

پردازش تصویر برای بهینه‌سازی روش‌های آستانه‌گیری و تعیین قطر نانوالیاف

Image Processing for Optimization of Thresholding Methods and Determination of Nanofibers Diameter

ندا دهقان، پدram پیوندی^{*}، محمد علی توانایی

دانشگاه یزد، مجتمع فنی و مهندسی، دانشکده مهندسی نساجی، یزد، ایران

تاریخ دریافت: ۹۲/۰۶/۱۶ تاریخ پذیرش: ۹۲/۰۸/۰۴

چکیده

الیاف پلیمری کاربردهای زیادی در علوم مختلف مهندسی از جمله نساجی، کامپوزیت و پزشکی دارند. خواص فیزیکی الیاف پلیمری بیشترین اثر را از قطر این الیاف می‌پذیرد. بنابراین، با کاهش قطر الیاف در حد نانو، خواص ویژه‌ای در این مواد ظاهر می‌شود که آن‌ها را بسیار کارآمد می‌کند. از این رو، توسعه روش اندازه‌گیری قطر الیاف به‌طور دقیق و خودکار بسیار مهم است. در سال‌های اخیر، پردازش تصویر به عنوان روشی متداول برای اندازه‌گیری قطر مورد توجه قرار گرفته است. در این مطالعه، از دو روش ردیابی مستقیم و تبدیل فاصله برای اندازه‌گیری قطر نانوالیاف استفاده و با یکدیگر مقایسه شده است. با توجه به اینکه اجرای روش‌های تعیین قطر الیاف روی تصاویر دودویی امکان‌پذیر است. از این رو، روش‌های آستانه‌گیری تصویر بررسی و نیز در این مطالعه الگوریتمی برای بهینه‌سازی روش‌های آستانه‌گیری طراحی شد. برای ارزیابی دقت روش‌ها، تصاویری با پارامترهای مشخص شبیه‌سازی شدند. مقایسه روش‌ها نشان می‌دهد، روش ردیابی مستقیم برآورد دقیق‌تری از قطر در زوایای مختلف قرارگیری نانوالیاف در تصویر ارائه می‌دهد.

مقدمه

استخراج از الیاف آمیخته‌ای [۹-۵] تولید می‌شوند. روش الکترورسی در سال‌های اخیر تا حدودی مورد توجه قرار گرفته است. کاربردهای نانوالیاف شامل مواردی مانند مهندسی بافت [۱۰]، البسه جراحی، لایه‌های جاذب، انتقال دارو [۱۱، ۱۲]، فیلترها، حسگرها، باتری‌های پلیمری، لباس‌های محافظ [۱۳] و به عنوان تقویت‌کننده در کامپوزیت‌هاست [۴]. خواص فیزیکی و مکانیکی نانوالیاف 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 نانولیفی است. اندازه خیلی کوچک الیاف و آرایش‌یافتگی متفاوت آن‌ها

نانوالیاف به الیافی با قطر کمتر از $1 \mu\text{m}$ اطلاق می‌شود. هنگامی که قطر الیاف پلیمری به کمتر از $1 \mu\text{m}$ یا چند صد نانومتر کاهش یابد، خواص جدید و ویژه‌ای از جمله خواص مکانیکی عالی و انعطاف‌پذیری به دلیل کاهش قطر، افزایش مقدار نسبت سطح به حجم الیاف و کاهش اندازه منافذ ظاهر می‌شود که این خواص برجسته موجب شده است، نانوالیاف انتخاب مناسبی برای بسیاری از کاربردهای مهم و کارآمد باشند.

نانوالیاف پلیمری در مقیاس آزمایشگاهی به کمک روش‌هایی مانند کشش [۱] ساخت با قالب [۲]، جدایی فاز [۳]، خوداتصال [۲]، الکترورسی [۴] و روش

کلمات کلیدی

روش ردیابی مستقیم،
تبدیل فاصله،
قطر نانوالیاف،
تصویر دودویی

* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار: peivandi@yazduni.ac.ir

اندازه‌گیری قطر نانوالیاف

برای اندازه‌گیری قطر الیاف، تصاویری با وضوح و بزرگ‌نمایی مناسب مورد نیاز است. تصاویر نانوالیاف به‌طور معمول با میکروسکوپ الکترونی پویشی (SEM) تهیه می‌شود. روش‌های اندازه‌گیری قطر الیاف عبارت از روش دستی و روش پردازش تصویری است.

اندازه‌گیری دستی

به‌طور معمول اندازه‌گیری قطر الیاف به روش دستی انجام می‌شود. ابتدا مقیاس تنظیم شده سپس پیکسل‌ها بین دو لبه از محور عمودی شمارش می‌شوند. تعداد پیکسل‌ها با استفاده از مقیاس به نانومتر تبدیل و نتایج گزارش می‌شود. این روش زمان‌بر و نیازمند متصدی است که همین موضوع باعث کاهش دقت روش می‌شود. تشخیص لبه‌های الیاف و اندازه‌گیری بر اساس محور عمود بر الیاف نیز نیازمند دقت است، به همین دلیل اندازه‌گیری خودکار قطر برای اندازه‌گیری پیشنهاد می‌شود [۱۸، ۲۱].

اندازه‌گیری با استفاده از پردازش تصویر

به دلیل زمان‌بر بودن و کاهش دقت روش دستی در اثر استفاده از نیروی انسانی باید روشی جایگزین شود که قطر الیاف را با دقت و سرعت بیشتر اندازه‌گیری کند. مشکلاتی نیز در این فرایند وجود دارد که عبارت از چگونگی گرفتن تصاویر واضح که برای پردازش تصویر مناسب باشد. دوم اینکه چگونگی طراحی الگوریتم خاص که برای پردازش تصاویر عملی باشد. با استفاده از تصاویر واضح SEM و روش مناسب پردازش تصویر اندازه‌گیری قطر الیاف خیلی سریع می‌تواند انجام شود [۱۷].

پیش‌پردازش تصاویر

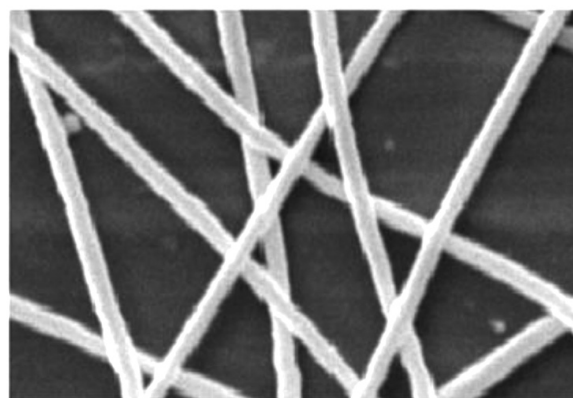
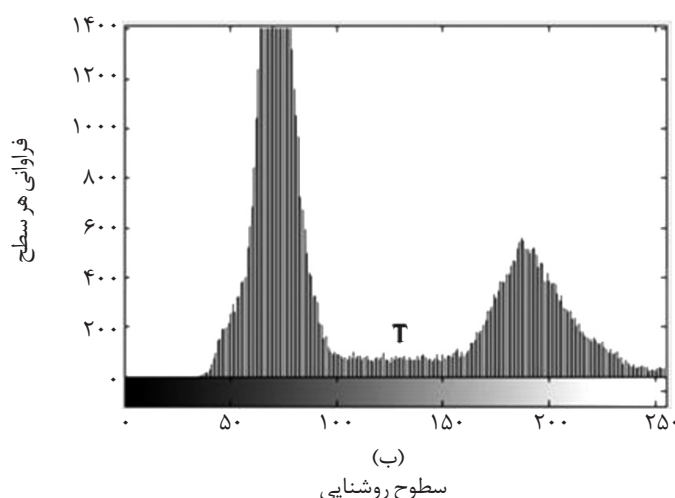
دانستن قطر الیاف و توزیع آن در وب بر خواص نهایی وب تولید شده اثر می‌گذارد. برای اندازه‌گیری قطر، تصویر باید پیش‌پردازش شود. روش‌های تعیین قطر بر اساس تبدیل فاصله و ردیابی مستقیم، روی

باعث می‌شود، اندازه‌گیری قطر نانوالیاف سخت باشد. افزون بر این، تولید نانوالیاف در مقیاس بزرگ نیاز به کنترل کیفیت برخط (online) دارد. در سال‌های اخیر روش پردازش تصویر برای اندازه‌گیری این خواص توسعه یافته که عبارت از آرایش‌یافتگی الیاف [۱۴، ۱۵]، یکنواختی الیاف [۱۶]، قطر الیاف [۱۷-۲۷] و اندازه منافذ آن [۳۱-۲۸] است. دانستن قطر الیاف و توزیع آن در وب بر خواص نهایی وب تولید شده اثر می‌گذارد. از روش‌های پردازش تصویری که برای اندازه‌گیری قطر نانوالیاف به‌کار می‌رود، روش تبدیل فاصله [۲۰-۱۸] و روش ردیابی مستقیم [۲۳-۲۱] است.

