید می کند [۳]. در نمونه هایی که عملیات حرارتی روی آنها انجام شده است، تغییر قابل ملاحظه ای در طیف FTIR آنها مشاهده نمی شود. در نمونه ی پارچه ی الیاف شیشه چینی (Zonel)، دو پیک مشخصه جدید نیز وجود دارد که در طول موج های ۱۲۰۳ و  $1148\text{ cm}^{-1}$  ظاهر شده اند، مطابق با مقالات این دو پیک به ترتیب مرتبط با کشش متقارن و کشش نامتقارن گروه  $\text{CF}_2$  هستند [۵][۴]. این نتیجه گیری بر اساس آنالیز EDS انجام شده نیز قابل تایید است. زیرا همانطور که در تصاویر EDS به دست آمده از حضور عنصر فلوئور روی سطح در شکل ۷ قابل مشاهده است، با توجه به نتیجه FTIR میتوان حضور پلیمر PTFE را روی سطح قطعی دانست. پیش از این در تصاویر SEM نیز حضور ماده ثانویه ای روی سطح الیاف پارچه مورد تایید قرار گرفته بود.



شکل ۹- طیف FTIR از نمونه پارچه شیشه بافته شده و نمونه‌هایی که دماهای مختلف تکمیل حرارتی شده‌اند و همینطور نمونه پارچه شیشه چینی (Zonel).

#### ۶-۱۳ تراکم تاری و پودی پارچه الیاف شیشه

تراکم تاری و پودی برای چهار نمونه پارچه الیاف شیشه ایرانی، سه حالت تکمیل حرارتی شدن این پارچه‌ها که در دمای ۳۵۰°C و به مدت ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعت حرارت داده شده بودند، اندازه‌گیری شد. نتایج در جدول ۲ نشان داده شده است. همانطور که از نتایج به دست آمده در جدول ۲ مشخص است، عملیات حرارتی تاثیری بر تراکم تاری و پودی پارچه ندارد و شاهد تغییر قابل توجهی در مقدار تراکم تاری و پودی در مدت زمان ۷۲ ساعت نیز نیستیم.

جدول ۲ تراکم تار و پود اندازه‌گیری شده برای پارچه الیاف شیشه شاهد و سه نمونه حرارت داده شده در دمای ۳۵۰ °C.

| نمونه<br>نوع تراکم | پارچه الیاف<br>شیشه شاهد | عملیات حرارتی شده<br>(۲۴ h، ۳۵۰ °C) | عملیات حرارتی شده<br>(۴۸ h، ۳۵۰ °C) | عملیات حرارتی شده<br>(۷۲ h، ۳۵۰ °C) |
|--------------------|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| تراکم تار<br>(cm)  | ۱۸/۳                     | ۱۸/۶                                | ۱۸/۴                                | ۱۸/۴                                |
| تراکم پود<br>(cm)  | ۱۲/۷                     | ۱۲/۷                                | ۱۲/۶                                | ۱۲/۸                                |

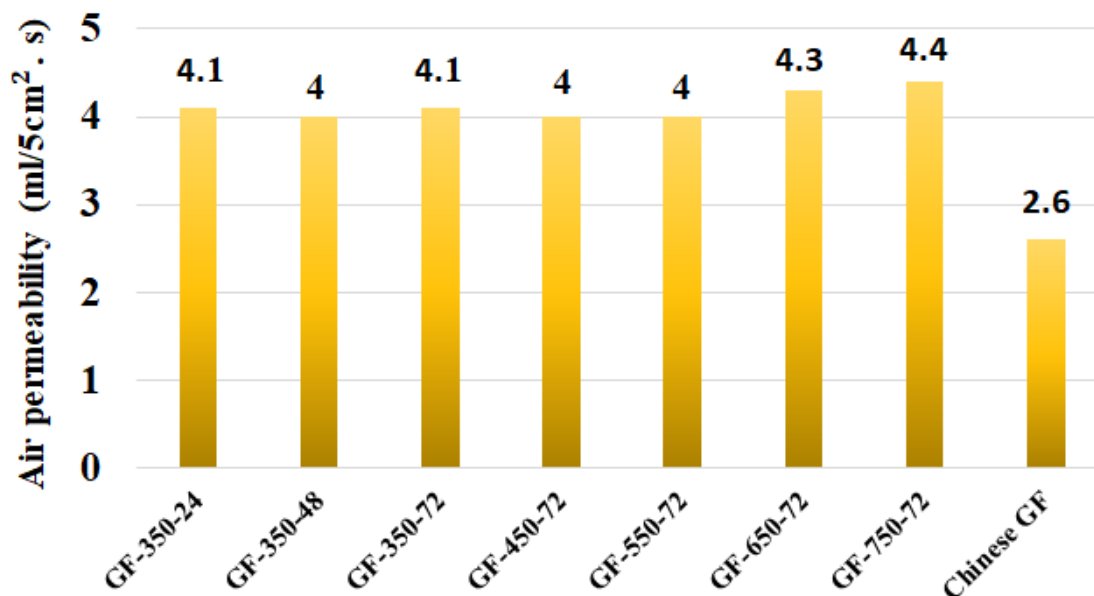
#### ۶-۱۴ اندازه‌گیری نفوذپذیری پارچه در برابر هوا

