



ارزش گوهرشناسی و دیرینه‌شناسی کهربا و روش‌های آزمایشگاهی تشخیص آن



تصویربرداری فراطیفی رامان و پیاده‌سازی الگوریتم‌های یادگیری ماشین، راهکاری نوین در استخراج نقشه توزیع مولکولی مواد



بررسی نرمال بودن توزیع نتایج آزمون با استفاده از نرم‌افزار MiniTab



بهینه‌سازی واحدهای گاز سوز با استفاده از الگوریتم فرا ابتکاری آموزش - یادگیری



بررسی میزان گلوتن در مواد غذایی با استفاده از روش الایزا

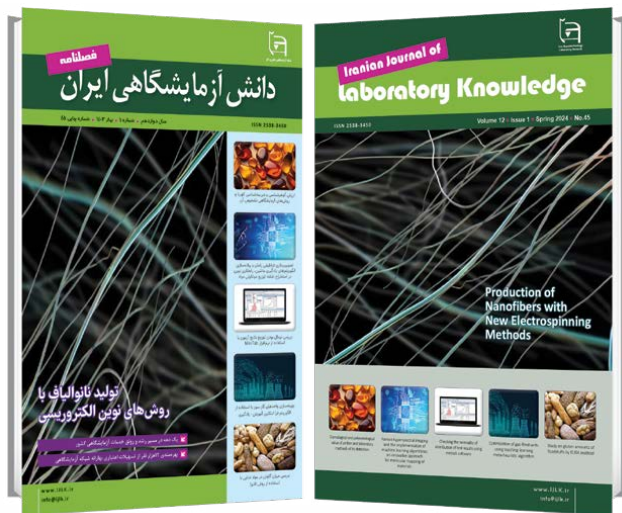
تولید نانوالیاف با روش‌های نوین الکتروریسی

یک دهه در مسیر رشد و رونق خدمات آزمایشگاهی کشور

بهره‌مندی ۱۲هزار نفر از تسهیلات اعتباری بهارانه شبکه آزمایشگاهی

عيد الفطر
عید الفطر





فصلنامه دانش آزمایشگاهی ایران

سال دوازدهم ■ شماره ۱ ■ بهار ۱۴۰۳ ■ شماره پیاپی ۴۵

ISSN 2538-3450

صاحب امتیاز: ستاد ویژه توسعه فناوری نانو معاونت علمی و فناوری ریاست جمهوری

سردبیر: علیرضا بدیعی

مدیرمسئول: مجتبی نسب

مدیریت اجرایی: شبکه آزمایشگاهی فناوری نانو

دبیر مقالات: داود قرایلو

همکاران این شماره: سید احمد ظهیر میردامادی
نصراله عباسی، صفورا شاکری، امین صفایی، مرجان جعفری
مهری ندیری نیری، صفا سراج مهدی زاده، رامین فتوحی
مهدی پورقلی، مریم احمدی، خسرو آقایی پور، اسماعیل رنجبری

طراحی و صفحه آرایی: سیمین رفیع پور لنگرودی

ویراستار: زینب زرینچه

نشانی: تهران . صندوق پستی ۳۴۴-۱۴۵۶۵

تلفن: ۰۲۱ ۶۶۹۴۱۰۸۵

پایگاه اینترنتی: www.IJLK.ir

پست الکترونیکی: info@ijlk.ir



فهرست مطالب

یک دهه در مسیر رشد و رونق خدمات آزمایشگاهی کشور

۲ <

بهره‌مندی ۱۲هزار نفر از تسهیلات اعتباری بهارانه شبکه آزمایشگاهی

۴ <

استاندارد ISO/IEC 17020
احراز صلاحیت شرکت‌های بازرسی

۵ <



ارزش گوهرشناسی و دیرینه‌شناسی کهرها و
روش‌های آزمایشگاهی تشخیص آن

۶ <



تصویربرداری فراطیفی رامان و پیاده‌سازی
الگوریتم‌های یادگیری ماشین، راهکاری نوین در
استخراج نقشه توزیع مولکولی مواد

۱۳ <



بررسی نرمال بودن توزیع نتایج آزمون با استفاده
از نرم‌افزار MiniTab

۲۲ <



بهینه‌سازی واحدهای گاز سوز با استفاده از الگوریتم
فرا ابتکاری آموزش - یادگیری

۲۶ <



بررسی میزان گلوتن در مواد غذایی با استفاده از
روش الیزا

۳۲ <



تولید نانوالیاف با روش‌های نوین الکترورسی

۳۷ <



یک دهه در مسیر رشد و رونق خدمات آزمایشگاهی کشور



فناوری های راهبردی ایران، تعداد ۱۴۰ مرکز عضو این شبکه بودند اما تا پایان سال ۱۴۰۲، تعداد این مراکز به بیش از ۱۷۰۰ مرکز رسیده و در تمامی این سالها، استقبال آزمایشگاهها از بخش های دولتی و خصوصی برای عضویت در این شبکه، برجسته بوده است.

مجتبی نسب دبیر شبکه آزمایشگاهی فناوری های راهبردی، توسعه و رونق پژوهش های کارآمد و دسترسی بهتر فعالان زیست بوم پژوهش، فناوری و نوآوری به خدمات آزمایشگاهی با کیفیت را از مهم ترین اهداف شبکه آزمایشگاهی فناوری های راهبردی دانست و افزود: ایجاد بستری مساعد برای دسترسی بهتر پژوهشگران، دانشگاهیان و فعالان حوزه فناوری به تجهیزات و خدمات آزمایشگاهی با کیفیت و همچنین افزایش بهره وری زیرساختها و تجهیزات آزمایشگاهی موجود در مراکز آزمایشگاهی و تحقیقاتی سراسر کشور، مهم ترین رکن فعالیت شبکه آزمایشگاهی فناوری های راهبردی معاونت علمی است.

نسب، با اشاره به یک دهه فعالیت شبکه آزمایشگاهی و حرکت این شبکه در مسیر توسعه توانمندی های پژوهشی و فناورانه کشور گفت: در سال ۱۳۹۳ و آغاز فعالیت شبکه آزمایشگاهی

پوشش استان های کشور و دربرگیرندگی مراکز عضو در ۳۱ استان گفت: در حال حاضر مراکز آزمایشگاهی و تحقیقاتی عضو شبکه آزمایشگاهی فناوری های راهبردی مستقر در ۱۶۷ شهر کشور عضو این شبکه هستند و به مخاطبانی از اقصی نقاط کشور خدمات آزمایشگاهی ارائه می دهند.

وی با تاکید بر ساختار فراسازمانی شبکه آزمایشگاهی فناوری های راهبردی عنوان کرد: رویکرد و رسالت اصلی شبکه آزمایشگاهی فناوری های راهبردی، هم افزایی و به کار بستن همه ظرفیت های آزمایشگاهی در تمامی دستگاهها و ارگانها اعم از بخش دولتی و خصوصی است؛ بر این اساس بستری فراهم شده است تا سازمانها از هر حوزه ای بتوانند تجهیزات و امکانات آزمایشگاهی و تحقیقاتی خود را بر بستر این شبکه اشتراک گذاری کرده و بر همین اساس، شبکه آزمایشگاهی از تنوع و گستردگی سازمانی خوبی در مراکز عضو برخوردار است و این یک مزیتی برای این شبکه محسوب می شود.

دبیر شبکه آزمایشگاهی همچنین با اشاره به رشد تجهیزات آزمایشگاهی به اشتراک گذاشته شده از طریق شبکه آزمایشگاهی فناوری های راهبردی گفت: در سال ۱۴۰۲ بیش از ۳۳ هزار و ۳۰۰ تجهیز آزمایشگاهی از مراکز آزمایشگاهی و تحقیقاتی و دانشگاه های سراسر کشور، به پژوهشگران و فناوران خدمت رسانی کرده اند؛ این در حالی است که تعداد این تجهیزات در آغاز فعالیت شبکه آزمایشگاهی، ۱۸۰۰ دستگاه بود و شاهد رشد بیش از ۲۰ برابری در جذب و به کارگیری تجهیزات آزمایشگاهی کشور هستیم. این موضوع، به واسطه ارتقای بهره وری این تجهیزات، کاهش خریدهای تجهیزاتی غیر ضروری و موازی، و کمک به دسترسی هر چه بهتر پژوهشگران، فناوران و صاحبان صنعت به این تجهیزات و خدمات آنها، مسیر صرفه جویی های ارزی و ریالی را برای کشور فراهم کرده است.

مهندس نسب، با اشاره به پیشرفت شبکه آزمایشگاهی در

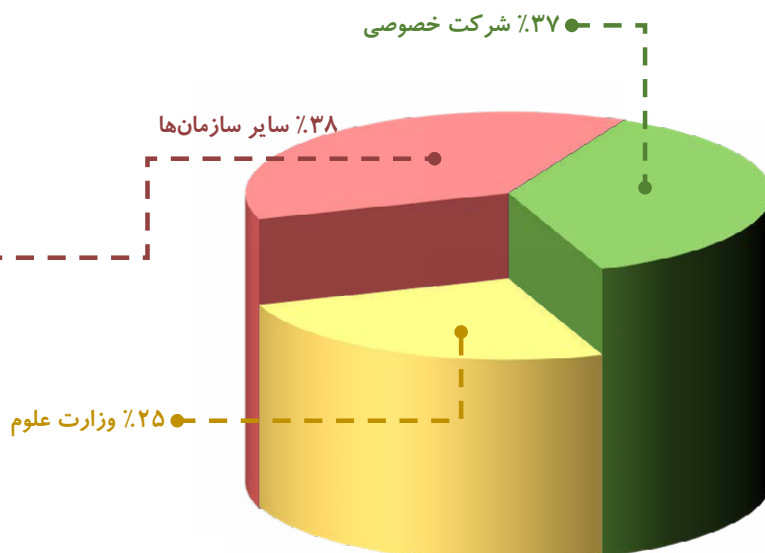


مجتبی نسب، با اشاره به ارائه بیش از ۲۰ میلیون خدمت آزمایشگاهی طی یک دهه فعالیت شبکه آزمایشگاهی گفت: در سال گذشته بیش از ۳ میلیون خدمت آزمایشگاهی به جامعه دانشگاهیان، پژوهشگران، مخترعان، نخبگان و فناوران ارائه شد که قریب به ۱۰ هزار میلیارد ریال برای آزمایشگاهها درآمدزایی داشته است. این درحالی است که در سال ۱۳۹۳ و همزمان با آغاز فعالیت شبکه آزمایشگاهی فناوریهای راهبردی ۱۱۶ هزار خدمت با ارزش ۲۶۰ میلیارد ریال ارائه شده بود که این روند، رشد ۱۰۰ درصدی داشته است.

دبیر شبکه آزمایشگاهی فناوریهای راهبردی، با اشاره به سهم قابل توجه آزمایشگاههای بخش خصوصی از اعضای این شبکه، عنوان کرد: در حال حاضر ۳۷ درصد از مراکز عضو شبکه آزمایشگاهی فناوریهای راهبردی از بخش خصوصی است؛ ۲۵ درصد اعضای شبکه از آزمایشگاههای پژوهشگاهها، دانشگاهها و مراکز تحقیقاتی تابعه وزارت علوم و ۳۸ درصد از آزمایشگاهها نیز از سایر سازمانها، از جمله وزارتخانههای مختلف، سازمان ملی استاندارد ایران، جهاد دانشگاهی و دانشگاه آزاد اسلامی هستند.

تنوع سازمانی در شبکه آزمایشگاهی

۶/۹۳٪	وزارت بهداشت
۵/۸۳٪	وزارت جهاد کشاورزی
۱۴/۲۶٪	دانشگاه آزاد
۰/۱۷٪	وزارت نفت
۱/۵۶٪	وزارت نیرو
۱/۵۰٪	جهاد دانشگاهی
۰/۴۰٪	وزارت صمت
۰/۶۹٪	وزارت ارتباطات
۱/۹۰٪	دانشگاه پیام نور
۲/۱۴٪	وزارت راه و شهرسازی
۲/۲۵٪	سازمان ملی استاندارد ایران





بهره‌مندی ۱۲ هزار نفر از تسهیلات اعتباری بهارانه شبکه آزمایشگاهی

دکتر رضا اسدی فرد، مدیر شبکه آزمایشگاهی فناوری‌های راهبردی، با اشاره به حمایت از آزمایشگاه‌ها و ترویج فرهنگ به اشتراک‌گذاری توانمندی‌ها به منظور بهره‌مندی جامعه علمی-پژوهشی از ظرفیت‌های آزمایشگاهی موجود در سراسر کشور گفت: شبکه آزمایشگاهی فناوری‌های راهبردی، بستری برای به اشتراک‌گذاری تجهیزات و خدمات آزمایشگاهی موجود در پژوهشگاه‌ها، آزمایشگاه‌ها و شرکت‌های دولتی و بخش خصوصی فراهم کرده است تا با رفع نیاز فعالان زیست‌بوم پژوهش، فناوری و نوآوری، گسترش مرزهای دانش، توسعه فناوری‌های راهبردی، محصولات و خدمات دانش‌بنیان و رفع نیازهای صنایع تسهیل شود. در همین راستا و با هدف ترغیب، حمایت و هدایت جامعه دانشگاهی، پژوهشگران، نخبگان و فناوران به استفاده از این تجهیزات، باشگاه مشتریان شبکه آزمایشگاهی راه‌اندازی کرده است.

قرار گرفته است گفت: از ابتدای سال جاری تاکنون، دانشجویان به میزان ۳۶ میلیارد ریال و اعضای هیئت علمی دانشگاه‌ها ۲۹ میلیارد ریال از یارانه اعطایی شبکه آزمایشگاهی استفاده کرده‌اند.

به گفته اسدی فرد، در سال جاری به واسطه یارانه خدمات آزمایشگاهی فصل بهار ۱۴۰۳ شبکه آزمایشگاهی، به بیش از ۵۰۰۰ عضو هیئت علمی و نزدیک به ۷۰۰۰ دانشجوی تحصیلات تکمیلی، یارانه ۴ میلیون تومانی استفاده از خدمات آزمایشگاهی تعلق گرفته است.

اسدی فرد، با اشاره به گذشت یک دهه از فعالیت باشگاه مشتریان شبکه آزمایشگاهی فناوری‌های راهبردی گفت: شبکه آزمایشگاهی در حال حاضر بیش از ۱۶۹ هزار عضو حقیقی و حقوقی دارد که از ابتدای سال جاری تاکنون، بیش از ۳ هزار عضو جدید به جمع این باشگاه اضافه شده‌اند.

اسدی فرد افزود: مهم‌ترین رویکرد شبکه آزمایشگاهی فناوری‌های راهبردی معاونت علمی در ایجاد باشگاه مشتریان، سهولت در دسترسی پژوهشگران، اعضای هیئت علمی، دانشجویان، اعضای بنیاد ملی نخبگان و سایر محققان و صنایع کشور به خدمات آزمایشگاهی مورد نیاز، بدون محدودیت زمانی و مکانی است.

مدیر شبکه آزمایشگاهی فناوری‌های راهبردی از تخصیص ۴۸۰ میلیارد ریال یارانه در قالب اعتبار استفاده از خدمات آزمایشگاهی در ۳ ماهه اول سال جاری خبر داد و افزود: شبکه آزمایشگاهی فناوری‌های راهبردی به صورت فصلی اعتبارات استفاده از خدمات آزمایشگاهی را به افراد واجد شرایط عضو باشگاه مشتریان شبکه آزمایشگاهی تخصیص می‌دهد.

وی با اشاره به این‌که تاکنون بیش از ۱۳ درصد از اعتبارات ۴۸۰ میلیارد ریالی تعلق گرفته، مورد استفاده

ISO 17020 Certification

تهیه کننده

سید احمد ظهیر میردامادی

A.zmirdamadi@gmail.com

کارشناس ارشد مدیریت دولتی، پژوهشگاه
مواد و انرژی

استاندارد ISO/IEC 17020

احراز صلاحیت شرکت‌های بازرسی

استاندارد ISO/IEC 17020 شرکت‌های بازرسی را بر اساس این که فقط به مشتری داخلی ارائه خدمت می‌کنند و یا فقط به مشتری خارجی سرویس می‌دهند و یا که به هر دوی این مشتریان ارائه خدمات دارند؛ در سه گروه مستقل تقسیم می‌کند.

این استاندارد بر مبنای تجربه کشورهای صنعتی در حوزه بازرسی و نیز الزامات سیستمی حوزه ISO 9001 بنا شده است.

بعضی مزایای پیاده سازی این استاندارد علاوه بر کسب اعتبارنامه عبارتند از:

- ◀ قابلیت توضیح و تفسیر حرفه ای نیازهای مشتریان و درک بیشتر نیازهای آنان به صورت مستند
- ◀ قابلیت ایجاد توانایی تأمین نیاز مشتریان بر طبق الزامات آن‌ها

- ◀ قابلیت آموزش اثربخش پرسنل سازمان در حوزه بازرسی
- ◀ قابلیت شناسایی الزامات ایمنی
- ◀ قابلیت کاهش شکایات مشتریان
- ◀ قابلیت بهبود فرایند نگهداری تجهیزات و حفظ سوابق

بازرسی

- ◀ قابلیت ایجاد تصویر مطلوبی از ارگان‌های بازرسی در حوزه بازار جهانی و ملی
- ◀ قابلیت افزایش بهره وری
- ◀ قابلیت افزایش انسجام و حفظ بی طرفی

در کشور ما "مرکز تایید صلاحیت ایران" ارزیابی و اعتباردهی استاندارد مذکور را بر عهده دارد.

استاندارد ISO/IEC 17020 از سری استانداردهای سازمان جهانی استاندارد است؛ که به عنوان استاندارد ملی در ایران پذیرفته و منتشر شده است و متن فارسی آن در سایت سازمان استاندارد ایران قابل دستیابی است. در واقع این استاندارد، مهم ترین سند فعلی برای احراز و اثبات صلاحیت شرکت‌های بازرسی است.

بر اساس این استاندارد از شرکت‌های بازرسی، ارزیابی صورت می‌گیرد و البته اعتبارنامه صادر می‌شود. ISO/IEC 17020 از سری ۱۷۰۰۰ بوده که مانند سایر استانداردهای مشابه، نظیر ISO/IEC 17025 و ISO/IEC 17034 توسط مراجع اعتباردهی (AB) مورد ارزیابی و اعتبار دهی قرار می‌گیرد.

در حال حاضر در جهان، کیفیت معنای جدیدی پیدا کرده است. امروزه با مقایسه شاخص‌های هر محصول و خدمت با الزامات استانداردهای مربوطه و بر مبنای انطباق آن بر این الزامات، کیفیت را تعریف می‌کنند. چنین تعریفی را تنها سازمان‌های تخصصی دارای صلاحیت می‌توانند برآورده کرده و گواهی‌های انطباق محصول و خدمت را صادر کنند. از مهم‌ترین حوزه‌های ارزیابی، انطباق حوزه بازرسی است لذا شرکت‌های بازرسی خودشان باید بر الزامات استاندارد مشخصی صلاحیت داشته باشند و صلاحیت مذکور در این زمینه را از طریق ارزیابی، توسط مراجع اعتباردهی احراز کنند. استاندارد مورد نیاز سازمان‌های بازرسی ISO/IEC 17020 نام دارد. سازمان‌های بازرسی بر مبنای استاندارد یاد شده به نیابت از ذینفعان، شامل مشتریان بیرونی و مشتریان درون سازمانی به بررسی شاخص‌هایی مثل کمیت، کیفیت و ایمنی مشتریان خود می‌پردازند.

نویسندگان

نصراله عباسی^{۱*}، صفورا شاکری^۲

۱. شرکت راستین زمین پژوهان، مرکز رشد و نوآوری واحدهای فناور دانشگاه زنجان، دانشگاه زنجان
۲. کارشناس معاونت پژوهش و فناوری، دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان

*abbasi@znu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۱۵

ارزش گوهر شناسی و دیرینه شناسی کهربا و روش های آزمایشگاهی تشخیص آن

واژه های کلیدی

کهربا، کوپالین، گوهر، طیفسنجی، صمغ.

چکیده

کهربا یک گوهرسنگ با منشاء آلی است که در پی فسیل شدن صمغ برخی از گیاهان ایجاد می شود. صمغ گیاهانی که در مراحل اولیه سنگ شدن هستند، کوپالین نامیده می شود. برخی از مواد آلی مصنوعی مانند باکلیت، ظاهری شبیه به کهربا داشته و بدل کهربا هستند. داشتن نقطه ذوب و ضریب شکست نوری به نسبت بیشتر، عدم انحلال در برخی از حلال های آلی مانند استون، فلورسانس آبی در زیر پرتو فرابنفش و داشتن بوی صمغی مطبوع در حرارت، از ویژگی های کهربای اصل است. بیشتر کهرباها از رسوبات کرتاسه، ائوسن تا میوسن یافت شده اند و بیشترین مقدار کهرباهای کشف شده از حوضه بالتیک است. داشتن برخی از فسیل های جانوری با حفظ شدگی بسیار خوب، وجود اذخالی های گازی، مایع و جامد، اهمیت کهرباها را در مطالعات دیرینه شناسی دو چندان می کند. آزمایش های فیزیکی ساده و همچنین استفاده از روش های آنالیز طیفسنجی رزونانس مغناطیسی هسته ای^۱ و پیرولیز - کروماتوگرافی گازی-طیفسنجی جرمی^۲ در تشخیص کهربا مورد استفاده قرار می گیرند.

مقدمه

سنگ های قیمتی، از دیرباز مورد توجه انسان ها بوده و در طی قرون متمادی، به تدریج ارزش گوهرسنگ ها برای انسان آشکار شده است. این سنگ ها و مواد قیمتی به انحناهای مختلف، در زیورآلات و یا در داد و ستد مورد استفاده قرار گرفتند. یکی از کهن ترین گوهرسنگ های شناخته شده توسط انسان ها کهربا است. مهره های کهربا از غار و شنوه واقع در استان قم از عصر برنز [۱] و یا از لایه های باستانی تپه حصار و تپه مارلیک یافت شده است که قدمت این مهره ها و شکسته های کهربا مربوط به هزاره پیش از میلاد است [۲ و ۳]. در طب ایرانی نیز به کهربا با عنوان یک داروی معدنی اشاره شده و از آن به دلیل داشتن مزاج معتدل برای تقویت قلب استفاده شده است [۴]. همچنین امروزه کهربا از گوهرهای مورد توجه است و روغن کهربا به عنوان یک عطر خوشبو، طرفداران زیادی دارد. گذشته از ارزش گوهرسنگی کهربا، به دلیل فرآیند تشکیل، ممکن است کهرباها میانبارهایی (اجزاء^۳) از گازها، مایعات، جامدات و یا فسیل اندام های سخت و نرم جانداران را در خود داشته باشد که اطلاعات بسیار ارزشمندی از شرایط آب و هوایی و حیات گذشته زمین را در اختیار دیرینه شناسان قرار می دهد. اهمیت دیرینه شناسی کهرباها در میان زمین شناسان، موضوعی شناخته شده است و همین امر، ارزش کهرباها را دو چندان می کند. در مقاله حاضر، تلاش می شود تا ضمن ارائه اطلاعات گوهرشناسی و دیرینه شناسی کهرباها، روش های متداول برای تشخیص آزمایشگاهی کهربا بیان شود.

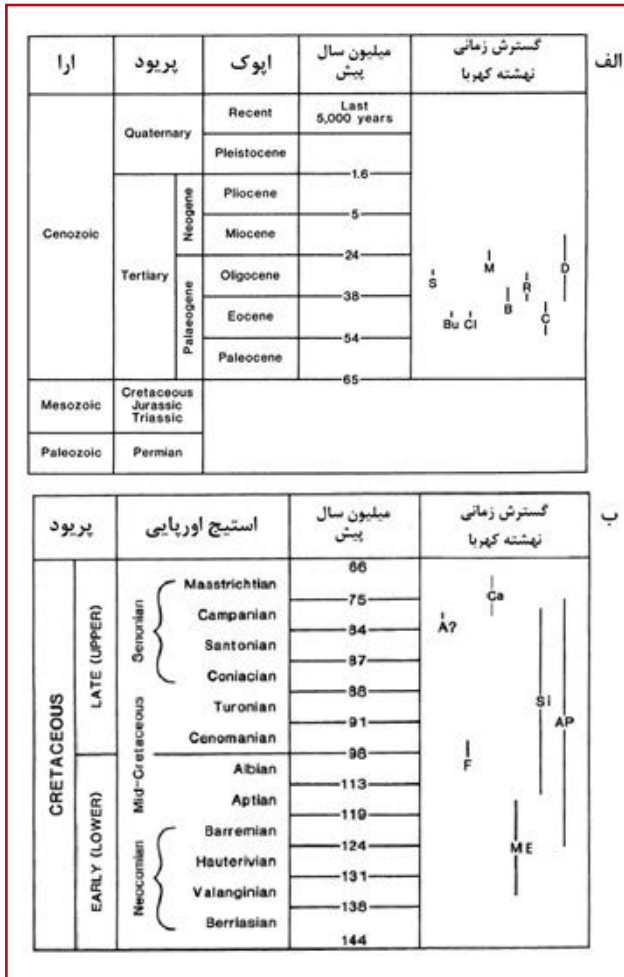
□ ماهیت و ویژگی‌های کهربا

هر چند کهربا در گروه گوهرسنگ‌ها طبقه‌بندی می‌شود اما کهربا یک سنگ یا یک کانی نیست؛ کانی یک ماده طبیعی، جامد و غیرآلی است، این در حالی است که کهربا منشاء آلی داشته و صمغ گیاهان (درختان) فسیل شده است. کهربا یک پلیمر آمورف، بدون ساختار بلوری یا کلیواژ بوده که به رنگ‌های زرد روشن تا قهوه‌ای، قرمز، به‌طور تقریبی بی‌رنگ، سفید شیری، آبی، سیاه متمایل به خاکستری تا سبز است. رنگ خاکه کهربا (اثر کشیدن کانی روی چینی بدون لعاب) سفید بوده و سختی آن در مقیاس موس ۲ تا ۲/۵ است. چگالی کهربا به ترکیبات شیمیایی و فرایند سخت‌شدگی و فسیل شدن آن بستگی دارد و به‌طور معمول از ۱/۰۵ تا ۱/۰۹ متغیر است و بیشینه آن به ۱/۳۰ گرم بر سانتیمتر مکعب می‌رسد. کهربا شکننده بوده و سطح شکستگی صدفی دارد. به لحاظ نوری، ضریب شکست آن ۱/۵۴ است و به دلیل آمورف بودن، فاقد شکست دوگانه یا مضاعف و چندرنگی است. کوپال^۴ که گاهی هم‌ارز با کهربا در نظر گرفته می‌شود، نوعی رزین خوشبو به رنگ زرد شفاف تا زرد کم رنگ است که از برخی درختان افراسانان (سپیندلز^۵) به ویژه از پروتیوم کوپال^۶ در آمریکای مرکزی به‌دست می‌آید و از آن برای تهیه چسب یا بخور خوشبو کننده استفاده می‌شود. کوپالی که تا حدودی سخت و کانیایی شده باشد، کوپالین^۷ نامیده می‌شود؛ به عبارتی کوپالین یک نیمه فسیل^۸ صمغ درختان است. جدول (۱) ویژگی‌های فیزیکی کهربا و کوپال را نشان می‌دهد.