Shin و همکاران [۲۰] از روش پردازش تصویر برای تعیین قطر نانوالیاف الکترونیسی استفاده کردند. فاصله از مرکز تا مرز لیف با استفاده از تبدیل فاصله محاسبه می‌شود. در بررسی‌هایی که در سال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۰۸ ضیابری و همکاران [۱۸، ۱۹] انجام دادند، روش جدیدی از تبدیل فاصله برای اندازه‌گیری قطر نانوالیاف الکترونیسی پیشنهاد شد. در این روش، با شناسایی محل تقاطع الیاف و حذف آن‌ها از تصویر اسکلت شیء، توزیع قطر الیاف به‌طور دقیق‌تر به‌دست می‌آید.

ضیابری و همکاران [۲۲] روش ردیابی مستقیم را برای اندازه‌گیری قطر نانوالیاف پیشنهاد دادند. در این مقاله، از روش آستانه‌گیری محلی برای تبدیل تصاویر به تصاویر دودویی استفاده شد و نیز به کمک روش Otsu، آستانه مناسب به‌طور خودکار انتخاب شد. از مقایسه نتایج روش ردیابی مستقیم و روش تبدیل فاصله مشخص شد که روش ردیابی مستقیم برآورد دقیق‌تری از قطر الیاف ارائه می‌دهد.

برای بعضی از کاربردها دانستن شکل‌شناسی ساختارهای نانوالیاف برای شناخت توزیع ابعاد الیاف و منافذ لازم است. اندازه‌گیری سریع و دقیق این پارامترها به روش پردازش تصویر امکان‌پذیر است. هدف از این پژوهش، مقایسه دو روش پردازش تصویر برای اندازه‌گیری قطر نانوالیاف و ارائه الگوریتمی برای بهینه‌سازی روش‌های آستانه‌گیری است. پردازش تصویر، روشی کارآمد، قابل اعتماد و بسیار سریع و قابل استفاده در روش‌های کنترل کیفیت برخط است.



شکل ۱- (الف) تصویر مجموعه‌ای از نانوالیاف و (ب) هیستوگرام تصویر.

این مشکل با پیش‌پردازش تصویر برای حذف ناهمگنی‌ها و اعمال یک آستانه سراسری روی تصویر پیش‌پردازش شده حل می‌شود. شکل ۲ تصویر وب نانوالیاف به همراه تصاویر دودویی حاصل را پس از اعمال آستانه‌های مختلف نشان می‌دهد. عملگر باز کردن، عملگری است که برای جبران نور غیریکنواخت پس‌زمینه به کار می‌رود. باز کردن تصویر، برآوردی از پس‌زمینه را با عنصر ساختاری بزرگ ایجاد می‌کند که مناسب نیست. شکل ۲ - ج، پراش تصویر حاصل از عملگر باز کردن از تصویر اصلی که تبدیل top-hat نامیده می‌شود، یک تصویر با پس‌زمینه منطقی را نتیجه می‌دهد. (شکل ۲-د). در نهایت، پس‌زمینه همگن و لبه‌های شیء واضح است. فرایند به نوبت حساس و پیش از تقسیم‌بندی، فرایند حذف نویز و افزایش تباين تصویر لازم است [۲۰، ۲۱].

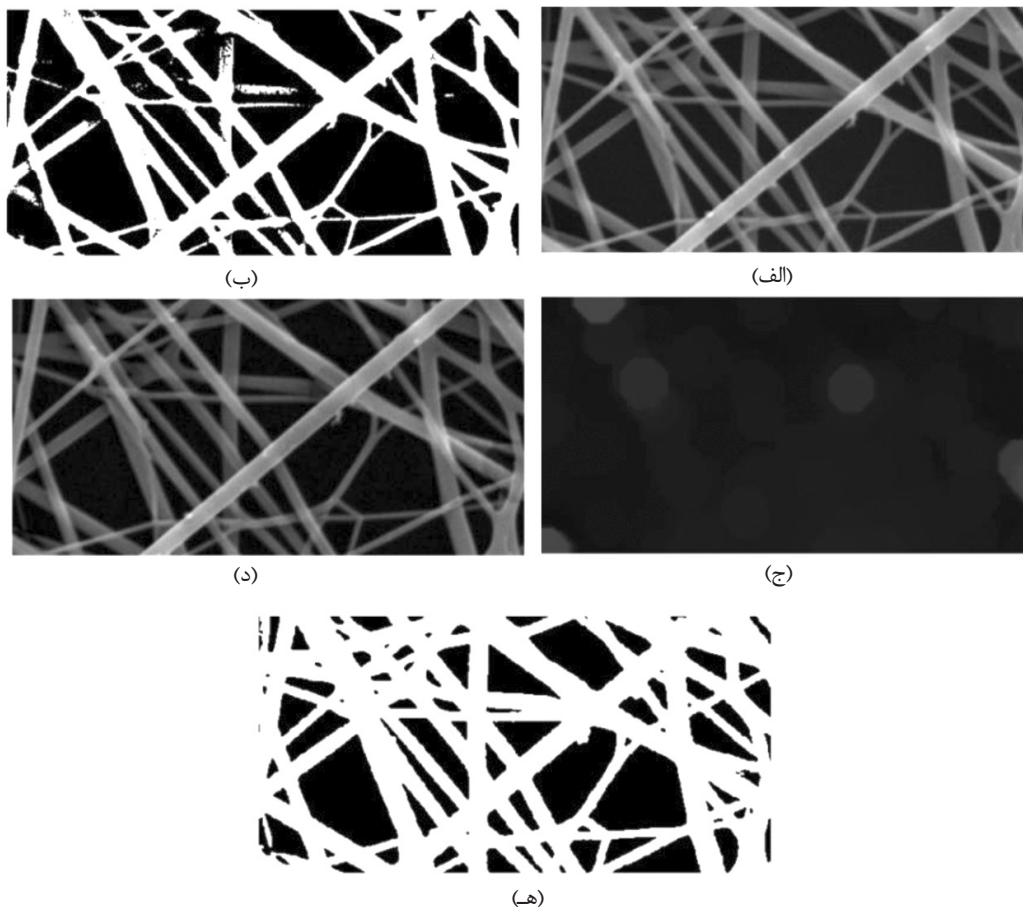
بهینه‌سازی روش‌های آستانه‌گیری

استفاده از روش‌های آستانه‌گیری برای تبدیل تصاویر با مقیاس خاکستری به تصاویر سیاه-سفید (دودویی) انجام می‌شود که این روش‌ها همواره با خطا همراه است. مواردی که با اعمال آستانه، پیکسل‌هایی از شیء جزء پس‌زمینه و نیز در مواردی پیکسل‌هایی از پس‌زمینه جزء شیء به‌شمار می‌آید که این موارد باعث می‌شود، شیء ضخیم‌تر یا باریک‌تر از مقدار واقعی نشان داده شود.

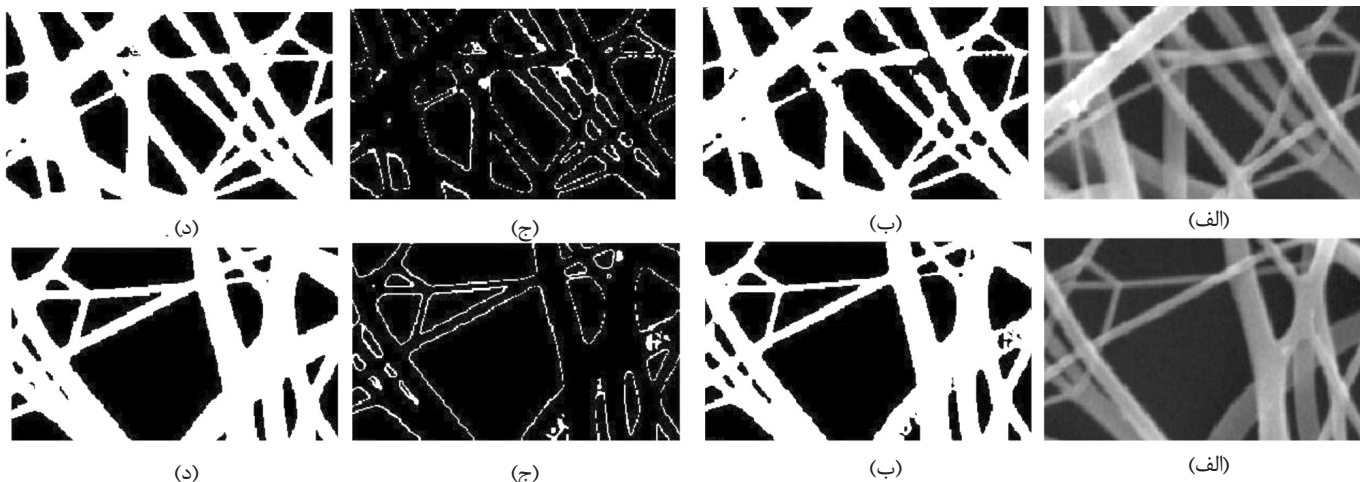
تصاویر دودویی اجرشدنی است. از این رو، اعمال آستانه‌گیری با کمترین خطا، نقش اساسی را در تعیین نتایج حاصل از تعیین قطر الیاف ایفا می‌کند.

