استفاده از روش آستانه‌گذاری FCM جهت اندازه‌گیری قطر نانوالیاف

ندا دهقان*[1]، پدرام پیوندی[2]، محمدعلی توانایی[3]

[1]دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده نساجی، دانشگاه یزد . پست الکترونیکی:neda.dehghan@stu.yazd.ac.ir
[2]استادیار و عضو هیات علمی دانشکده نساجی دانشگاه یزد. پست الکترونیکی:peivandi@yazd.ac.ir
[3] استادیار و عضو هیات علمی دانشکده نساجی دانشگاه یزد. پست الکترونیکی:MA.Tavanaei@yazd.ac.ir

چکیده

با توجه به توسعه استفاده از نانوالیاف در صنایع مختلف، دانستن مورفولوژی ساختارهای نانو الیاف جهت شناخت توزیع ابعاد الیاف و منافذ مورد توجه است. از این رو توسعه تکنیک اندازه‌گیری قطر الیاف به صورت دقیق و خودکار بسیار مهم است. در سال‌های اخیر، پردازش تصویر به عنوان یک روش متداول جهت اندازه‌گیری قطر مورد توجه قرارگرفته است. آستانه‌گیری یک تکنیک ساده و موثر برای تقسیم‌بندی تصویر است. روش‌های آستانه‌گیری بسیاری تاکنون توسعه داده شده‌اند. یکی از این روش‌ها که در سال های اخیر مورد توجه قرار گرفته است، روش فازی میانگین(FCM) است. مقاله حاضر با هدف محاسبه قطر از وب نانوالیاف با استفاده از پردازش تصویر، رسیدن به تصویر بهینه جداشده به دو قسمت الیاف و منافذ را با استفاده از الگوریتم FCM در اولویت قرار داده است. نتایج ارزیابی‌های انجام شده نشان دهنده این موضوع است که الگوریتم FCM نتایج مناسبی در آستانه‌گذاری تصاویر ارائه می‌دهد. همچنین مقایسه روش‌ها نشان می‌دهد که روش تبدیل فاصله برآورد دقیقی از قطر در زوایای مختلف قرارگیری نانو الیاف در تصویر ارائه می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: قطر نانوالیاف، پردازش تصویر، الگوریتم FCM، روش تبدیل فاصله.

۱- مقدمه

نانو الیاف به الیافی با قطر کمتر از یک میکرومتر اطلاق می‌شود. هنگامی که قطر الیاف پلیمری به کمتر از یک میکرومتر یا چند صد نانومتر کاهش یابد، خواص جدید و ویژه‌ای از جمله خواص مکانیکی عالی و انعطاف‌پذیری به جهت کاهش قطر، افزایش میزان نسبت سطح به حجم الیاف، کاهش اندازه منافذ ظهور می‌نماید که این خواص برجسته موجب شده است، نانو الیاف انتخاب مناسبی برای بسیاری از کاربردهای مهم و با کارایی بالا باشند.

نانو الیاف پلیمری در مقیاس آزمایشگاهی به وسیله تکنیک‌هایی مانند کشش، ساخت با قالب، تفکیک فازی، خوداتصالی، الکتروریسی و روش استخراج از الیاف آمیخته‌ای تولید می‌شوند. روش الکتروریسی در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. کاربردهای نانو الیاف شامل مواردی مانند مهندسی بافت، البسه جراحی، لایه‌های جاذب، انتقال دارو، فیلترها، حسگرها، باتری‌های پلیمری، لباس‌های محافظتی و . . . است.