جدول (۱): ویژگی‌های فیزیکی کهربا و کوپال [۵].

ویژگی‌ها	کهربا	کوپال
نقطه ذوب	۳۸۰-۲۰۰°C	کمتر از ۱۵۰°C
سختی	۲-۳	۱-۲
حلالیت در استون	نامحلول	محلول (سطح آن چسبناک می‌شود)
ضریب شکست نوری	۱/۵-۱/۶	۱/۵-۱/۶
چگالی ویژه	۱/۱-۱/۰۴	۱/۰۳-۱/۰۸
واکنش در نور UV	به‌طور معمول به رنگ آبی دیده می‌شود	حداکثر اندکی درخشنده دیده می‌شود
واکنش در سوختن	شعله پایدار با دود سیاه	شعله پخش شونده با دود سفید
بوی ناشی از گرمایش	بوی تند صمغ سوخته	بوی خوش، لیموی سوخته

کهربا را می‌توان از زمان کربنیفر و پس از آن و در همه دوره‌های زمین‌شناسی و در همه جای دنیا یافت. قدیمی‌ترین کهربای یافت شده مربوط به لایه‌های زغال‌سنگی کربنیفر ایلینویز آمریکا و به قدمت حدود ۳۲۰ میلیون سال پیش است [۶]. با این حال، بیشتر کهرباها در رسوبات کرتاسه و اتوسن تا میوسن یافت شده‌اند (شکل (۱)).



شکل (۱): (الف): پراکنش زمانی کهربا در طی پالئوژن و کرتاسه. (ب): موقعیت‌های مکانی شامل: آلاسکا (A)، کرانه‌های ساحلی آتلانتیک (AP)، بالتیک (B)، برمه (BU)، چین (C)، کانادا (Ca)، کالیفورنیا (Cl)، دومینیکن (D)، فرانسه (F)، خاورمیانه (ME)، مکزیک (M)، رومانی (R)، سیسیلی (S)، سیبری (Si) [۵].

تعیین سن کهربا به تنهایی مقدور نیست چرا که ممکن است کهربا نابرجا بوده و از محل ایجاد خود جابجا شده باشد. سن کهربا را می‌توان از روی موقعیت چینه‌شناسی کهربای برجا^۹، فسیل‌های شاخصی که ممکن است در کهربا فسیل شده باشند و یا از روی ارزیابی رادیو-ایزوتوپی برخی از کانی‌ها و یا میانبارهای محبوس شده در کهربا، تخمین زد [۷]. تاکنون در بیش از ۱۰۰ نقطه از جهان، کهربا یافت شده‌است [۸]. کهربا در مناطق خاصی مانند حوضه‌های بالتیک (دانمارک و آلمان) و مدیترانه (لبنان و جزیره سیسیل) بیشترین فراوانی را دارد و در سایر مناطق مانند چین، میانمار، سیبری، اردن، جمهوری

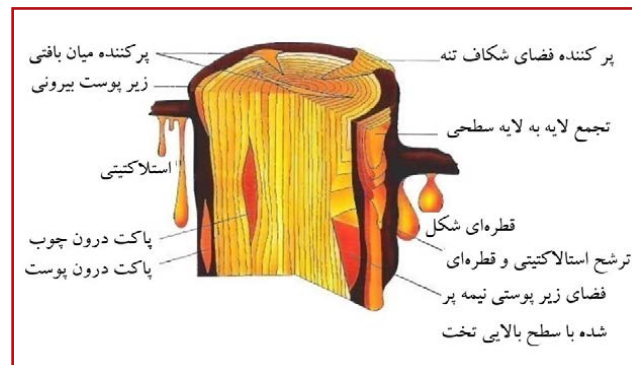
را به‌صورت فسیل، محافظت کند. در این میان، کهرباها از امتیاز منحصر به فردی در حفظ و نگهداری اندام‌های نرم جانداران برخوردار هستند و داده‌های بسیار ارزشمندی از حیات گذشته زمین را در اختیار دانشمندان، قرار می‌دهند. گروه‌های مختلفی از جانداران میکروسکوپی به‌عنوان مثال، آغازیان گرفته تا جانوران بزرگ مانند بندپایان، نرم‌تنان، کرم‌ها و یا حتی مهره‌داران، مانند دوزیستان، خزندگان، پرندگان و پستانداران و همچنین انواع گیاهان و اندام‌های مختلف آنها، در داخل کهربا فسیل شده‌اند [۵ و ۸ تا ۱۱]. با توجه به تنوع فسیلی و حفظ‌شدگی بسیار خوب جانداران در داخل کهرباها، اطلاعات ذی‌قیمتی از موضوعات مختلف دیرینه‌شناسی مانند دیرین اقلیم‌شناسی [۱۲]، دیرین بوم‌شناسی [۱۳]، انقراض‌ها [۱۴]، تکامل و فرگشت گونه‌ها [۱۵ و ۱۶]، فرآیند فسیل شدن [۱۷]، رفتارهای فسیل شده مانند انگل، جفتگیری [۱۸ و ۱۹] و محیط رسوبی [۲۰] از آنها به‌دست آمده است.

□ ترکیب شیمیایی کهربا

رزین (شامل صمغ، انگوم و سقز^{۱۱}، چربی^{۱۲}، شیره^{۱۳}، لاتکس^{۱۴}، لیزآب^{۱۵}، روغن) یکی از چندین موادی است که توسط گیاهان ترشح می‌شود و یک پلیمری است که با گذشت زمان و در صورت تدفین در رسوبات به کوبالین و در نهایت به کهربا تبدیل (پلیمریزه) می‌شود. فرآیند تبدیل شدن صمغ به کوبال و کهربا فرآیندی تدریجی و پیوسته است. صمغ درختان ترکیب شیمیایی خاصی داشته و درختان را از هجوم سایر جانداران مهاجم محافظت می‌نماید و مانع از نفوذ باکتری‌ها و قارچ‌ها به بافت‌های گیاهی می‌شود [۲۱]. ترکیب صمغ درختان با یکدیگر و حتی در یک درخت، در طی فصول متفاوت است و همین امر در رنگ و کیفیت و حتی شرایط فسیل شدن جانداران در کهربا تاثیرگذار است [۲۲ و ۲۳]. صمغ درختان از سایر ترشحات گیاهی متفاوت بوده و دارای ترکیبات پیچیده‌ای است که به‌طور عمده از ترپنوئیدها، ترکیبات فنلی و به همراه برخی از ترکیبات ثانویه همراه است. ترکیب شیمیایی هر نوع صمغی با عوامل مختلفی مانند نوع درخت، فصل، شرایط آب و هوایی، فرآیند متابولیسمی درختان و اندام تولیدکننده صمغ کنترل می‌شود و بسته به منشأ صمغ، متفاوت است. کهربای حوضه بالتیک، با ترکیب شیمیایی اسید بوتاندیوئیک^{۱۶} (C_۴H_۶O_۴) است که بیشتر به‌عنوان اسید سوکسینیک^{۱۷} شناخته می‌شود. اگرچه به‌طور تقریبی ۸۰ درصد نمونه‌های کهرباهای جهان از حوضه بالتیک است اما انواع دیگری از کهرباها وجود دارند که حاوی اسید سوکسینیک نیستند. تجزیه و تحلیل صدها نمونه از صمغ و کهرباها نشان می‌دهد که می‌توان کهرباها را از نظر ترکیب شیمیایی به چند دسته تقسیم کرد و به‌طور کلی، دو نوع طبقه‌بندی شیمیایی برای کهربا پیشنهاد شده‌است (شکل (۳)) [۲۲]:

دومینیکن، نیوجرسی، آلاسکا و کانادا نیز وجود آن گزارش شده‌است [۵]. در یافته‌های باستان‌شناسی ایران، به کهربا برخورد شده‌است ولی گزارشی از وجود لایه‌های کهربادار در ایران در دسترس نیست. بیش از ۸۰ درصد کهرباهای یافت شده از حوضه بالتیک بوده و بیشتر گزارش‌ها مربوط به زمین‌های کرتاسه هستند [۷].

اندازه و شکل کهربا بسیار متغیر است. کهربای موزه قیدایسکا^۱ در کشور لهستان به وزن ۶۸/۲۰ کیلوگرم وزین‌ترین کهربای جهان است. از آنجایی که کهربا صمغ ترشح شده، چکیده شده و یا جاری شده از تنه درختان است بنابراین، شکل آن ثابت نیست. با این وجود، شکل کهربا به جای خود، نشان‌دهنده فرآیند تشکیل آن است. از روی شکل کهرباها می‌توان به درونی بودن، یعنی آنهایی که در درون و در فضای خالی تنه درخت ایجاد شده‌اند و یا بیرونی بودن که از تنه درختان جدا شده و در نزدیکی درخت جمع می‌شوند، پی برد. کهربای درونی به‌طور معمول فاقد میانبار و اپک بوده و به‌طور نسبی، در اندازه‌های بزرگتری است. کهربای بیرونی به‌طور معمول به‌صورت لایه‌ای است که ناشی از جریان و ترشح چند باره صمغ بوده و بیشتر اذخالی‌ها یا بقایای زیستی دارد [۸]. شکل (۲) موقعیت‌های کهرباها را نسبت به تنه درخت نشان می‌دهد. بیشتر کهرباهایی که در درون تنه و زیر پوست درخت ایجاد می‌شوند، ورقه‌ای شکل هستند و کهرباهایی که در خارج از تنه درخت شکل می‌گیرند، حالت چکیده و قطره‌ای دارند [۸].



شکل (۲): موقعیت جایگیری صمغ در تنه درختان و شکل‌گیری کهربا [۸].

□ اهمیت دیرینه‌شناختی کهربا

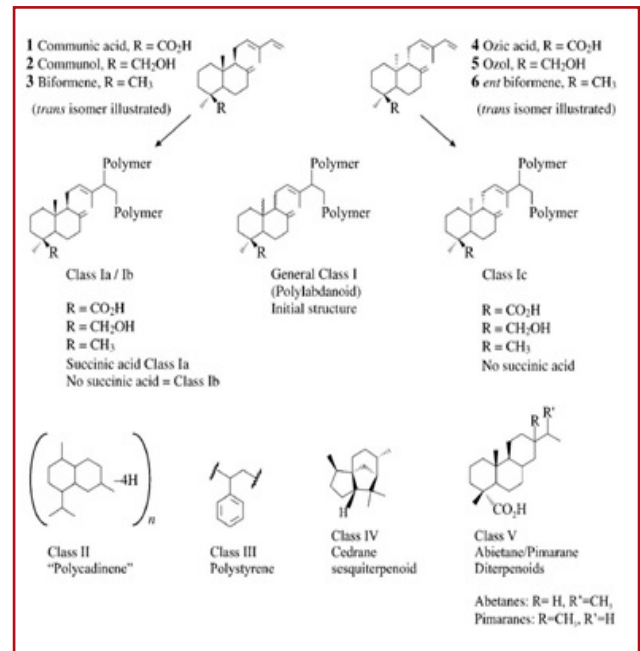
به‌طور معمول، سنگواره‌ها شامل بقایای اندام‌های سخت جانداران به‌عنوان مثال، استخوان، صدف، دندان و یا چوب هستند که شانس بیشتری برای فسیل شدن دارند. اندام‌های نرم به دلیل فسادپذیری، پس از مرگ جانور به سرعت از بین می‌روند و به ندرت در لایه‌های رسوبی یافت می‌شوند. با این وجود، برخی از مواد مانند یخزارها، رسوبات نمک، قیر و یا مومیایی شدن طبیعی، می‌تواند اندام‌های نرم جانداران

این مواد نسبت به کهربای کلاس I-III نرم تر و شکننده تر بوده و کمتر قادر به حفظ شدن و به شکل قابل تشخیص، در طی فرایندهای زمین‌شناسی هستند.

روش‌های آزمایشگاهی تشخیص کهربا و اودخال‌های آن

کهرباها به ندرت به صورت خالص یافت می‌شوند. تنوع رنگی و تغییر در میزان فسیل‌شدگی کهربا (میزان پلیمریزاسیون) موجب می‌شود تا برخی از مواد دست‌ساز یا فرآوری شده مصنوعی با آن اشتباه شوند. یکی از این مواد، نوعی رزین مصنوعی به نام باکلیت^{۲۳} است که ظاهری شبیه به کهربا دارد. این رزین در واقع اولین رزین مصنوعی جهان با ترکیب فنول فورمال‌دهاید با فرمول $(C_6H_6O \cdot CH_2O)_n$ است. از آنجایی که کهرباها قیمتی هستند، در شناسایی آنها تلاش می‌شود از روش‌هایی استفاده شود که به نمونه آسیب نرسد و به اصطلاح، روش‌های غیر تهاجمی به کار گرفته شود. با این وجود، در صورت نیاز به استفاده از روش‌های تهاجمی، سعی می‌شود بخش غیر ملموس کهربا مورد سنجش قرار گیرد. روش‌های مرسوم و سنتی برای شناسایی کهرباها عبارتند از [۲۵]:

- بررسی در پرتو فرابنفش (غیر تهاجمی): قطعه کهربا در زیر پرتو UV قرار می‌گیرد. کهربای بالتیک (با ترکیب ساکسینیک) در این پرتو خاصیت فلورسانس نشان می‌دهد.
- آزمایش سوزن داغ: این روش تهاجمی است و به نمونه آسیب می‌رساند. یک سوزن داغ را در بخش نامحسوس نمونه فرو می‌کنند. اگر سوزن به راحتی وارد نمونه شود و بوی تند بدهد، نمونه یک ماده مصنوعی مانند باکلیت است. اگر سوزن به راحتی وارد شود اما بوی شیرین دهد، نمونه کوپال است. اگر نمونه مقاوم باشد (سوزن به سختی به نمونه فشار داده شود) و بوی مطبوع دهد، این نشان دهنده کهربا است.
- آزمایش الکتریسیته ساکن (غیر تهاجمی): نمونه روی یک پارچه پشمی مالش داده شده و در نزدیکی خرده‌های کوچک



شکل (۳): سیستم طبقه‌بندی کهربا، شامل ساختارهای کهرباهای کلاس I [۲۴].

■ گروهی که براساس طیف‌سنجی رزونانس مغناطیسی هسته‌ای حالت جامد ^{13}C و محلول 1H بوده و کهرباها و یا صمغ‌های عهد حاضر را شامل می‌شود که از پنج گروه شیمیایی اصلی (E و A, B, C, D) تشکیل شده‌است (جدول (۲)).

■ گروهی دیگر از کهرباها که بر پایه اسپکترومتری ساختار شیمیایی مشخص می‌شوند. با استفاده از روش پیرولیز-کروماتوگرافی گازی-طیف‌سنجی جرمی، ساختار کهربا را به هفت دسته Ia, Ib, Ic, II, III, IV and V تقسیم می‌شود که بیشتر با گروه‌های شیمیایی NMR همپوشانی دارد (جدول (۲) و شکل (۳)) [۲۴]. کهرباهای کلاس IV و V از ترپنوئیدهایی تشکیل شده‌اند که فاقد ویژگی‌های ساختاری لازم برای پلیمریزاسیون خود به خودی هستند؛ در نتیجه،

جدول (۲): گروه‌های شیمیایی کهربا براساس داده‌های NMR و PY-GC-MS [۲۲ و ۲۴].

گروه شیمیایی NMR	گروه شیمیایی PY-GC-MS	ساختار	گسترش	محدوده سنی	درخت تولید کننده
A	Ib, IV, V	Ib: non-Succinite acid Polyabdanoid IV: Sesquiterpenoid V: Abietane, pimarane/isopimarane diterpenoids	جهانی	تریاس تا عهد حاضر	درخت آروکیرسیا ^{۱۸}
B	II	Polycadinene	جهانی	کربنفر تا عهد حاضر	درخت دیپتروکیرپسیا ^{۱۹}
C	Ia	Succinite acid Polyabdanoid	حوضه بالتیک	ائوسن	احتمالاً مربوط به درخت مخروطیان کنیفرس ^{۲۰}
D	Ic	non-Succinite acid Polyabdanoid	دومینیکن (مشابه مکزیک و آمریکای جنوبی)	میوسن	مشابه رزین گیاه هایمنیا ^{۲۱}
E	III	polystyrene	نیوجرسی	کرتاسه	مشابه رزین درخت لیکویدمبر ^{۲۲}

این روش‌ها این است که دقیق‌تر هستند و اطلاعات بیشتری را از نمونه ارائه می‌دهند و البته برخی کمتر تهاجمی هستند. عیب عمده این است که به‌طور معمول به تجهیزات بسیار گران قیمت تری نیاز است. از طرف دیگر، شامل تجزیه و تحلیل داده‌های پیچیده‌ای است که برای بسیاری از محققان غیرقابل دسترس هستند. برخی از محققان از روش‌های تلفیقی آنالیز کروماتوگرافی گازی-طیف‌سنجی جرمی^{۲۵} و طیف‌سنجی رامان استفاده می‌کنند [۲۶]؛ چراکه تنها استفاده از روش طیف‌سنجی جرمی، به دلیل تخریب ساختار مولکولی ممکن است نتایج رضایت‌بخشی را نداشته باشد.

از طریق تجزیه و تحلیل طیف‌سنجی جرمی، مواد جدا شده با کروماتوگرافی گازی، دارای ترکیبات خاصی در کهربا است که قابل شناسایی بوده و اساس طبقه‌بندی قابل اعتماد انواع مختلف کهربا است [۲۷]. طیف‌سنجی NMR در واقع یک طبقه‌بندی مکملی را ارائه می‌دهد و برای توصیف رزین‌های عهد حاضر و سایر ترشحات گیاهی با ترکیبات مولکولی بسیار متفاوت نیز، قابل استفاده است.

روش توموگرافی کامپیوتری پرتو ایکس^{۲۶} که روش تصویربرداری پیشرفته پرتو X است، در شناسایی ساختار سه بُعدی جانداران فسیل شده در داخل کهربا بسیار مفید و کارایی دارد. در پرتو X معمولی، اشعه به‌صورت سطحی روی جسم سه بُعدی تابیده می‌شود و یک تصویر دو بُعدی از جسم به‌دست می‌آید. در حالی که در روش توموگرافی کامپیوتری، پرتو X، تصویربرداری دیجیتالی از یک برش نازک، موازی با پرتو اشعه ایکس انجام می‌دهد. ضخامت برش معمولی از ۰/۰۲۵ تا ۰/۰۳ میلی‌متر، با اندازه پیکسل (عناصر تصویر) در محدوده ۰/۰۲۵ تا ۱ میلی‌متر است [۲۸ و ۲۹].

ادخال‌های غیر زیستی شامل میانبارهای گازی، مایع و جامد داخل کهرباها است که اطلاعات ارزشمندی از شرایط محیط تشکیل و شرایط آب و هوایی گذشته را در اختیار قرار می‌دهند. برای مطالعه این نوع ادخال‌ها، استفاده از استیج سرمایه‌ی و گرمایش به‌منظور ثبت بازه دمایی و یک میکروسکوپ پلاریزان به‌منظور پتروگرافی (سنگ‌نگاری) میانبارها لازم است.

کاغذ نگه داشته می‌شود. کهربا و باکلیت با الکتروسیسته ساکن باردار می‌شود و کاغذ را به سمت خود جذب می‌کند. کوپال و بیشتر کهرباهای بدلی چنین خاصیتی را ندارند.

■ آزمایش با برش چاقو (تهاجمی): یک گوشه نامحسوس از قطعه کهربا را با ابزاری تیز مانند چاقوی جراحی برش داده می‌شود. کهربا و کوپال در حین برش خرد می‌شوند، باکلیت خرده‌های بزرگتری تولید می‌کند و راحت‌تر بریده می‌شود. ■ آزمایش نقطه ذوب (تهاجمی): نقطه ذوب مورد انتظار کهربا ۲۸۷-۳۰۰ درجه سانتیگراد است و نقطه ذوب کوپال کمی پایین‌تر است، در حالی که باکلیت بدون عبور از فاز مایع، تجزیه می‌شود.

■ آزمایش حلالیت (تهاجمی): حلال مورد نظر مانند استون، دی استون الکل، سقز و تری کلرواتیلن انتخاب می‌شود. از آنجایی که کوپال فسیل نشده است (یعنی به‌طور کامل پلیمریزه شده و دارای پیوندهای اولیه است) در استون محلول است، در حالی که کهربا یا مواد پلاستیکی مشابه، اینگونه نیستند. همچنین مرطوب کردن سطوح کهربایی شکسته شده با هیدروکسید پتاسیم و فشردن آنها یک روش بازسازی و تعمیر کهربا است و به‌عنوان وسیله‌ای برای تشخیص اصل بودن کهربا شناخته می‌شود.

■ آزمایش چگالی (غیر تهاجمی): با استفاده از ترازیوی چگالی سنج، جرم نمونه در هوا و در آب اندازه‌گیری می‌شود و چگالی ویژه آن، از طریق تقسیم نمودن جرم در هوا بر تفاضل جرم در هوا و آب به‌دست می‌آید. البته باید توجه داشت که این روش تنها زمانی مفید است که در نمونه ادخال‌های زیستی - غیرزیستی زیادی وجود نداشته باشد. مقدار ثبت شده برای چگالی کهربا ۱/۰۹۶ تا ۱/۰۵۸ گرم بر میلی‌لیتر است.

همچنین روش‌های پیشرفته و نوینی برای شناسایی کهربا مورد استفاده قرار می‌گیرند که نیازمند تجهیزات پیشرفته است. بیشتر این روش‌ها براساس استفاده از طیف‌سنجی تبدیل فوریه فرورسرخ^{۲۴} هستند. بیشتر محققین، از FTIR در گام نخست و به‌عنوان یک روش آنالیز عمومی استفاده می‌کنند [۲۶]. مزایای

نتیجه‌گیری

کهربا یکی از گوهرسنگ‌های با ارزش از نظر گوهرشناسی و دیرینه‌شناسی است. به دلیل شرایط ایجاد، این گوهرسنگ می‌تواند اطلاعات خوبی از نظر شرایط فسیل شدن صمغ درختان و همچنین جاندارانی که در درون آن گیر کرده‌اند را در اختیار پژوهشگران قرار دهد. سن و قدمت کهربا بستگی به دیرینگی ظهور و گسترش گیاهان دارد، ولی بیشتر از زمین‌های کرتاسه، آئوسن و میوسن یافت شده‌اند. ترکیب شیمیایی کهرباها در درجه نخست، به ترکیب شیمیایی صمغ گیاهانی که به کهربا تبدیل شده‌اند بستگی دارد. با این وجود، فرایند سنگزایی و فسیل شدن، در تغییر ترکیب شیمیایی کهرباها موثر است. کهرباها براساس نتایج طیف‌سنجی رزونانس مغناطیسی هسته‌ای به پنج دسته و براساس روش پیرولیز - کروماتوگرافی گازی - طیف‌سنجی جرمی به هفت دسته تقسیم می‌شوند. بیشتر کهرباها از حوضه بالتیک یافت شده‌اند و ترکیب شیمیایی آنها از نوع اسید بوتاندیوئیک ($C_4H_6O_4$) است که بیشتر به‌عنوان اسید سوکسینیک شناخته می‌شود. برای شناسایی کهربای اصل می‌توان از دو روش سنتی یا نوین استفاد کرد.