آستانه‌گیری

در آستانه‌گیری هر پیکسل تصویر به عنوان شیء یا پس‌زمینه نشانه‌گذاری می‌شود. دو روش آستانه‌گیری که به‌طور معمول استفاده می‌شوند، آستانه سراسری و آستانه محلی است. در روش آستانه سراسری، انتخاب مقدار آستانه با استفاده از بررسی چشمی هیستوگرام تصویر و تعیین مقدار آستانه انجام می‌شود. شکل ۱ تصویر نانوالیاف را به همراه هیستوگرام آن نشان می‌دهد. تصویر شامل اشیای روشن در پس‌زمینه تاریک است. یک روش برای انتخاب آستانه مناسب استفاده از روش سعی و خطاست که مقادیر مختلف آستانه انتخاب و تصویر حاصل از اعمال این آستانه توسط بیننده قضاوت می‌شود. روش دیگر انتخاب آستانه مناسب با استفاده از روش Otsu است. این روش، روشی مؤثر در انتخاب خودکار آستانه بهینه، با بیشینه کردن واریانس بین گروهی و کمینه کردن واریانس داخل گروهی پیکسل‌هاست. آستانه سراسری در حالت نامناسب بودن وضوح پس‌زمینه تصویر، با مشکل مواجه می‌شود. برای حذف اثر ناهمگنی، آستانه محلی می‌تواند استفاده شود.



شکل ۲- (الف) تصویری از وب الکترونیسی، (ب) آستانه سراسری، (ج) تصویر پس از عملگر باز کردن، (د) تفریق تصویر اصلی از تصویر باز شده (تبدیل top-hat) و (ه) آستانه‌گیری محلی.



شکل ۳- (الف) تصویر نانوالیاف، (ب) تصویر پس از اعمال آستانه محلی، (ج) نقاط از بین رفته از تصویر با اعمال آستانه و (د) جمع تصاویر (ب) و (ج).

نانوالیاف شده است. در تصاویر نانوالیاف استفاده شده در این مطالعه این خطا تا ۳/۵ درصد بود که با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی به حداقل مقدار می‌رسد. جمع تصویر آستانه‌گذاری شده با نقاطی از تصویر که جزء پس‌زمینه شدند، (شکل ۳-ج)، تصویری با بهترین آستانه را ایجاد خواهد کرد (شکل ۳-د).

شکل ۴ نمودار الگوریتم طراحی شده برای بهینه‌سازی روش‌های آستانه‌گیری و به حداقل رساندن خطای حاصل از آستانه‌گیری را برای تصاویر نانوالیاف نشان می‌دهد.

انتخاب بهترین روش آستانه‌گیری معمولاً با ارزیابی چشمی است که ارزیابی بدین روش دقیق نیست. در این مطالعه، الگوریتمی برای تعیین درصد خطای روش آستانه‌گیری و بهینه‌سازی روش‌ها طراحی شده است. شکل ۳، تصویر دو وب نانوالیاف (شکل ۳-الف) را به همراه تصویر آستانه محلی (شکل ۳-ب) نشان می‌دهد.

استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی نشان داد، روش آستانه استفاده شده برای این تصاویر با مقداری خطا همراه بوده و باعث باریک‌تر شدن

حذف نویز

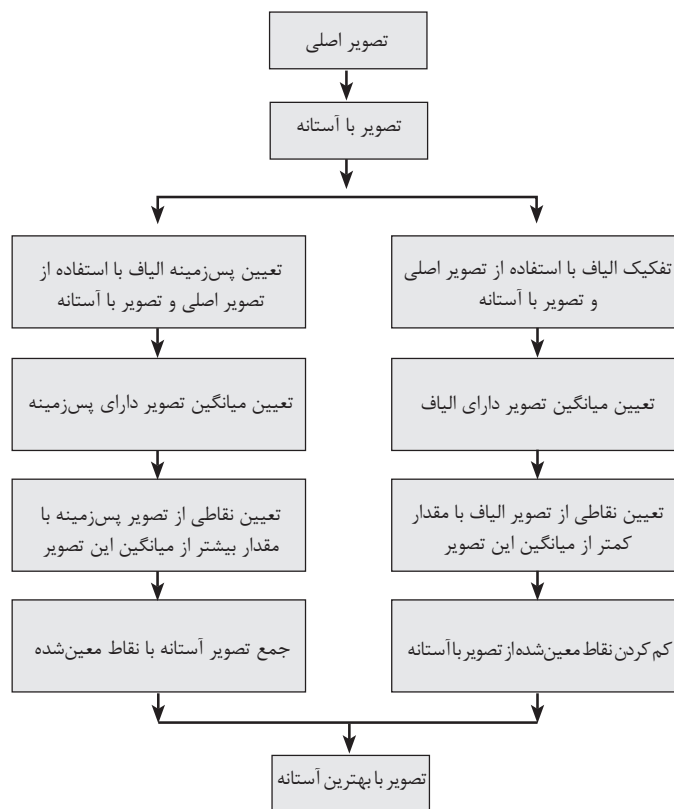
با اعمال آستانه بر تصویر، نویز حاصل در نتایج باعث ایجاد خطا می‌شود [۱۸]. برای حذف نویز از تصاویر، می‌توان از عملگرهای باز کردن و بستن شکل‌شناسی استفاده کرد. این دو عملگر هم‌زمان با روش آستانه‌گیری اعمال می‌شوند. عملگر بستن، عملگری است که ابتدا عملگر انبساط (dilation) و سپس عملگر ساییدگی (erosion)، عملگر باز کردن ابتدا عملگر ساییدگی و در مرحله بعد عملگر انبساط، با استفاده از عنصر ساختاری یکسان استفاده می‌شود [۲۰]. از روش‌های پردازش تصویر برای اندازه‌گیری قطر عبارت از روش تبدیل فاصله و روش ردیابی مستقیم است.

روش تبدیل فاصله

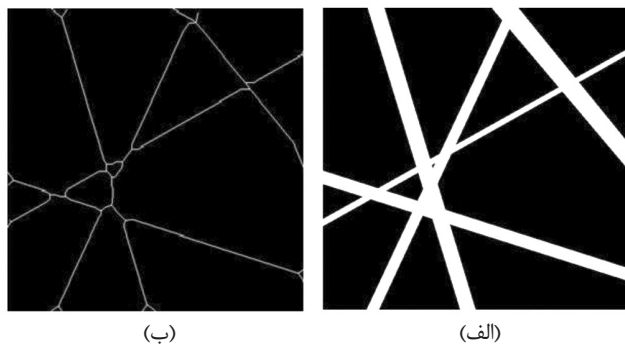
تبدیل فاصله یک تصویر دودویی که ۱ نشان‌دهنده شیء و ۰ نشان‌دهنده پس‌زمینه است، عبارت از کمینه فاصله از هر پیکسل تا نزدیک‌ترین پیکسل غیر صفر است.

روش‌های اندازه‌گیری فاصله

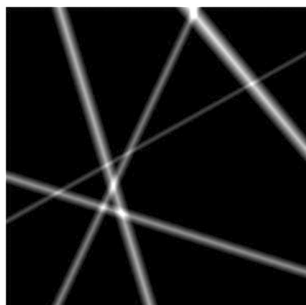
سه روش اندازه‌گیری فاصله که به‌طور متداول استفاده می‌شود، City block، صفحه شطرنجی و اقلیدسی است. شکل ۵ اجرای سه روش را روی تصویر دودویی یک لیف نشان می‌دهد. در City block طول مسیر بین پیکسل با ۴ پیکسل مجاور محاسبه می‌شود و حرکت در



شکل ۴- نمودار الگوریتم طراحی شده برای بهینه‌سازی روش‌های آستانه‌گیری.



شکل ۶- (الف) نمونه‌ای از تصویر شبیه‌سازی، (ب) اسکلت تصویر و (ج) تصویر تبدیل فاصله.

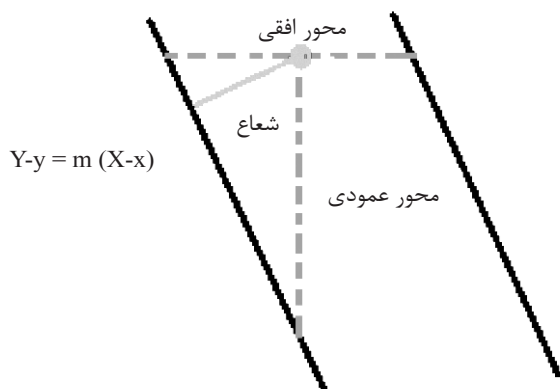


(ج)

شکل ۶- (الف) نمونه‌ای از تصویر شبیه‌سازی، (ب) اسکلت تصویر و (ج) تصویر تبدیل فاصله.

اسکلت‌سازی

اسکلت‌سازی به معنای باریک‌سازی اشیا یا شکل‌های دودویی تا حد یک پیکسل است. این عملیات در هر اجرا یک یا دو پیکسل از ضخامت شیء دودویی را کم می‌کند. در این روش، شیء به خطوط نازک کاهش داده می‌شود. بدین ترتیب، تنها اطلاعات مهم مربوط به شکل شیء اصلی حفظ می‌شوند [۳۳]. عملیات اسکلت‌سازی اغلب منجر به تولید زائده‌های اضافی کوچک می‌شود که از آن‌ها با عنوان اجزای پارازیتی یاد می‌شود. با استفاده از فرایند هرس کردن (pruning) 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 ۶ نمونه‌ای از تصویر شبیه‌سازی الیاف به همراه اسکلت شیء و تصویر تبدیل فاصله اقلیدسی آن را نشان می‌دهد.



شکل ۷- طرح روش ردیابی مستقیم [۲۱].