خواص فیزیکی و مکانیکی نانو الیاف و منسوجات بی‌بافت نه تنها وابسته به خواص مواد سازنده، بلکه به پارامترهای ساختاری آن‌ها نیز وابسته است. قطر الیاف یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های ساختاری وب‌های نانو لیفی است. اندازه خیلی کوچک الیاف و آرایش یافتگی متفاوت آن‌ها باعث می‌شود، که اندازه‌گیری قطر نانو الیاف سخت باشد. علاوه بر این تولید نانو الیاف در مقیاس بزرگ نیاز به کنترل کیفیت آنلاین دارد. در سال‌های اخیر روش آنالیز تصویر برای اندازه‌گیری این خواص که عبارت‌اند از: آرایش یافتگی الیاف(پوردیهمی ۱۹۹۶: ۷۱۳و پوردیهمی ۱۴۳:۱۹۹۷)، یکنواختی الیاف (Chahabra۴۳:۲۰۰۳)، قطرالیاف(ضیابری ۹۰۵:۲۰۰۸ ، شین ۳۱۴:۲۰۰۸ ، ملکی۱۱۳۱:۲۰۰۹، کنفچیان۷۵۱:۲۰۱۱) و اندازه منافذ (Xu۸۱:۱۹۹۶، Ahamt۲۸۰:۲۰۰۲ و She۴۲۷:۲۰۰۸) توسعه یافته است. دانستن قطر الیاف و توزیع آن در وب بر خواص نهایی وب تولید شده اثر می‌گذارد. از روش های پردازش تصویری که برای اندازه‌گیری قطر نانو الیاف بکار می‌رود، روش تبدیل فاصله (ضیابری ۹۰۵:۲۰۰۸ ، Shin ۳۱۴:۲۰۰۸) است.

(shin ۳۱۴:۲۰۰۸) از روش آنالیز تصویر برای تعیین قطر نانو الیاف الکتروریسی استفاده کردند. در مقاله مذکور، آستانه‌گذاری تصاویر وب نانوالیاف با استفاده از روش آستانه سراسری و قطر نانوالیاف به صورت فاصله از مرکز تا مرز لیف با استفاده از "تبدیل فاصله" محاسبه شد. در بررسی‌هایی که در سال ۲۰۰۷ و ۲۰۰۸ توسط ضیابری و همکارانش (ضیابری۵۹۷:۲۰۰۷، ضیابری۹۰۵:۲۰۰۸) انجام شد، روش جدیدی از تبدیل فاصله برای اندازه‌گیری قطر نانو الیاف الکتروریسی پیشنهاد شد. در این روش با شناسایی محل تقاطع الیاف و حذف آن‌ها از تصویر اسکلت شئ، توزیع قطر الیاف به صورت دقیق‌تر بدست می‌آید. آستانه-گذاری تصاویر با استفاد از روش آستانه محلی انجام گرفت.

آستانه‌گیری یک تکنیک ساده ولی موثر برای تقسیم‌بندی تصویر است. پیدا کردن یک مقدار آستانه مناسب برای تفکیک شیء دلخواه از پس زمینه، یک گام مهم در پردازش تصویر و بینایی ماشین است. تکنیک انتخاب آستانه بر اساس تقسیم‌بندی تصویر به مناطقی مجزا (شئ و پس‌زمینه) به گونه‌ای است که یک بخش، شامل پیکسل‌های با مقدار، شدت بیشتر و یا برابر با مقدار آستانه تعیین شده و بخش دیگر شامل پیکسل‌های با مقدار شدت کمتر از آن مقدار خواهد بود(Ng ۲۰۰۶: ۱۶۴۴).

برای بعضی از کاربردها دانستن مورفولوژی ساختارهای نانو الیاف جهت شناخت توزیع ابعاد الیاف و منافذ لازم است. اندازه‌گیری سریع و دقیق این پارامترها با روش آنالیز تصویر امکان‌پذیر خواهد بود. هدف از این پژوهش، استفاده از الگوریتم خوشه بندی FCM جهت آستانه‌گذاری تصاویر نانوالیاف، محاسبه قطر وب نانوالیاف با استفاده از روش تبدیل فاصله و مقایسه با روش بصری است.