پی‌نوشت

- | | |
|---|--|
| 1. Nuclear magnetic resonance (NMR) | 14. latex |
| 2. Pyrolysis Gas Chromatography/Mass Spectrometry (Pyrolysis-GC-MS) | 15. mucilage |
| 3. inclusions | 16. butanedioic |
| 4. Copal | 17. succinic acid |
| 5. Sapindales | 18. Araucariaceae |
| 6. Protium copal | 19. Dipterocarpaceae |
| 7. Copaline | 20. coniferous |
| 8. subfossil | 21. Hymenaea |
| 9. in situ | 22. Liquidambar |
| 10. Muzeum Gdańska | 23. Bakelite |
| 11. gum | 24. Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) |
| 12. wax | 25. Gas chromatography–mass spectrometry (GC–MS) |
| 13. sup | 26. X-ray computed tomography |

مراجع

- [1] Bagherpour Kashani, N., Rouštaei, K., and Stöllner, Th., Iron Age amber beads from Vešnave/Iran. In Bagherpour Kashani, N. and Stöllner, T., (eds.) *Water and caves in Ancient Iranian religion: Aspects of archaeology, cultural history and religion*. In Workshop in the «Kunstsammlungen» at the University of Bochum, p. 71-77.
- [2] Moorey, P.R.S., *Ancient Mesopotamian materials and industries: the archaeological evidence*. Eisenbrauns, 1999.
- [3] Beck C. W., and Muroga, T. The origin of the amber found at Tepe Marlik. *Japanese Studies in the History of Science*, 1972, 11, 99–102.
- [4] Vahedi Mazdabadi, Y, Bozorgi, M., Farjadmand, F., Binesh Marvesti, M., Akbarzadeh, T., Khanavi, M, and Saidi, M. (2017). Investigation of cardiac drugs based on mineral stones in traditional Iranian medicine. *Journal of traditional medicine of Islam and Iran*, year 9, number 4, p. 320-309.
- [5] Poinar, G.O., *Life in amber*. 1992, Stanford University Press.
- [6] Bray, P.S. and Anderson, K.B., Identification of Carboniferous (320 million years old) class Ice amber. *Science*, 2009, 326(5949), pp.132-134.
- [7] Chang, S.-C.; Li, Y.; Zheng, D. Dating Amber: Review and Perspective. *Minerals* 2023, 13, 948. <https://doi.org/10.3390/min13070948>.
- [8] Weitschat, W. and Wichard, W., 2002. *Atlas of plants and animals in Baltic amber* (p. 256). München: Pfeil.
- [9] Penney, D. (Ed.). *Biodiversity of Fossils in Amber from the Major World Deposits* (Manchester: Siri Scientific Press,), 2010, 304 pp., ISBN 978 0 955 86364 6.
- [10] Penney, D. and Green, D.I., *Fossils in Amber: Remarkable snapshots of prehistoric forest life*. Siri Scientific Press. 2011.
- [11] Grimaldi, D.A., *Amber: window to the past*. Harry N. Abrams, Inc., Publishers, in association with the American Museum of Natural History, 1996, 216 p.
- [12] Poinar, G., Archibald, B. and Brown, A., New amber deposit provides evidence of early Paleogene extinctions,

- paleoclimates, and past distributions. *The Canadian Entomologist*, 1999, 131(2), pp.171-177.
- [13] Penney, D., Paleocology of Dominican amber preservation: spider (Araneae) inclusions demonstrate a bias for active, trunk-dwelling faunas. *Paleobiology*, 2002, 28(3), pp.389-398.
- [14] Hall, J.P., Robbins, R.K. and Harvey, D.J., Extinction and biogeography in the Caribbean: new evidence from a fossil riodinid butterfly in Dominican amber. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 2004, 271(1541), pp.797-801.
- [15] Langenheim, J.H., Amber: A Botanical Inquiry: Amber provides an evolutionary framework for interdisciplinary studies of resin-secreting plants. *Science*, 1969, 163(3872), pp.1157-1169.
- [16] Perrichot, V., Marion, L., Néraudeau, D., Vullo, R. and Tafforeau, P., The early evolution of feathers: fossil evidence from Cretaceous amber of France. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2008, 275(1639), pp.1197-1202.
- [17] Grimaldi, D.A., Lillegraven, J.A., Wampler, T.W., Bookwalter, D. and Shedrinsky, A., Amber from Upper Cretaceous through Paleocene strata of the Hanna Basin, Wyoming, with evidence for source and taphonomy of fossil resins. *Rocky Mountain Geology*, 2000, 35(2), pp.163-204.
- [18] silization, *Paleontological Society Papers* 2014, 20, 163–216.
- [19] Mizumoto, N., Hellemans, S., Engel, M.S., Bourguignon, T. and Buček, A., Extinct and extant termites reveal the fidelity of behavior fossilization in amber. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2024, 121(12), p.e2308922121.
- [20] de Lourdes Serrano-Sánchez, M., Hegna, T.A., Schaaf, P., Pérez, L., Centeno-García, E. and Vega, F.J., The aquatic and semiaquatic biota in Miocene amber from the Campo La Granja mine (Chiapas, Mexico): Paleoenvironmental implications. *Journal of South American Earth Sciences*, 2015, 62, pp.243-256.
- [21] Poinar, G. O. & Hess, R. Preservative qualities of recent and fossil resins: electron micrograph studies on tissue preserved in Baltic amber. *Journal of Baltic Studies*, 1985, 16, 222–30.
- [22] McCoy, V.E., Soriano, C. and Gabbott, S.E., A review of preservational variation of fossil inclusions in amber of different chemical groups. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 2017, 107(2-3), pp.203-211.
- [23] Henwood, A., Exceptional preservation of dipteran flight muscle and the taphonomy of insects in amber. *Palaios*, 1992, 203-212.
- [24] Lambert, J. B., Santiago-Blay, J. A. & Anderson, K. B., Chemical signatures of fossilized resins and recent plant exudates. *Angewandte Chemie International Edition*, 2008, 47, 9608–16.
- [25] Caldararo, N., The analysis, identification and treatment of an amber artifact. *Archeomatica*, 2013, 4(2), 46-49.
- [26] Vavra, N., Chemical characterization of fossil resins (“amber”)—A critical review of methods, problems and possibilities: determination of mineral species, botanical sources and geographical attribution. *125 Jahre Knappenwand -125 years Knappenwand Proceedings of a Symposium, Wien, Juni 1993, Abh.Geol. B.-A., Band 49, S. 147-157.*
- [27] Beck, C.W., Spectroscopic investigations of amber. *Applied Spectroscopy Reviews*, 1986, 22(1), pp.57-110.
- [28] Burstein, P., Bjorkholm, P.J., Chase, R.C. and Seguin, F.H., The largest and smallest X-ray computed tomography systems. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 1984, 221(1), pp.207-212.
- [29] Murasato, Y., Horiuchi, M. and Otsuji, Y., Three-dimensional modeling of double-stent techniques at the left main coronary artery bifurcation using micro-focus X-ray computed tomography. *Catheterization and Cardiovascular Interventions*, 2007, 70(2), pp.211-220.

نویسندگان

امین صفایی^{۱*}، مرجان جعفری^۱

۱. کارشناسان آزمایشگاه مرکزی دانشگاه شیراز

*Amin.safaie2016@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۲۱

واژه‌های کلیدی

میکروسکوپ کانفوکال رامان، تصاویر فراطیفی (HS)،
هوش مصنوعی و یادگیری ماشین، پراکندگی غیرخطی
رامان، الگوریتم‌های نظارت‌نشده، PCA.

تصویربرداری فراطیفی رامان و پیاده‌سازی الگوریتم‌های یادگیری ماشین، راهکاری نوین در استخراج نقشه توزیع مولکولی مواد

چکیده

طیف‌سنجی پراکندگی غیرخطی رامان، از جمله روش‌های طیف‌نگاری اپتیکی است که به دلیل آشکارسازی مدهای ارتعاشی مولکول هدف که بیانگر اثر انگشت مولکول بوده، امکان طیف‌سنجی و آشکارسازی گونه‌های شیمیایی موجود در مواد در مقیاس مولکولی را فراهم می‌آورد. همچنین یک سامانه اپتیکی ترکیبی متشکل از یک سیستم طیف‌سنجی رامان به همراه میکروسکوپ کانفوکال نوری، این امکان را فراهم می‌آورد که بتوان سطح نمونه مورد بررسی را به صورت نقطه به نقطه، با گام‌های فضایی قابل کنترل، جاروب نموده و با اندازه‌گیری طیف پراکندگی رامان غیرخطی هر نقطه، اطلاعات مولکولی موجود در سطح نمونه را ثبت کرد. از تجمیع داده‌های خام طیفی تهیه شده و مختصات فضایی هر طیف، تصاویری موسوم به تصاویر فراطیفی^۱ دو بُعدی تهیه شده که در آن هر پیکسل حاوی یک بازه طیفی از پراکندگی غیرخطی رامان است. سپس در مرحله تجزیه و تحلیل داده‌های HS حاصل شده، با استفاده از روش‌های آماری پیشرفته در حوزه هوش مصنوعی و یادگیری ماشین، اطلاعات مربوط به چگونگی توزیع مولکولی و فازهای شیمیایی نمونه مزبور با حساسیت و دقت بالا استخراج می‌شود. این روش ترکیبی به همراه روش‌های عددی مذکور، به خوبی می‌تواند مجموعه داده‌های پیچیده و بزرگ تصویر HS را تحلیل و اطلاعات مربوط به نقشه توزیع مولکولی نمونه‌های طیف‌نگاری شده را فراهم کند. لذا در این مقاله، از یک چیدمان اپتیکی ترکیبی، متشکل از یک میکروسکوپ کانفوکال نوری و یک سامانه طیف‌سنجی رامان استفاده شده است و با استفاده از این چیدمان و بهره‌گیری از لیزر مرئی با طول موج ۵۳۲ نانومتر، سطح یک نمونه دو پلیمری با توزیع ناهمگن به تعداد ۳۹۰۰ نقطه جاروب شد و طیف پراکندگی غیرخطی رامان نمونه در نقاط مختلف آن به ثبت رسید و تصاویر فراطیفی خام از این نمونه هدف تهیه شده است. در نهایت، نقشه مولکولی از چگونگی توزیع فضایی پلیمرها در این قرص با استفاده از روش‌های آماری هوش مصنوعی و یادگیری ماشین استخراج شده است.

علم آشکارسازی مواد در مقیاس مولکولی^۲، شامل روش‌های نوین و فناوری‌های نوظهوری است که به مطالعه رفتار یک مولکول منفرد در میان سیستم پیچیده‌ای^۳ از مولکول‌ها می‌پردازد؛ به طوری که بررسی در لحظه ساختار، دینامیک و عملکرد مولکولی و همچنین درک ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی در مقیاس مولکولی بدون نیاز به میانگین‌گیری و روش‌های آنسامبلی^۴ را میسر می‌سازد [۱ تا ۳]. طیف‌سنجی و تصویربرداری فلئوئورسانس^۵ یکی از مرسوم‌ترین روش‌های اپتیکی است که در یک دهه اخیر، آشکارسازی مواد در مقیاس مولکولی را امکان‌پذیر ساخته است. در این روش، مولکول‌های هدف مورد بررسی با رنگدانه‌های آلی، رنگ‌آمیزی و برچسب‌گذاری می‌شود و پس از برانگیختگی، این رنگدانه‌ها با طول موج مشخص، تابش فلئوئورسانس حاصل به‌منظور آشکارسازی و مطالعه فرایندهای دینامیکی مولکول‌های هدف بررسی می‌شوند [۴ و ۵]. با این حال، این روش نیز در آشکارسازی مواد در مقیاس مولکولی با محدودیت‌هایی روبه‌رو است. از جمله مهم‌ترین این چالش‌ها و محدودیت‌ها این است که امکان اتصال برچسب به همه انواع مولکول‌ها امکان‌پذیر نیست و همچنین خود برچسب‌گذاری و نشان‌دار کردن مولکول‌ها [۶] به‌منظور تشخیص و آشکارسازی، می‌تواند روی جنبش و حرکت^۶ مولکول‌ها تاثیرگذار باشد [۷] که این امر منجر به ایجاد اثرات ناخواسته و نامطلوب در مطالعه دینامیکی مولکول‌های هدف می‌شود.

طیف‌سنجی رامان ابزاری قدرتمند و مفید به‌منظور مشخصه‌یابی و آنالیز ساختار شیمیایی مواد در مقیاس مولکولی است. از جمله مزیت‌های این روش طیف‌سنجی، می‌توان به دو ویژگی مهم غیرمخرب بودن و عدم نیاز به آماده‌سازی نمونه اشاره نمود. از طرفی دیگر، ماهیت اپتیکی این روش، اندازه‌گیری‌ها را به‌صورت غیرتماسی امکان‌پذیر ساخته است. به‌علاوه، حجم مورد نیاز نمونه برای آنالیز طیفی در این روش، بسیار اندک (از مقیاس μm^3 است [۸]. همچنین، چیدمان اپتیکی طیف‌سنجی رامان، این امکان را فراهم می‌آورد که اندازه‌گیری‌ها در محل و به‌صورت برخط صورت پذیرد، از این‌رو می‌توان فعالیت شیمیایی مد نظر را در مقیاس ثانیه پایش نمود. از دیگر ویژگی‌های این روش طیف‌سنجی این است که بسته به کاربرد مورد انتظار، می‌توان میزان تفکیک فضایی از حدود $1 \mu\text{m}$ تا 1 cm به‌منظور آنالیز سطحی و یا حجمی نمونه، تنظیم نمود [۹]. در این روش، امکان اندازه‌گیری برای تمامی فازهای شیمیایی ماده اعم از جامد، مایع و گاز وجود دارد. در نهایت، باید اشاره نمود که در طیف‌سنجی رامان برخلاف طیف‌نگاری مادون قرمز^۷، رطوبت و آب عاملی مزاحم محسوب نشده و این بدین علت است که مدهای ارتعاشی آب مشخص و منحصر به فرد بوده و از این رو، در ترکیب با سایر مواد، قابل تفکیک هستند.

امروزه تصویربرداری از اجسام و پدیده‌ها دارای مفاهیم بسیار پیچیده‌تر و گسترده‌تری نسبت به چند دهه اخیر است. در واقع علم MD، تحول و پیشرفت عظیمی در روش‌های تصویربرداری اپتیکی بر مبنای تصویربرداری فراطیفی^۸ را در مقیاس مولکولی موجب شده است [۱۰ و ۱۱]؛ تا آن جا که روش‌های مبتنی بر این رهیافت، امکان ثبت تصاویر با دقت، حساسیت و قدرت تفکیک فضایی^۹ بالا به‌منظور تهیه نقشه مولکولی^{۱۰} و تعیین توزیع فضایی گونه‌های مختلف مولکولی در یک نمونه آزمایشگاهی هدف را فراهم آورده است [۱۱]. از مهم‌ترین دسته تصاویر HS که حاوی اطلاعاتی مربوط به اثرانگشت و ساختار مولکولی و توزیع شیمیایی مولکولی موجود در نمونه مورد بررسی است، تصاویر HS غیرخطی بر مبنای پراکندگی رامان است [۱۱ و ۱۲]. توسعه چیدمان‌های اپتیکی طیف‌سنجی رامان نظیر یک سامانه ترکیبی متشکل از یک سیستم طیف‌سنجی رامان به همراه میکروسکوپ کانفوکال نوری، این امکان را فراهم آورده است که بتوان سطح نمونه مورد بررسی را به‌صورت نقطه به نقطه با گام‌های فضایی قابل کنترل در سه راستای فضایی X-Y-Z جاروب کرده و طیف پراکندگی غیرخطی رامان هر نقطه را ثبت نمود [۱۱]؛ در نهایت، با استفاده از اطلاعات تجمیع شده، تصاویر HS غیرخطی دو بُعدی و سه بُعدی حاصل می‌شود که حاوی اطلاعاتی در مورد چگونگی توزیع گونه‌های مختلف مولکولی موجود در نمونه، با تفکیک فضایی بالا است. اما این رهیافت اپتیکی با چالش‌هایی روبه‌رو است که از جمله آن می‌توان به عدم توانایی تحلیل حجم عظیم اطلاعات مولکولی موجود در طیف‌های غنی پراکندگی رامان و داده‌های تصاویر HS رامان اشاره نمود.

استفاده از روش‌های آماری پیشرفته در حوزه هوش مصنوعی^{۱۱} و تحلیل یادگیری ماشین^{۱۲}، امکان پردازش و تجزیه و تحلیل مجموعه داده‌های پیچیده و بزرگ طیفی و به دنبال آن، استخراج اطلاعات، ویژگی‌ها و الگوهای پیچیده موجود در طیف پراکندگی غیرخطی رامان را به‌صورت خودکار فراهم می‌کنند [۱۳ تا ۱۸]. به عبارت دقیق‌تر، نتایج حاصل از تصویربرداری فراطیفی مبتنی بر طیف‌سنجی رامان، همواره به‌صورت مجموعه داده‌های

بزرگ و خام بوده [۱۹ و ۲۰] که شامل تعداد زیادی از طیف‌های ارتعاشی مربوط به ساختار و ترکیبات پیچیده شیمیایی است [۱۵ و ۲۱]؛ از این رو، به‌منظور پی بردن به پیچیدگی اطلاعات موجود در داده‌های خام طیفی و همچنین تشخیص افت‌وخیزهای بسیار جزئی و درک تفاوت‌های ظریف در نوارهای ارتعاشی مربوط به مولکول‌های متفاوت، استفاده از این‌گونه روش‌های هوشمند امری ضروری است تا بتوان اطلاعاتی را در مورد چگونگی توزیع گونه‌های مختلف مولکولی موجود در نمونه، با تفکیک فضایی بالا استخراج نمود [۲۲ تا ۲۵].

با توجه به اهمیت و جایگاه آشکارسازی ساختار شیمیایی مواد در مقیاس مولکولی و همچنین در راستای ارائه راهکار اپتیکی نوین به‌منظور تهیه نقشه مولکولی از گونه‌های شیمیایی موجود در نمونه مورد بررسی، در این تحقیق، پس از مروری کوتاه بر اصول طیف‌نگاری رامان و تصویربرداری فرایطی براساس طیف‌نگاری رامان، به ثبت تصویر فرایطی توسط فوتون‌های پراکنده شده غیرخطی رامان از یک نمونه قرص پلیمری با ترکیب ناهمگن از ساختار مولکولی در دو بُعد اقدام شده است و پس از آن الگوریتم‌های آماری نظارت نشده و بر مبنای یادگیری ماشین روی داده‌های خام فرایطی اعمال شده و در نهایت، نقشه مولکولی از چگونگی توزیع فضایی پلیمرها در این قرص استخراج می‌شود. در طی این تحقیق نشان داده می‌شود که با بکارگیری الگوریتم‌ها و تحلیل‌های آماری چندمتغیره مبتنی بر هوش مصنوعی و یادگیری ماشین در کنار داده‌های فرایطی ثبت شده در طی فرایند تصویربرداری HS رامان، پروفایل فضایی و نقشه توزیع ساختار شیمیایی در مقیاس مولکولی، به‌صورت کاملاً هوشمند و بدون نیاز به برچسب‌گذاری و یا رنگ‌آمیزی و با حساسیت، دقت و قدرت تفکیک فضایی بالا فراهم می‌شود.

تئوری

در این بخش، ابتدا اصول فیزیکی حاکم بر پراکندگی غیرخطی رامان بیان شده و همچنین چیدمان اپتیکی سامانه ترکیبی طیف‌سنجی پراکندگی غیرخطی رامان و میکروسکوپ کانفوکال نوری توصیف می‌شود؛ سپس، تصویربرداری فرایطی بر مبنای پراکندگی رامان به‌عنوان رهیافتی نوین در راستای تهیه نقشه مولکولی مواد مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد و در نهایت، انواع الگوریتم‌های آماری مبتنی بر هوش مصنوعی و یادگیری ماشین، به‌صورت خلاصه و با هدف تجزیه و تحلیل مجموعه داده‌های عظیم و خام تصاویر فرایطی و تهیه نقشه مولکولی مواد در دو و سه بُعد به‌صورت هوشمند بررسی می‌شود.

اصول فیزیکی حاکم بر پراکندگی رامان و توصیف اپتیکی چیدمان سامانه ترکیبی طیف‌سنجی پراکندگی غیرخطی رامان و میکروسکوپ کانفوکال نوری

به‌طور کلی، هنگامی که یک مولکول در معرض تابش امواج الکترومغناطیسی قرار می‌گیرد، توزیع بار الکترونی مولکول تحت تاثیر نوسانات سریع میدان الکتریکی مختل می‌شود؛ بنابراین، به دلیل جابه‌جایی الکترون‌ها نسبت به هسته‌ها با بار مثبت، یک ممان دوقطبی الکتریکی در مولکول القا می‌شود. این ممان دوقطبی القایی نوسانی، به‌عنوان یک منشأ برای تولید میدان‌های الکترومغناطیسی ثانویه تابشی عمل می‌کند، به طوری که این میدان ثانویه، معیاری از نور پراکنده شده توسط مولکول است. تغییرات

زمانی این ممان دوقطبی القایی و رابطه آن با بسامد نور فرودی (ω_0) و همچنین بسامد ویژه مدهای ارتعاشی مولکول (ω_q) در رابطه (۱) بیان شده است. همان‌گونه که در رابطه (۱) ملاحظه می‌شود، دوقطبی القایی ایجاد شده در مولکول، می‌تواند عامل پراکندگی‌های کشسان و غیرکشسان شود: پراکندگی کشسان رایلی ($\mu^{\text{Rayleigh}}(t, \omega_0)$) که هیچ‌گونه اطلاعاتی را در رابطه با ساختار مولکولی در بر نداشته و همچنین پراکندگی‌های غیرکشسان استوکس و آنتی‌استوکس رامان ($\mu^{\text{Stokes/Anti-Stokes Raman}}(t, \omega_0 \pm \omega_q)$) که حاوی اطلاعات ترازهای ارتعاشی مولکولی هستند:

رابطه (۱)

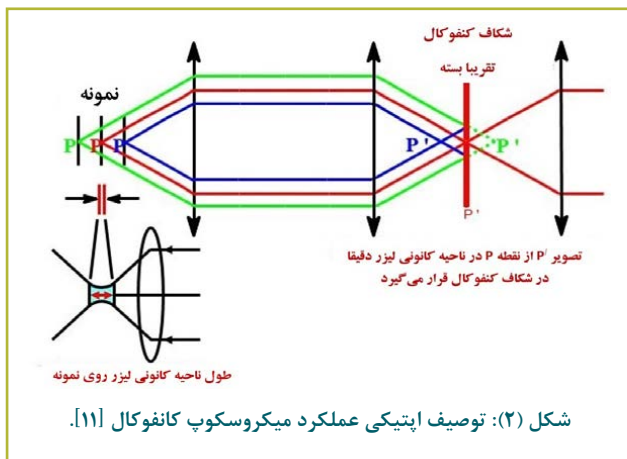
$$\mu^{\text{Stimulated}}(t) = \mu^{\text{Rayleigh}}(t, \omega_0) + \mu^{\text{Stokes Raman}}(t, \omega_0 - \omega_q) + \mu^{\text{Anti-Stokes Raman}}(t, \omega_0 + \omega_q)$$

با مطالعه میزان تغییرات حاصل شده در انرژی فوتون‌های پراکنده شده نسبت به فوتون‌های فرودی با استفاده از یک چیدمان اپتیکی دقیق و مناسب، می‌توان به اطلاعات ترازهای ارتعاشی مولکولی به‌منظور آشکارسازی و شناسایی دقیق تک مولکول دست یافت. به‌صورت کلی، یک سامانه طیف‌سنجی رامان، از سه قسمت اصلی تشکیل می‌شود [۸ و ۱۱]:

- منبع برانگیختگی نوری که به‌طور معمول از منابع همدوس لیزری استفاده می‌شود.

- سیستم اپتیکی هدایت کننده فوتون‌های فرودی روی نمونه و همچنین چیدمان اپتیکی به‌منظور جمع‌آوری فوتون‌های پراکنده شده که بیشتر، یک سیستم میکروسکوپ در این بخش می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

صفحه مرکزی ناحیه DOF عدسی شیئی به طیف‌سنج راه پیدا کنند؛ به عبارتی دیگر، شکاف، مانع از عبور فوتون‌های پراکنده شده از سطوح بالاتر و یا پایین‌تر از صفحه مرکزی کانونی عدسی به طیف‌سنج می‌شود. این ویژگی، با عنوان خاصیت کانفوکالی^{۱۵} شناخته می‌شود [۱۱ و ۲۷]. این ویژگی کمک می‌کند که به‌طور مؤثر، علاوه بر تقویت قدرت تفکیک‌پذیری عرضی، یک قدرت تفکیک محوری نیز ایجاد شود. معیار قدرت تفکیک در دو جهت عرضی و محوری، شاخصی مهم و تعیین‌کننده در کیفیت تصویرهای ثبت شده توسط ابزارهای تصویربرداری میکروسکوپی محسوب می‌شود. در واقع، سیستم‌های تصویربرداری کانفوکال، بر این اصل استوار هستند که نوری که از ناحیه کانونی گسیل نشده باشد، نمی‌تواند از فیلتر فضایی مقابل آشکارساز عبور کند.



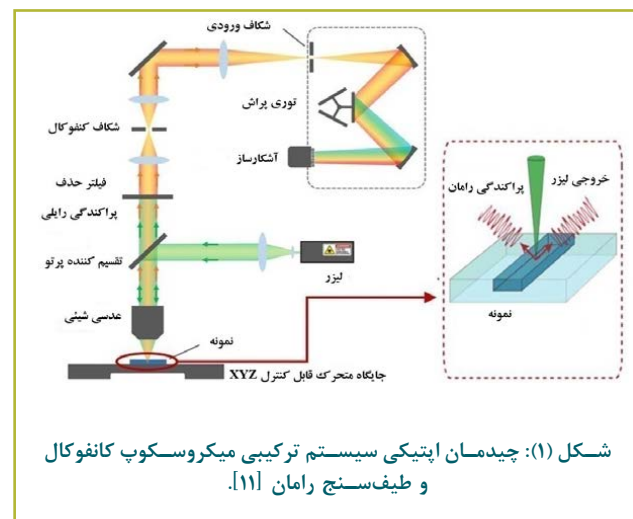
تصویربرداری فرایطیفی بر مبنای طیف‌نگاری رامان

امروزه تصویربرداری از اجسام و پدیده‌ها دارای مفاهیم بسیار پیچیده‌تر و گسترده‌تری نسبت به چند دهه اخیر است [۳۰]. به‌طور کلی، تصاویر رنگی که دوربین‌های معمول ثبت می‌کنند، ترکیبی از سه تصویر در باندهای فرکانسی قرمز (R)، سبز (G) و آبی (B) هستند. در واقع، ترکیب تصاویر در این سه باند فرکانسی، ثبت توزیع رنگ‌های بازتابی از سطح نمونه در ناحیه اپتیکی که چشم انسان به آن حساس است را امکان‌پذیر می‌کند؛ با این حال، با اینکه روش تصویربرداری RGB^{۱۶} برای مشخص کردن اجسام براساس شکل و رنگ مناسب بوده اما از آن جایی که تنها سه باند فرکانسی مرئی در دسترس است، قابلیت شناسایی اجسام، به حداقل می‌رسد. با پیشرفت فناوری، امروزه امکان ثبت تصاویر فرایطیفی فراهم شده است.

تصویربرداری فرایطیفی HS، روشی است که در آن به جای اختصاص دادن رنگ‌های اصلی RGB به هر پیکسل، طیف وسیعی از باندهای فرکانسی نور بازتاب شده از سطح اجسام اندازه‌گیری و ثبت می‌شود [۱۱، ۳۰ و ۳۱]. شکل (۳)،

طیف‌سنج برای ثبت طیف فوتون‌های پراکنده شده. لازم به ذکر است که دقت و قدرت تفکیک طیف پراکندگی ثبت شده، وابسته به ویژگی‌های مولفه‌های به کار رفته در طیف‌سنج است که مهم‌ترین آنها توری پراش و آشکارساز است.

شکل (۱)، چیدمان اپتیکی یک سامانه ترکیبی متشکل از میکروسکوپ نوری کانفوکال و یک طیف‌سنج رامان را نمایش می‌دهد [۱۱]. در این چیدمان، نور لیزر ابتدا از طریق عدسی شیئی میکروسکوپ نوری روی نمونه، کانونی شده و پس از پراکندگی توسط مولکول‌های حاضر در لکه کانونی بیم لیزر، پرتوهای پس پراکنده شده توسط همان عدسی میکروسکوپ، جمع‌آوری شده و به سمت طیف‌سنج هدایت می‌شود. سپس، پرتوهای جمع‌آوری شده به‌منظور حذف فوتون‌های پراکنده شده رایلی از آنها، از فیلترهای مناسب عبور می‌کند. در نهایت، این پرتوهای فیلتر شده در مسیر هدایت به سمت طیف‌سنج، به‌منظور ثبت طیف نقطه‌ای پراکندگی رامان، درست از مولکول‌های موجود در مرکز لکه کانونی پرتو لیزر، از یک شکاف با پهنای قابل تنظیم (بین‌هول)^{۱۳} عبور داده می‌شوند. درون طیف‌سنج نیز با استفاده از مولفه‌های اپتیکی مناسب و توری پراش، یک واگرایی فضایی بر حسب طول موج برای فوتون‌های پراکنده شده رامان اتفاق افتاده و در نهایت، از طریق یک آشکارساز نوری، شدت این فوتون‌ها براساس بازه طول موجی آنها ثبت می‌شود [۱۱، ۲۶ و ۲۷].