جهت افقی و عمودی است. پیکسل‌ها در همسایگی مستقیم، یک واحد و پیکسل‌ها به شکل مورب دو واحد در نظر گرفته می‌شود. شکل ۵ - ب اندازه‌گیری فاصله با این روش را نشان می‌دهد. صفحه شطرنج مسیر بین پیکسل‌ها بر اساس ۸ پیکسل همسایه متصل است (حرکت مورب نیز مجاز است) (شکل ۵-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 به هر سه روش با معادله‌های (۱) تا (۳) معین می‌شود [۳۲]:
فاصله City block برابر است با:

$$Distance_{cityblock} = (|x_1 - x_2| + |y_1 - y_2|) \quad (1)$$

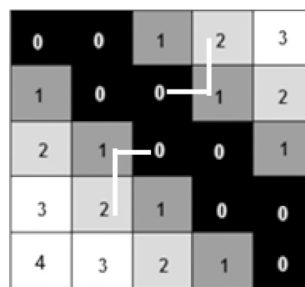
فاصله صفحه شطرنج برابر است با:

$$Distance_{chessboard} = \text{Max}(|x_1 - x_2|, |y_1 - y_2|) \quad (2)$$

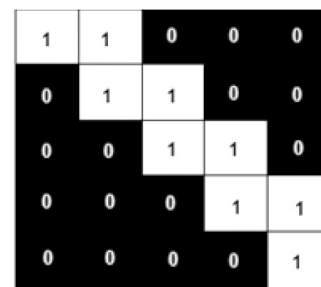
فاصله اقلیدسی برابر است با:

$$Distance_{euclidean} = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (3)$$

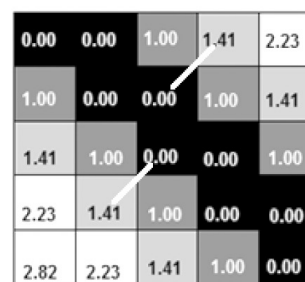
برای اندازه‌گیری قطر نانوالیاف روش تبدیل فاصله اقلیدسی به کار می‌رود. قطر الیاف با استفاده از تصویر تبدیل فاصله و تصویر اسکلت‌بندی شده به دست می‌آید.



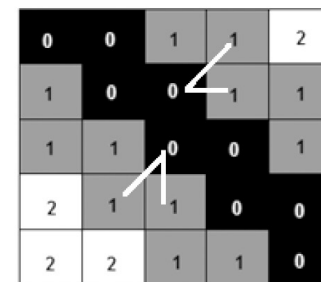
(ب)



(الف)

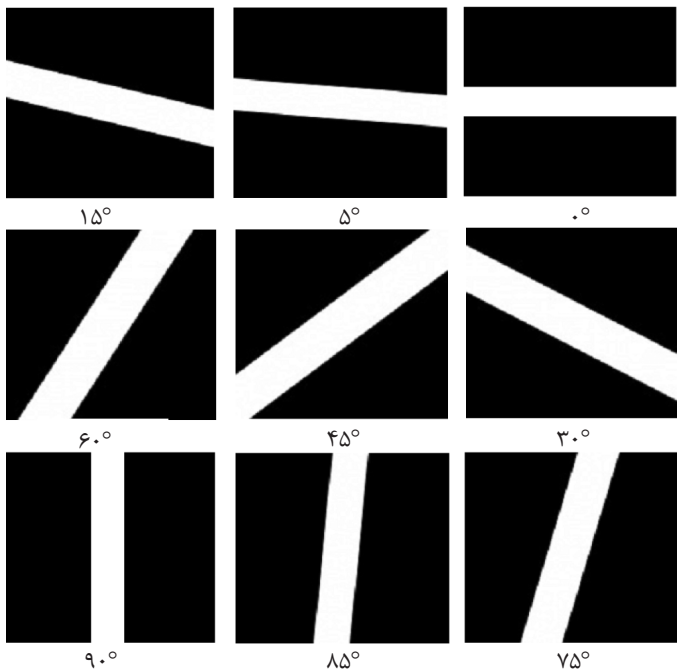


(د)



(ج)

شکل ۵- (الف) تصویر دودویی، فاصله‌های به دست آمده به روش‌های (ب) city block، (ج) صفحه شطرنج و (د) اقلیدسی.



شکل ۹- تصاویر شبیه‌سازی شده با ضخامت ۳۰ پیکسل در زاویه‌های مختلف.

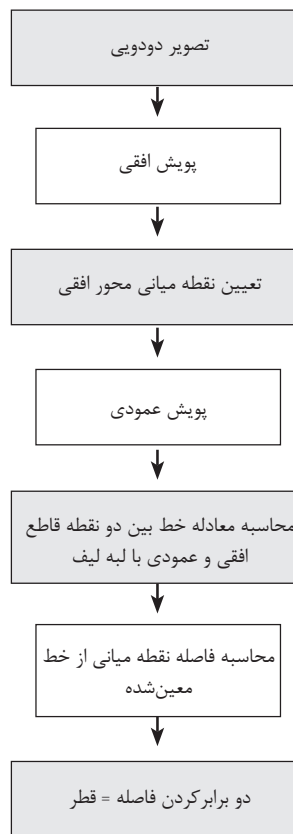
مقایسه دقت دو روش، تصاویری از الیاف با پارامترهای مشخص مورد نیاز است.

مرحله اول: شبیه‌سازی یک لیف

در این مطالعه، ابتدا تصاویری از یک لیف در ضخامت معین ۳۰ پیکسل و در زاویه‌های مختلف (۰-۱۵-۳۰-۴۵-۶۰-۷۵-۸۵-۹۰) درجه شبیه‌سازی و به دو روش تبدیل فاصله و ردیابی مستقیم، قطر لیف محاسبه شد.

جدول ۱- میانگین قطر و درصد خطای به دست آمده برای لیف با ضخامت ۳۰ پیکسل به دو روش تبدیل فاصله و ردیابی مستقیم.

زاویه لیف (°)	ردیابی مستقیم		تبدیل فاصله	
	قطر (پیکسل)	درصد خطا	قطر (پیکسل)	درصد خطا
۰	-	-	۳۲	۲۰
۵	-	-	۳۰/۷۳	۶/۶۶
۱۵	۲۶/۶۹	۱/۰۳	۳۰/۷۷	۲/۴۴
۳۰	۲۹/۷۹	۰/۷	۳۱/۰۲	۲/۵۶
۴۵	۳۰/۳۶	۱/۲	۳۱/۱۷	۳/۴
۶۰	۳۰/۷۵	۲/۵	۳۱/۰۳	۳/۹
۷۵	۳۰/۸۶	۲/۸۶	۳۰/۸۳	۳/۴۳
۸۵	۳۰/۳۳	۱/۱	۳۰/۷۶	۲/۷۶
۹۰	-	-	۳۲	۲/۵۳



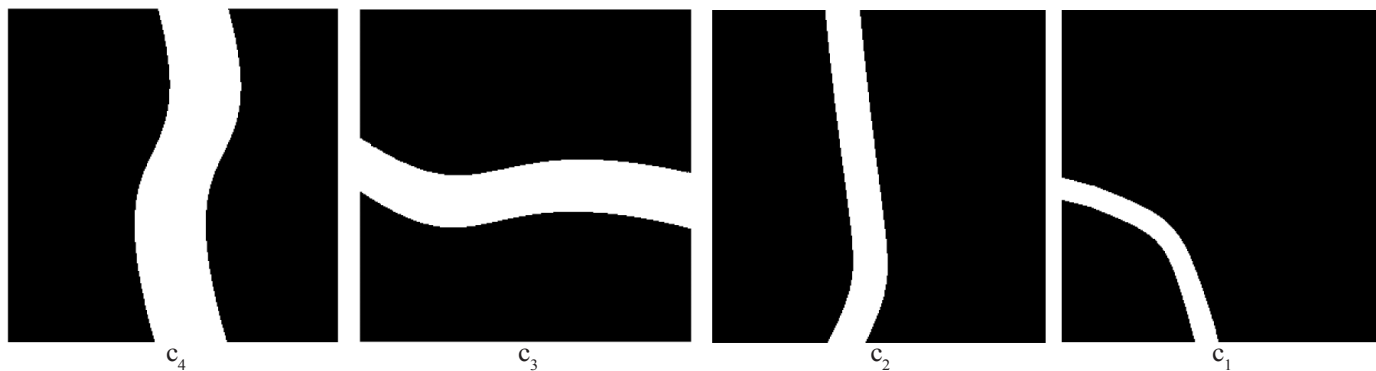
شکل ۸- نمودار جریان روش ردیابی مستقیم.

روش ردیابی مستقیم

در روش ردیابی مستقیم نیز از یک تصویر دودویی به عنوان ورودی استفاده می‌شود. شکل ۷ اندازه‌گیری قطر به این روش را به‌طور طرح‌وار نشان می‌دهد. تعیین قطر الیاف بر اساس اطلاعات به دست آمده از دو محور ابتدا محور افقی و سپس محور عمودی است. محور افقی از یک مرز لیف شروع و به‌طور افقی به مرز دیگر لیف ختم می‌شود. شکل ۸ نمودار جریان روش ردیابی مستقیم را برای اندازه‌گیری قطر نشان می‌دهد. پس از آن در مرحله دوم شروع از نقطه میانی محور افقی تا رسیدن به پیکسل عمودی که مرز لیف را قطع کند [۲۱]، اگر لبه لیف در راستای حرکت عمودی وجود نداشته باشد، پویس در راستای مخالف انجام می‌گیرد. با داشتن محورهای عمودی و افقی، معادله این نقطه قاطع و نقطه قاطع قطر افقی با مرز لیف محاسبه شده، سپس فاصله نقطه مرکزی تا این خط به عنوان شعاع گزارش می‌شود.