قابلیت نفوذ هوا اینگونه تعریف می‌شود؛ سرعت جریانی از هوا که تحت شرایط مشخص (فشار هوا و زمان) بطور عمود از سطح پارچه می‌گذرد. قابلیت نفوذ هوا یکی از ویژگی‌های مهم در عملکرد منسوجات است؛ به خصوص در کاربردهایی از منسوجات نظیر البسه، بادبان‌های چتر نجات، کیسه جاروبرقی، ایربگ خودرو و مدیای فیلترهای صنعتی. به طور کلی، نفوذپذیری هوا وابسته به جرم و ساختار (ضخامت و تخلخل) آن دارد. در ساختار پارچه‌های تار و پودی، حفراتی میان نخ تار و نخ پود وجود دارد. اندازه این حفرات نقش مهمی را در کاربرد منسوجات ایفا می‌کند. قابلیت نفوذپذیری هوای پارچه متأثر از این فاکتورها است: نوع ساختار پارچه، نوع بافت پارچه تار و پودی، تعداد نخ‌های تار و پود در هر سانتی متر از پارچه، میزان تاب نخ، اندازه نخ و نوع ساختار نخ [۶].

به منظور بررسی قابلیت نفوذ هوا در پارچه الیاف شیشه به استاندارد ملی ایران به شماره ۵۰۲۷ ISIRI، تحت عنوان "روش آزمون سنجش نفوذ پذیری پارچه در مقابل هوا" استناد شد. این روش آزمون برای انواع پارچه‌ها اعم از پارچه‌های صنعتی برای مقاصد فنی کاربرد دارد. نمونه‌ی پارچه الیاف شیشه با ابعاد مشخص (دایره‌ای به قطر ۹ cm<sup>۲</sup>) برش داده می‌شود و در محل قرارگیری نمونه در میان یک تیوب، که جریان هوا باید از آن با فشار

مشخص عبور کند به وسیله گیره، محکم می‌شود. پس از آن، پمپ به وجود آورنده جریان هوا که حداکثر تا ۲ bar قابلیت ایجاد فشار در تیوب را دارد، روشن شده و جریان هوا از یک سمت تیوب به نمونه برخورد کرده و از آن عبور می‌کند. فشار هوای عبور پیدا کرده از نمونه در سمت دیگر تیوب اندازه‌گیری می‌شود. بر اساس اختلاف فشار اولیه و فشار عبوری از نمونه، میزان نفوذ پذیری هوا محاسبه می‌شود.

میزان نفوذپذیری هوا برای نمونه پارچه الیاف شیشه بافته شده در ایران و همینطور نمونه پارچه شیشه چینی (Zonel) انجام گرفت و نتایج به دست آمده در شکل ۱۰ قابل مشاهده است. همانطور که از نمودار شکل ۱۰ قابل مشاهده است، قابلیت نفوذپذیری هوا در نمونه پارچه الیاف شیشه که در ایران تولید شده است،  $4/1 \text{ ml/}^\circ\text{cm}^2 \cdot \text{s}$  است. با انجام تکمیل حرارتی در زمان‌های مختلف در  $350^\circ\text{C}$  و دماهای مختلف به مدت ۷۲ ساعت، به نظر می‌رسد که میزان نفوذپذیری هوا در نمونه‌های تکمیل حرارتی شده تغییر قابل توجهی پیدا نکرده است. نکته قابل توجه در مورد نتیجه این آزمون، مقدار نفوذپذیری به دست آمده در مورد نمونه چینی است. میزان نفوذپذیری در نمونه پارچه الیاف شیشه که از چین تهیه شده است،  $2/6 \text{ ml/}^\circ\text{cm}^2 \cdot \text{s}$  به دست آمده است. که این مقدار معادل  $60\%$  از نمونه پارچه الیاف شیشه بافته شده‌ی ایرانی است. با توجه به تصاویر SEM به دست آمده که در شکل ۵ الف به نمایش در آمده است، سطح پارچه Zonel آغشته به ماده‌ای است که طبق مباحث مطرح شده در قسمت تحلیل FTIR و همینطور نتایج آنالیز عنصری به دست آمده، این پیشنهاد مطرح شده که این ماده PTFE است. حضور این پلیمر به عنوان یک ماده‌ی تکمیلی روی سطح این پارچه، می‌تواند تاثیر بسیار قابل توجهی بر میزان نفوذپذیری آن داشته باشد؛ منطقی است که با اعمال این پوشش میزان نفوذپذیری هوا کاسته شود.