۲- روش‌ها

تکنیک‌های آستانه‌گذاری به طور کلی به دو دسته آستانه‌گذاری سراسری و آستانه‌گذاری محلی تقسیم‌بندی می‌شوند. در آستانه-گذاری سراسری یک مقدار آستانه از هیستوگرام برای کل تصویر انتخاب می‌شود. یک روش بهینه آستانه سراسری، روش آتسو(Otsu۶۲:۱۹۷۹) است که روشی آسان و مناسب در انتخاب خودکار آستانه، با بیشینه کردن واریانس بین گروهی است. در

آستانه‌گذاری محلی برای هر منطقه کوچک در تصویر (زیرتصویر) آستانه انتخاب می‌شود (Bansol۲۰۱۳:۴۵). تقسیم تصویر به تصویرهای جزئی را می‌توان برای جبران غیریکنواختی‌ها در شدت روشنایی پس‌زمینه تصویر بکار برد.
روش خوشه‌بندی فازی (FCM) نیز تکنیک دیگری است که برای آستانه‌گیری در سال‌های متمادی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲-۱- روش فازی C میانگین(FCM)

یکی از مهمترین الگوریتم‌های خوشه‌بندی، الگوریتم c میانگین می‌باشد. در این الگوریتم پیکسل‌ها به دو خوشه تقسیم می‌شوند و تعداد c از قبل مشخص شده است(Chuang ۲۰۰۶:۹). تابع هدفی که برای این الگوریتم تعریف شده است بصورت زیر می‌باشد:

$$J = \sum_{j=1}^{N} \sum_{i=1}^{C} u_{ij}^{m} \left| x_j - v_i \right|^2 \quad (1)$$

در رابطه (۱)، $X = (x_1, x_2, \dots, x_N)$، ویژگی‌های تصویر و N تعداد پیکسل های تصویر می‌باشد که به دو کلاستر تقسیم بندی می‌شود. u_{ij} نشان دهنده عضویت پیکسل x_j در کلاستر اول یا کلاستر دوم و v_i مرکز کلاستر اول یا دوم و علامت ||*|| میزان تشابه (فاصله) نمونه از مرکز خوشه می‌باشد که می‌توان از هر تابعی که بیانگر تشابه نمونه و مرکز خوشه باشد، استفاده کرد. در فرمول فوق m یک عدد حقیقی بزرگتر از ۱ است که در اکثر موراد برای m عدد ۲ انتخاب می‌شود. تابع هدف J مینیمم خواهد شد ، زمانی که پیکسل‌ها به مراکز کلاسترهای خود نزدیک و دارای مقدار عضویت بالا باشند، و مقدار عضویت کم برای پیکسل-هایی که دور از مراکز باشند.
تابع عضویت و مراکز کلاستر در روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$u_{ij} = \frac{1}{\sum_{k=1}^{2} \left(\frac{\|x_j - v_i\|}{\|x_j - v_k\|} \right)^2} \quad (2)$$

و

$$v_i = \frac{\sum_{j=1}^{N} u_{ij}^2 \, x_j}{\sum_{j=1}^{N} u_{ij}^2} \quad (3)$$

مراحل الگوریتم:

۱. مقدار دهی اولیه برای c، m و u۰ خوشه های اولیه حدس زده شوند. که در اینجا مقدار c=۲ و m=۲ می‌باشد.
۲. مراکز خوشه‌ها محاسبه شوند (محاسبه viها).
۳. محاسبه ماتریس عضویت از روی خوشه‌های محاسبه شده در رابطه(۲).
۴. اگر $\|ul+1 - ul\| \le \varepsilon$ الگوریتم خاتمه می‌یابد و در غیر اینصورت بازگشت به مرحله ۲.

(Sivakumar ۲۰۱۲:۱۰۹)، روش خوشه بندی فازی را برای تقسیم‌بندی تصاویر ماموگرام استفاده و آن را یک روش مناسب برای آستانه گذاری تصاویر پزشکی معرفی کردند. دو روش آستانه محلی و روش خوشه بندی فازی توسط(Sivanand ۲۰۱۳:۲۶۱) مورد استفاده قرار گرفته است. در این بررسی روش آستانه محلی بهبود یافته، برای رفع مشکل آستانه سراسری در تصاویر با نویز و وضوح کم مناسب و روش خوشه بندی فازی را روشی مناسب برای تقسیم بندی تصاویر پزشکی معرفی شد.