تجربی

برای ارزیابی دقت روش‌ها، تصاویری با پارامترهای مشخص مورد نیاز است. از این رو، از تصاویر شبیه‌سازی می‌توان برای ارزیابی مفیدبودن الگوریتم، تشخیص قطر و سایر ویژگی‌های ساختاری استفاده کرد. برای بررسی و



شکل ۱۰- لیف غیرمستقیم با ضخامت: (C₁) ۲۰ پیکسل، (C₂) ۳۰ پیکسل، (C₃) ۴۵ پیکسل و (C₄) ۶۰ پیکسل.

باشد، نقطه میانی با یک پیکسل اختلاف، به سمت راست یا چپ معین می‌شود. همان‌طور که در جدول دیده می‌شود، روش تبدیل فاصله برای تمام زاویه‌ها مناسب است، اما اختلاف آن با قطر واقعی بیشتر و درصد خطای بزرگ‌تری دارد. علت خطا در این روش زائده‌های ایجاد شده در اسکلت شیء، پس از اعمال تبدیل فاصله است که باعث می‌شود، قطر بیش از مقدار واقعی اندازه‌گیری شود.

در جدول ۲ نتایج تغییرات میانگین قطر و درصد خطا برای تصاویر در دو زاویه ۳۰ و ۷۵ درجه آمده است. دیده می‌شود، با افزایش ضخامت لیف درصد خطا کاهش می‌یابد. این کاهش در هر دو روش مشهود است. همچنین با افزایش زاویه، درصد خطا تغییرات منظمی ندارد. برخی از نانوالیاف کاملاً مستقیم در صفحه قرار نمی‌گیرند و همراه با انحنا هستند. شکل ۱۰ چند تصویر شبیه‌سازی از لیف غیرمستقیم را با ضخامت‌های مختلف نشان می‌دهد. اندازه‌گیری قطر این‌گونه لیف‌ها نیز به هر دو روش امکان‌پذیر است. جدول ۳ نتایج به‌دست آمده برای الیاف منحنی را نشان می‌دهد.

شکل ۹ تصویر نانولیف شبیه‌سازی شده با قطر مشخص را در زاویه‌های مختلف نشان می‌دهد. در جدول ۱ اندازه‌گیری قطر به دو روش تبدیل فاصله و ردیابی مستقیم برای تصاویر لیف شبیه‌سازی با قطر ۳۰ پیکسل و نیز درصد خطای آن‌ها آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، به‌طور کلی روش ردیابی مستقیم نتایج بهتری ارائه می‌دهد و درصد خطاهای آن کمتر است. اما، این روش دارای درصدی خطا در بعضی از زاویه‌هاست. بیشترین خطا مربوط به زاویه‌های کم و نیز زاویه ۹۰ است. به‌طوری که میانگین قطر در زاویه‌های ۵، ۰ و ۹۰ بیان نشده است.

با توجه به مراحل محاسبه قطر در روش ردیابی مستقیم که گفته شد، روش ردیابی مستقیم برای زاویه‌های کم و زاویه قائم نامناسب است، چرا که در زاویه‌های کم، هر چه ضخامت لیف افزایش یابد، دیگر پویش افقی بین دو محور لیف اتفاق نمی‌افتد و در زاویه قائم پویش عمودی وجود ندارد. یکی دیگر از دلایل خطای ایجاد شده در روش ردیابی مستقیم تعیین نقطه میانی است. در مواردی که تعداد پیکسل‌های محور افقی زوج

جدول ۴- مشخصات ساختاری تصاویر مجموعه اول.

شماره تصویر	ضخامت خطوط (پیکسل)	تراکم خطوط در تصویر	زاویه خطوط (°)
D1	۱۰	۱۵	۰-۳۶۰
D2	۱۵	۱۵	۰-۳۶۰
D3	۲۰	۱۵	۰-۳۶۰
D4	۲۵	۱۵	۰-۳۶۰
D5	۳۰	۱۵	۰-۳۶۰

جدول ۵- مشخصات ساختاری تصاویر مجموعه دوم.

شماره تصویر	ضخامت خطوط (پیکسل)	تراکم خطوط در تصویر	زاویه خطوط (°)
D6	۲۰ (۲)	۱۵	۰-۳۶۰
D7	۲۰ (۴)	۱۵	۰-۳۶۰
D8	۲۰ (۶)	۱۵	۰-۳۶۰
D9	۲۰ (۸)	۱۵	۰-۳۶۰
D10	۲۰ (۱۰)	۱۵	۰-۳۶۰

اعداد داخل پرانتز مقادیر انحراف معیار را نشان می‌دهد.

جدول ۲- تغییرات میانگین قطر و درصد خطا برای سه لیف در دو زاویه ۳۰ و ۷۵ درجه به روش‌های تبدیل فاصله و ردیابی مستقیم.

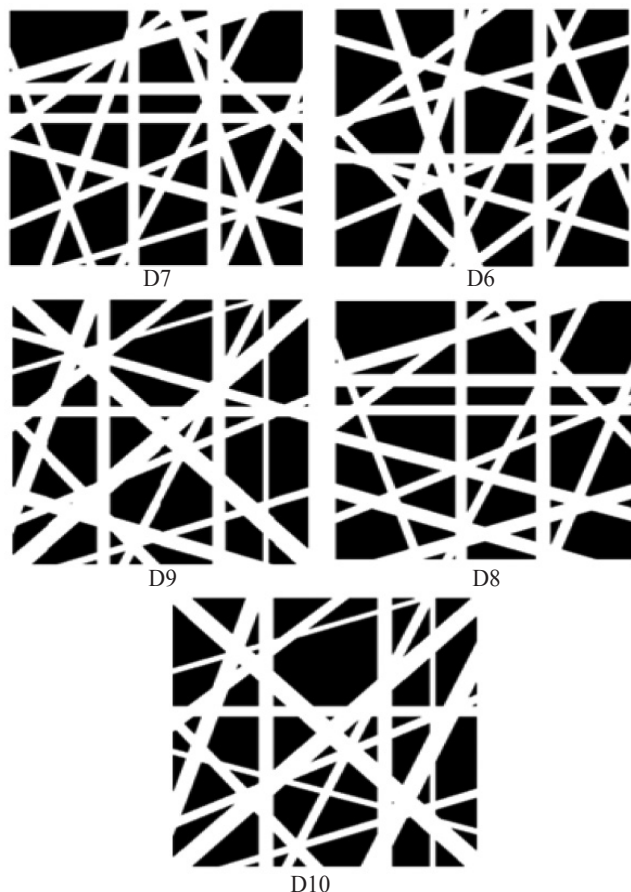
ضخامت الیاف (پیکسل)	ردیابی مستقیم		تبدیل فاصله	
	۳۰°	۷۵°	۳۰°	۷۵°
۱۰	۹/۹۶ (۰/۴)	۱۰/۳۸ (۳/۸)	۱۰/۹۹ (۹/۹)	۱۰/۹۲ (۹/۲)
۳۰	۲۹/۷۹ (۰/۷)	۳۰/۸۶ (۲/۸۶)	۳۱/۰۲ (۲/۵۶)	۳۰/۸۳ (۳/۴۳)
۶۰	۵۹/۸۷ (۰/۲۱)	۶۰/۱۵ (۰/۲۵)	۹/۹۶ (۰/۴)	۶۰/۸۶ (۱/۳۶)

اعداد داخل پرانتز درصد خطای مقادیر را نشان می‌دهد.

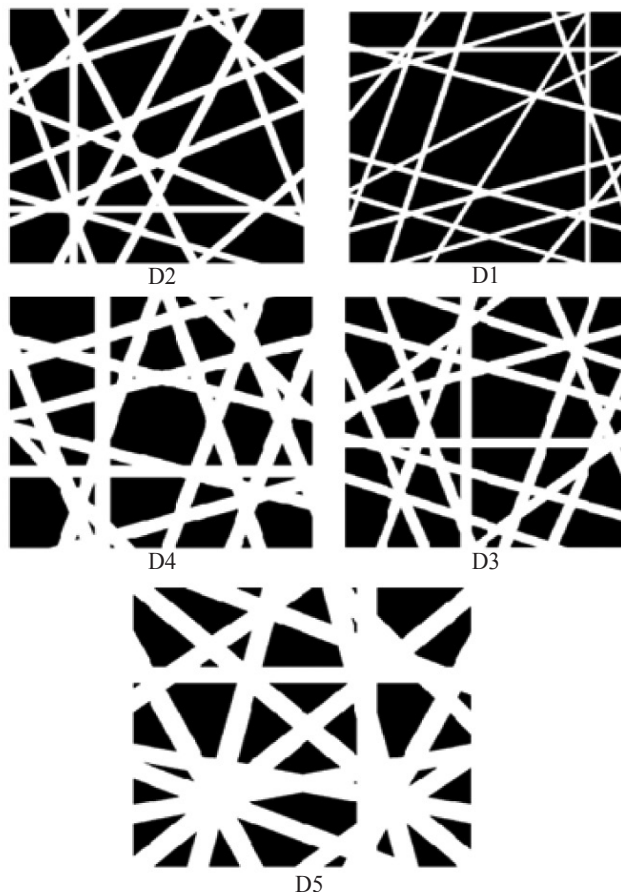
جدول ۳- میانگین قطر و درصد خطای به‌دست آمده برای الیاف غیرمستقیم به دو روش تبدیل فاصله و ردیابی مستقیم.