مطابق شکل (۲)، زمانی که نور لیزر توسط عدسی شیئی میکروسکوپ روی نمونه کانونی می‌شود، تمامی مولکول‌هایی که در ناحیه عمق کانونی^{۱۴} عدسی شیئی قرار می‌گیرند، برانگیخته شده و موجب پراکندگی فوتون‌ها در جهت‌های مختلف می‌شوند [۲۸ و ۲۹]. قرار گرفتن یک شکاف قابل تنظیم در مسیر پرتوی پراکنده شده قبل از ورود به طیف‌سنج، این امکان را فراهم می‌آورد که تنها فوتون‌های پراکنده شده از مولکول‌های موجود در

نقطه را ثبت نمود؛ به تجمیع این داده‌های طیفی (شدت پراکندگی و جابه‌جایی رامان) با مختصات فضایی که در آن به ازای هر پیکسل از تصویر، یک بازه طیفی از پراکندگی غیرخطی رامان ثبت شده‌است، تصویربرداری فراطیفی (HS) و غیرخطی رامان می‌گویند. تصاویر HS غیرخطی دو بُعدی و یا سه بُعدی حاصل شده، حاوی اطلاعاتی در مورد چگونگی توزیع گونه‌های مختلف مولکولی موجود در نمونه (نقشه مولکولی)، با تفکیک فضایی بالا است [۱۱ و ۱۲، ۳۰ و ۳۲]. در این صورت، استخراج این مجموعه اطلاعات مولکولی، تنها منوط به تجزیه و تحلیل صحیح و سریع افت‌وخیزهای موجود در اطلاعات طیفی ثبت شده‌است. این امر با استفاده از الگوریتم‌های آماری در حوزه هوش مصنوعی و یادگیری ماشین محقق می‌شود.

■ الگوریتم‌های آماری یادگیری ماشین

توسعه روش‌های آماری پیشرفته در حوزه هوش مصنوعی و یادگیری ماشین، راهکارهای مناسب و مؤثری را به‌منظور تجزیه و تحلیل مجموعه داده‌های عظیم و پیچیده ارائه می‌کنند. امروزه به دلیل تنوع در نوع و حجم وسیع داده‌ها در حوزه‌های مختلف تحقیقاتی، الگوریتم‌های آماری پیشرفته متعددی در حوزه هوش مصنوعی و یادگیری ماشین به‌منظور تحلیل و تفسیر آنها توسعه داده شده‌است. در حالت کلی، مبنای عملکرد روش‌های هوشمند تحلیل آماری پیشرفته مبتنی بر یادگیری ماشین در حوزه تفسیر مجموعه داده‌ها، مطابق با دو رهیافت کلی الگوریتم‌های نظارت نشده و الگوریتم‌های نظارت شده است. به‌طور کلی، مبنای عملکرد روش‌های هوشمند تحلیل آماری مبتنی بر یادگیری ماشین در حوزه تفسیر مجموعه داده‌ها، مطابق با دو رهیافت کلی به شرح زیر است [۳۳ و ۳۴]:

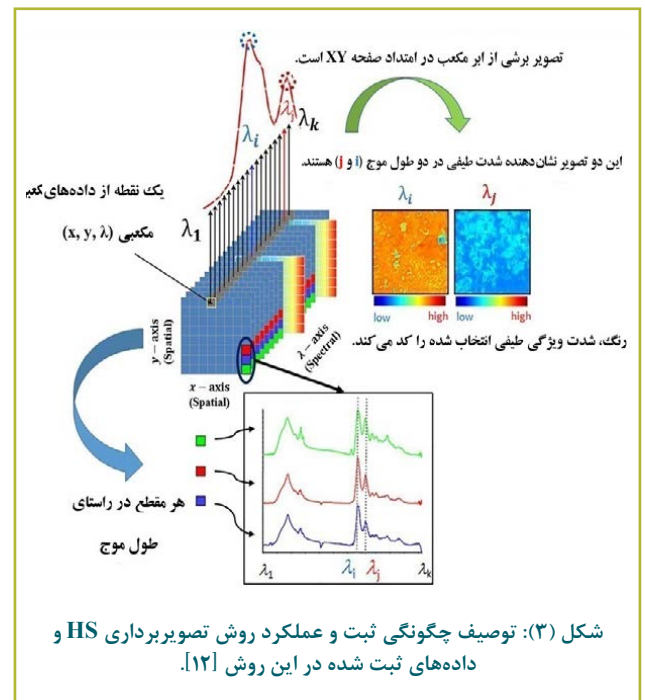
■ الگوریتم‌های نظارت شده^{۱۸} [۱۱ و ۳۵]: الگوریتم‌هایی هستند که از طریق آموزش^{۱۹} با استفاده از مجموعه داده‌های شناخته شده با طبقه‌بندی قطعی، که با عنوان پایگاه داده^{۲۰} شناخته می‌شوند، به دسته‌بندی^{۲۱} داده‌های جدید بر مبنای دانش استخراج شده می‌پردازند.

■ الگوریتم‌های نظارت نشده^{۲۲} [۱۱ و ۳۵]: الگوریتم‌هایی هستند که در آنها از طریق ارزیابی مجموعه داده‌ها، الگوهای پیچیده‌ای که بین داده‌ها وجود دارد، استخراج شده و در نهایت یک طبقه‌بندی^{۲۳} از داده‌ها بدون دانش قبلی ارائه می‌شود.

براساس دو رهیافت ذکر شده، از طریق دانش حاصل شده از الگوریتم‌های آماری بر مبنای یادگیری ماشین، این امکان فراهم می‌شود که بتوان اطلاعات خام طیفی را به‌صورت کاملاً خودکار پردازش و در جهت استخراج عوامل مورد نظر ارزیابی نمود.

از جمله روش‌هایی که در دسته الگوریتم‌های نظارت نشده قرار می‌گیرند، می‌توان به الگوریتم‌های خوشه‌بندی سلسله مراتبی^{۲۴} و k-میانه^{۲۵} اشاره نمود. اساس عملکرد این الگوریتم‌ها به شرح زیر است:

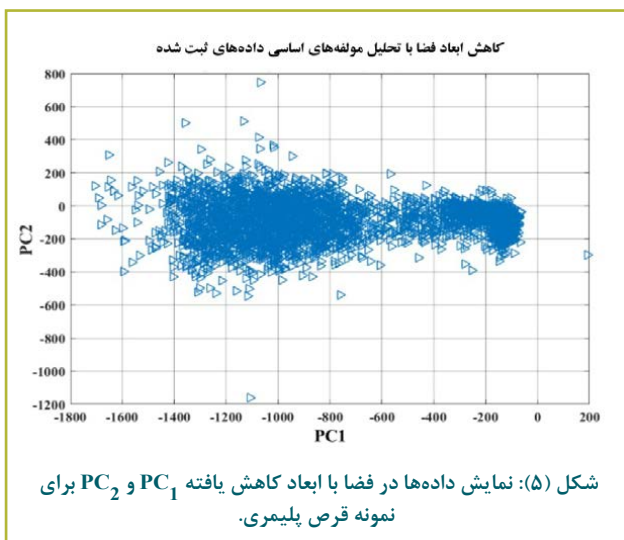
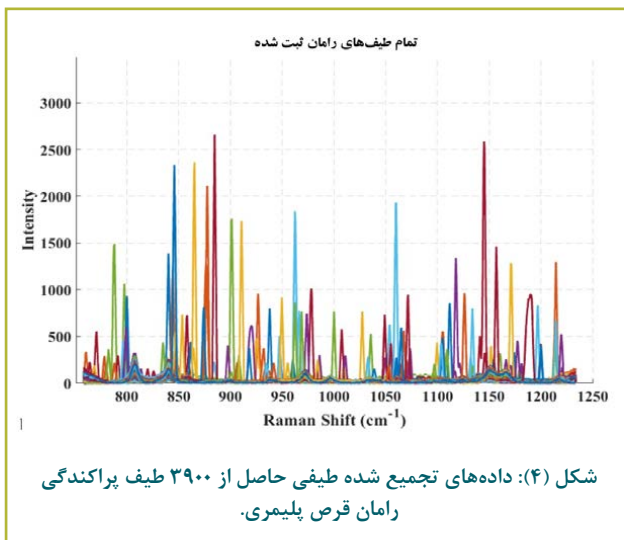
چگونگی ثبت و عملکرد روش تصویربرداری HS را نمایش می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ملاحظه می‌شود، داده‌های ذخیره شده در طی یک فرایند تصویربرداری HS، به‌صورت یک مجموعه داده مکعبی هستند؛ بدین معنا که این مکعب تصویر فراطیفی^{۱۷}، حاوی مجموعه اطلاعات مربوط به مختصات فضایی به همراه داده‌های طیفی هر نقطه است. به عبارت ساده‌تر، به ازای هر پیکسل از تصویر در صفحه x-y، یک بازه طیفی ثبت می‌شود. بسته به ناحیه طیفی ثبت شده به ازای هر پیکسل، این نوع تصاویر به‌صورت ذاتی حاوی حجم بالایی از اطلاعات ارزشمند نظیر ساختار مولکولی و ترکیبات شیمیایی نمونه مورد بررسی هستند. از جمله ساده‌ترین موارد استفاده از تصاویر HS، به تصویر کشیدن داده‌ها در باندهای فرکانسی به غیر از RGB است؛ به طوری که در این‌گونه تصاویر، رنگ‌های اختصاص یافته، بیانگر رنگ واقعی نمونه نبوده بلکه متناسب با شدت نور بازتاب شده از سطح نمونه هدف متناظر با باند فرکانسی مورد بررسی، کدگذاری شده‌اند [۱۱ و ۳۲].



از مهم‌ترین دسته تصاویر HS که حاوی اطلاعاتی مربوط به اثرانگشت و ساختار مولکولی و توزیع شیمیایی مولکولی موجود در نمونه مورد بررسی است، تصاویر HS غیرخطی بر مبنای پراکندگی رامان هستند [۱۱ و ۱۲]. به‌منظور ثبت تصاویر HS غیرخطی بر پایه پراکندگی رامان، از چیدمان اپتیکی ترکیبی ارائه شده در شکل استفاده می‌شود. بدین‌منظور، چنانچه جایگاه قرارگیری نمونه زیر میکروسکوپ به یک استپ موتور با دقت بالا تجهیز شده باشد، حرکت نمونه در سه راستای X-Y-Z را میسر می‌کند، در این صورت این امکان فراهم می‌شود که بتوان سطح نمونه مورد بررسی را به‌صورت نقطه به نقطه با گام‌های فضایی قابل کنترل در سه راستای فضایی X-Y-Z جاروب کرد و طیف پراکندگی غیرخطی رامان هر

شد. این تصویربرداری‌ها با استفاده از میکروسکوپ کانفوکال رامان هوریبا^{۲۹} با توری پراش 1800 groove/mm در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه شیراز انجام شده‌است.

مدت زمان ۰/۵ ثانیه برای ثبت طیف هر نقطه در نظر گرفته شده‌است. شکل (۴) داده‌های تجمیع شده خام طیفی ثبت شده از 3900 طیف پراکندگی رامان قرص پلیمری در ناحیه طیفی 750 cm^{-1} تا 1250 cm^{-1} را نمایش می‌دهد. باید توجه شود که طیف رامان به ازای هر نقطه در این بازه طیفی شامل 1024 جابه‌جایی رامان^{۳۰} بوده، به طوری که میزان شدت در هر جابه‌جایی رامان، دربردارنده اطلاعات مولکولی نقطه مورد بررسی است. با توجه به دشوار بودن تحلیل داده‌های طیفی 3900 نقطه در این فضای 1024 بُعدی، از الگوریتم آماری PCA بهره گرفته شده‌است تا بتوان ابعاد فضای 1024 بُعدی را به دو بُعد با بیشترین میزان انحراف از معیار میان داده‌ها کاهش داد (شکل (۵)). همان‌گونه که در شکل (۵) مشهود است، داده‌ها در دو ناحیه با چگالی بالا متمرکز شده‌اند که نشان از حضور دو دسته با ساختار مولکولی متفاوت است.



■ HCA: روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی، یک ابزار اکتشافی برای آشکارسازی خوشه‌های ذاتی موجود در یک مجموعه داده معین است. این الگوریتم، براساس یک معیار، که در اینجا فاصله اقلیدسی میان داده‌ها است، شروع به خوشه‌بندی داده‌ها می‌کند به‌گونه‌ای که هر خوشه، می‌تواند زیرمجموعه‌ای از خوشه‌های بزرگتر باشد. در این رهیافت می‌توان بسته به نیاز، داده‌ها را به k دسته معین دسته‌بندی نمود.

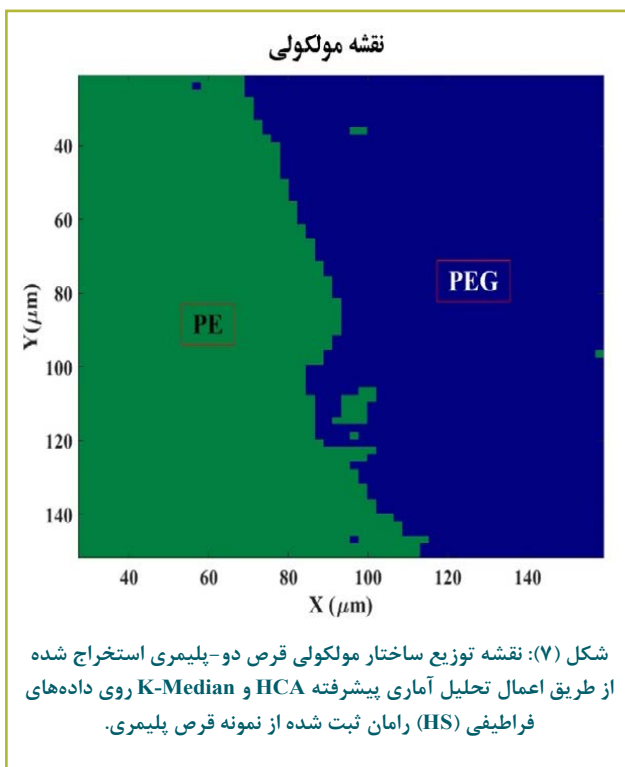
■ K-Median: این الگوریتم خوشه‌بندی، این هدف را دنبال می‌کند که N مجموعه داده معین را به k خوشه تقسیم‌بندی کند. رهیافت این تقسیم‌بندی بدین گونه است که باید k مرکز خوشه‌ها به‌گونه‌ای جستجو شوند که فاصله داده‌های قرار گرفته در هر خوشه تا مراکز آنها، کمینه مقدار را به خود اختصاص دهند.

لازم به ذکر است که به‌منظور سرعت بخشیدن و بهینه کردن عملکرد الگوریتم‌های خوشه‌بندی، نیاز است محاسبات فضایی انجام پذیرند که در آن بیشترین انحراف از معیار میان داده‌ها وجود داشته باشد. به‌منظور دستیابی به چنین فضای محاسباتی با ابعاد کاهش یافته از الگوریتم تحلیل مولفه‌های اساسی^{۲۶} استفاده می‌شود. این الگوریتم، محاسبات را به فضای ویژه برداری ماتریس همبستگی داده‌ها انتقال داده و ویژه بردارها با بیشترین انحراف از معیار میان داده‌ها را، معیار محاسبات قرار می‌دهد.

داده‌های خام تجمیع شده فراطیفی بر مبنای پراکندگی غیرخطی رامان، همواره شامل چندین هزار طیف پراکندگی رامان به ازای یک توزیع فضایی مشخص است، از این رو، یک مجموعه عظیمی از داده‌های خام با حجم زیاد محسوب می‌شوند. بنابراین، در حالت معمول، استخراج و تفسیر اطلاعات مولکولی و یا یافتن افت‌وخیزها و شباهت‌های موجود در این مجموعه عظیم از داده‌های طیفی ثبت شده، به‌صورت سریع و صحیح بسیار پیچیده و دشوار است. از این رو، در این تحقیق از طریق توسعه کدهای محاسباتی مربوط به الگوریتم‌های خوشه‌بندی نظارت نشده مناسب و اعمال آنها روی داده‌های عظیم تصاویر HS، رهیافتی برای استخراج اطلاعات مربوط به نقشه مولکولی مواد، از مجموعه داده‌های بزرگ و پیچیده طیفی ارائه می‌شود.

بحث و بررسی نتایج

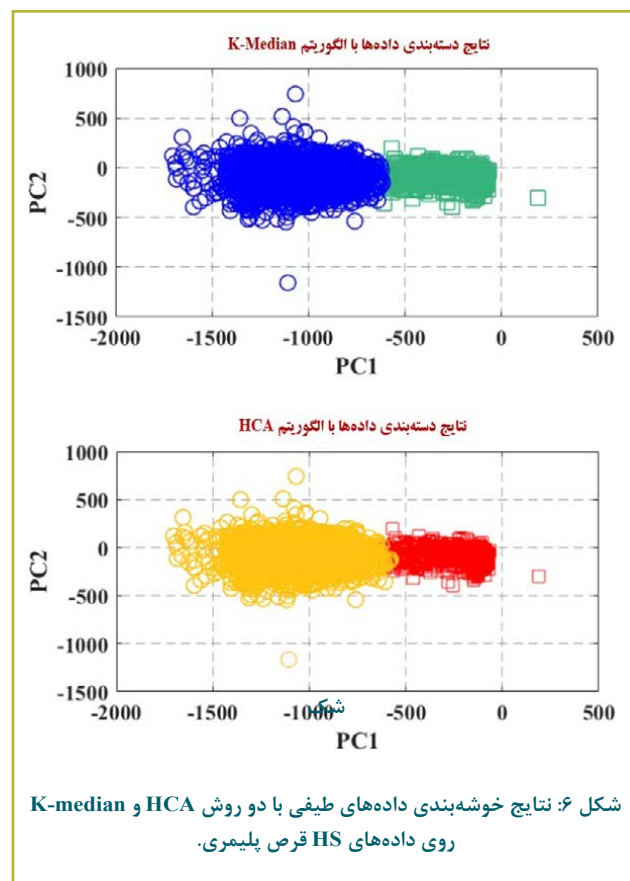
در این تحقیق، ابتدا یک قرص متشکل از دو پلیمر پلی‌اتیلن^{۲۸} و پلی‌اتیلن گلایکل^{۲۹} که به‌صورت غیریکنواخت و ناهمگن ترکیب شده‌اند، تهیه شده‌است. سپس، یک سطح مقطع از قرص پلیمری به ابعاد 130 در 130 میکرومتر که شامل 3900 نقطه با گام فضایی 2 میکرومتری برای تصویربرداری HS دو بُعدی انتخاب



نتیجه‌گیری

در این تحقیق، از یک قرص حاوی دو پلیمر مختلف با توزیع غیرهمگن، با استفاده از سامانه ترکیبی طیف‌سنج رامان و میکروسکوپ کانفوکال نوری، یک تصویر HS شامل ۳۹۰۰ نقطه ثبت شده است. از تجمیع مجموعه اطلاعات عظیم داده‌های خام طیفی با موقعیت فضایی متناظر با هر نقطه طیفی، داده‌های فرایندی (HS) غیر قابل نمایش حاصل می‌شود که می‌توان با تجزیه و تحلیل این اطلاعات از طریق روش‌های آماری هوش مصنوعی و یادگیری ماشین، نقشه توزیع فضایی گونه‌های مختلف مولکولی موجود در نمونه مورد بررسی را استخراج نمود که در این پژوهش، با بکارگیری الگوریتم‌های آماری در حوزه یادگیری ماشین نظیر کاهش فضای محاسباتی PCA و روش‌های خوشه‌بندی HCA و K-median، نوع پلیمرها به صورت دقیق شناسایی شده و در نهایت نقشه مولکولی از چگونگی توزیع فضایی آنها در این قرص پلیمری استخراج شده است. در واقع، با ترکیب نمودن الگوریتم‌های هوش مصنوعی و روش تصویربرداری فرایندی اپتیکی رامان، امکان ثبت تصاویر با کیفیت، دقت، حساسیت و قدرت تفکیک فضایی بالا به منظور تهیه نقشه مولکولی و تعیین توزیع فضایی گونه‌های مختلف مولکولی در یک نمونه آزمایشگاهی هدف فراهم می‌شود.

در گام بعد، به منظور ارائه یک خوشه‌بندی از داده‌ها و با هدف شناسایی نقاط با ویژگی طیفی مشابه و سپس دسته‌بندی آنها در گروه‌های یکسان، دو الگوریتم نظارت نشده K-Median و HCA به طور هم‌زمان روی داده‌ها در فضای دو بُعدی PC1 و PC2 پیاده‌سازی شده است. نتایج این مرحله در شکل (۶) نمایش داده شده است.



همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، هر دو الگوریتم نظارت نشده، دسته‌بندی‌های یکسانی را برای این مجموعه داده طیفی پیش‌بینی می‌کنند که نشان از تفکیک‌پذیری مناسب داده‌ها در فضای محاسباتی پیشنهادی با PCA است.

در ادامه، با ترکیب اطلاعات حاصل شده از دسته‌بندی داده‌ها و موقعیت فضایی ثبت شده به ازای هر طیف (داده‌های فرایندی (HS) رامان)، نقشه توزیع ساختار مولکولی این قرص پلیمری مطابق شکل (۷) استخراج شده است. این نقشه مولکولی، غیریکنواختی توزیع مولکولی دو پلیمر PE و PEG را در این قرص تایید می‌نماید. در نهایت در پایان این گام، نتایج حاصل از استخراج نقشه مولکولی، با مقایسه طیف هر ناحیه با طیف رامان نمونه‌های استاندارد هر پلیمر اعتبارسنجی شده است. بدین ترتیب با ترکیب الگوریتم‌های نظارت نشده هوش مصنوعی با تصویربرداری HS براساس طیف‌نگاری رامان، نقشه مولکولی دو بُعدی قرص پلیمری به همراه تفکیک و چگونگی توزیع فضایی دو پلیمر PE و PEG تشکیل دهنده نمونه هدف، استخراج شد.

پی‌نوشت

1. Hyperspectral (HS) images
2. Molecular Detection (MD)
3. Complex System
4. Ensemble
5. Fluorescence Spectroscopy and Microscopy
6. Kinetics
7. Infrared spectroscopy (IR)
8. Hyperspectral Imaging (HSI)
9. Spatial Resolution
10. Molecular Mapping
11. Artificial Intelligence (AI)
12. Machine Learning
13. Pin Hole
14. Depth of Focus (DOF)
15. Confocality
16. The use of red, green, and blue (RGB) color imaging
17. Hyperspectral Image Cube Data
18. Supervised Algorithm
19. Training
20. Data Base
21. Classification
22. Unsupervised Algorithm
23. Clustering
24. Hierarchical Clustering Algorithm (HCA)
25. K-Median
26. Principle Component Analysis (PCA)
27. Polyetylen (PE)
28. Polyethylene glycol (PEG)
29. HORIBA
30. Raman Shift

مراجع

- [1] C. Y. Li et al., "Real-time detection of single-molecule reaction by plasmon-enhanced spectroscopy," *Sci. Adv.*, vol. 6, no. 24, pp. 1–9, 2020, doi: 10.1126/sciadv.aba6012.
- [2] Y. Qiu, C. Kuang, X. Liu, and L. Tang, "Single-Molecule Surface-Enhanced Raman Spectroscopy," pp. 1–16, 2022.
- [3] A. A. Deniz, S. Mukhopadhyay, and E. A. Lemke, "Single-molecule biophysics: At the interface of biology, physics and chemistry," *J. R. Soc. Interface*, vol. 5, no. 18, pp. 15–45, 2008, doi: 10.1098/rsif.2007.1021.
- [4] Jie Zhang, G. Qi, C. Xu, and Y. Jin, "Enzymatic Preparation of Plasmonic-Fluorescent Quantum Dot-Gold Hybrid Nanoprobes for Sensitive Detection of Glucose and Alkaline Phosphatase and Dual-Modality Cell Imaging," *Anal. Chem.*, vol. 91, no. 21, pp. 14074–14079, 2019, doi: 10.1021/acs.analchem.9b03818.
- [5] D. Frank et al., "Overview of the role of nanotechnological innovations in the detection and treatment of solid tumors," *Int. J. Nanomedicine*, vol. 9, no. 1, pp. 589–613, 2014, doi: 10.2147/IJN.S50941.
- [6] A. Gharatape and A. Y. Khosroushahi, "Optical Biomarker-based Biosensors for Cancer / Infectious," *Appl. Immunohistochem. Mol. Morphol.*, vol. 00, no. 00, pp. 1–9, 2017.
- [7] C. Salinas, M. V. Amé, and A. G. Bracamonte, "Synthetic non-classical luminescence generation by enhanced silica nanophotonics based on nano-bio-FRET," *RSC Adv.*, vol. 10, no. 35, pp. 20620–20637, 2020, doi: 10.1039/d0ra02939d.
- [8] B. A. In situ Spectroscopic Techniques at High Pressure Supercritical Fluid Science and Technology, vol. 7.
- [9] I. Durickovic, "Using Raman Spectroscopy for Characterization of Aqueous Media and Quantification of Species in Aqueous Solution," *Appl. Mol. Spectrosc. to Curr. Res. Chem. Biol. Sci.*, 2016, doi: 10.5772/64550.
- [10] G. Deka, C. K. Sun, K. Fujita, and S. W. Chu, "Nonlinear plasmonic imaging techniques and their biological applications," *Nanophotonics*, vol. 6, no. 1, pp. 31–49, 2017, doi: 10.1515/nanoph-2015-0149.
- [11] J. Dieing, T. Hollricher, O., & Toporski, *Confocal Raman Microscopy Second Edition*, vol. 66. 2018.
- [12] K. B. Beć, J. Grabska, G. K. Bonn, M. Popp, and C. W. Huck, "Principles and Applications of Vibrational Spectroscopic Imaging in Plant Science: A Review," *Front. Plant Sci.*, vol. 11, no. August, pp. 1–27, 2020, doi: 10.3389/fpls.2020.01226.
- [13] L. Pan, P. Zhang, C. Daengngam, S. Peng, and M. Chongcheawchamnan, "A review of artificial intelligence methods combined with Raman spectroscopy to identify the composition of substances," *J. Raman Spectrosc.*, vol. 53, no. 1, pp. 6–19, 2022, doi: 10.1002/jrs.6225.
- [14] S. Chen et al., "Raman Spectroscopy Reveals Abnormal Changes in the Urine Composition of Prostate Cancer: An