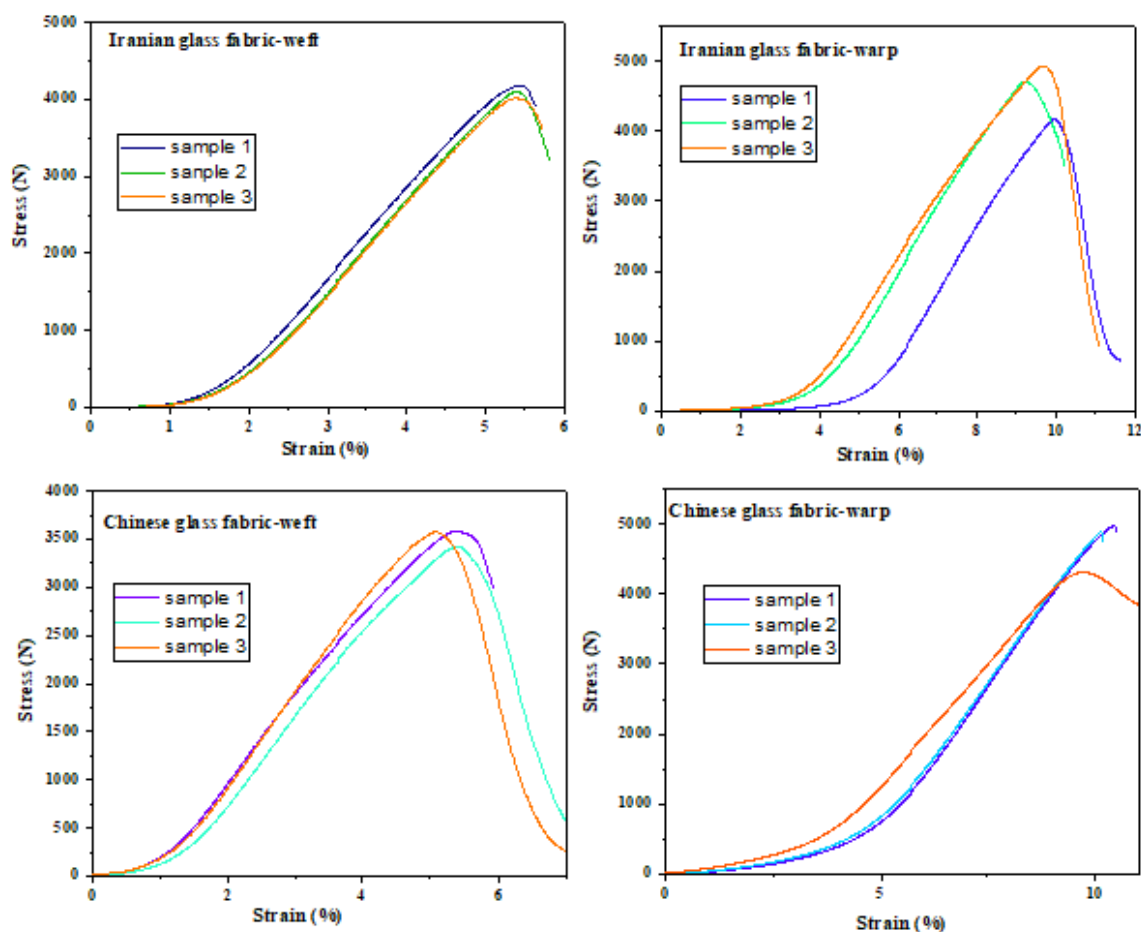
شکل ۱۰- نتایج آزمون نفوذپذیری هوا که بر روی نمونه پارچه الیاف شیشه تولید شده در داخل و نمونه چینی و همینطور پارچه‌های شیشه تکمیل حرارتی شده انجام شده است.

#### ۶-۱۵ آزمون استحکام کششی الیاف شیشه

در گام نخست جهت اندازه‌گیری استحکام پارچه الیاف شیشه، از پارچه‌ها، نمونه خام و چینی و نمونه‌های حرارت داده شد، در هر کدام از جهت‌های نخ تار و پود سه نمونه برش داده شد. برای نمونه‌های پارچه‌ای الیاف شیشه نمونه‌ها با عرض ۵ cm و بین دو فکی که فاصله‌ی آن دو از هم ۲۰ cm بود، قرار داده شد و نرخ افزایش طول فک دستگاه ۲۵ mm/min بود. میانگین سه اندازه‌گیری برای هر نمونه گزارش شده است.