روش	ضخامت الیاف (پیکسل)			
	۲۰	۳۰	۴۵	۶۰
ردیابی مستقیم	۱۸/۷۷ (۶/۱۵)	-	-	۶۱/۱۶ (۱/۹۳)
تبدیل فاصله	۲۱/۸۸ (۹/۴)	۳۱/۰۴ (۳/۴۶)	۴۶/۱۹ (۲/۴۶)	۶۲/۲۹ (۳/۸۱)

اعداد داخل پرانتز درصد خطای مقادیر را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲- تصاویر شبیه‌سازی شده برای مجموعه دوم.



شکل ۱۱- تصاویر شبیه‌سازی شده برای مجموعه اول.

مرحله دوم: شبیه‌سازی چند لیف

در مرحله دوم شبیه‌سازی دو مجموعه تصویر که مجموعه اول شامل ۵ تصویر با میانگین قطرهای ثابت، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ است که به ترتیب D1 تا D5 شماره‌گذاری شدند. مجموعه دوم نیز شامل ۵ تصویر، با شماره‌های D6 تا D10، با میانگین قطر ۲۰ پیکسل و انحراف استاندارد ۲، ۴، ۶، ۸ و ۱۰ پیکسل است. برای هر تصویر تراکم خطوط ۱۵ و زاویه قرارگیری خطوط در تصویر به‌طور تصادفی از ۰ تا ۳۶۰° است. مشخصات این تصاویر در جدول‌های ۴ و ۵ آمده است. تصاویر شبیه‌سازی برای هر

جدول ۶- میانگین قطر و درصد خطای اندازه‌گیری شده با استفاده از دو روش تبدیل فاصله و ردیابی مستقیم برای مجموعه اول.

شماره تصویر	ضخامت خطوط (پیکسل)	تراکم خطوط در تصویر	زاویه خطوط (°)
D1	۱۰ (۰)	۱۰/۸ (۸)	۹/۷ (۳)
D2	۱۵ (۰)	۱۵/۶۳ (۴/۲)	۱۴/۹۱ (۰/۶)
D3	۲۰ (۰)	۲۱/۱۲ (۵/۶)	۱۹/۹۶ (۰/۲)
D4	۲۵ (۰)	۲۶/۰۱ (۴/۰۴)	۲۴/۹۳ (۰/۲۸)
D5	۳۰ (۰)	۳۱/۹۳ (۶/۴۳)	۲۹/۹۳ (۰/۱۳)

اعداد داخل پرانتز درصد خطای مقادیر را نشان می‌دهد.

مجموعه در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ دیده می‌شود.

تعیین قطر لیاف در مرحله شبیه‌سازی چند لیف، دارای دو مشکل عمده در دو روش بررسی شده است، مشکل اول مربوط به محدودیت اندازه‌گیری قطر در برخی از زوایاها، یعنی زوایاها خیلی کم و زاویه ۹۰°، در روش ردیابی مستقیم است که با اصلاح برنامه این مشکل رفع می‌شود و برنامه قابلیت اندازه‌گیری قطر را در تمام زوایاها خواهد داشت.

برنامه بدین روش عمل می‌کند که اگر جمع ستونی پیکسل‌ها خیلی بیشتر از جمع سطری یا پویش عمودی وجود نداشته باشد، پویش افقی به عنوان قطر و اگر پویش افقی وجود نداشته باشد یا جمع سطری پیکسل‌ها خیلی بیشتر از جمع ستونی باشد، پویش عمودی به

جدول ۷- میانگین قطر اندازه‌گیری شده با استفاده از دو روش تبدیل فاصله و ردیابی مستقیم برای تصاویر مجموعه دوم.

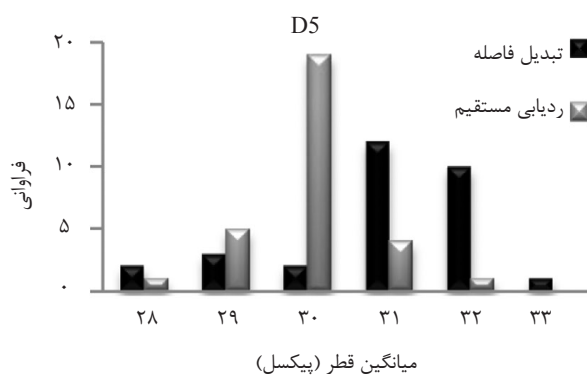
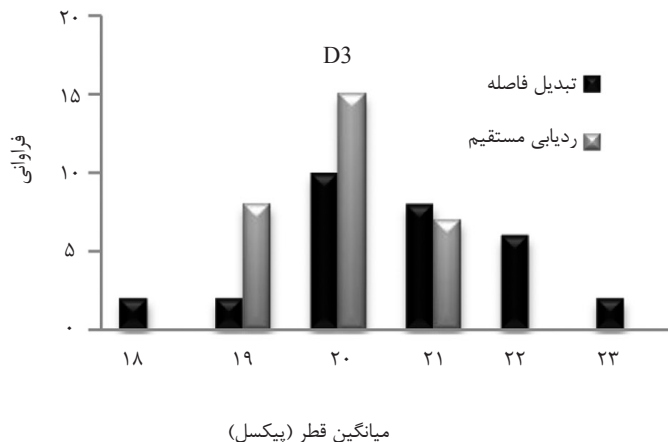
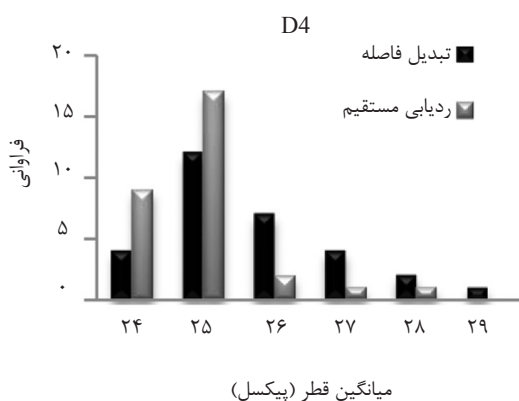
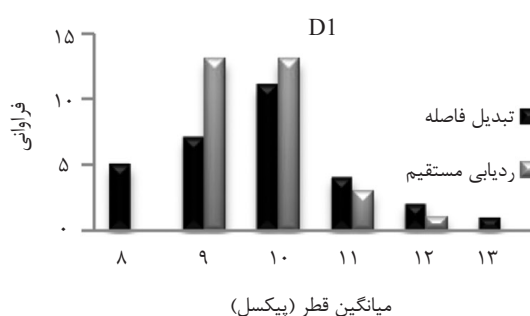
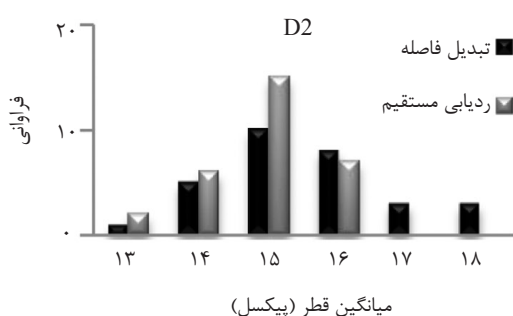
روش	D6	D7	D8	D9	D10
شبیه‌سازی	۲۱/۰۱	۲۰/۱۳	۲۰/۵۶	۲۰/۷۱	۲۱/۰۳
تبدیل فاصله	۲۰/۲۲	۲۲/۳۵	۲۱/۱۳	۲۱/۵۸	۲۳/۵۶
ردیابی مستقیم	۱۹/۸۱	۲۰/۸۶	۲۱/۰۶	۲۰/۴	۲۱/۹۶

نزدیک‌تر به مقادیر تصاویر شبیه‌سازی است. همان‌طور که قبلاً گفته شد، علت خطای روش تبدیل فاصله را می‌توان به زائده‌های اضافی ایجاد شده در اسکلت شیء نسبت داد که پس از فرایند هرس کردن هنوز از بین نرفتند. در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ دیده می‌شود، روش تبدیل فاصله بازه بزرگ‌تری از قطرها را شامل می‌شود و روش ردیابی مستقیم به توزیع نرمال نزدیک‌تر است.