- Application of an Intelligent Diagnostic Model with a Deep Learning Algorithm,” *Adv. Intell. Syst.*, vol. 3, no. 4, p. 2000090, 2021, doi: 10.1002/aisy.202000090.
- [15] P. Solís-Fernández and H. Ago, “Machine Learning Determination of the Twist Angle of Bilayer Graphene by Raman Spectroscopy: Implications for van der Waals Heterostructures,” *ACS Appl. Nano Mater.*, vol. 5, no. 1, pp. 1356–1366, 2022, doi: 10.1021/acsnm.1c03928.
- [16] J. W. Tang et al., “Comparative Analysis of Machine Learning Algorithms on Surface Enhanced Raman Spectra of Clinical Staphylococcus Species,” *Front. Microbiol.*, vol. 12, no. August, 2021, doi: 10.3389/fmicb.2021.696921.
- [17] R. Kothari et al., “Raman spectroscopy and artificial intelligence to predict the Bayesian probability of breast cancer,” *Sci. Rep.*, vol. 11, no. 1, pp. 1–17, 2021, doi: 10.1038/s41598-021-85758-6.
- [18] I. Kecoglu, M. Sirkeci, M. B. Unlu, A. Sen, U. Parlatan, and F. Guzelcimen, “Quantification of salt stress in wheat leaves by Raman spectroscopy and machine learning,” *Sci. Rep.*, vol. 12, no. 1, pp. 1–10, 2022, doi: 10.1038/s41598-022-10767-y.
- [19] N. Blake, R. Gaifulina, L. D. Griffin, I. M. Bell, and G. M. H. Thomas, “Machine Learning of Raman Spectroscopy Data for Classifying Cancers: A Review of the Recent Literature,” *Diagnostics*, vol. 12, no. 6, pp. 1–19, 2022, doi: 10.3390/diagnostics12061491.
- [20] Y. Kanemura et al., “Assessment of skin inflammation using near-infrared Raman spectroscopy combined with artificial intelligence analysis in an animal model,” *Analyst*, vol. 147, no. 12, pp. 2843–2850, 2022, doi: 10.1039/d2an00193d.
- [21] V. Karunakaran et al., “A non-invasive ultrasensitive diagnostic approach for COVID-19 infection using salivary label-free SERS fingerprinting and artificial intelligence,” *J. Photochem. Photobiol. B Biol.*, vol. 234, no. August, p. 112545, 2022, doi: 10.1016/j.jphotobiol.2022.112545.
- [22] C. Post et al., “Application of laser-induced, deep uv raman spectroscopy and artificial intelligence in real-time environmental monitoring—solutions and first results,” *Sensors*, vol. 21, no. 11, 2021, doi: 10.3390/s21113911.
- [23] D. Cui, L. Kong, Y. Wang, Y. Zhu, and C. Zhang, “In situ identification of environmental microorganisms with Raman spectroscopy,” *Environ. Sci. Ecotechnology*, vol. 11, p. 100187, 2022, doi: 10.1016/j.ese.2022.100187.
- [24] R. Luo, J. Popp, and T. Bocklitz, “Deep Learning for Raman Spectroscopy: A Review,” *Analytica*, vol. 3, no. 3, pp. 287–301, 2022, doi: 10.3390/analytica3030020.
- [25] M. A. Kouri et al., “Raman Spectroscopy: A Personalized Decision-Making Tool on Clinicians’ Hands for In Situ Cancer Diagnosis and Surgery Guidance,” *Cancers (Basel)*, vol. 14, no. 5, 2022, doi: 10.3390/cancers14051144.
- [26] S. F. Wu et al., “Raman scattering investigation of the electron-phonon coupling in superconducting Nd(O,F) BiS₂,” *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.*, vol. 90, no. 5, pp. 3–7, 2014, doi: 10.1103/PhysRevB.90.054519.
- [27] T. Dieing and O. Hollricher, “High-resolution, high-speed confocal Raman imaging,” *Vib. Spectrosc.*, vol. 48, no. 1, pp. 22–27, 2008, doi: 10.1016/j.vibspec.2008.03.004.
- [28] S. Thomas, Y. Grohens, G. Vignaud, N. Kalarikkal, and J. James, *Nano Optics: Fundamental, Experimental Methods, and Applications*. 2020.
- [29] L. Novotny and B. Hecht, *Principles of Nano-Optics*, 2nd ed. New York, 2012.
- [30] K. N. Prajapati, A. A. Nair, S. R. P. Silva, and J. Mitra, “Hyperspectral imaging with Raman scattered photons: A new paradigm in Raman analysis,” 2021, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2106.02876>.
- [31] I. J. Maybury, D. Howell, M. Terras, and H. Viles, “Comparing the effectiveness of hyperspectral imaging and Raman spectroscopy: a case study on Armenian manuscripts,” *Herit. Sci.*, vol. 6, no. 1, pp. 1–15, 2018, doi: 10.1186/s40494-018-0206-1.
- [32] K. Hauke, J. Kehren, N. Böhme, S. Zimmer, and T. Geisler, “In situ hyperspectral Raman Imaging: A new method to investigate sintering processes of ceramic material at high-temperature,” *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 7, 2019, doi: 10.3390/app9071310.
- [33] M. Hussain, J. Zou, H. Zhang, R. Zhang, Z. Chen, and Y. Tang, “Recent Progress in Spectroscopic Methods for the Detection of Foodborne Pathogenic Bacteria,” *Biosensors*, vol. 12, no. 10, 2022, doi: 10.3390/bios12100869.
- [34] H. Zhao et al., “The application of machine-learning and Raman spectroscopy for the rapid detection of edible oils type and adulteration,” *Food Chem.*, vol. 373, no. PB, p. 131471, 2022, doi: 10.1016/j.foodchem.2021.131471.
- [35] M. Jordan, J. Kleinberg, and B. Scho, *Pattern Reconnization and Machine Learning*.

نویسندگان

مهتری ندیری نیری^{۱*}صفا سراج مهدی زاده^۱

۱. شرکت طنین پیک سلان (تولیدکننده توپ‌های بتا)،
شهرک صنعتی شماره ۲، اردبیل، ایران

*mnadiriniri@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۲۰

بررسی نرمال بودن توزیع نتایج آزمون با استفاده از نرم افزار MiniTab



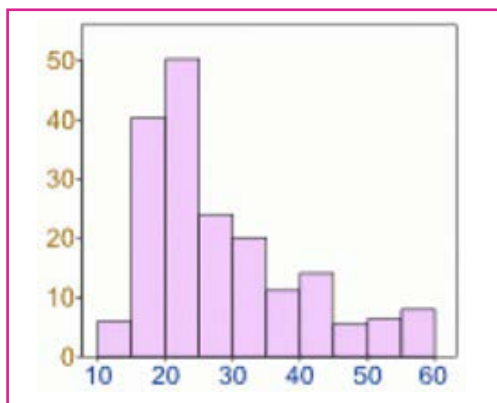
واژه‌های کلیدی

اندازه‌گیری، داده، نرمال بودن، برگشت
عمودی، MiniTab.

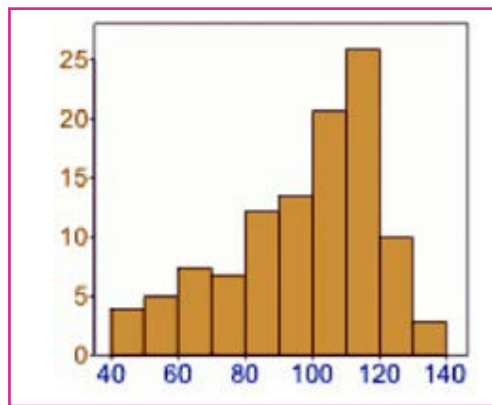
چکیده

پس از انجام هر نوع اندازه‌گیری همواره تعدادی داده (عدد) به‌دست می‌آید که باید ارتباط بین آنها را کشف و یا دسته‌بندی نمود تا بتوان آنها را تجزیه و تحلیل کرد. برای انجام این کار، ابتدا باید چگونگی توزیع داده‌ها مشخص شود. محققین به‌طور معمول تلاش می‌کنند تا دریابند که توزیع داده‌ها به کدام توابع ریاضی نزدیک‌تر هستند، تا بدین ترتیب بتوانند تحلیل صحیحی از ماهیت توزیع و محاسبات روی آن داشته باشند. در واقع یکی از مهمترین توزیع‌های آماری، «توزیع نرمال» نام دارد. بررسی نرمال بودن توزیع نتایج آزمون، پیش‌نیاز بسیاری از آزمون‌های آماری است و از جمله نرم‌افزارهایی که برای انجام این بررسی مورد استفاده قرار می‌گیرد، می‌توان به نرم‌افزار مینی‌تب^۱ اشاره نمود. در این پژوهش، به‌منظور بررسی نرمال بودن نتایج حاصل از اندازه‌گیری، برگشت عمودی یک نمونه توپ فوتبال خارج سالن سایز (۵) لاستیکی، از روش اندرسون دارلینگ و به کمک نرم‌افزار مینی‌تب استفاده شده‌است. عامل مورد استفاده برای قضاوت در رابطه با نرمال بودن توزیع داده‌ها، $p\text{-value}$ است. با توجه به نتیجه به‌دست آمده، مقدار $p\text{-value} \geq 0/05$ است که نشان‌دهنده نرمال بودن توزیع داده‌ها است.

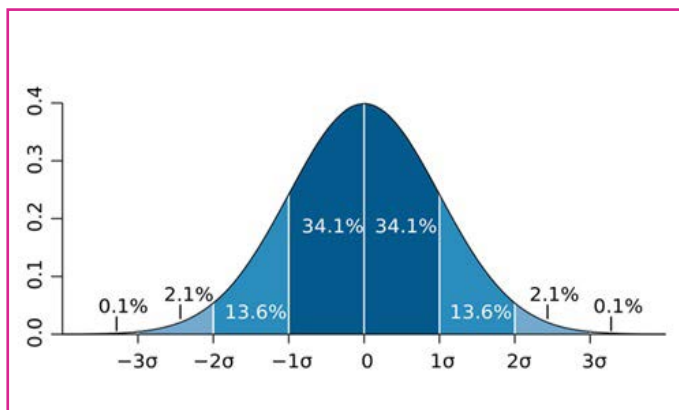
انواع مختلفی از توزیع‌های محتمل برای داده‌ها وجود دارد. داده‌ها ممکن است طوری توزیع شوند که بیشتر در سمت راست باشند (شکل (۱)). ممکن است توزیع داده‌ها به گونه‌ای باشد که داده‌ها بیشتر در سمت چپ تجمع یابند (شکل (۲)). همچنین ممکن است توزیع داده‌ها به صورت مختلط باشد (شکل (۳)). اما موارد بسیاری نیز وجود دارد که داده‌ها میل به جمع شدن در اطراف مقدار میانگین دارند. در چنین حالتی، داده‌ها به سمت چپ یا راست تمایل ندارند و به این توزیع «توزیع نرمال» یا توزیع زنگوله‌ای گفته می‌شود (شکل (۴)). توزیع نرمال نخستین بار توسط کارل فردریش گاوس پیشنهاد شده‌است و به همین دلیل با نام توزیع گاوسی نیز شناخته می‌شود. این توزیع یکی از مهمترین توزیع‌های احتمالی پیوسته در نظریه احتمالات است. علت نام‌گذاری و همچنین اهمیت این توزیع، هم‌خوانی بسیاری از مقادیر حاصل شده، هنگام نوسان‌های طبیعی و فیزیکی پیرامون یک مقدار ثابت با مقادیر حاصل از این توزیع است.



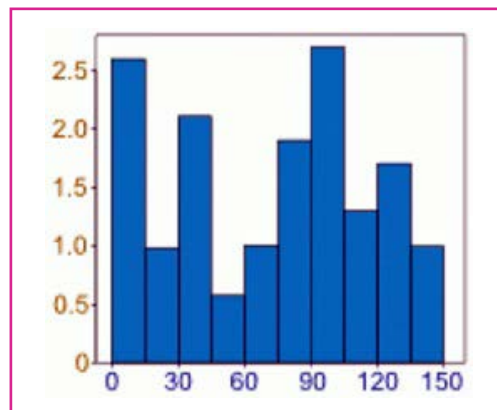
شکل (۲): توزیع داده‌ها به سمت چپ [۶].



شکل (۱): توزیع داده‌ها به سمت راست [۶].



شکل (۴): توزیع نرمال [۶].



شکل (۳): توزیع داده‌ها به صورت مختلط [۶].

ویژگی‌های مهم توزیع نرمال به صورت زیر است:

۱. متقارن است؛ یعنی نیمی از داده‌ها از مرکز کمتر و نیمی از داده‌ها از مرکز بیشتر است.
۲. بیشتر مشاهدات نزدیک مرکز است و هر چه از مرکز فاصله می‌گیریم، فراوانی مشاهدات کمتر می‌شود.
۳. در بازه $\bar{X} \pm 1 \frac{SD}{\sqrt{n}}$ درصد از مشاهدات قرار می‌گیرند. به عبارتی $68/2$ درصد از مقادیر در محدوده یک برابر انحراف استاندارد یا انحراف معیار^۳ از میانگین هستند. انحراف معیار، معیار پراکندگی اعداد است.
۴. در بازه $\bar{X} \pm 2 \frac{SD}{\sqrt{n}}$ ، $95/4$ درصد از مشاهدات قرار می‌گیرند. به عبارتی $95/4$ درصد از مقادیر در محدوده دو برابر انحراف معیار از میانگین هستند.
۵. در بازه $\bar{X} \pm 3 \frac{SD}{\sqrt{n}}$ ، $99/7$ درصد از مشاهدات قرار می‌گیرند. به عبارتی $99/7$ درصد از مقادیر در محدوده سه برابر انحراف معیار از میانگین هستند [۱ تا ۶].

روش تحقیق

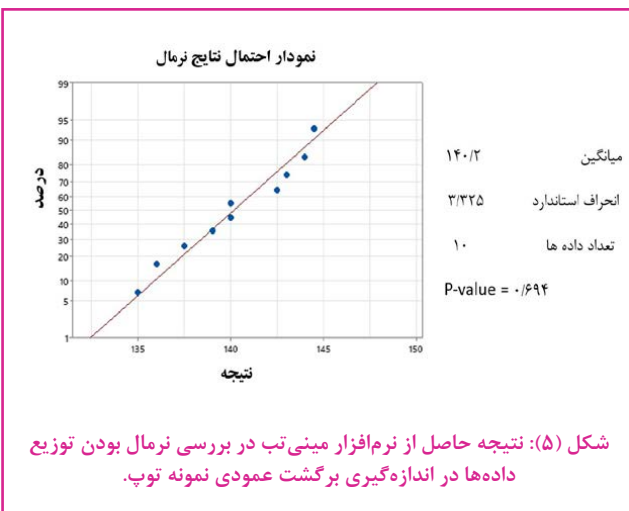
همچنین لازم به ذکر است که مسیر زیر در نرم افزار مینی تب، علاوه بر یکسری داده، برای چند سری داده، نرمال بودن را بررسی می کند.

Assistant > Graphical Analysis > Graphical Summary

بررسی نرمال بودن توزیع نتایج حاصل از اندازه گیری برگشت عمودی توپ

نتایج حاصل از اندازه گیری برگشت عمودی نمونه توپ فوتبال خارج سالن سایز (۵) لاستیکی با ۱۰ بار تکرار آزمون و در حالتی که یکسری داده در دسترس است، در جدول (۱) ذکر شده است:

با استفاده از مراحل Stat > Basic Statistics > Normality Test در محیط نرم افزار مینی تب، نرمال بودن داده ها مورد بررسی قرار گرفت که نتیجه به دست آمده در شکل (۵)، آورده شده است.



با توجه به نتیجه نشان داده شده در شکل (۵)، در سطح اطمینان ۹۵ درصد برای آزمون بررسی نرمال بودن نتایج اندازه گیری به روش اندرسون دارلینگ، مقدار $p\text{-value} \geq 0/05$ است (P-value = ۰/۶۹۴). لذا فرض H_0 را نمی توان رد کرد و در نتیجه، توزیع داده ها نرمال است.

جدول (۱): داده های حاصل از اندازه گیری برگشت عمودی نمونه توپ.

تکسین	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
نتیجه (cm)	۱۴۴/۵	۱۴۳/۰	۱۳۵/۰	۱۴۰/۰	۱۴۴/۰	۱۳۹/۰	۱۳۶/۰	۱۴۰/۰	۱۳۷/۵	۱۴۲/۵

نرم افزار مینی تب ۲۱ یک بسته نرم افزاری آماری است که با استفاده از آن می توان به طور تقریبی همه محاسبات آماری و نمودارهای مربوطه را انجام داد. همچنین این نرم افزار یکی از قوی ترین نرم افزارهای موجود در زمینه کنترل کیفیت آماری است. از این نرم افزار می توان برای تجزیه و تحلیل داده های گرفته شده از فرایند، تشخیص مشکلات موجود در فرایند تولیدی یا خدماتی، تجزیه و تحلیل مشکلات و غیره استفاده نمود. همچنین در این پژوهش، به منظور انجام بررسی نرمال بودن توزیع نتایج در آزمون اندازه گیری برگشت عمودی توپ فوتبال خارج سالن سایز (۵) لاستیکی، از آزمون نرمال بودن^۴ به کمک نرم افزار مینی تب ۲۱، استفاده شد.

بحث و نتایج

آزمون آماری نرمال بودن با استفاده از نرم افزار مینی تب، برای بررسی نرمال بودن داده ها به کار می رود. در این آزمون آماری فرض ها به صورت زیر تعریف می شود:

H_0 : data follow a normal distribution

H_1 : data do not follow a normal distribution

این آزمون آماری با استفاده از نرم افزار مینی تب و برای حالتی که یکسری داده در دسترس باشد، به صورت زیر انجام می شود:

Stat > Basic Statistics > Normality Test

پس از وارد کردن داده ها و انجام محاسبات، نرم افزار، مقدار P-Value را برای آزمون فرض H_0 و H_1 ارائه می دهد. نتایج به دست آمده را می توان به صورت ذیل تحلیل نمود:

◀ اگر مقدار $p\text{-value} \geq 0/05$ باشد، در سطح اطمینان ۹۵ درصد، فرض H_0 را نمی توان رد کرد. (توزیع داده ها نرمال است).

◀ اگر مقدار $p\text{-value} < 0/05$ باشد، در سطح اطمینان ۹۵ درصد، فرض H_0 رد می شود. (توزیع داده ها نرمال نیست).

نتیجه گیری

در این پژوهش، آزمون آماری نرمال بودن توزیع نتایج، با استفاده از نرم افزار مینی تب انجام شده است. برای این منظور، داده های حاصل از اندازه گیری برگشت عمودی یک نمونه توپ مورد بررسی قرار گرفتند. نتیجه حاصل شده حاکی از نرمال بودن توزیع داده ها است.

پی نوشت

1. minitab
2. The probability of obtaining test results at least as extreme as the result actually observed
3. Standard Deviation
4. Normality Test

مراجع

- [1] "ISO / IEC Guide 99:2007 International vocabulary of metrology-basic and general concepts and associated terms (VIM), "International Organization for Standardization, Geneva, 2008.
- [2] "ISO Guide 80:2014 Guidance for the In-house Preparation of Quality Control Materials (QCMs), "International Organization for Standardization, Geneva, 2014.
- [3] I. D. S. C. (IDS), "IDS-GDL-1484:2016 Guidelines for Quality Assurance of Measurement Results," 2016.
- [4] A. AIAG, " Measurement systems analysis (MSA), " Reference Manual, Third Edition, The Automotive Industries Action Group, Troy, 2010.
- [5] "ISO 5479:1997 Statistical interpretation of data-Tests for departure from the normal distribution , "International Organization for Standardization, Geneva, 1997.
- [6] <https://blog.faradars.org/normal-distribution/>

نویسندگان

رامین فتوحی^{۱*}مهدی پورقلی^۲

۱. مرکز تحقیقات صنایع انفورماتیک
 ۲. دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شهید بهشتی

*fotouhi@rcii.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۲۲

بهینه‌سازی واحدهای گاز سوز با استفاده از الگوریتم فرا ابتکاری آموزش - یادگیری

واژه‌های کلیدی

الگوریتم آموزش - یادگیری، الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی،
تولید هم‌زمان برق و حرارت، مدیریت انرژی.

چکیده

شرکت‌های خدماتی که وظیفه بهره‌برداری شبکه‌های برق شهرهای صنعتی را تأمین می‌کنند، برق مورد نیاز خود را از بازارهای برق و یا نیروگاه‌های گاز به‌دست می‌آورند. به‌منظور به حداقل رساندن هزینه شرکت، یک تابع هدف با در نظر گرفتن قیود تأمین انرژی مصرف‌کنندگان، قیود واحد گاز و قیود مربوط به سیستم بازیافت معرفی شده‌است. الگوریتم به کار برده شده برای بهینه‌سازی، الگوریتم فرا ابتکاری آموزشی - یادگیری است و درنهایت، نتایج مربوط به شبیه‌سازی الگوریتم معرفی شده با الگوریتم ژنتیک مقایسه شده‌است. کدهای مربوط به شبیه‌سازی در نرم‌افزار متلب^۱ ارائه شده‌است و نتایج مربوطه نشان می‌دهد که الگوریتم آموزش - یادگیری می‌تواند سریع‌تر از الگوریتم ژنتیک جواب بهینه مسئله را پیدا کند.

مقدمه

واحدهای تولید پراکنده برای اهداف بهینه‌سازی مانند بهبود مصارف انرژی، کاهش تلفات و افزایش قابلیت اطمینان شبکه توزیع استفاده می‌شوند. هزینه شرکت‌های خدماتی که مسئولیت بهره‌برداری از شبکه‌های برق شهرک‌های صنعتی را بر عهده دارند، با الگوریتم ژنتیک کمینه می‌شود و شرکت‌های ذکر شده، برق خود را از بازارهای برق یا نیروگاه‌های گاز به‌دست می‌آورند [۱]. روشی به‌منظور ارزیابی تولید بخار برای توربین گاز و موتور احتراق داخلی پیشنهاد شده‌است که درنهایت، نتایج خوبی در تجزیه و تحلیل اقتصادی سیستم‌های تولید هم‌زمان به‌دست می‌آید [۲]. تعدادی راه حل برای چالش صرفه‌جویی در انرژی در فرودگاه‌ها مانند سیستم‌های گرمایش، خنک‌کننده و برق (CHCP) ارائه شده‌است [۳]. یک چارچوبی که دارای چند هدف تصادفی است برای بهینه‌سازی تابع هزینه پیشنهاد شده‌است که شامل تلفات انرژی، انحراف ولتاژ و هزینه نصب تجهیزات می‌شود [۴]. توزیع بهینه‌سازی اقتصادی بین گرما و برق ارائه شده‌اند و مسئله به‌منظور رسیدن به سود بیشینه سیستم حل و بررسی شده‌است [۵]. از یک آنالیز انرژی - اقتصادی روی تعدادی میکروتوربین گازی به‌منظور تأمین بار حرارتی و الکتریکی استفاده می‌شود و درنهایت، تابع هدف مربوط به مسئله تعیین و بهینه‌سازی می‌شود [۶]. هدف اصلی این بود که سیستم تولید هم‌زمان به استقرار اقتصادی قابل قبولی دست یابد و درنهایت از بهینه‌سازی ازدحام ذرات به‌منظور رسیدن به نتایج بهینه استفاده شود [۷]. یک الگوریتم بهینه‌سازی مؤثر و قوی به‌منظور حل مسائل بهینه‌سازی پیشنهاد شده‌است که این الگوریتم، آموزش - یادگیری نامیده می‌شود. این الگوریتم در دو مرحله اجرا می‌شود. این روش بر تأثیر معلم روی دانش‌آموزان کار می‌کند و بهترین عضو جامعه به‌عنوان معلم انتخاب می‌شود و درنهایت معلم، میانگین اعضای جامعه را به‌سوی خودش هدایت می‌کند [۸]. یک الگوریتم ازدحام ذرات تکاملی و جدید به‌منظور بهینه‌سازی سیستم تولید هم‌زمان برق و حرارت ارائه شده که در خروجی سیستم از توربین بادی، مخزن انرژی حرارتی و بخاری برقی استفاده شده‌است [۹].

■ هزینه ناشی از انرژی تأمین نشده

هزینه ناشی از انرژی تأمین نشده از طریق رابطه (۴) محاسبه می‌شود [۱]:

رابطه (۴)

$$F_{ENS}(n, t) = \frac{h(t)}{N \cdot \rho} \sum_i U_i \cdot c_s(t) \cdot (1 + r_s)^n \cdot ((1 + r_N)^n \cdot P_{LO})$$

$$P_{LO} = PL_i(t) - \min\{(1 + r_N)^n \cdot PL_i, P_{CHP_i}^{max}\}$$

■ درآمد ناشی از بازیافت حرارت

درآمد ناشی از بازیافت حرارت مربوط به صاحب واحد بوده که این عامل باید از تابع هزینه کم شود. این رویکرد باعث می‌شود که واحدها در شین‌هایی با اولویت بار حرارتی بالاتر نصب شوند. درآمد معرفی شده طبق رابطه (۵) به دست می‌آید:

رابطه (۵)

$$R_{REC}(n, t) = \sum_i U_{bf} \cdot C_f \cdot (1 + r_f)^n \cdot QD_i(t) \cdot h(t) \cdot K_{CHP}$$

در نهایت، با معرفی تمامی عوامل دخیل، تابع هدف مطابق با رابطه (۶) به دست می‌آید:

رابطه (۶)

$$tot_cost = \sum_{n=1}^{N-1} cost(n, t) \cdot (1 + I)^{N-n}$$

$$cost(n, t) = F_{CHP-PUR}(n, t) + F_{NET-PUR}(n, t) + F_{LOSS}(n, t) + F_{ENS}(n, t) - R_{REC}(n, t)$$

■ قیود مسئله

اصلی‌ترین قیود مربوط به مسئله همان قیود شبکه هستند که مطابق با رابطه (۷) به دست می‌آید:

رابطه (۷)

$$P_{Gi} - P_{Li} = \sum_{i=1}^{n_{bus}} V_i V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij})$$

$$q_{Gi} - q_{Li} = \sum_{i=1}^{n_{bus}} V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij})$$

$$\sum_{i=1}^{n_{bus}} PL_i + \sum_{i=1}^{n_{bus}} PG_i + \sum_{i=1}^{n_{bus}} \sum_{j=1}^{n_{bus}} R_{ij} \cdot I_{ij}^2 = 0$$

$$|F_{ij}| \leq F_{ij}^{max}$$

$$V_{min} < V < V_{max}$$

و همچنین قیود مربوط به واحدهای گازسوز و محدوده حرارت بازیافتی از واحدهای گازسوز به ترتیب مطابق با روابط (۸) و (۹) محاسبه می‌شود:

شرح مسأله

برای بهینه‌سازی، مسئله باید از دیدگاه‌های مختلف مورد بررسی قرار گیرد. برای ایجاد یک طراحی بهینه، عوامل مختلفی باید در نظر گرفته شود. در مسائل بهینه‌سازی، سه قسمت از مسئله که شامل متغیرهای کنترل، قیود مسئله و تابع هدف مسئله بوده باید تعیین شود. روش شبه دینامیکی برای تعیین این متغیرها استفاده می‌شود. در این روش، مسئله نصب واحدهای گازی برای یک دوره یک ساله حل خواهد شد و در نهایت، یک طرح برای نصب واحدهای گازسوز برای هر سال با بهینه‌سازی واحدهای گازسوز با استفاده از اطلاعات سال قبل به دست می‌آید. برای انجام محاسبات ضروری، منحنی سالانه تداوم بار شبکه به چندین پله مساوی تخمین زده شده است.