۲-۲-روش تبدیل فاصله

سه روش اندازه‌گیری فاصله که به صورت متداول استفاده می‌شود، City block، صفحه شطرنجی[۱] و اقلیدسی است. شکل ۱پیاده سازی سه روش را بر روی تصویر سیاه-سفید یک لیف نشان می‌دهد. در City block طول مسیر بین پیکسل با ۴ پیکسل مجاور محاسبه، حرکت در جهت افقی و عمودی است. پیکسل‌های همسایگی مستقیم یک واحد و پیکسل‌ها به صورت مورب دو واحد در

[۱] chess board

نظر گرفته می‌شود. شکل۱(ب) اندازه‌گیری فاصله با این روش را نشان می‌دهد. صفحه شطرنج مسیر بین پیکسل‌ها بر اساس ۸ پیکسل همسایه متصل (حرکت مورب نیز مجاز است) شکل۱(ج). اقلیدسی فاصله خطی مستقیم بین دو پیکسل است. مسیر حرکت در هر یک از روش‌ها با خط سفید در شکل نشان داده شده است. فاصله بین هر دو پیکسل (x_1,y_1) و (x_2,y_2) از تصویر با هر سه روش با روابط زیر تعیین می‌شود(Borgefors ۱۹۸٦:۳٤٤):

فاصله City blockبرابر است با (۴):

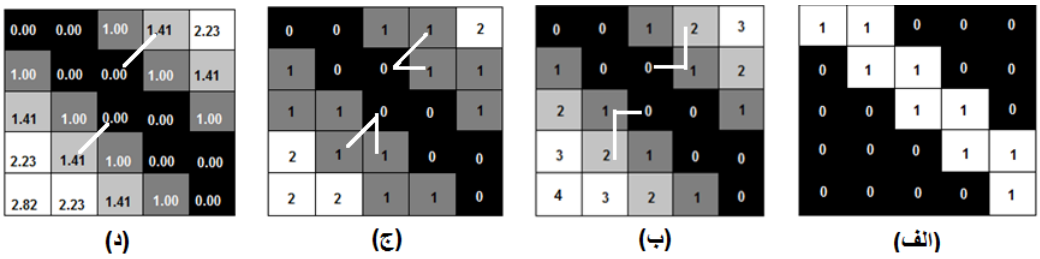
$$Distance_{cityblock} = (|x_1 - x_2| + |y_1 - y_2|) \quad (۴)$$

فاصله صفحه شطرنج برابر است با (۵):

$$Distance_{chessboard} = Max(|x_1 - x_2|, |y_1 - y_2|) \quad (۵)$$

فاصله اقلیدسی برابر است با (۶):

$$Distance_{euclidean} = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (۶)$$



شکل۱: (الف) تصویر دودویی، فاصله‌های به دست آمده با روش‌های (ب) city block، (ج) صفحه شطرنج، (د) اقلیدسی

جهت اندازه‌گیری قطر نانو الیاف روش تبدیل فاصله اقلیدسی بکار می‌رود. قطر الیاف با استفاده از تصویر تبدیل فاصله و تصویر اسکلت‌بندی شده به دست می‌آید.

اسکلت سازی

به معنای باریک‌سازی اشیا یا شکل‌های دودویی تا حد یک پیکسل می‌باشد. این عملیات در هر اجرا یک یا دو پیکسل از ضخامت شئ دودویی را کم می‌کند. در این روش شئ به خطوط نازک کاهش داده می‌شود. به این ترتیب تنها اطلاعات مهم مربوط به شکل شئ اصلی حفظ می‌شوند. عملیات اسکلت‌سازی اغلب منجر به تولید زائده‌های اضافی کوچک می‌شود که از آن‌ها تحت عنوان اجزای پارازیتی یاد می‌شود. با استفاده از فرایند "هرس کردن[۱]" این زائده‌ها حذف می‌شود.

در فرایند تبدیل فاصله اقلیدسی، نقاط لبه الیاف دارای مقادیر کمتر و مرکز الیاف دارای بیش‌ترین مقدار خواهند بود. در نتیجه قطر الیاف دو برابر فاصله بین کمترین مقادیر و بیش‌ترین مقادیر در الیاف خواهد بود. شکل ۲ نمونه‌ای از تصویر شبیه‌سازی الیاف را به همراه اسکلت شئ و تصویر تبدیل فاصله اقلیدسی آن را نشان می‌دهد.