آزمون اندازه‌گیری استحکام تا حد پارگی برای نمونه‌های پارچه الیاف شیشه چینی و پارچه الیاف شیشه بافته شده در ایران اندازه‌گیری شد، نمودارهای به دست آمده برای هر سه اندازه‌گیری در شکل ۱۱ قابل مشاهده است. مقادیر استحکام و ازدیاد طول تا حد پارگی از نمودارهای به دست آمده استخراج شد و در جدول ۳ به نمایش در آمده است. استحکام تا حد پارگی در جهت نخ تار پارچه شیشه ایرانی، N ۴۶۱۱ و میزان ازدیاد طول تا حد پارگی آن ۹/۶٪ بود؛ به ترتیب، همین مقادیر برای پارچه شیشه چینی N ۴۷۳۰ و ۱۰/۱٪ بود. همانطور که

قابل مشاهده است، اخلاف زیادی میان متوسط مقادیر به دست آمده وجود ندارد و تنها استحکام در جهت نخ تار پارچه الیاف شیشه ایرانی حدود ۲/۵٪ از نمونه چینی کمتر است. با توجه به اینکه پارچه ایرانی که مورد استفاده قرار گرفته، خام بوده و هیچگونه عملیات شیمیایی، مکانیکی و یا حرارتی روی آن انجام نشده است ولی روی پارچه الیاف شیشه وارد شده از چین اطلاعات دقیقی از مراحل تکمیل انجام شده در دسترس نیست می‌توان این میزان اختلاف جزئی را قابل توجیه دانست. البته لازم به ذکر است که انجام عملیات تکمیل شیمیایی رو پارچه الیاف شیشه با توجه به نتایج به دست آمده از آنالیزهای SEM، EDS و FTIR ثابت شده است. در مورد نتایج استحکام درجهت نخ پود دو پارچه، این مقدار برای پارچه شیشه ایرانی به ترتیب N ۴۰۹۴ با درصد ازدیاد طول ۵/۴٪ و برای پارچه الیاف شیشه چینی N ۳۵۲۶ و ۵/۳٪ اندازه‌گیری شد. در این مورد، استحکام در جهت نخ پود الیاف شیشه ایرانی ۱۶٪ نسبت به نمونه پارچه چینی بیشتر است.



شکل ۱۱- نتایج آزمون استحکام تا حد پارگی برای نمونه‌های پارچه الیاف شیشه در جهت نخ‌های تار و پود پارچه‌ی الیاف شیشه تهیه شده در ایران و پارچه الیاف شیشه وارد شده از چین (Zonel).

جدول ۳- مقادیر متوسط استحکام تا حد پارگی و ازدیاد طول تا حد پارگی در جهت نخ‌های تار و پود پارچه الیاف شیشه ایرانی و چینی.

| نمونه                                           | نوع نخ | استحکام تا حد پارگی (N) | ازدیاد طول ت ا حد پارگی (%) |
|-------------------------------------------------|--------|-------------------------|-----------------------------|
| پارچه شیشه ایرانی                               | تار    | ۴۶۱۱                    | ۹/۶                         |
|                                                 | پود    | ۴۰۹۴                    | ۵/۴                         |
| پارچه شیشه چینی                                 | تار    | ۴۷۳۰                    | ۱۰/۱                        |
|                                                 | پود    | ۳۵۲۶                    | ۵/۳                         |
| پارچه شیشه ایرانی<br>حرارتی در ۳۵۰ C° -<br>h ۲۴ | تار    | ۱۰۳۸                    | ۱۴/۰                        |
|                                                 | پود    | ۸۲۷                     | ۴/۴                         |
| پارچه شیشه ایرانی<br>حرارتی در ۳۵۰ C° -<br>h ۴۸ | تار    | ۱۱۵۷                    | ۱۴/۴                        |
|                                                 | پود    | ۹۵۲                     | ۵/۸                         |
| پارچه شیشه ایرانی<br>حرارتی در ۳۵۰ C° -<br>h ۷۲ | تار    | ۲۶۶۰                    | ۱۴/۹                        |
|                                                 | پود    | ۱۰۷۲                    | ۴/۹                         |

در ادامه اثر دمای فرآیند تکمیل حرارتی پارچه شیشه بر روی استحکام به دست آمده در جهت تار و پود مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که همانطور که انتظار می‌رفت و در بخش ۶-۲ به تفصیل راجع به آن صحبت کردیم، تکمیل حرارتی نمونه پارچه شیشه در دمای ۳۵۰ C° موجب کاهش استحکام آن در مقایسه با پارچه خام شد. به طور مثال وقتی نمونه پارچه الیاف شیشه به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۳۵۰ C° حرارت دیده