◀ تابع هدف مسئله

تابع هدف مسئله به منظور کاهش هزینه شرکت در مدت زمان N سال تعریف می‌شود. هزینه مفروض شامل عوامل ذیل می‌شود:

■ هزینه خرید برق از واحدهای گازسوز

هزینه مربوط به خرید برق از واحدهای گازسوز طبق رابطه (۱) به دست می‌آید [۱]:

رابطه (۱)

$$F_{CHP-PUR}(n, t) = (1 + r_C)^n \cdot C_C(t) \cdot E_{CHP}(n, t)$$

■ هزینه خرید برق از بازار برق

به منظور محاسبه این هزینه، قیمت بازار برق به منحنی تداوم بار به پله‌های مساوی تقسیم می‌شود. روابط (۲) این هزینه را نشان می‌دهند [۱]:

رابطه (۲)

$$F_{CHP-PUR}(n, t) = (1 + r_N)^n \cdot C_N(t) \cdot [E_{LOAD}(n, t) - E_{CHP}(n, t)]$$

$$E_{LOAD}(n, t) = (1 + r_P)^n \cdot PL(t) \cdot h(t)$$

$$E_{CHP}(n, t) = \sum_{i=1}^n P_{CHP_i}(n, t) \cdot h(t) \cdot K_{CHP}$$

■ هزینه ناشی از تلفات

برای محاسبه هزینه ناشی از تلفات، از رابطه (۳) استفاده می‌شود [۱]:

رابطه (۳)

$$F_{LOSS}(n, t) = C_N(t) \cdot (1 + r_C)^n \cdot E_{LOSS}(n, t)$$

$$E_{LOSS}(n, t) = h(t) \cdot \sum_{i=1}^{n_{bus}} \sum_{j=1}^{n_{bus}} R_{ij} \cdot I_{ij}^2(n, t)$$

رابطه (۸)

$$q_{CHP_i}^{\min} \leq q_{CHP_i} \leq q_{CHP_i}^{\max}$$

$$p_{CHP_i}^{\min} \leq p_{CHP_i} \leq p_{CHP_i}^{\max}$$

$$\frac{P_{CHP_i}}{\sqrt{2P_{CHP_i}^2 + q_{CHP_i}^2}} \geq PF^{\min}$$

$$Q_{CHP_i}(n, t) \leq k_{heat} \cdot P_{CHP_i}$$

رابطه (۸)

رابطه (۹)

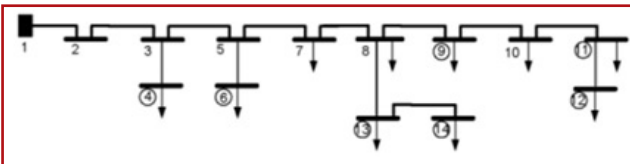
$$Q_{CHP_i}(n, t) \geq Q_{D_i}(t) \cdot (1 + r_h)^n$$

نتایج شبیه‌سازی

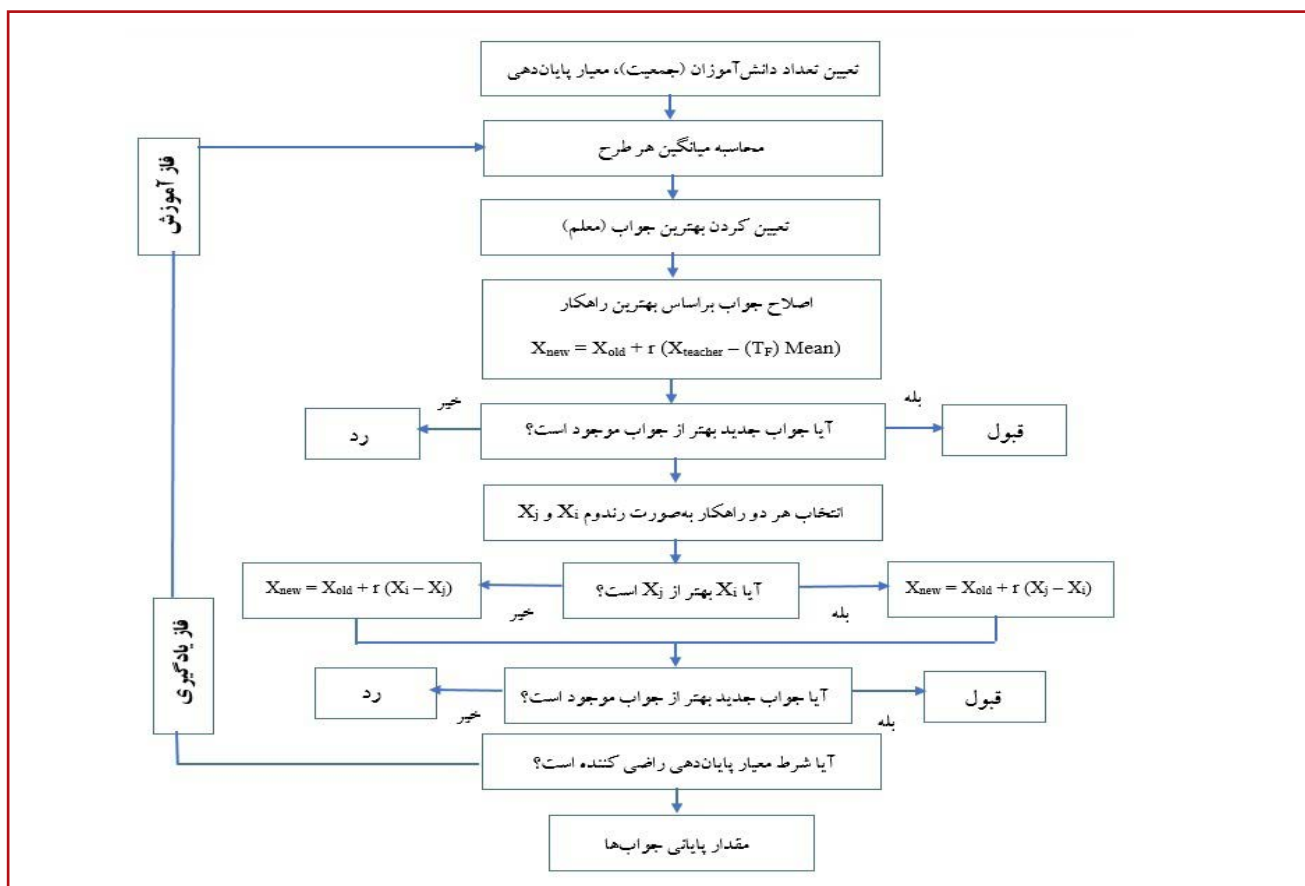
در جدول‌های (۱)، (۲) و (۳) اطلاعات مربوط به فیدر پیکو و عوامل ضروری به‌منظور حل مسئله داده شده‌اند. با توجه به شکل (۲)، تعداد ۱۴ عدد شین که مربوط به پست فوق توزیع در یکی از مناطق تهران است وجود دارد و به مقدار توان اکتیو و راکتیو هر یک از شین‌ها نیز اشاره شده‌است. وضعیت ۷ عدد از شین‌ها نیز برابر ۱ است. تمام مصرف‌کنندگان این پست را، واحدهای صنعتی تشکیل می‌دهند. در این تحقیق، واحدهای تولید هم‌زمان با اولویت تولید حرارت نصب می‌شوند.

بهینه‌سازی مسئله با استفاده از الگوریتم آموزش - یادگیری

روش بهینه‌سازی مؤثر مبتنی بر آموزش - یادگیری^۲ است که در دو مرحله اجرا می‌شود. این روش بر تأثیر معلم روی دانش‌آموزان کار می‌کند و بهترین عضو جامعه به‌عنوان معلم انتخاب می‌شود [۸]. روش آموزش - یادگیری، یک روش مبتنی بر جمعیت است. جمعیت به‌عنوان یک گروه از دانش‌آموزان کلاس در نظر گرفته شده‌است. همان‌گونه که گفته شد این روش در دو فاز اجرا می‌شود که اولین فاز، همان فاز معلم است و دومین فاز نیز همان فاز دانش‌آموز خواهد بود. در رابطه به کار رفته در روندنا

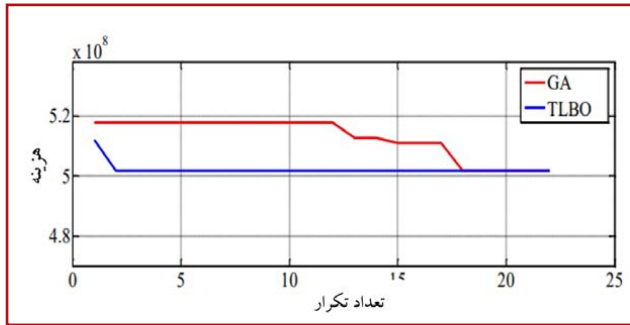


شکل (۲): نمودار فیدر پیکو [۸].

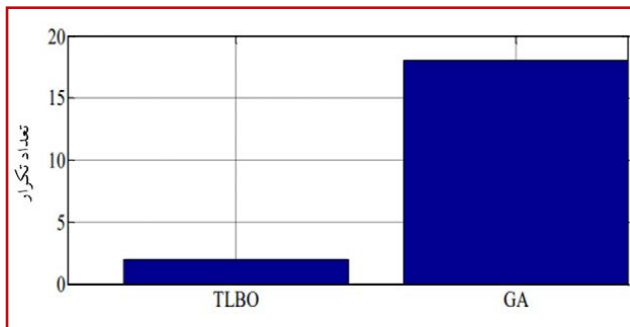


شکل (۱): روندنامی الگوریتم آموزش - یادگیری [۸].

در شکل (۳) سرعت همگرایی بین دو الگوریتم و در شکل (۴) نتایج مربوط به دو الگوریتم با هم مقایسه شده‌اند و دیده می‌شود که الگوریتم آموزش - یادگیری سریع‌تر از الگوریتم ژنتیک توانسته است جواب بهینه مسئله را پیدا کند و در همان گام‌های اولیه جواب مربوطه را پیدا کرده است این در حالی است که الگوریتم ژنتیک جواب بهینه را در تعداد تکرار بالاتری به دست آورده است.

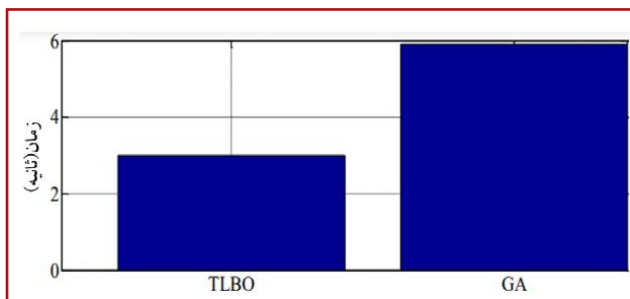


شکل (۳): مقایسه سرعت همگرایی بین دو الگوریتم.



شکل (۴): مقایسه نرخ همگرایی بین دو الگوریتم.

همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود الگوریتم آموزش - یادگیری نسبت به الگوریتم ژنتیک محاسبات را سریع‌تر انجام می‌دهد؛ بنابراین، مدت زمان اجرایی آن نیز کمتر است که همین مورد از دیگر مزایای الگوریتم آموزش - یادگیری است. زمان اجرایی برای الگوریتم ژنتیک ۵/۹ ثانیه است در حالی که مدت زمان اجرایی برای الگوریتم آموزش - یادگیری ۳ ثانیه است؛ بنابراین، الگوریتم آموزش - یادگیری سریع‌تر از الگوریتم ژنتیک در انجام محاسبات عمل می‌کند.



شکل (۵): مقایسه مدت زمان اجرایی بین دو الگوریتم.

جدول (۱): عوامل لازم به منظور حل مسئله [۱].

r_c	r_n	r_e	r_h
۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۲
I	N	$PF_k \min$	K_{heat}
۰/۱۲	۵	۰/۸۵	۱/۱
K_{CHP}	U_{bf}	C_f	r_s
۰/۹	۰/۲۵	۴۹	۰/۰۵

جدول (۲): مشخصات شین‌ها [۱].

شماره	کیلووات	کیلووات	دیماند حرارتی به کیلووات	وضعیت واحدها
۱	۰	۰	۰	۰
۲	۰	۰	۰	۰
۳	۰	۰	۰	۰
۴	۳۱۵	۲۴۱	۳۷۸	۱
۵	۰	۰	۰	۰
۶	۵۶۶	۴۳۳	۶۷۹	۱
۷	۹	۷	۰	۰
۸	۴	۳	۰	۰
۹	۳۱۵	۲۴۱	۳۷۸	۱
۱۰	۱۱	۹	۰	۰
۱۱	۳۲۱	۲۴۵	۳۸۵	۱
۱۲	۴۶۹	۳۵۹	۵۶۳	۱
۱۳	۷۳۴	۵۶۱	۸۸۱	۱
۱۴	۵۹۵	۴۵۵	۷۱۴	۱

جدول (۳): مکان کلیدها [۱].

شماره شناسایی شین	شماره خط
۱	۱
۵	۲
۶	۳
۹	۴
۱۲	۵
۱۳	۶
۱۳	۷

در این مقاله هزینه‌های مربوط به شرکت خدماتی به‌علاوه قیود دخیل در مسئله ارائه شد و همچنین مدل ریاضی مربوط به مسئله، مدل‌سازی و درنهایت، با استفاده از داده‌های مربوط به شهرک صنعتی و همچنین به‌کارگیری الگوریتم‌های ژنتیک و آموزش - یادگیری تابع هدف مربوط به مسئله عنوان شده بهینه‌سازی شد. نتایج شبیه‌سازی به‌دست آمده مربوط به مسئله نشان داد که هر دو الگوریتم معرفی شده به خوبی می‌توانند جواب بهینه مسئله را پیدا کنند ولی الگوریتم آموزش - یادگیری نسبت به الگوریتم ژنتیک، سریع‌تر می‌تواند به جواب بهینه مسئله همگرا شود و همچنین الگوریتم آموزش - یادگیری قادر است که محاسبات خود را در مدت زمان کمتری انجام دهد.

عوامل و علائم استفاده شده	توضیح کارکرد هر عامل	واحد هر عامل
P_{Gi}	مجموع توان اکتیو تولیدی در شین i	(p.u.)
P_{Li}	مجموع توان اکتیو بار موجود در شین i	(p.u.)
C_f	قیمت گاز مصرفی	(Rls/m ³)
U_{bf}	میزان گاز مصرفی	(m ³ /kWh)
B_{ij}	بخش موهومی ادمیتانس خط بین شین‌های i و j	(p.u.)
F_{ij}	توان ظاهری بین شین‌های i و j	(p.u.)
G_{ij}	بخش حقیقی ادمیتانس خط بین شین‌های i و j	(p.u.)
I_{ij}	جریان الکتریکی بین شین‌های i و j	(p.u.)
θ_{ij}	زاویه ادمیتانس خط بین شین‌های i و j	(p.u.)
K_{CHP}	ضریب دسترس‌پذیری واحدهای گازسوز نصب شده در سال n	-
R_{ij}	مقدار مقاومت خط بین شین‌های i و j	(p.u.)
U_i	میانگین زمان قطع بار i در یک سال	(hour/year)
V_i	ولتاژ شین i	(p.u.)
V^{max}	بیشینه ولتاژ مجاز در هر شین	(p.u.)
V^{min}	کمینه ولتاژ مجاز در هر شین	(p.u.)
k_{heat}	ضریب بازیافت حرارت واحد گازسوز	-
N	بازه زمانی برای حل مسئله	(year)
PF_k^{min}	حداقل ضریب مجاز برای واحد گازسوز k	-
$Cost(n)$	هزینه بهره‌برداری از شبکه در سال n	(Rls)
tot_cost	کل هزینه بهره‌برداری از شبکه	(Rls)

عوامل و علائم استفاده شده	توضیح کارکرد هر عامل	واحد هر عامل
F_{ENS}	هزینه ناشی از انرژی تأمین شده	(Rls)
$F_{CHR-PUR}$	هزینه خرید برق از واحدهای گازسوز	(Rls)
F_{LOSS}	هزینه ناشی از تلفات	(Rls)
$F_{NET-PUR}$	هزینه خرید برق از بازار برق	(Rls)
R_{REC}	درآمد بازیافت حرارت	(Rls)
E_{CHP}	مجموع انرژی الکتریکی تولید شده توسط واحدهای گازسوز	(kWh)
E_{LOAD}	انرژی مصرفی بارهای شبکه	(kWh)
E_{LOSS}	انرژی تلف شده در شبکه	(kWh)
C_C	قیمت خرید برق از واحدهای گازسوز	(Rls/kWh)
C_N	قیمت خرید برق از شبکه	(Rls/kWh)
C_S	هزینه بار قطع شده	(Rls/kWh)
$h(t)$	قیمت خرید برق از واحدهای گازسوز	(Rls/kWh)
n_{bus}	تعداد شین‌های شبکه	-
r_C	نرخ افزایش قیمت برق خریداری شده از واحدهای گازسوز	-
r_N	نرخ افزایش قیمت برق شبکه	-
r_h	نرخ افزایش بار حرارتی شبکه	-
r_e	نرخ افزایش بار الکتریکی شبکه	-
r_s	نرخ افزایش قیمت بار قطع	-
$q_{CHP_i}^{max}$	بیشترین حرارت قابل بازیافت توسط واحد گازسوز i	(kW)
$q_{CHP_i}^{min}$	کمترین حرارت قابل بازیافت توسط واحد گازسوز i	(kW)
Q_{CHP_i}	حرارت بازیافتی توسط واحد گازسوز i	(kW)
Q_{D_i}	بار حرارتی موجود در شین i	(kW)
q_{G_i}	مجموع توان راکتیو تولیدی در شین i	(kW)
P_{CHP_i}	توان الکتریکی خروجی واحد گازسوز i	(kW)
q_{CHP_i}	توان راکتیو تولیدی واحد گازسوز i	(kVAR)
$P_{CHP_i}^{max}$	بیشترین توان الکتریکی تولیدی توسط واحد i	(kW)
$P_{CHP_i}^{min}$	کمترین توان الکتریکی تولیدی توسط واحد i	(kW)

پی نوشت

1. Matlab
2. Teaching-learning based optimization

مراجع

- [1] M. Ansari, M. S. Payam, M. Abdollahi, and A. S. Dehkordi, "Optimal Parameter Selection of Gas-Fired Units for Distributed Cogeneration in an Industrial Town Based on an Industrial Service Company Perspective," Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, Vol.4, no.9, pp.1062-1066, May. 2012.
- [2] L. Giaccone, A. Canova, "Economical comparison of CHP systems for industrial user with large steam demand," Applied Energy, Vol. 86, no.6, pp. 904-914, Jun. 2009.
- [3] E. Cardona, A. Piacentino, and F. Cardona, "Energy saving in airports by trigeneration. Part I: Assessing economic and technical potential," Applied Thermal Engineering, Vol. 26, no. 14_16 pp.1427-1436, Oct. 2006.
- [4] A. Abbasi, and A. Seifi, "Simultaneous Integrated stochastic electrical and thermal energy expansion planning," Generation, Transmission & Distribution, IET, Vol. 8, no.6, pp. 1017-1027, Feb. 2014.
- [5] F. Marty, S. Serra, S. Sochard, J. M. Reneaume, "Economic optimization of a combined heat and power plant: heat vs electricity," Energy Procedia, Vol. 116, pp. 138-151, Jun. 2017.
- [6] S. Sanaye, and M. R. Ardali, "Estimating the power and number of micro-turbines in small-scale combined heat and power systems," Applied Energy, Vol. 86, no. 6, pp. 895-903, Jun. 2009.
- [7] A. K. Basu, A. Bhattacharya, S. Chowdhury, and S. P. Chowdhury, "Planned scheduling for economic power sharing in a CHP-based micro-grid," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 27, no. 1, pp. 30-38, Feb. 2012.
- [8] R.V. Rao, V. J. Savsani, and D. P. Vakharia, "Teaching-Learningbased optimization:A novel method for constrained mechanical design optimization problems," Computer-Aided Design, Vol. 43, no. 3, pp. 303-315, Mar. 2011.
- [9] A. Lorestani, M. M. Ardehali, "Optimization of autonomous combined heat and power system including PVT, WT, storages and electric heat utilizing novel evolutionary particle swarm optimization algorithm," Renewable Energy, Vol. 119, pp. 490- 503, Apr. 2018.

نویسندگان

مریم احمدی^{۱*}
خسرو آقایی پور^۲

۱. بخش بیوتکنولوژی مجتمع آزمایشگاهی بهشت آئین
۲. مدیریت و مدیر فنی مجتمع آزمایشگاهی بهشت آئین

*Maryam.ahmadi3836@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۱۹

بررسی میزان گلوتن در مواد غذایی با استفاده از روش الیزا

چکیده

گلوتن یکی از ترکیبات غذایی است که به دلیل ویژگی‌های فناورانه و ارگانولپتیکی به وفور در صنایع غذایی استفاده می‌شود. بیماری سلیاک یک اینتروپاتی خودایمنی است که به دلیل عدم تحمل دائمی به گلوتن ایجاد شده‌است. این بیماری زمانی اتفاق می‌افتد که بیماران مستعد ژنتیکی در معرض گلوتن که پروتئین عمده موجود در گندم، جو، چاودار و غلات مرتبط است، قرار می‌گیرند و پاسخ ایمنی اختصاصی در آنها فعال می‌شود. در حال حاضر، رژیم غذایی بدون گلوتن تنها راه درمان بیماران سلیاکی است. حذف غذاهای حاوی گندم، جو و چاودار باعث کاهش علائم می‌شود و کیفیت زندگی را بهبود داده و حتی مرگ و میر را کاهش می‌دهد. بدین منظور، انجام آزمون کنترلی به‌منظور تعیین و تأیید عدم وجود گلوتن در فرآورده‌ها و غذاهای مصرفی این بیماران ضروری است. الیزا به‌عنوان روش مرسوم تشخیص گلوتن توسط انجمن شیمیدانان به تصویب رسیده است. الیزا قادر است میزان گلوتن را هم به‌طور طبیعی و هم گرما دیده تشخیص داده و آن را به‌صورت کمی اندازه‌گیری نماید. سنجش الیزا می‌تواند مقدار کمی گلیادین‌ها و هوردئین‌ها را در محصولات فرآوری شده و فرآوری نشده که بر پایه گندم و جو هستند و همچنین محتوای گلوتن محصولات هیدرولیز شده را تخمین بزند.

واژه‌های کلیدی

گلوتن، گلیادین، بیماری سلیاک، الیزا.

گلوتن یکی از ترکیبات غذایی است که به دلیل ویژگی‌های ارگانولپتیکی، فراوانی و قیمت مناسب به وفور در صنایع غذایی استفاده می‌شود [۱]. گندم یکی از محصولات غذایی اصلی است که در سطح جهانی کشت، مصرف و تجارت می‌شود. دانه گندم ۸ تا ۱۵ درصد پروتئین داشته که شامل ۱۰ تا ۱۵ درصد آلبومین/گلوبولین و ۸۵ تا ۹۰ درصد گلوتن است. گلوتن ترکیبی پیچیده شامل صدها پروتئین متمایز (به‌طور عمده گلیدین و گلوٹنین) است. وارپته‌های مختلف گندم در محتوای پروتئین و ترکیب و توزیع پروتئین‌های گلوتن تفاوت می‌کنند [۲].

بیماری‌های مرتبط با گلوتن به‌عنوان حساسیت و واکنش‌های نامطلوب به گلوتن تعریف شده‌اند که توسط واکنش نایجای سیستم ایمنی ایجاد می‌شوند. بیماری سلیاک^۱ و آلرژی ایمونوگلوبولین E^۲ ایجاد شده به واسطه گندم دو بیماری شناخته شده هستند [۳]. ارزیابی رژیم‌های غذایی استفاده شده در طول زمان نشان داده‌اند که گندم یکی از رایج‌ترین محصولات است که مسبب این بیماری‌ها بوده و مشکلات ایجاد شده در این بیماران و علائم آزاردهنده گوارشی متعدد آنها را ایجاد می‌کند [۲].

ترکیبات گندم

دانه‌های گندم به‌طور عمده از کربوهیدرات‌ها، پروتئین‌ها، لیپیدها و موادمعدنی تشکیل شده‌اند. در حالی که این مولفه‌ها می‌توانند غذای اصلی را برای بیشتر مردم فراهم کنند، برای جمعیت اندکی که حساس هستند، مصرف گندم سبب واکنش‌های التهابی و حساسیت‌زا می‌شود. با این حال همه ترکیبات گندم باعث ایجاد این حساسیت نمی‌شود. گلوبولین‌ها، آلبومین‌ها، گلوٹن‌ها و فروکتان‌ها در برخی افراد هضم سختی دارند و باعث ایجاد حساسیت می‌شوند [۴].

ساختار گلوتن

گلوتن یک ترکیب بسیار پیچیده با چندشکلی آلی بالا است که با پروتئین‌های ویژه‌ای که گلوٹنین و گلیدین را کد می‌کنند، مشخص می‌شود. علاوه‌بر این، هر ژنوتیپ گندم انواع و مقادیر منحصر به فردی از این ترکیبات را تولید می‌کند که می‌تواند با شرایط مختلف رشد و فرایندهای فناورانه تفاوت کند. بیان پروتئین و کربوهیدرات یک ژنوتیپ می‌تواند بسته به محیطی که در آن رشد کرده است، تغییر کند [۴].

بیماری سلیاک

بیماری سلیاک یک اینتروپاتی خود ایمنی حساسیت به گلوتن است که به دلیل عدم تحمل دائمی به گلوتن ایجاد شده‌است و افراد در تمام سنین در سراسر جهان را تحت تاثیر قرار می‌دهد [۵ و ۶]. زمانی تصور می‌شد که

بیماری سلیاک یک بیماری نادر در کودکان است که با علائمی مانند اسهال مشخص می‌شود اما در واقع بیماری سلیاک یک اختلال چند سیستمی، در نتیجه پاسخ ایمنی به گلوتن در افرادی است که به‌صورت ژنتیکی مستعد هستند [۶]. سلیاک پاسخ ایجاد شده به واسطه سلول‌های T به عدم تحمل و مقاومت در هضم پپتیدهای گلوتن است [۷]. بیماری سلیاک زمانی اتفاق می‌افتد که بیماران مستعد ژنتیکی در معرض گلوتن که پروتئین عمده در گندم، جو، چاودار و غلات مرتبط است، قرار می‌گیرند و سیستم پاسخ ایمنی آنها در برابر این پروتئین فعال می‌شود [۸]. بررسی‌ها نشان داده است که عوامل محیطی، عوامل عفونی، ویژگی‌های اجتماعی-اقتصادی و همچنین وجود هاپلوتیپ‌های HLA-DQ2 یا HLA-DQ8 و یا تغییرات ژنتیکی در تعدادی از ژن‌های non-HLA، احتمال ایجاد بیماری سلیاک را بالا می‌برند [۵].

اهمیت توسعه محصولات بدون گلوتن

در این بیماران، پیشگیری کامل از خوردن مواد غذایی و فرآورده‌های حاوی گلوتن باعث بهبود التهاب و مشکلات روده شده و تمام عوارض گوارشی، تغذیه‌ای و سایر علائم برطرف می‌شود [۹]. همچنین پایبندی به رژیم غذایی فاقد گلوتن، خطر توسعه بسیاری از عوارض مزمن طولانی و پیش‌رونده حاد بیماری سلیاک را کاهش می‌دهد. اگرچه در ظاهر پیروی از رژیم غذایی فاقد گلوتن ممکن است ساده به نظر برسد اما رعایت این رژیم غذایی چندین آسان و بی‌دغدغه نیست. این برنامه غذایی نه تنها شامل حذف غلات حاوی گلوتن و تمامی محصولات حاوی آنها است،

جدول (۱): لیست مواد غذایی دارای گلوتن و فاقد گلوتن [۶].