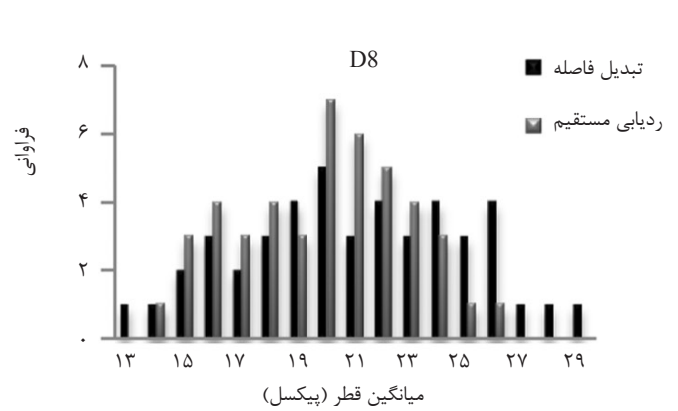
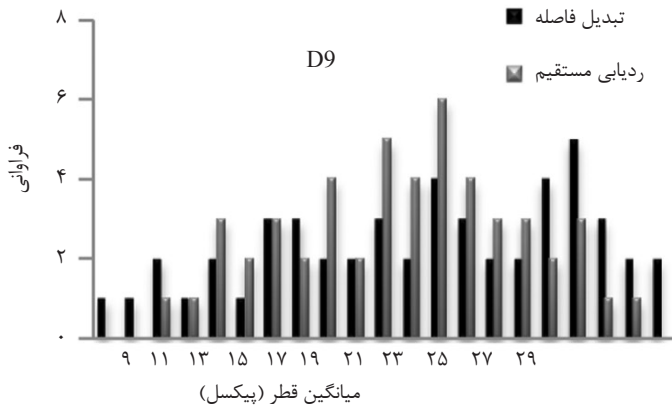
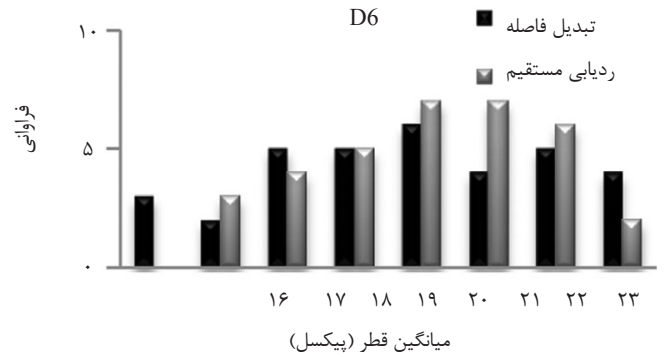
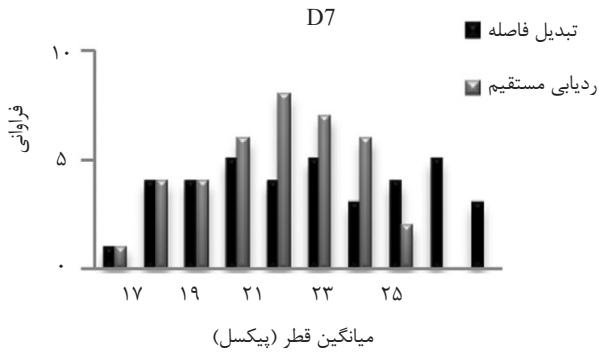
در این بررسی، همچنین تصاویری از نانوالیاف به عنوان وب‌های واقعی برای پردازش تصویر استفاده شد. شکل ۱۵ دو تصویر از وب واقعی را نشان می‌دهد. این نانوالیاف از الکتروسی پلی‌وینیل الکل (PVA) با وزن مولکولی 72000 g/mol حاصل شده و تصاویر SEM پس از لایه‌نشانی نمونه‌ها با طلا گرفته شده است.

عنوان قطر معرفی می‌شود. مشکل دوم اندازه‌گیری قطر در محل تقاطع الیاف است. برای رفع این مشکل، در روش ردیابی مستقیم تصویر به تصویرهای جزئی تقسیم می‌شود، به طوری که هر لیف در یک تصویر قرار گیرد و بدین ترتیب اثر تقاطع حذف می‌شود.

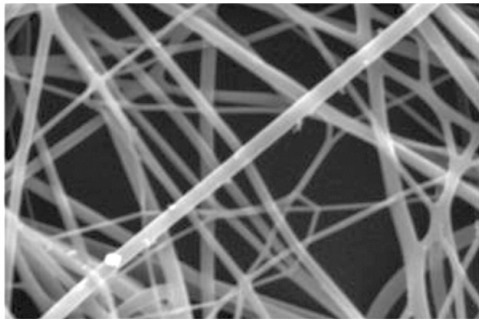
برای تعیین قطر با استفاده از روش تبدیل فاصله، محل نقاط متقاطع از تصویر اسکلت بندی شده شناسایی و از تصویر تبدیل فاصله حذف شدند [۱۸]. نتایج برای تصاویر شبیه‌سازی هر دو مجموعه در جدول‌های ۶ و ۷ دیده می‌شود. همچنین، توزیع قطر الیاف اندازه‌گیری شده به دو روش برای هر دو مجموعه در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ دیده می‌شود. از جدول‌های ۶ و ۷ دیده می‌شود، نتایج روش ردیابی مستقیم بهتر و



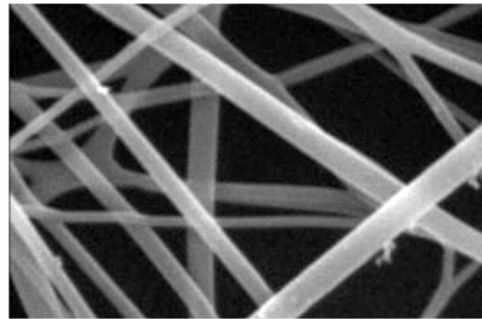
شکل ۱۳- توزیع قطرهای اندازه‌گیری شده با استفاده از دو روش تبدیل فاصله و ردیابی مستقیم برای تصاویر مجموعه اول.



شکل ۱۴- توزیع قطرهای اندازه‌گیری شده با استفاده از دو روش تبدیل فاصله و ردیابی مستقیم برای تصاویر مجموعه دوم.

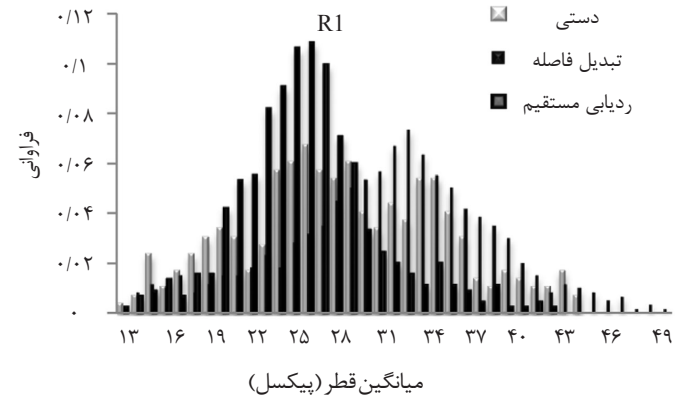
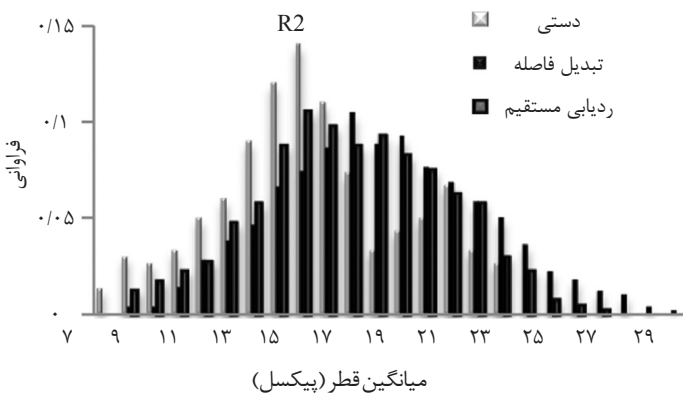


R2



R1

شکل ۱۵- تصاویری از نانوالیاف پلی‌وینیل الکل حاصل از الکتروریسی [۳۴].



شکل ۱۶- توزیع قطرهای اندازه‌گیری شده با استفاده از روش دستی به دو روش پردازش تصویر، تبدیل فاصله و ردیابی مستقیم برای تصاویر مجموعه نانوالیاف واقعی.

در این مطالعه، دو روش پردازش تصویر برای اندازه‌گیری قطر نانوالیاف مقایسه شده و هدف از این کار تعیین قطر نانوالیاف با استفاده از روش بهتر و دقیق‌تر در اندازه‌گیری بوده است. برای ارزیابی و دقت روش‌ها تصاویر با ویژگی‌های مشخص مورد نیاز است. به همین منظور در دو مرحله، تصاویر شبیه‌سازی ایجاد و میانگین قطر و درصد خطا برای هر مجموعه محاسبه شد. همچنین تصاویری از نمونه‌های واقعی بررسی شدند که برای استفاده از این تصاویر برای اندازه‌گیری قطر به روش پردازش تصویر، عملیات پیش‌پردازش تصویر روی آن‌ها انجام شد تا به تصویر دودویی مناسب برای اندازه‌گیری قطر تبدیل شدند.

با اعمال آستانه روی تصاویر و استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی آستانه‌گیری که در این بررسی ارائه شده است، بهترین تصویر دودویی با حداقل خطا حاصل می‌شود. در تصاویر نانوالیاف استفاده شده در این مطالعه خطای ۳/۵ درصد ایجاد شده با آستانه‌گیری، به حداقل می‌رسد. نتایج نشان داد، روش ردیابی مستقیم دارای درصد خطای کمتری نسبت به روش تبدیل فاصله است و به‌طور کلی نتایج دقیق‌تر و بهتری ارائه می‌دهد.