می‌شود؛ استحکام در جهت نخ تار آن میزان ۷۷٪ کاهش را نشان می‌دهد. این مقدار برای پود معادل با ۷۹٪ کاهش استحکام است. همانطور که بخش اول توضیحات ذکر شد، این نتیجه می‌تواند مرتبط به سه مسئله باشد؛ مورد اول اینکه پس از قرار گیری در دمای بالا به دلیل حضور اصلاح کننده‌های ساختار شیشه که حاوی کلسیم و سدیم هستند، هیدرولیز آبی اتفاق می‌افتد و ساختار شیشه از بین می‌رود. علت دوم می‌تواند مرتبط به بلوری شدن سطح ساختار الیاف شیشه باشد که موجب می‌شود در اثر آن استحکام الیاف در آزمون کشش کاهش پیدا کند و علت نهایی می‌تواند مرتبط با واهلش آنتالپی و یا انیزوتروپی در ساختار الیاف باشد [۱].

## ۶-۱۶ تکنولوژی اصلاح سطح مدیای فیلتر

علاقه‌مندی به تکمیل سطح و یا فرآیندهای اصلاح پارچه‌های فیلتر در اواخر دهه ۱۹۶۰ و اوایل دهه ۱۹۷۰ آغاز شد. این کار مصادف شد با معرفی مدیای مصنوعی که قابلیت کاربرد در فیلترهای صنعتی را دارد، زیرا چنین مدیاهایی راحت‌تر اصلاح می‌شوند و برای تکنولوژی تکمیل مناسب هستند. اولین روش‌های اصلاح سطح عبارتند از [۷]:

(۱) پرس‌سوزی: به طور خاص برای پارچه‌هایی که از الیاف staple کوتاه تهیه شده‌اند، چنین پارچه‌هایی دارای الیاف بیرون زده کوتاهی هستند که به دلیل چسبندگی مکانیکی فیبر به یک می‌تواند مانع از تخلیه کیک شود. با این حال، با عبور سریع پارچه از روی شعله گاز یا تماس سریع آن با یک نوار فلزی که تا دمای بسیار بالا گرم شده است، می‌توان بر این مشکل غلبه کرد.

(۲) غلتک‌های کالندر:

این فرآیند نه تنها صافی سطح پارچه را افزایش می‌دهد؛ آزاد سازی کیک نیز در آن راحت‌تر اتفاق می‌افتد؛ از طرفی نفوذ پذیری هوا را تحت تاثیر قرار می‌دهد و در نهایت عملکرد فیلتر را تغییر می‌دهد. ایت تکنیک از طریق عبور پارچه از میان غلتک‌های گرم و تحت فشار و در حالتی که دما و فشار غلتک و سرعت عبور

پارچه با توجه جنس پارچه و نوع پلیمر تنظیم می‌گردد. هرچند کاهش سطح تماس و کاهش نفوذ پذیری از معایبی هستند که این روش با آن مواجه است.

تکمیل و اصلاح پارچه به منظور دستیابی به سه هدف اصلی انجام می‌شود:

۱. اطمینان از کیفیت پارچه
۲. اصلاح مشخصات سطح
۳. تنظیم میزان نفوذپذیری پارچه.

از اوایل دهه هفتاد میلادی به بعد، روش‌های اصلاح سطح دیگری مورد ارزیابی قرار گرفت. این توجه به این علت به این سمت کشیده شد که صنعت به شدت با مشکل کنترل آلودگی هوا مواجه بود، چه به صورت ذرات آزاد شده در هوا و چه به صورت تخلیه پساب‌ها به منابع آبی. علاوه بر این، از طرفی کاربران این فیلترها با در نظر گرفتن منظر اقتصادی و همینطور تکنیکی از فیلترها، خواستار کارایی و همینطور طول عمر هرچه بیشتر مدیای فیلتر بودند [۷].

## ۶-۱۶-۱ غشاهای ePTFE

از سال ۱۹۷۳ شرکت Gore در استفاده از غشاهای Gore-Tex expanded polytetrafluoroethylene (ePTFE) به عنوان ساپورت needlefelt در کاربرد فیلتراسون هوا/گرد و غبار پیشگام شد.

طی سالهای بعد Gore چندین نوع غشای ePTFE را توسعه دادند. برای مثال، پایداری بسیار بالایی در فیلترهای کیسه‌ای که به دلیل نسل جدیدی از غشاهای لمینت شده روی سطح nanofelt پلی استر ایجاد شده بودند. آنها برای این منظور طراحی شده‌اند که الزامات پالس جت بگهوس که به صورت روتین در صنعت شیمیایی استفاده می‌شود را بر آورده کند. این کمپانی همچنین، یک سری از فیلترهای کیسه‌ای که از غشای PTFE دوباره مهندسی شده که به طور ویژه به جریان هوای بیشتر می‌رسد و افت فشار کمتری

دارد؛ در آغاز از این فیلترهای در صنعت سیمان استفاده شد. Gore همچنین، استحکام غشاهای جدید را بهبود بخشید که مشخص شد که استحکام آن تقریباً چهار برابر نمونه اسبق بود. این استحکام بالا به معنی کاهش ترک‌ها و مقاومت بهتر در برابر آسیب‌های ناشی از ذراتی که نفوذ می‌کنند، است [۷].