مواد غذایی بدون گلوتن	مواد غذایی حاوی گلوتن
دانه تاج خروس	جو
آروروت	بلغور گندم
آردهای لوبیا (انواع آجیل، باقالا، رومانو)	چسب غلات
گندم سیاه	آرد چا پاتی
ذرت	بلغور عربی
باقالا	گندم آلمانی
تخم کتان	گندم دوروم
انواع آجیل	گندم اینکورن (تک دانه)
هامنی (ذرت خشک فرآوری شده)	گندم تتراپلوئید
آرد حبوبات	گندم فارینا
ارزن	گندم فارو (سه گونه)
آرد مونتینا	گندم فو
آرد فندق و وعده غذایی فندقی	آرد گلوتن و گلوتن
جو دوسر (بدون آلودگی با گلوتن)	آرد کامل گندم
آرد نخود	گندم کاموت
آرد و نشاسته سیبزمینی	مالت (عصاره مالت، طعم دهنده مالت، شیر مالت، سرکه مالت)
کینوا	نان فتیر
تمام انواع برنج (سفید، قهوه‌ای، شیرین، وحشی، جاسمین، باسماتی، گلو تینوس، پولیش، بران)	جو دوسر (بیشتر شرکت‌های تجاری، سبوس جو دوسر، شیر جو دوسر)
ساگو	اورزو (پاستا)
آرد سورگوم	چاودار
آرد سویا	گلو تن گندم (ماده غذایی حاوی گلو تن)
تاپیوکا	سمولینا
آرد علف دسته‌ای	تریتیکاله
-	گندم (جوانه، شیر، نشاسته)

بلکه نیاز به هوشیاری همیشگی و بی‌وقفه به‌منظور پرهیز از خوردن این خوراکی‌ها دارد که حتی می‌تواند حس انزوا، فشار اجتماعی و آسیب‌های روحی روانی نیز به همراه داشته باشد. از آنجایی که بیشتر نان‌ها، بیسکویت‌ها، ماکارونی‌ها، کیک‌ها، کلوچه‌ها، غلات صبحانه، شیرینی‌ها و سوپ‌ها از گندم و ترکیبات واجد گلوتن تهیه می‌شوند، این بیماران باید از همه این خوراکی‌ها اجتناب کنند. موارد بیان شده نشان دهنده نیاز به تغییر کامل سبک زندگی است که ممکن است برای همه قابل اجرا نباشد. با توجه به همه این دلایل، امروزه تقاضا برای محصولات تأیید شده عاری از گلوتن سال به سال در حال افزایش است [۱۰]. در حال حاضر، رژیم غذایی بدون گلوتن تنها راه کنترل بیماری سلیاک است. حذف غذاهای حاوی گندم، جو و چاودار باعث بهبود علائم و ویژگی‌های بافتی و سرولوژیکی می‌شود و کیفیت زندگی را بهبود و حتی مرگ و میر را کاهش می‌دهد. با این حال، به دلیل آلودگی متقابل مواد غذایی با مواد حاوی گلوتن، هزینه بالای محصولات و محدودیت در دسترس بودن مواد غذایی بدون گلوتن، کنترل این بیماری می‌تواند دشوار باشد [۵] و [۶]. در رژیم غذایی بدون گلوتن تمام غذاها و فرآورده‌های حاوی گلوتن شامل گندم، چاودار و جو و مشتقات آنها (جدول (۱)) حذف شده‌اند. برای این بیماران حتی مقدار کمی گلوتن ممکن است خطرناک باشد [۱۱].

در حال حاضر، محصولات غذایی بدون گلوتن بخش سودآوری در صنایع غذایی با ارزش تخمینی چندین میلیارد دلار را تشکیل می‌دهد. تصور بی‌اساسی در جامعه وجود دارد که رژیم غذایی بدون گلوتن یک رژیم غذایی سالم است در حالی که رژیم غذایی بدون گلوتن برای افراد سالم از نظر پزشکی غیرقابل توجیه بوده و رژیم مناسبی نیست. در حال حاضر، فقط بیمارانی که مبتلا به سلیاک هستند به‌صورت مادام‌العمر باید از یک رژیم سخت بدون گلوتن پیروی کنند و بیمارانی که آلرژی گندم به واسطه ایمونوگلوبولین E دارند، باید از قرار گرفتن در معرض گلوتن به هر شکلی خودداری کنند [۳]. براساس کمیسیون مربوط به مواد غذایی و آیین‌نامه اجرایی کمیسیون و سازمان غذا و داروی ایالت متحده آمریکا محصولاتی که برچسب بدون گلوتن می‌خورند باید میزان گلوتن آنها کمتر از ۲۰ میلی‌گرم در کیلوگرم (ppm) [۱۲ و ۱۳] و محصولاتی که برچسب گلوتن کم می‌خورند میزان گلوتن آنها باید بین ۲۰ تا ۱۰۰ میلی‌گرم در کیلوگرم (ppm) باشد [۱۴]. از آنجایی که این مقادیر تعیین شده‌اند، فراهم کردن روش‌ها و ابزارهای دقیق و با قابلیت استفاده به نسبت آسان که بتوانند با دقت و صحت مقادیر گلوتن در مواد غذایی

به مراتب مطمئن تری را ایجاد می کنند. الیذاها می توانند انواع متفاوتی داشته باشند [۱۶].

مختلف را اندازه بگیرند، مهم است [۱۵].

الیزا چیست؟

دستگاه خوانشگر الیزا و آنالیز گلوتن

دستگاه خوانشگر میکروپلیت به طور معمول به نام های میکروفتمتریک و خوانشگر الیزا نیز نامیده می شود. خوانشگر الیزا داده های زیستی و شیمیایی را با استفاده از جذب نوری در طول موج های خاصی تشخیص داده و پردازش می کند. الیزا به عنوان روش مرسوم تشخیص گلوتن توسط انجمن شیمیدانان به تصویب رسیده است. الیزا قادر است میزان گلوتن اصلی و گرما دیده را به صورت کمی به دست آورد. این روش سنجش که توسط کمیسیون مربوط به مواد غذایی کدکس^۵ تایید شده است، می تواند مقادیر جزئی از گلیادین ها و هور دئین ها را در محصولات فرآوری شده و فرآوری نشده که بر پایه گندم و جو هستند و همچنین محتوای گلوتن محصولات هیدرولیز شده را تخمین بزند؛ بنابراین، برای جلوگیری از مصرف گلوتن در افرادی که به این پروتئین حساسیت دارند لازم است که آنالیز الیزا به منظور بررسی میزان گلوتن محصولات مختلف انجام شود. از آنجایی که با گذشت زمان، روش های آزمایش حساس تر و پیشرفته تر شده اند این نگرانی وجود دارد که بسیاری از محصولات، معیارهای برچسب زنی به عنوان محصولات بدون گلوتن را نداشته باشند [۲].

واژه الیزا^۳ سنجش ایمنوسوربنت مرتبط با آنزیم است که به طور عمومی برای سطوح کمی مولکول ها و ترکیبات خاص در یک نمونه استفاده می شود. به طور معمول، نمونه های مختلفی برای آزمون در الیزا استفاده می شوند که شامل سرم، پلاسما، مایع رویی کشت سلول، لیزشده های سلولی، بزاق، ادرار و عصاره لیزشده های بافت و انواع محلول های حاوی مولکول های زیستی مختلف هستند. الیزا به طور معمول در میکروپلیت های حاوی چاهک های کوچک که دارای پوششی از آنتی بادی خاص گیرنده برای آنالیت مورد نظر هستند، انجام می شود. به طور معمول بعد از انکوباسیون با نمونه های آزمایشگاهی، استاندارد ها و یا کنترل ها، آنالیت هدف توسط این آنتی بادی ها جذب می شود. آنتی بادی تشخیصی که به اپی توپ های مختلف روی آنالیت هدف که حاوی آنزیم گزارشگر^۴ است، برای تکمیل این سنجش استفاده می شود. یک محلول سوبسترا به طور پی در پی اضافه شده تا سیگنالی تولید شود که متناسب با مقدار آنالیت محدود شده است. الیزا روش سریع و آسانی محسوب می شود که قادر به ردیابی کمتر از یک نانوگرم از یک پروتئین است و آن را می توان هم با پادتن های پلی کلونال و هم با پادتن های مونوکلونال انجام داد؛ با این حال استفاده از پادتن های مونوکلونال نتایج

نتیجه گیری

در سراسر دنیا، غلات حاوی گلوتن (گندم، چاودار، جو و جو دوسر) به طور گسترده مصرف می شود. گلوتن یک شبکه پروتئینی پیچیده است که نقش مهمی در ایجاد بیماری سلیاک دارد. بیماری سلیاک بیماری مرتبط با مصرف گلوتن است. برای آنالیز گلوتن از روش الیزا استفاده می شود که در نهایت، نتایج این آزمون با استفاده از خوانشگر الیزا مورد بررسی قرار گرفته و میزان گلوتن نمونه مورد نظر به دست می آید که این موضوع به بیماران سلیاکی کمک می کند تا بتوانند با اطمینان بیشتری مواد غذایی فاقد گلوتن را مصرف کرده و از عوارض و خطرات این بیماری در امان باشند.

پی نوشت

1. Celiac disease (CD)
2. Immunoglobulin E (IgE)
3. The enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA)
4. Reporter
5. Codex

- [1] L. Day, M. Augustin, I. Batey and C. Wrigley. Trends in Food Science & Technology, 17 (2006) 82–90.
- [2] J.R. Biesiekierski, Gastroenterology and Hepatology, 32 (2017) 78–81.
- [3] B. Cabanillas, CRITICAL REVIEWS IN FOOD SCIENCE AND NUTRITION, 60 (2019) 2606–2621.
- [4] L. Kissing Kucek, L.D.Veenstra, P. Amnuaycheewa and M.E. Sorrells, Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 14 (2015) 285-302.
- [5] G. J. Tack, W. H. M. Verbeek, M. W. J. Schreurs and C.J. J. Mulder. Nature journal, 7 (2010) 204-213.
- [6] M. Niewinski. Journal of the AMERICAN DIETETIC ASSOCIATION, 108 (2008) 661-672.
- [7] P.H.R. Green, B. Lebwohl, R. Greywoode, Allergy Clin Immunol, 135 (2015) 1099–1106.
- [8] J.R. Biesiekierski and J. Iven, United European Gastroenterology Journal, 3 (2015) 160-165.
- [9] M. Poonam Dhankhar, International Journal of Engineering Science Invention, 2 (12) (2013) 10-19.
- [10] P. Jnawali, V. Kumar, B. Tanwar, Food Science and Human Wellness, 5 (2016) 169-176.
- [11] A. Fasano and C. Catassi, GASTROENTEROLOGY, 120 (2001), 636–651.
- [12] R. Hochegger, W. Mayer, M. Prochaska, Foods, 4 (2015), 654–664.
- [13] E. Commission, Official Journal of the European Union, 228 (2014) 5–8.
- [14] A.K. Verma, S. Gatti, T. Galeazzi, C. Monachesi, L. Padella, G.D. Baldo, R. Annibali, E. Lionetti, C. Catassi, Nutrients, 9 (2017) 1-10.
- [15] Z. Bugyi, K. Torok, L. Hajast, Z. Adonyi, B. Popping, S.Tomoskozi, Quality Assurance and Safety of crops and foods, 5 (2013) 79-87.
- [16] S. Catherine, Journal of Clinical and Experimental Pharmacology, 11 (2021) 1.

نویسنده

اسماعیل رنجبری^۱

۱. مدیر و رابط شبکه آزمایشگاهی دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

esmaeil.ranjbari@srbiau.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۱۶

تولید نانوالیاف با روش‌های توین الکتروریسی

چکیده

رویکردهای زیادی در مقالات برای افزایش بهره‌وری و رفع نواقص ساختاری نانوالیاف پیشنهاد شده‌است. آنها بیشتر بر افزایش تعداد جت‌ها از طریق اصلاح سوزن، استفاده از سوزن‌های متعدد و الکتروریسی بدون سوزن تمرکز کرده‌اند که هر کدام دارای معایب و مزایایی هستند. درست است که در الکتروریسی بدون سوزن مشکل گرفتگی سوزن و سرعت پایین تولید حل شده‌است، اما مشکل تبخیر سریع حلال‌های فرار که منجر به کاهش دقت و عدم تکرارپذیری در مراحل ساخت می‌شود هنوز به‌طور کامل مرتفع نشده‌است. امروزه تولید در مقیاس صنعتی نانوالیاف به دلیل کاربرد فراوان آنها در حوزه‌های مختلف در جهان اهمیت فراوانی یافته است. گرچه تولید نانوالیاف در آزمایشگاه آسان است، اما وقتی صحبت از تولید در مقیاس صنعتی به میان می‌آید، به دلیل شرایط سخت کنترل عوامل محیطی و دستگامی که تاثیر مستقیم بر ساختار و خواص نانوالیاف دارند، کمی سخت به نظر می‌آید.

واژه‌های کلیدی

نانوالیاف، الکتروریسی، عوامل موثر.

با کاهش قطر الیاف پلیمری از میکرومتر به نانومتر خواص منحصر بفردی همچون نسبت سطح به حجم بسیار بالا، انعطاف‌پذیری و خواص مکانیکی عالی به الیاف بخشیده شده که گستره کاربرد آنها را بسیار وسیع می‌کند. تاکنون روش‌های متعددی برای تولید الیاف نانومتری از جمله روش کشش^۱، سنتز قالبی^۲، جداسازی فازی^۳ و روش خودبه‌خودی^۴ پیشنهاد شده‌است. از بین روش‌های مطرح شده برای تولید نانوالیاف، روش الکتروریسی^۵ علاوه بر سادگی از بازدهی بالاتری نیز برخوردار است و می‌توان گفت این روش تنها روشی است که در آینده می‌توان از آن برای تولید نانوالیاف به صورت هم‌جهت و پیوسته استفاده نمود. الکتروریسی به دو روش سوزنی و بدون نازل انجام می‌گیرد. از معایب روش الکتروریسی سوزنی می‌توان به میزان تولید پایین و گرفتن سوزن در حین ریسندگی اشاره کرد، اخیراً روش جدیدی برای ساخت نانوالیاف استفاده می‌شود که به آن الکتروریسی بدون نازل می‌گویند که توجه زیادی را به خود جلب کرده و تبدیل به یک راهبرد امیدوارکننده برای بهبود بهره‌وری در تولید نانوالیاف شده‌است. تولید نانوالیاف از نقطه نظر تحقیقاتی و گستره کاربرد و ساخت محصول بسیار جالب است و در حال حاضر تولید این الیاف با روش الکتروریسی یک موضوع جهانی بوده و میلیون‌ها دلار در مورد آن هزینه شده‌است. از جمله کاربردهای مهم این الیاف می‌توان به استفاده از آن در ساخت نانوکامپوزیت‌های پلیمری، کاربردهای پزشکی، نظامی و فیلتراسیون‌های مختلف اشاره کرد [۱ تا ۳].

● روش‌های تولید نانوالیاف

در سال‌های اخیر برای تهیه نانوالیاف از روش‌های متعددی مانند جداسازی فازی، روش خودبه‌خودی، اعمال کشش، سنتز قالبی و الکتروریسی کمک گرفته شده‌است. از بین روش‌های ذکر شده تنها روش الکتروریسی از بازدهی بالا برخوردار بوده و بیشتر از این روش برای تولید نانوالیاف استفاده می‌شود [۴ تا ۶].

● روش اعمال کشش

این روش، فرایندی مشابه با فرایند خشک‌ریسی در صنعت نساجی است که در این روش از یک میکروپیپت با قطری در حدود چند میکرومتر برای تولید نانوالیاف استفاده می‌شود؛ به طوری که این میکروپیپت در نزدیکی خط تماسی در داخل قطره فرو رفته و سپس با سرعت ثابتی کشیده می‌شود که در این نتیجه عمل، نانوالیاف شکل می‌گیرد. اما تنها مواد ویسکو الاستیکی می‌توانند از طریق این روش ساخته شوند که قادر باشند در شرایط تغییر شکل‌های شدید از خود مقاومت نشان دهند و یا در طول عمل کشیده شدن به قدر کافی منسجم باشند [۴ و ۵].

● روش سنتز قالبی (قالب‌گیری)

در این روش از یک قالب با سوراخ‌هایی در مقیاس نانو به‌عنوان قالب به‌منظور ساختن نانوالیاف به حالت جامد (فیبریل) یا به شکل توخالی (لوله‌ای) استفاده می‌شود. بیشترین توجه در این روش در آینده ممکن است به سمت ساخت نانولوله، مواد خام متنوع نظیر پلیمرهایی با هدایت الکتریکی بالا، فلزات نیمه هادی و غیره جلب شود. از طرف دیگر، این روش قادر به تولید نانوالیاف پیوسته و جدا از هم نیست [۴ و ۵].

● جداسازی فازی

مراحل این روش شامل فرایند حل کردن، ژلاسیون، استخراج با به کار بردن یک حلال متفاوت، منجمد کردن و خشک کردن است که در نتیجه این عمل یک فوم با منافذی در مقیاس نانو پدیدار می‌شود. در این فرایند به دلیل اینکه قطر ذرات در حد نانو است به زمان طولانی‌تری برای انتقال پلیمر جامد به داخل فوم نیاز خواهد داشت. در فرایند جداسازی فازی در ابتدا پلیمر به‌گونه‌ای حل می‌شود تا محلولی همگن با غلظت مطلوب تشکیل شود سپس محلول در داخل یخچال با درجه حرارت ژلی شدن قرار داده می‌شود که این درجه حرارت بستگی به غلظت پلیمر دارد. بعد از شکل‌گیری، ژل، درون آب مقطر معلق می‌ماند تا بدین طریق انتقال فاز بین حلال صورت گیرد. پس از این که ژل از آب مقطر خارج شد ابتدا منجمد و سپس خشک شده و بدین طریق ماتریس نانوالیاف پدیدار می‌شود [۴ و ۵].

● روش خودبه‌خودی

از آنجایی که این روش به‌صورت خودبه‌خودی بوده، بسیار وقت‌گیر و زمان‌بر است؛ بنابراین، نمی‌توان از آن به‌منظور تولید انبوه نانوالیاف استفاده کرد.

● روش الکتروریسی

در روش‌های معمول ریسندگی به‌عنوان مثال، ذوب‌ریسی، خشک‌ریسی و یا ترریسی از نیروهای مکانیکی برای تولید لیاف استفاده می‌شود. این کار از طریق اکستروژن کردن مذاب و یا محلول پلیمری از میان نازل و در مرحله بعدی اعمال کشش صورت می‌گیرد و در نهایت به تولید فیلامنت‌هایی به‌صورت جامد و یا منعقد شده می‌انجامد. اما روش الکتروریسی به‌طور کلی متفاوت از روش‌های دیگر است. در این روش از نیروهای الکترواستاتیکی استفاده می‌شود [۴ تا ۶]. در این روش نانوالیاف از طریق اعمال بارهای الکترواستاتیک بر محلول و یا مذاب پلیمری به‌دست می‌آیند.

عوامل مهم و تاثیرگذار در فرایند الکتروریسی عبارتند از:

- ▶ انتخاب حلال مناسب به‌منظور حل کردن پلیمر؛
- ▶ فشار بخار حلال انتخابی باید مناسب باشد تا از این طریق میزان سرعت تبخیر حلال نیز تحت شعاع قرار نگیرد یعنی نه خیلی سریع که موجب سخت شدن لیف قبل از رسیدن آن به محدوده نانو شود و نه خیلی آهسته که موجب چسبندگی لیاف روی هم شود. در حقیقت باید به اندازه‌ای باشد که لیف انسجام خود را تا قبل از رسیدن به جمع‌کننده حفظ کند؛
- ▶ ویسکوزیته و کشش سطحی حلال نیز باید بهینه باشد؛ چنانچه خیلی زیاد باشد از حرکت و شکل‌گیری جت جلوگیری به عمل می‌آورد و اگر خیلی کم باشد، محلول پلیمری به‌صورت آزادانه از سطح رشته‌ساز خارج می‌شود؛
- ▶ ولتاژ اعمالی نیز باید به اندازه کافی باشد تا بدین طریق بتواند بر نیروی کشش سطحی و ویسکوزیته محلول پلیمری فائق آید و در نهایت، جت، کار خود را آغاز کند؛
- ▶ فاصله بین رشته‌ساز و صفحه جمع‌کننده نیز باید به اندازه کافی باشد تا بدین طریق حلال زمان کافی را برای تبخیر شدن داشته باشد [۴ تا ۶].

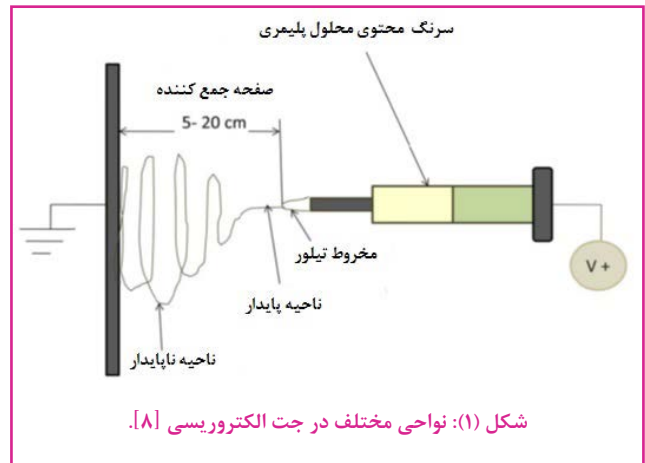
● سازوکار الکتروریسی

همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، جت الکتروریسی از ۴ ناحیه مجزا تشکیل شده‌است؛ این نواحی عبارتند از:

- ▶ بخش پایه^۶ ناحیه که جت از محلول پلیمری خارج می‌شود و به مخروط تیلور^۷ معروف است.
- ▶ ناحیه بعد از مخروط تیلور که به ناحیه پایدار^۸ معروف است.
- ▶ ناحیه شکاف^۹ و انشعابی شدن^{۱۰} که منظور از شکاف، تبدیل شدن جت به دو قسمت مساوی و منظور از منشعب شدن، تقسیم جت اولیه به چندین جت باردار، با قطرهای یکسان و توزیع بار برابر در واحد طول است. این ناحیه به ناحیه ناپایدار^{۱۱} معروف است و دقیقاً در این ناحیه است که امکان بروز مهره‌ها^{۱۲} روی لیف وجود دارد.
- ▶ منطقه تجمع که در این ناحیه، لیاف الکتروریسی شده روی جمع‌کننده جمع‌آوری می‌شوند [۷ و ۸].

پلیمری از نازل داخلی و جریان هوا از نازل بیرونی می‌گذرد؛ در نتیجه، محلول پلیمری همراه با هوا از نوک نازل خارج شده و در اثر میدان الکتریکی حاصل از منبع ولتاژ بالای منفی متصل به جمع‌کننده، باردار شده و جت تشکیل شده به سمت جمع‌کننده کشیده می‌شود. نمایی از روش الکترورسی دمشی در شکل (۳) نشان داده شده است [۱۱].

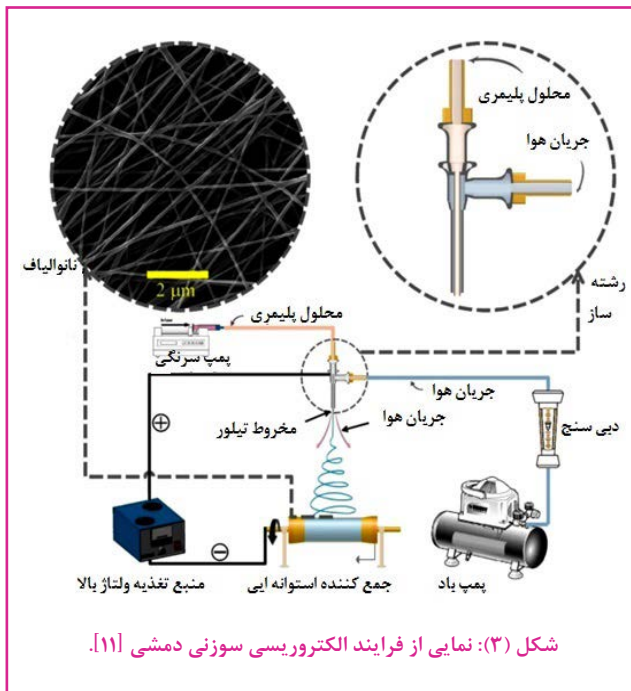
با استفاده از این روش می‌توان مشخصات نانوالیاف تولیدی از جمله تخلخل، شکل و قطر را کنترل کرد. همچنین مزیت دیگر این روش، سادگی فرایند آن است که امکان تولید نانوالیاف با سرعت تولید بالا را فراهم می‌کند.



شکل (۱): نواحی مختلف در جت الکترورسی [۸].

● الکترورسی سوزنی

در فرایند الکترورسی سوزنی یک میدان الکتریکی با ولتاژ بالا بین منبع محلول پلیمری و جمع‌کننده فلزی ایجاد می‌شود. یک جت از محلول پلیمری با استفاده از نیروی الکترواستاتیک به شکل نانوالیاف تولید و روی جمع‌کننده جمع می‌شود. مجموعه فرایند در ساده‌ترین شکل خود از یک پیپت برای نگهداری محلول پلیمری، دو الکتروود و یک منبع تغذیه ولتاژ بالا تشکیل می‌شود. در این حالت قطره پلیمری شکل گرفته در سر پیپت به دلیل اعمال ولتاژ، کشیده شده و در نهایت، به لیف تبدیل می‌شود. جت نیز به صورت الکتریکی باردار می‌شود و همین امر باعث بروز خمیدگی در لیف و کاهش قطر آن شده و سپس لیاف روی سطح جمع‌کننده، جمع‌آوری می‌شود. نمایی از فرایندهای فوق در شکل (۲) نشان داده شده است. [۵ تا ۱۰].



شکل (۳): نمایی از فرایند الکترورسی سوزنی دمشی [۱۱].