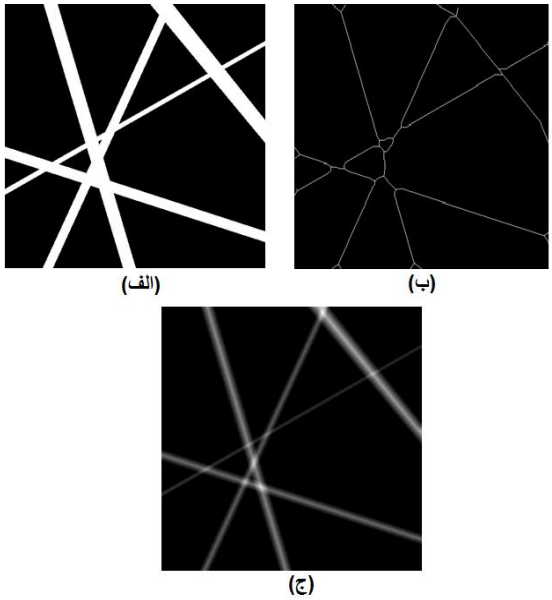
۲-۳-روش بصری

به طور معمول اندازه‌گیری قطر الیاف و توزیع آن‌ها با روش بصری انجام می‌شود. در ابتدا مقیاس تنظیم می‌شود، سپس پیکسل‌ها بین دو لبه از محور عمودی الیاف شمارش می‌شوند. تعداد پیکسل‌ها با استفاده از مقیاس به نانومتر(nm) تبدیل و نتایج گزارش می‌شود. در یک تصویر در حدود ۱۰۰ قطر اندازه‌گیری می‌شود. این روش زمان‌بر و نیازمند اپراتور است، که همین باعث کاهش دقت می‌شود. تشخیص لبه‌های الیاف نیز نیازمند دقت و اندازه‌گیری بر اساس محور عمود بر الیاف دقیق نیست. از این روش نمی‌توان برای کنترل کیفیت آنلاین استفاده کرد، زیرا نیاز به اپراتور دارد. اندازه‌گیری خودکار قطر و حذف استفاده از نیروی انسانی برای اندازه‌گیری راه حلی طبیعی برای حل این مسئله است.

[۱] pruning

۳- تجربیات

در این بررسی تصاویری از نانو الیاف برای پردازش تصویر مورد استفاده قرار گرفتند. این نانو الیاف از الکتروریسی پلی وینیل الکل(PVA) با وزن مولکولی g/mol ۷۲۰۰۰حاصل و تصاویر SEM بعد از لایه نشانی نمونه‌ها با طلا گرفته شده است.



شکل۲ (الف) نمونه‌ای از تصویر شبیه‌سازی، (ب) اسکلت تصویر ، (ج) تصویر تبدیل فاصله

۴- پردازش تصاویر

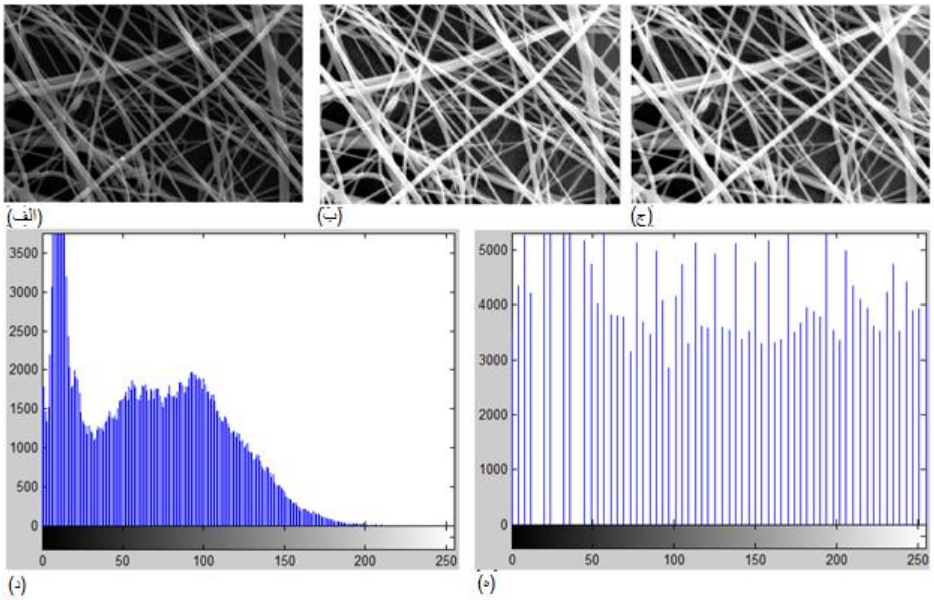
جهت اندازه‌گیری قطر، تصویر باید پیش پردازش شود. روش تعیین قطر تبدیل فاصله، بر روی تصاویر باینری قابل پیاده‌سازی است. از این رو اعمال آستانه‌گیری با کمترین خطا، نقش اساسی در تعیین نتایج حاصل از تعیین قطر الیاف ایفا می‌کند.
قبل از آستانه‌گذاری تصاویر، عملیات پیش پردازش تصویر انجام می‌شود. پیش پردازش تصاویر در بررسی حاضر یکسان‌سازی و حذف نویز از تصاویر می‌باشد.