همانطور که ذکر شد اصلاح سطح فیلترها از سی سال گذشته شروع شده و هرچند پیشرفت‌ها و تغییرات زیادی تا به امروز داشته ولی همچنان دستیابی به میزان فیلتراسیون بیشتر و تحمل دماهای بالاتر از جمله ویژگی‌هایی است که به شدت مورد تقاضا است.

#### ۶-۱۷ پوشش دار کردن پارچه شیشه با امولسیون PTFE

پوشش دار کردن<sup>۶</sup> و لمینیت کردن دو فرآیند کاربردی هستند که برای ایجاد تکمیل مناسب به منسوجات اعمال می‌شود. فرآیند پوشش‌دار کردن با طیف وسیعی از پلیمرها مانند PVC، PU، اکریلیک و PTFE انجام می‌گیرد تا محصولی با کاربرد چند منظوره تولید گردد. از طرف دیگر، فرآیند لمینیت کردن برای حتی برای شماری از محصولات نساجی در استفاده روزمره در زندگی کاربرد دارد، به کار گرفته می‌شود [۸].

#### ۶-۱۸ تکنولوژی پوشش‌دار کردن

پوشش‌دار کردن فرآیندی است که یک لایه پلیمری به صورت مستقیم به یک یا دو طرف پارچه اعمال می‌شود. پلیمر باید با وسیله تیغه یا وسیله مشابهی دیگری روی سطح پارچه به گونه‌ای اعمال شود که ضخامت پلیمر ویسکوز را کنترل کند. پارچه پوشش‌دار شده حرارت داده می‌شود و پخته می‌شود و در این حالت پلیمر پلیمریزه می‌شود. به منظور ایجاد لایه ضخیمی از پوشش، نیاز است تا فرآیند اعمال پوشش پلیمری به صورت متوالی و برای چند بار انجام گیرد، در این صورت پوشش به صورت لایه لایه روی سطح می‌نشیند. بسته به نوع الزامات کاربرد نهایی، برای منسوجات فنی لایه ضخیمی از پوشش نیاز است و برای البسه ای با فناوری بالا، درصد وزنی

---

<sup>۶</sup> Coating

بسیار کمی از پوشش مورد نیاز است. فرمول شیمیایی پوشش، ضخامت و وزن پوشش، تعداد لایه‌ها، شکل منسوجات فنی و نوع عملیات پیش آماده‌سازی از عوامل بسیار تاثیر گذار این فرآیند هستند [۸].

#### ۶-۱۹ لمینیت کردن پارچه الیاف شیشه پوشش دار شده با غشای PTFE

پلی تترا فلورو اتیلن (PTFE<sup>۷</sup>) نقطه ذوب بالایی حدود ۳۴۲ °C دارد و در نتیجه ذوب شدن مذاب پایداری حتی در ۳۸۰ °C تشکیل می‌دهد که ویسکوزیته آن معادل ۱۰ s Pa G است. به دلیل دمای ذوب بالا و همینطور ویسکوزیته مذاب بالای این پلیمر، این امکان وجود ندارد که رزین PTFE را با استفاده پروسه‌های ذوب پلیمر مرسوم رزین PTFE تهیه شود. در عوض، روشی با استفاده از پرس سرد و در هم جوشی<sup>۸</sup> باید برای این منظور مورد استفاده قرار گیرد [۹].

#### ۶-۲۰ آزمون DLS برای امولسیون PTFE

برای اندازه‌گیری اندازه ذرات PTFE توزیع شده درون محلول سوسپانسیون آبی، از روش آنالیز DLS انجام استفاده شد. در این آزمون نمونه‌ی سنجش شده به سه طریق مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد که عبارتند از روش‌های Pade Laplace، Cumulants و SBL؛ نتایج به دست آمده از این آنالیز در شکل ۱۲ به نمایش در آمده است.

در روش Pade Laplace که بیشتر مصرف صنعتی دارد، اندازه ذرات در آن سوسپانسیون به دست می‌آید که باید در نظر داشت که اندازه حقیقی ذرات ممکن است از مقدار به دست آمده کوچکتر باشد اما به دلیل تجمع ذرات در محلول، عدد بزرگتری در این روش گزارش می‌شود.