شکل ۱۶ توزیع قطر به دست آمده را برای نمونه‌های واقعی نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، روش تبدیل فاصله دارای بازه گسترده‌تری از قطر است، در حالی که توزیع قطر به روش ردیابی مستقیم برای تصاویر واقعی وب نانوالیاف، به نتایج روش دستی نزدیک‌تر و دارای توزیع نرمال است. در نتیجه روش ردیابی مستقیم نتایج بهتر و دقیق‌تری ارائه می‌دهد.

نتیجه‌گیری

اندازه‌گیری قطر الیاف دارای اهمیت ویژه‌ای است. اما به دلیل اندازه بسیار کوچک نانوالیاف و آرایش‌یافتگی متفاوت آن‌ها، اندازه‌گیری قطر نانوالیاف پیچیده است. به دلیل نامناسب بودن روش دستی در اثر استفاده از نیروی انسانی باید روشی جایگزین شود که قطر الیاف را به دقت و سریع اندازه‌گیری کند. به همین دلیل اخیراً از روش پردازش تصویر برای اندازه‌گیری استفاده می‌شود.

مراجع

- Bajakova J., Chaloupek J., Lukas D., and Lacarin M., Drawing – The production of individual nanofibers by experimental method, *NanoCon*, Brno, Czech Republic, EU, 2011.
- راما کریشنا س. و همکاران، مقدمه‌ای بر الکتروریسی و نانوالیاف، ترجمه: مرانی ع.ا، دادگر م.، متالون، تهران، ۱۳۸۷.
- Pater X.M. and Ruiyun Z., Synthetic nano-scale fibrous extracellular matrix, *J. Biomed. Mater. Res.*, 46, 60-72, 1999.
- Huang Z.M., Zhang Y.Z., Kotaki M., and Ramakrishna S., A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposite, *Compos. Sci. Technol.*, 63, 2223-2253, 2003.
- Tavanaie M.A., Shoushtari A.M., Goharpey F., and Mojtaehedi M.R.M., Matrix-fibril morphology and structure of polyblend fibers in melt spinning process: A review, *Iran. J. Polym. Sci. Technol.*, 5, 367-388, 2008.
- قاسمی ط.، توانایی م.ع، صفی م.، موسوی شوشتری ا.، مطالعه رفتار رنگ‌رزی الیاف پلی‌پروپیلن اصلاح شده به روش تولید الیاف آمیخته، اول: تاثیر عملیات کشش الیاف و وزن مولکولی ماده رنگ‌رزی دیسپرس، نشریه علوم و فناوری رنگ، ۵، ۱۱۴-۱۰۳، ۱۳۹۰.
- Fallahi E., Barmar M., and Haghghat Kish M., Nanofibrils from nylon 6/polypropylene-g-maleic anhydride/polypropylene blended filaments, *Iran. J. Polym. Sci. Technol.*, 20, 433-443, 2011.
- Fallahi E., Barmar M., and Haghghat Kish M., Micro and Nano fibrils from polypropylene/nylon 6 blends, *J. Appl. Polym. Sci.*, 108, 1473-1481, 2008.
- Bagheban Kochak E., Fallahi E., and Haghghat Kish M., Extraction of micro and nano-fibrils from nylon6/polypropylene grafted with maleic anhydride/polypropylene blended films, *Iran. J. Polym. Sci. Technol.*, 23, 155-169, 2010.
- Tan S., Huang X., and Wu B., Mini-review: Some fascinating phenomena in electrospinning processes and applications of electrospun nanofibers, *Polym. Int.*, 56, 1330-1339, 2007.
- Lannutti J., Reneker D., Ma T., Tomasko D., and Farson D., Electrospinning for tissue engineering scaffolds, *Mater. Sci. Eng.*, 27, 504-509, 2007.
- Khan N., Applications of electrospun nanofibers in the biomedical field, *Studies by Undergraduate Researchers at Guelph*, 5, 63-73, 2012.
- Phillip W.G., Calvin L., Frank K., and Darrell R., Application of nanofiber technology to nonwoven thermal insulation, *J. Eng. Fiber Fabric*, 2, 32-40, 2007.
- Pourdeyhimi B., Ramanathan R., and Dent R., Measuring fiber orientation in nonwovens, Part I, *Text. Res. J.*, 66, 713-726, 1996.
- Pourdeyhimi B., Dent R., and Davis H., Measuring fiber orientation in nonwovens. Part III: Fourier transform, *Text. Res. J.*, 67, 143-151, 1997.
- Chhabra R., Nonwoven uniformity-measurements using im-

- age analysis, *Int. Nonwoven. J.*, 43-50, 2003.
17. Priscila B., Caliope E., and Ana N.S., Digital image analysis to determine diameters distribution of nanofibers, *ECS Transactions*, 14, 477-484, 2008.
 18. Ziabari M., Mottaghitalab V., and Haghi A.K., Distance transform algorithm for measuring nanofiber diameter, *Korean J. Chem. Eng.*, 25, 905-918, 2008.
 19. Ziabari M., Mottaghitalab V., McGovern S.T., and Haghi A.K., A new image analysis based method for measuring electrospun nanofiber diameter, *Nanoscale Res. Lett.*, 2, 597-600, 2007.
 20. Shin E.H., Cho K.S., Seo M.H., and Kim H., Determination of electrospun fiber diameter distributions using image analysis processing, *Macromol. Res.*, 16, 314-319, 2008.
 21. Maleki M., Latifi M., and Amani-Tehran M., Definition of structural features of nanocoated webs by image processing methods, *Int. J. Nanotechnol.*, 6, 1131-1154, 2009.
 22. Ziabari M., Mottaghitalab V., and Haghi A.K., Application of direct tracking method for measuring electrospun nanofiber diameter, *Braz. J. Chem. Eng.*, 26, 53-62, 2009.
 23. Kanafchian M., Valizadeh M., and Haghi A., Prediction of nanofiber diameter for improvements in incorporation of multilayer electrospun nanofibers, *Korean J. Chem. Eng.*, 28, 751-755, 2011.
 24. Ziabari M., Mottaghitalab V., McGovern S.T., and Haghi A.K., Measuring electrospun nanofibre diameter: A novel approach, *Chin. Phys. Lett.*, 25, 3071-3074, 2008.
 25. Haghi A.K., Electrospun nanofiber process control, *Cellulose Chem. Technol.*, 44, 343-352, 2010.
 26. Tomba E., Facco P., Roso M., Modesti M., Bezzo F., and Barolo M., Artificial vision system for the automatic measurement of interfiber pore characteristics and fiber diameter distribution in nanofiber assemblies, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 49, 2957-2968, 2010.
 27. Zeyun C., Rongwu W., Xianmiao Z., and Baopu Y., Study on measuring microfiber diameter in melt-blown web based on image analysis, *Procedia Eng.*, 15, 3516 - 3520, 2011.
 28. Ziabari M., Mottaghitalab V., and Haghi A.K., Evaluation of electrospun nanofiber pore structure parameters, *Korean J. Chem. Eng.*, 25, 923-932, 2008.
 29. Xu B., Measurement of pore characteristics in nonwoven fabrics using image analysis, *Cloth. Text. Res. J.*, 14, 81-88, 1996.
 30. She F.H., Tung K.L., and Kong L.X., Calculation of effective pore diameters in porous filtration membranes with image analysis, *Robot. Cim. Int. Manufact.*, 24, 427-434, 2008.
 31. Aydilek A.H., Oguz S.H., and Edil T.B., Digital image analysis to determine pore opening size distribution of nonwoven geotextiles, *J. Comput. Civil. Eng.*, 16, 280-290, 2002.
 32. Borgfors G., Distance transformations in digital images, *Comput. Vision. Graph. Image. Process*, 34, 344-371, 1986.
 33. Golabi S., Saadat S., Sadegh Helfroush M., and Tashk A., A novel thinning algorithm with fingerprint minutiae extraction capability, *Int. J. Comput. Theory Eng.*, 4, 514-517, 2012.
۳۴. جمشیدیان م، مطالعه بر روی کنترل پایداری فرایند الکترورسی توسط میدان مغناطیسی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی نساجی، دانشکده مهندسی نساجی، دانشگاه یزد، ۱۳۹۰.

Image Processing for Optimization of Thresholding Methods and Determination of Nanofibers Diameter

N. Dehghan, P. Payvandy* , and M.A. Tavanaei

Department of Textile Engineering, Faculty of Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

Received 7 September 2013; Accepted 26 October 2013

Abstract

Polymer fibers have extensive applications in various areas of industrial products such as textiles, composites, medical and etc. The physical properties of a fiber could be directly influenced by its diameter. So, by reducing the diameter of fibers down to nanoscale some unique properties of these materials can be achieved which make them very efficient in different applications. Therefore, development of techniques for accurate automation measure of fiber diameter is greatly desirable. In recent years, image processing is a common method used to measure the diameters. In this study direct tracking and conversion distance are the two methods that are discussed and compared. Since the implementation of the above method for determination of fiber diameter needs a binary image, a new algorithm has been developed to optimize the threshold method. To evaluate the accuracy of the methods, the images are created with definite parameters. Comparison of methods shows that diameter estimate by the direct method is more effective than distance method.

Keywords

direct tracking method,
distance transform,
nanofiber diameter,
binary image

(*) Address Correspondence to P. Payvandy, Email: peivandi@yazduni.ac.ir