۴-۱-یکسان سازی هیستوگرام تصویر

برای تشخیص الیاف و منافذ در تصویر نانوالیاف لازم است که بین پیکسل الیاف و منافذ تفاوت شدت وجود داشته باشد. یکسان سازی تصویر با افزایش شدت نور الیاف نسبت به پس زمینه تصویر، این تفاوت شدت را برای الیاف و منافذ به وجود می‌آورد.

۴-۲- حذف نویز

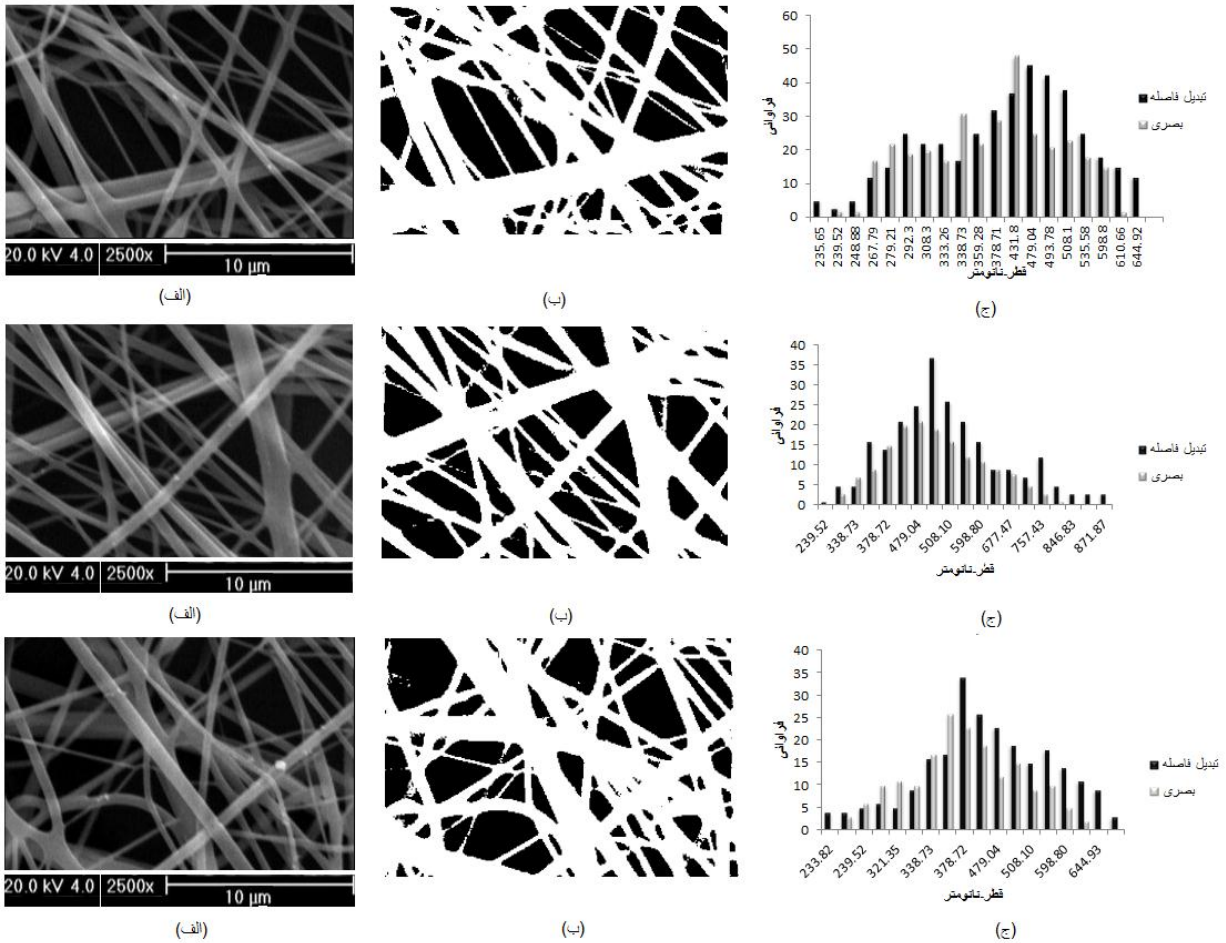
یکی از روش های موثر در کاهش نویز استفاده از فیلتر خطی میانه می‌باشد. در این روش با استفاده از تعریف یک همسایگی در اطراف پیکسل مربوطه در تصویر ورودی، پیکسل خروجی میانه مقادیر آن همسایگی در اطراف پیکسل ورودی است. شکل۳ یک تصویر نانوالیاف را به همراه هیستوگرام تصویر، تصویر حاصل از افزایش کانتراست و تصویر بعد از حذف نویز را نشان داده شده است.