---

<sup>۷</sup> Polytetrafluoroethylene

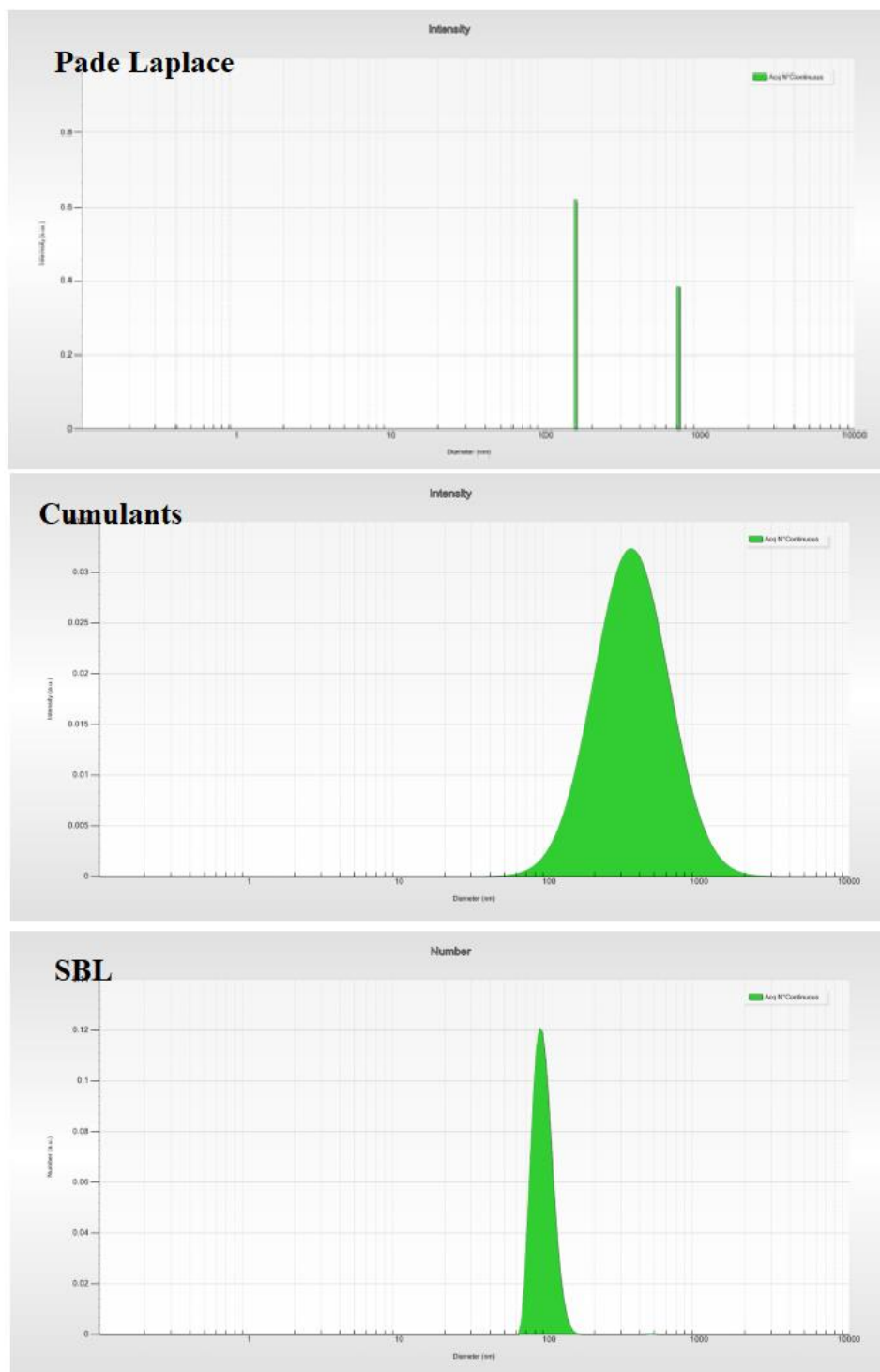
<sup>۸</sup> Sintering

در نتیجه‌ی به دست آمده طبق این روش در آنالیز نمونه امولسیون PTFE، اندازه ذرات ۱۵۷ nm و ۷۰۹ nm گزارش شده است. ولی تعداد ذرات با اندازه‌ی ۷۰۹ nm تقریباً ناچیز بود و می‌توان گفت به طور کلی اندازه ذرات بر اساس این روش ۱۵۷ nm است.

در روش Cumulants که برای تحلیل نمونه‌های با ابعاد بیش از ۲۰۰ nm کاربرد دارد و به صورت نموداری توزیع و فراوانی ابعاد هیدرودینامیکی ذره‌های تشکیل دهنده نمونه را نشان می‌دهد. تجمع ذرات نتیجه حاصل از این روش را به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهد و این روش بیشتر برای نمونه‌های دارویی کاربرد دارد. نتیجه این روش روی نمونه‌های آنالیز شده میانگین ۲۱۴ nm را برای ذرات PTFE دیسپرس شده نشان می‌دهد.