شکل۳(الف)تصویر نانوالیاف-(ب)تصویر حاصل از یکسان‌سازی-(ج)تصویر نانوالیاف بعد از حذف نویز-(د)هیستوگرام تصویر نانوالیاف(ه) هیستوگرام تصویر (ب)

۵- نتایج و بحث

در مقاله انجام شده تصاویر نانوالیاف با استفاده از روش FCM آستانه‌گذاری شدند. شکل۴ نتایج استفاده از این روش را بـرای سـه تصویر از وب نانوالیاف و همچنین توزیع قطر اندازه‌گیری شده نانوالیاف را برای روش پردازش تصویر و روش بصری نشان می‌دهد.



شکل۴(الف)تصویر نانوالیاف-(ب)تصویر حاصل از آستانه سازی با روش FCM (ج)توزیع فراوانی قطر اندازه‌گیری شده با روش بصری و پردازش تصویری

تصاویر وب نانوالیاف با استفاده از روش FCM آستانه‌گذاری، در مرحله بعد برای اندازه‌گیری قطر نانوالیاف از این تصاویر به گونه‌ای عمل شد که هر لیف در یک زیرتصویر قرار گیرد سپس با استفاده از روش تبدیل فاصله قطرها اندازه‌گیری شدند. نتایج حاصل از توزیع فراوانی دو روش نشان‌دهنده نزدیکی روش پردازش تصویر به روش معیار(روش بصری) است.

۶- نتیجه‌گیری

زمان‌بر بودن روش‌های سنتی در تعیین منافذ و اندازه‌گیری قطر و همچنین اندازه‌گیری دقیق خواص مستلزم روی آوردن به روش های سریع و دقیق چون پردازش تصاویر می‌باشد. در مقاله حاضر روش FCM جهت جداسازی الیاف از منافذ پیشنهاد، و دقت این روش با روش معمول بصری مقایسه شده است. نتایج تصویری و محاسباتی در تعیین قطر در وب نانوالیاف گواه بر دقیق بودن روش پردازش تصویری و پیشنهاد استفاده از این روش بجای روش بصری می‌باشد.

۷- مراجع

[۱] Ahmet H., Aydilek A.M., Seyfullah H., and Tuncer B., (۲۰۰۲),« Digital Image Analysis to Determine Pore Opening SizeDistribution of Nonwoven Geotextiles», Journal of Computing in Civil Engineering, ۱٦, ۲۸۰-۲۹۰.

[۲] Bansal S. Maini R., (۲۰۱۳),« A Comparative Analysis of Iterative and Ostu's Thresholding Techniques»," Int J. comput. App. ٦٦, ٤٥-٤٧ .

[۳] Borgefors G., (۱۹۸٦), « Distance transformations in digital images», Computer vision, graphics, and image processing, ,۳٤, ۳٤٤-۳۷۱.

[٤] Chhabra R., (۲۰۰۳), «.Nonwoven uniformity-measurements using image analysis», International Nonwoven Journal, ٤۳-٥۰.

[٥] Chuang, Keh-Shih, Tzeng,Hong-Long, Chen,Sharon Wu, Jay, Chen, Tzong-Jer,(۲۰۰٦), «Fuzzy c-means clustering with spatial information for image segmentation», Computerized Medical Imaging and Graphics, ۳۰,: ۹–۱٥.

[٦] Kanafchian M., Valizadeh M., and Haghi A.,(۲۰۱۱), « Prediction of nanofiber diameter for improvements in incorporation of multilayer electrospun nanofibers»,, Korean J. Chem. Eng, ۲۸, ۷٥۱-۷٥٥.

[۷] Maleki M., Latifi M., Amani-Tehran M.,(۲۰۰۹) «Definition of structural features of nano coated webs by image processing methods», Int. J. of Nanotechnology, ٦, ۱۱۳۱ – ۱۱٥٤.

[۸] Ng,H. F. (۲۰۰٦). «Automatic thresholding for defect detection», Pattern Recognition. Letters. ۲۷ , ۱٦٤٤-۱٦٤۹ .

[۹] Otsu, N. (۱۹۷۹) «A Tlreshold Selection Method from Gray-Level Histograms», IEEE Transaction On Systrems, Man, And Cybernetice, ۹, ٦۲-٦٦.

[۱۰] Pourdeyhimi B., Ramanathan R., and Dent R.,(۱۹۹٦) «Measuring Fiber Orientation in Nonwovens, Part I», Textile Research Journal, ٦٦, ۷۱۳-۷۲٦.

[۱۱] Pourdeyhimi B., Dent R., & Davis H.,(۱۹۹۷) «Measuring fiber orientation in nonwovens part III»: fourier transform. Textile Research Journal, ٦۷, ۱٤۳-۱٥۱.

[۱۲] She F.H., Tung K.L., Kong L.X.,(۲۰۰۸), «Calculation of effective pore diameters in porous filtration membranes with image analysis», Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, ۲٤, ٤۲۷–٤۳٤.

[۱۳] Shin E.H., Cho K.S, Seo M.H., and Kim H., (۲۰۰۸), «Determination of Electrospun Fiber Diameter Distributions Using ImageAnalysis Processing», Macromolecular Research,۱٦, ۳۱٤-۳۱۹.

[۱٤] Sivakumar, S., and Chandrasekar C.. (۲۰۱۲). «Lungs image segmentation through weighted FCM.» , In Recent Advances in Computing and Software Systems (RACSS), International Conference on, ۱۰۹-۱۱۳. IEEE

[۱٥] Sivanand, Sayana.(۲۰۱۳) «Adaptive Local Threshold Algorithm and Kernel Fuzzy C-Means Clustering Method for Image Segmentation»: International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology (IJLTET) Vol. ۲ Issue ۳ ۲٦۱-۲٦٥.

[۱٦] Xu B., (۱۹۹٦), «Measurement of Pore Characteristics in Nonwoven Fabrics Using Image Analysis»,, Clothing and Textiles Research Journal, ۱٤, ۸۱-۸۸, ۱۹۹٦.

[۱۷] Ziabari M., Mottaghitalab V., and Haghi A.K.,(۲۰۰۸), «Distance transform algorithm for measuring nanofiber diameter», Korean J. Chem. Eng, ۲٥, ۹۰٥-۹۱۸.

[۱۸] Ziabari M., Mottaghitalab V., McGovern S.T., and Haghi A.K.,(۲۰۰۷), «A New Image Analysis Based Method for Measuring Electrospun Nanofiber Diameter», Nanoscale Res Lett, ۲, ٥۹۷–٦۰۰.