در روش SBL که نسبت به دو روش قبلی روش جدیدتری است و از اصلاح فرمول‌های دو روش قبلی به دست آمده است، سعی شده که خطای تجمع ذرات به حداقل برسد و با حذف ابعاد هیدرودینامیکی اندازه ذرات به دست آمده از این روش به اندازه حقیقی آنها نزدیک‌تر باشد. نتیجه به دست آمده در این روش به نتیجه به دست آمده از آنالیز TEM نزدیک‌تر است. مطابق با این روش، میانگین اندازه ذرات PTFE درون سوسپانسیون ۹۰ nm است.

با توجه به مطالب ذکر شده برای تفاوت‌های موجود میان سه روش به کار گرفته شده برای اندازه گیری ابعاد ذره، به نظر می‌رسد که با توجه به اینکه هدف از انجام آنالیز بررسی ابعاد PTFE در وضعیت دیسپرس شده تهیه شده از فروشنده است، روش اول روش مناسب‌تری برای استناد بوده و می‌توان گفت که درصد بالایی از PTFE‌ها درون محلول دارای ابعاد ۱۵۷ nm و درصد بسیار کمی از آنها ابعاد ۷۰۹ nm دارد. لازم به ذکر است که نتایج به دست آمده برای این نمونه تنها برای زمان انجام آنالیز صحت دارد و با گذشت زمان میانگین ابعاد ذرات در اثر تجمع و ته نشین شدن درون ظرف نگهدارنده می‌تواند متفاوت از نتایج گزارش شده در آنالیز DLS باشد.



شکل ۱۲- نمودارهای DLS به دست آمده با استفاده از روش‌های Pade Laplace، Cumulants و SBL برای اندازه گیری اندازه ذرات امولسیون PTFE.

## منابع:

- [١] P. Jenkins, "Investigation of the Strength Loss of Heat Treated Glass Fibre," ٢٠١٦.
- [٢] F. R. Jones and N. T. Huff, *The structure and properties of glass fibers*. ٢٠١٨.
- [٣] F. Wang, J. Yu, X. Liang, S. Lu, Z. Liu, and L. Liu, "Effect of heat treatment on the morphology, diameter and mesoporous of superfine glass fiber," *J. Text. Inst.*, vol. ١١٢, no. ١, pp. ١٢٣-١٣١, ٢٠٢١, doi: ١٠.١٠٨٠/٠٠٤٠٥٠٠٠,٢٠٢٠,١٧٩٨٦١٤.
- [٤] J. Piwowarczyk, R. Jedrzejewski, D. Moszyński, K. Kwiatkowski, A. Niemczyk, and J. Baranowska, "XPS and FTIR studies of polytetrafluoroethylene thin films obtained by physical methods," *Polymers (Basel)*, vol. ١١, no. ١٠, pp. ١-١٣, ٢٠١٩, doi: ١٠.٣٣٩٠/polym١١١٠١٦٢٩.
- [٥] H. Wang *et al.*, "Grafting polytetrafluoroethylene micropowder via in situ electron beam irradiation-induced polymerization," *Polymers (Basel)*, vol. ١٠, no. ٥, ٢٠١٨, doi: ١٠.٣٣٩٠/polym١٠٠٥٠٥٠٣.
- [٦] L. W. Rainard, "Air Permeability of Fabrics," *Text. Res. J.*, vol. ١٦, no. ١٠, pp. ٤٧٣-٤٨٠, ١٩٤٦, doi: ١٠.١١٧٧/٠٠٤٠٥١٧٥٤٦.١٦.١٠.١.
- [٧] R. Lydon, "Filter media surface modification technology: State of the art," *Filtr. Sep.*, vol. ٤١, no. ٩, pp. ٢٠-٢١, ٢٠٠٤, doi: ١٠.١٠١٦/S٠٠١٥-١٨٨٢(٠٤)٠٣٤٣-X.
- [٨] K. Singha, "A Review on Coating & Lamination in Textiles: Processes and Applications," *Am. J. Polym. Sci.*, vol. ٢, no. ٣, pp. ٣٩-٤٩, ٢٠١٢, doi: ١٠.٥٩٢٣/j.ajps.٢٠١٢.٢٠٣.٠٤.
- [٩] A. B. Ariawan, S. Ebnesajjad, and S. G. Hatzikiriakos, "Preforming behavior of polytetrafluoroethylene paste," *Powder Technol.*, vol. ١٢١, no. ٢-٣, pp. ٢٤٩-٢٥٨, ٢٠٠١, doi: ١٠.١٠١٦/S٠٠٣٢-٥٩١٠(٠١)٠٣٨٥-٠.