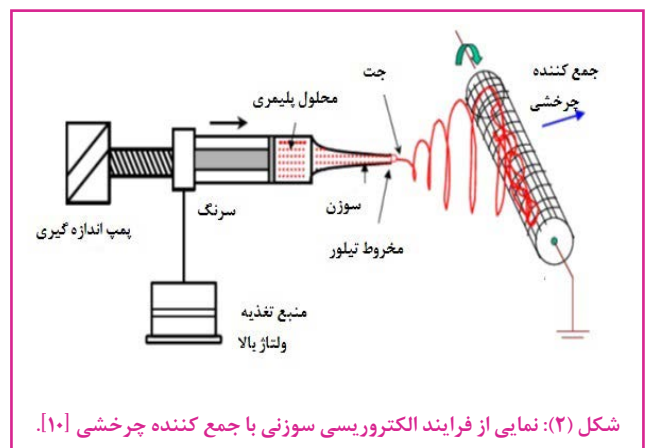
● پیشرفت در سیستم الکترورسی برای تولید نانوالیاف در مقیاس بالا

الکترورسی سوزنی به‌طور گسترده در آزمایشگاه‌های تحقیقاتی برای تولید مقدار کمی از نمونه‌های نانوالیاف و یا به‌عنوان یک مدل در تجزیه تحلیل نظری و درک اساس الکترورسی استفاده می‌شود.

در سال‌های اخیر سیستم‌های الکترورسی با توانایی تولید در مقیاس بالا مورد بررسی قرار گرفته‌اند و نتایج خلاصه، پیشرفت تحقیقات اخیر در فناوری‌های الکترورسی در مقیاس بالا مورد بررسی قرار خواهد گرفت [۹ تا ۱۵].

● الکترورسی چند جتی رو به پایین

یک راه ساده برای افزایش توان الکترورسی، استفاده از رشته‌ساز چند جتی بوده که در شکل (۴) آورده شده است.

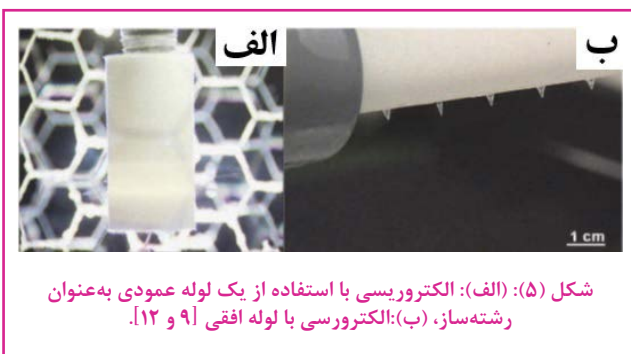


شکل (۲): نمایی از فرایند الکترورسی سوزنی با جمع‌کننده چرخشی [۱۰].

● الکترورسی دمشی

الکترورسی سوزنی دمشی یکی از روش‌های تولید نانوالیاف با سرعت بالا به کمک جریان هوا و با سرعت زیاد است. در این روش از نازل هم‌محور با طراحی منحصر به فرد و مختص الکترورسی دمشی استفاده می‌شود. در این نوع نازل الکترورسی دمشی، نازل محلول در هسته و نازل هوا در قسمت پوسته، حول یک محور قرار دارند. به عبارت دیگر، محلول

لوله حرکت می‌کند. به دلیل محدود بودن تعداد منافذ لوله، این مجموعه می‌تواند در $0.5-0.3$ g/hr نانوالیاف تولید کند. سرعت تولید تا ۲۵۰ بار بیشتر از الکتروریسی تک سوزن است. اگرچه نتایج به‌دست آمده از میکروسکوپ الکترونی روبشی^{۱۳}، ناپیکناختی زیادی در ضخامت نانوالیاف نشان می‌دهد. سرعت تولید به راحتی می‌تواند با افزایش طول لوله و تعداد منافذ مقیاس‌پذیر باشد اما فاصله بین منافذ به دلیل ایجاد دافعه میدان الکتریکی بین جت‌ها خیلی نمی‌تواند کاسته شود. دافعه قوی در این مجموعه می‌تواند باعث تداخل شدید میدان در درون وب الیاف و حتی میان جت و جمع کننده شود [۹، ۱۲، ۱۶ و ۱۷].



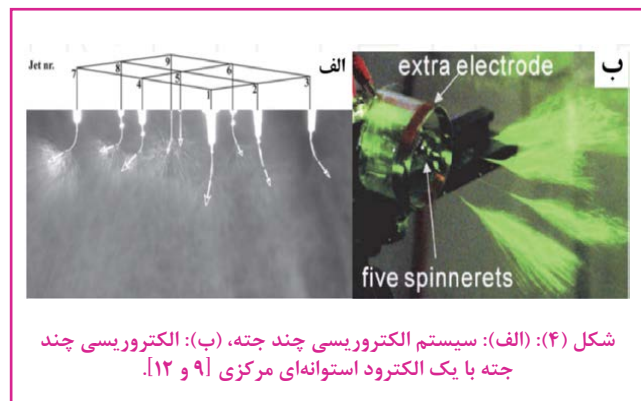
شکل (۵): (الف): الکتروریسی با استفاده از یک لوله عمودی به‌عنوان رشته‌ساز، (ب): الکتروریسی با لوله افقی [۹ و ۱۲].

وانگ^{۱۴} [۱۶] استفاده از رشته‌ساز مخروطی سیم‌پیچی شده که می‌تواند تا ۷۰ KV بدون تخلیه شارژ کار کند را گزارش داد. همان‌طور که در شکل (۶-الف) و (۶-ج)، نشان داده شده‌است، ریسندگی محلول در مخروط سیمی بدون استفاده از هیچ کانالی انجام می‌شود. هنگامی که یک ولتاژ بالا به سیم‌پیچ وارد می‌شود با توجه به کشش سطحی بالا و ویسکوالاستیسیته، محلول پلیمری می‌تواند درون مخروط سیمی باقی بماند. بنابراین، دیگر محدودیت تعداد جت و منافذ در الکتروریسی چند جتی و لوله‌ای را نداریم. در مقایسه با الکتروریسی سوزنی معمولی، الکتروریسی سیم‌پیچ مخروطی باعث بهبود قابل ملاحظه‌ای در بهره‌وری ریسندگی و تولید نانوالیاف با قطر کوچکتر شد (شکل (۶-ج)). همچنین نتایج نشان داد که الیاف تهیه شده با الکتروریسی سیم‌پیچ مخروطی، توزیع قطر گسترده‌تری نسبت به الکتروریسی سوزنی دارد. برای افزایش میزان تولید الیاف توسط تاپی^{۱۴} و همکارانش [۹ و ۱۲] دستگاه الکتروریسی لبه و صفحه پیشنهاد شد. برای این کار، یک صفحه با زاویه ۴۰ درجه با سطح، برای نگهداشتن محلول، به‌عنوان رشته‌ساز در نظر گرفته می‌شود. در این روش، مخزن عایق الکتریکی شده با یک یا چند پیپت پلاستیکی به هم متصل و صفحه شارژ می‌شود، هر پیپت تامین کننده شروع یک جت است. گزارش شد که میزان تولید الیاف درشت با توزیع قطر گسترده (پهن) حتی با استفاده از یک پیپت ریسندگی، بدون انسداد تا ۵ برابر افزایش یافت.

در این روش، کشش سطحی محلول پلیمر نقشی حیاتی را

بهره‌وری الیاف را می‌توان به سادگی با افزایش تعداد جت‌ها افزایش داد، با این حال الکتروریسی چند جته نشان داده شده در شکل، دارای دافعه قوی در میان جت‌ها بوده که این امر ممکن است باعث کاهش تولید الیاف و همچنین افت کیفیت الیاف شود؛ این امر یک مانع اصلی برای کاربرد عملی این جت است. برای کاهش دافعه باید جت‌ها در یک فاصله مناسب از یکدیگر جدا شوند و همچنین برای تولید انبوه نانوالیاف، فضای زیادی برای سوزن‌ها لازم است.

برای تثبیت و بهینه‌سازی فرایند الکتروریسی یک الکتروود استوانه‌ای خارجی به‌عنوان الکتروود مکمل برای پوشش رشته‌ساز چند جتی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۹ و ۱۲].

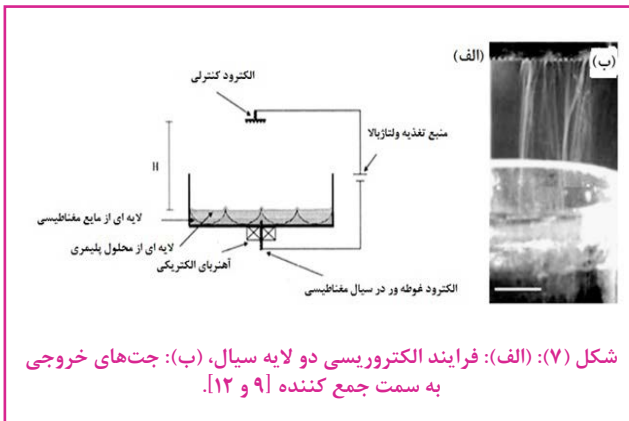


شکل (۴): (الف): سیستم الکتروریسی چند جته، (ب): الکتروریسی چند جته با یک الکتروود استوانه‌ای مرکزی [۹ و ۱۲].

همان‌طور که در شکل (۴-ب)، نشان داده شده‌است، حضور الکتروود خارجی به‌طور چشمگیری باعث کاهش منطقه تجمع الیاف و در نتیجه بهبود میزان تولید الیاف شده‌است. با این وجود، به دلیل حرکت کوچک و بی‌نظم الکتروود ممکن است در الکتروریسی چند جتی، الیاف درشت مشاهده شود. در این نوع الکتروریسی، محلول خروجی از جت حامل مقدار زیادی بار الکتریکی است که حرکت جت باعث کشش آمدن می‌شود و لیف روی جمع کننده می‌نشیند. می‌توان استنباط کرد که در الکتروریسی چند جتی با روش‌های ذکر شده، تداخل به‌طور کامل از بین نمی‌رود، که این امر مانع بزرگی برای صنعتی کردن الکتروریسی چند جتی است.

علاوه بر این، یک عملیات ریسندگی چند جتی موفقیت‌آمیز مستلزم یک سیستم با کیفیت منظم به‌منظور عدم انسداد نازل‌های سوزنی است. همچنین تنظیم یک دستگاه با کیفیت برای تولید انبوه نانوالیاف با استفاده از دستگاه الکتروریسی چند جتی به‌طور تقریبی غیرممکن است. علاوه بر الکتروریسی چند جتی، می‌توان از لوله متخلخل به‌عنوان رشته‌ساز برای بهبود بهره‌وری الیاف استفاده کرد. این سیستم به دلیل تولید الیاف متعدد (پیوسته) به‌طور هم‌زمان از کانال‌های محلول پلیمری درون لوله جزء الکتروریسی چند جتی طبقه‌بندی می‌شود.

در مثال دیگری (شکل (۵)) از یک لوله پلی اتیلن متخلخل با یک محور افقی به‌منظور الکتروریسی نانوالیاف استفاده شده‌است. در الکتروریسی لوله‌ای با محور افقی، محلول پلیمری با اختلاف فشار ۱-۲ KPa در طی دیواره



شکل (۷): (الف): فرایند الکترورسی دو لایه سیال، (ب): جت‌های خروجی به سمت جمع کننده [۹ و ۱۳].

در اثر اعمال ولتاژ بالا به سیستم الکترورسی تعداد جت فراوانی می‌تواند از سطح غلتک به سمت بالا تشکیل شود (شکل ۸). فرایند الکترورسی بدون سوزن با رشته‌ساز دوار می‌توان بدین صورت خلاصه کرد: چرخش رشته‌ساز بارگذاری شده با یک لایه نازک محلول پلیمری و تشکیل الیاف روی سطح رشته‌ساز.

چرخش و گرانش باعث ایجاد جت مخروطی روی سطح لایه محلول می‌شود. هنگامی که یک ولتاژ بالا به رشته‌ساز اعمال می‌شود، خوشه‌ها تمایل به تمرکز بار و تقویت آشفستگی دارند و مایع در اطراف خوشه‌ها تحت تاثیر نیروی الکتریکی، بالا کشیده می‌شود و در نتیجه، مخروط تیلور شکل می‌گیرد. در جت‌های محلولی ایده‌آل، زمانی که نیروی الکتریکی به اندازه کافی باشد از نوک آنها مخروط تیلور خارج می‌شود.

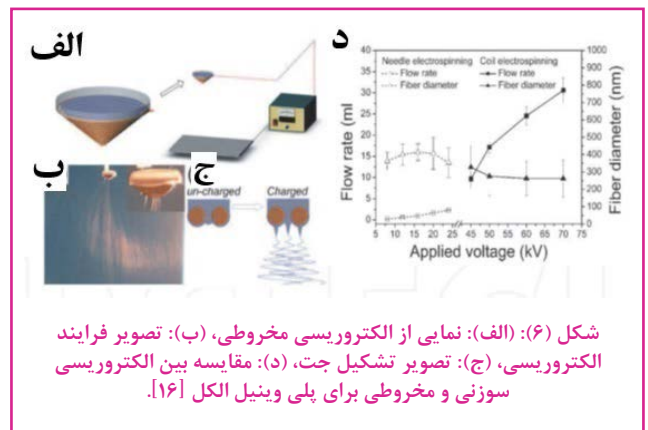


شکل (۸): فرایند الکترورسی چرخشی [۱۲].

نیو^{۱۹} و همکاران [۱۲ و ۱۵]، از طرحی مشابه، شامل یک سیستم الکترورسی بدون نازل ولی با رشته‌سازهای متفاوت الیاف (دیسک، استوانه، گوی) استفاده کردند (شکل ۹). هنگامی که محلول پلی وینیل الکل^{۲۰} از طریق یک سیم مسی که داخل حمام محلول بود با یک ولتاژ الکتریکی بالا شارژ شد، جت‌ها / رشته‌های متعددی از رشته‌ساز تشکیل شده که روی جمع کننده، جمع می‌شوند. با چرخش رشته‌ساز، به‌طور مداوم محلول پلی وینیل الکل روی سطح رشته‌ساز بارگذاری شده و منجر به تولید پیوسته جت / رشته پلیمری می‌شود. آنها همچنین با استفاده از روش المان‌های محدود به تجزیه و تحلیل میدان الکتریکی و بررسی شکل رشته‌ساز در شدت مشخصات

ایفا می‌کند و زاویه صفحه باید طوری انتخاب شود که با توجه به خواص محلول باعث چکیدن آن نشود.

در طرحی دیگر برای الکترورسی، از یک حمام محلول و یک غلطک فلزی به‌عنوان رشته‌ساز استفاده شد. قطرات محلول پلیمری با استفاده از یک توزیع کننده روی غلطک فلزی پخش و هنگامی که ولتاژ اعمال می‌شود قطرات محلول روی سطح فلز رشته‌ساز غلتکی که در معرض نیروی الکتریکی قرار دارد، به بیرون کشیده شده و به شکل نانوالیاف تبدیل می‌شوند. این دستگاه برای افزایش میزان تولید الیاف در فرایند الکترورسی پیشنهاد شده است.



شکل (۶): (الف): نمایی از الکترورسی مخروطی، (ب): تصویر فرایند الکترورسی، (ج): تصویر تشکیل جت، (د): مقایسه بین الکترورسی سوزنی و مخروطی برای پلی وینیل الکل [۱۶].

● الکترورسی بدون نازل (بدون سوزن) به سمت بالا

روش الکترورسی خوب و مناسب برای تولید و میزان بهره‌وری بالای نانوالیاف باید کمترین وابستگی به تعداد کانال و سیال داشته باشد. این شرایط باید شامل همه پلیمرها با خواص متفاوت باشد. دستگاه الکترورسی بدون نازل دارای پتانسیل خوبی است [۱۳، ۱۸ و ۱۹].

یارین^{۱۶} و سوزمان^{۱۷} [۹، ۱۲] استفاده از دستگاه الکترورسی سیال دو لایه را گزارش کردند که می‌تواند مشکلات الکترورسی چند جتی را نداشته باشد (شکل ۷-الف). در این دستگاه، لایه پایینی سیال سوسپانسیون فرو مغناطیسی است و در لایه فوقانی، محلول رسیده می‌شود. در طول الکترورسی، زمانی که یک میدان مغناطیسی طبیعی به سیستم اعمال می‌شود، جت عمودی ثابت از آشفستگی بین سطح مشترک دو لایه تشکیل می‌شود؛ در نتیجه، در اثر اعمال ولتاژ بالا به سیال در همان زمان، هزاران جت به سمت بالا پرتاب می‌شوند (شکل ۷-ب). سیستم ذکر شده نیاز به شرایط نصب پیچیده دارد و نانوالیاف حاصل شده دارای قطر درشت و توزیع قطر پهن است.

جریسکا^{۱۸} و همکاران [۹، ۱۲ و ۲۰] یک دستگاه الکترورسی بدون سوزن با استفاده از یک غلتک دوار به‌عنوان رشته‌ساز الیاف اختراع کردند. هنگامی که غلتک به آرامی در حمام محلول پلیمری می‌چرخد باعث خیس شدن سطح می‌شود.



شکل (۱۰): دستگاه الکتروریسی بدون سوزن ساخت شرکت المار کو کشور چک [۱۲ و ۲۴].

در کشور ایران نیز با توجه به اهمیت بحث نانو و تحقیقات فراوان در زمینه نانوالیاف و همچنین کاربرد نانوالیاف در تولیدات صنعتی به منظور افزایش خواص شیمیایی، مکانیکی و فیزیکی آنها، نیاز به تولید نانوالیاف در مقیاس صنعتی به نیازی مبرم تبدیل شده است و بر همین اساس، شرکت‌های دانش‌بنیان به سمت ساخت دستگاه‌هایی که بتوانند بهره‌وری در این زمینه را افزایش دهند، رفته‌اند. یکی از این شرکت‌ها، شرکت فناوران نانومقیاس است که کشور را در زمینه دستگاه‌های مورد نیاز برای تولید نانوالیاف در مقیاس آزمایشگاهی، نیمه صنعتی و صنعتی به طور کامل خودکفا کرده است. دستگاه الکتروریسی آزمایشگاهی دو پمپ این شرکت برای تولید نانوالیاف پلیمری/کربنی/سرامیکی با قطر ۵۰ نانومتر تا چند میکرون است. نمایی از این دستگاه که در شکل (۱۱) آمده است، شامل بدنه فلزی، پمپ سرنگی، سیستم ریسند، سیستم کالکتور و منبع تامین ولتاژ و لتاژ بالاست. در این دستگاه‌ها دو ماده مختلف می‌توانند به طور هم‌زمان الکتروریسی شوند.

علاوه بر این، الکتروریسی ماده پلیمری در یک سمت دستگاه و مواد افزودنی مانند داروها در طرف مقابل، امکان تولید نانوالیاف کامپوزیتی حاوی اجزای مورد نظر را فراهم می‌کند. بنابراین، این دستگاه برای کاربردهای دارویی، پزشکی و زیستی مناسب است. در شکل (۱۱) تصویر یک دستگاه صنعتی بدون سوزن ساخت شرکت ایرانی فناوران نانومقیاس نشان داده شده است [۲۵].



شکل (۱۱): دستگاه الکتروریسی آزمایشگاهی دو پمپ ساخت شرکت فناوران نانومقیاس [۲۵].

میدان الکتریکی پرداختند. آنها دریافتند که رشته‌ساز به مقدار خیلی زیادی با میدان الکتریکی در منطقه تشکیل نانوالیاف همپوشانی شده است که این امر، یک نقطه کلیدی موثر برای تشکیل نانوالیاف یکنواخت در الکتروریسی بدون سوزن است.

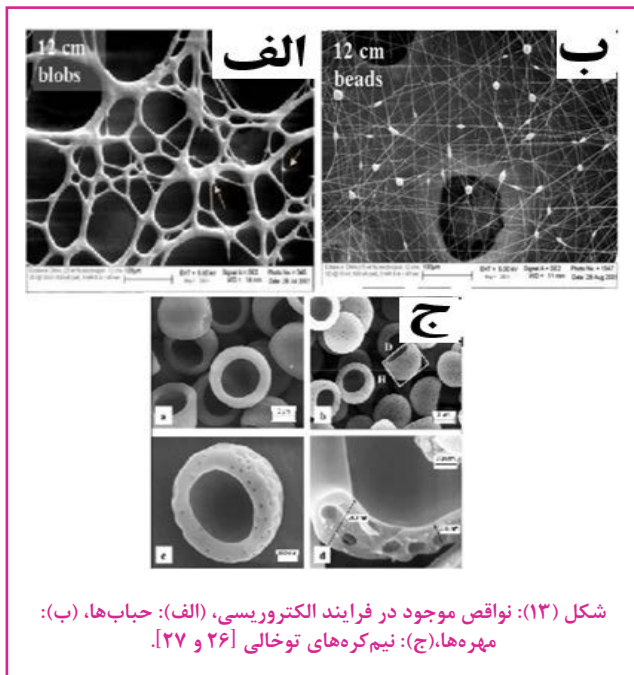


شکل (۹): تصاویر الکتروریسی بدون نازل با استفاده از رشته‌سازهای متفاوت استوانه‌ای، دیسکی و توبی [۱۲].

یک اختلاف قابل ملاحظه‌ای بین فرایندهای الکتروریسی بدون سوزن به سمت بالا و با سوزن وجود دارد. در الکتروریسی بدون سوزن به سمت بالا، مخروط تیلور روی سطح محلول پلیمر تشکیل می‌شود، مخروط تیلور به همراه سطح جمع کننده در حال چرخش حرکت خواهد کرد و یک جت محلولی در شرایط میدان الکتریکی قوی تولید می‌شود؛ بنابراین، باید یک تداخل (همپوشانی) بین مولکولی قوی بین مولکول‌های پلیمر در محلول به منظور تثبیت مخروط تیلور تشکیل شده باشد که مخروط تیلور به سمت جت ظریف‌تر (نازک‌تر) کشیده شده و روی جمع کننده به عنوان الیاف جامد ته‌نشین می‌شود. تفاوت مخروط تیلور تشکیل شده در الکتروریسی با سوزن مرسوم در این است که مخروط تیلور با استفاده از محلول پلیمری به صورت مداوم تغذیه و تشکیل می‌شود اما در الکتروریسی بدون سوزن، مخروط تیلور با استفاده از محلول پلیمری که در اطراف رشته‌ساز محاط شده و به سمت بالا کشیده شده، تشکیل می‌شود. مشاهده شده است که قطر اصلی مخروط تیلور در الکتروریسی با رشته‌ساز استوانه‌ای از ۱/۲ ابتدایی در انتها به ۰/۳ میلی‌متر کاهش یافته است (ضخامت فیلم اولیه پلیمری ۱ میلی‌متر). اگر ضخامت اولیه فیلم پلیمری بیشتر کاهش یابد، مخروط تیلور یا نانوالیاف نمی‌توانند تشکیل شوند؛ بنابراین، محلول باید یک خواص رئولوژیکی مناسب داشته باشد. علاوه بر این، به دلیل شکل‌گیری مخروط تیلور از نوسانات موجی برای شروع فرایند الکتروریسی بدون سوزن نیاز به یک ولتاژ بالا است [۷ و ۲۱ تا ۲۳].

در فرایند تولید صنعتی نانوالیاف، محلول پلیمری در حوضچه‌ای ریخته می‌شود. در چرخش رشته‌ساز استوانه‌ای، که به یکی از قطب‌های دستگاه مولد ولتاژ بالا وصل شده، در درون حوضچه، لایه‌ای از محلول پلیمر بر سطح رشته‌ساز قرار می‌گیرد. این لایه پلیمری از سطح، تحت تاثیر میدان الکتریکی جت شده و نانوالیاف روی سطح جمع کننده که می‌تواند یک بستر فیلتر باشد، قرار می‌گیرد. در شکل (۱۰) چگونگی تشکیل نانوالیاف در فرایند بدون سوزن، فناوری بدون سوزن نانواسپایدر که توسط شرکت المار کو [۲۴] ارائه شده، نشان داده شده است.

مهره‌ها تاثیر کمتری دارند عبارتند از: فاصله بین صفحه جمع کننده و رشته‌ساز، غلظت محلول پلیمری و وزن مولکولی.



شکل (۱۳): نواقص موجود در فرایند الکتروسی، (الف): حباب‌ها، (ب): مهره‌ها، (ج): نیم‌کره‌های توخالی [۲۶ و ۲۷].

در فرایند الکتروسی چنانچه فاصله بین صفحه جمع کننده و رشته‌ساز به حد کافی نباشد، محلول پلیمری فرصت کافی را برای خشک شدن کامل پیدا نمی‌کند. در این حالت، الیاف خیس روی یکدیگر انباشته و در نهایت به هم می‌چسبند و پس از گذشت مدتی، توده بزرگی از الیاف خیس بوجود می‌آید که به آنها حباب می‌گویند. عوامل متعددی بر شکل‌گیری حباب‌ها موثرند؛ به‌عنوان مثال، فاصله بین صفحه جمع کننده و رشته‌ساز، غلظت محلول پلیمری، ولتاژ الکتریکی و غیره. همچنین شکل‌گیری نیمکره‌های توخالی به میدان الکتریکی، نوع حلال و نوع پلیمر بستگی دارد [۲۸، ۲۹، ۳۲].

● عوامل موثر بر فرایند الکتروسی بدون نازل

در این فرایند، عوامل متعددی در شکل‌گیری نانوالیاف پلیمری موثرند که از این جمله می‌توان به عوامل محلول، عوامل فرایندی و عوامل محیطی اشاره کرد.

● عوامل محلول

خواص محلول پلیمری بیشترین تاثیر را در فرایند الکتروسی و مورفولوژی لیف حاصل شده ایجاد می‌کند؛ به‌عنوان مثال، کشش سطحی در شکل‌گیری نواقص مهره مانند در طول لیف تاثیرگذار است. ویسکوزیته محلول پلیمری و خواص الکتریکی آن، تعیین کننده میزان کشش اعمالی بر محلول پلیمری است. در نهایت، همین کشش اعمالی است که بر قطر نهایی تاثیرگذار است. عوامل محلول عبارتند از: غلظت محلول پلیمری، نوع حلال مصرفی، وزن مولکولی پلیمر، ویسکوزیته و کشش سطحی.

در مقیاس خط تولید صنعتی نانوالیاف شرکت فناوران نانو مقیاس^{۲۲}، دو دستگاه با مدل‌های INFL160 و INFL6100 را که قابلیت تولید نانوالیاف پلیمری/سرامیکی در مقیاس صنعتی برای کاربردهای مختلف را دارد ساخته و به بازار ارائه کرده است. INFL براساس نیاز مصرف کننده دارای (۱) تا (۸) واحد الکتروسی است. عوامل و شرایط الکتروسی مانند تنظیمات ریسند و کالکتور، فاصله الکتروسی، سرعت خطی بستر مورد استفاده، دما و زمان فعالیت دستگاه در خط تولید صنعتی نانوالیاف، می‌تواند با استفاده از یک سیستم کنترل پیشرفته یکپارچه، کنترل و تنظیم شود. این دستگاه ایمنی بسیار خوبی برای کاربران در ارتباط با منابع تامین ولتاژ بالا و حلال‌های شیمیایی فراهم می‌کند. با استفاده از این دستگاه، نانوالیاف می‌تواند روی بسترهای مختلف در مقیاس صنعتی پوشش داده شود. تصاویر دستگاه‌های ذکر شده در شکل (۱۲) نشان داده شده است [۲۵].



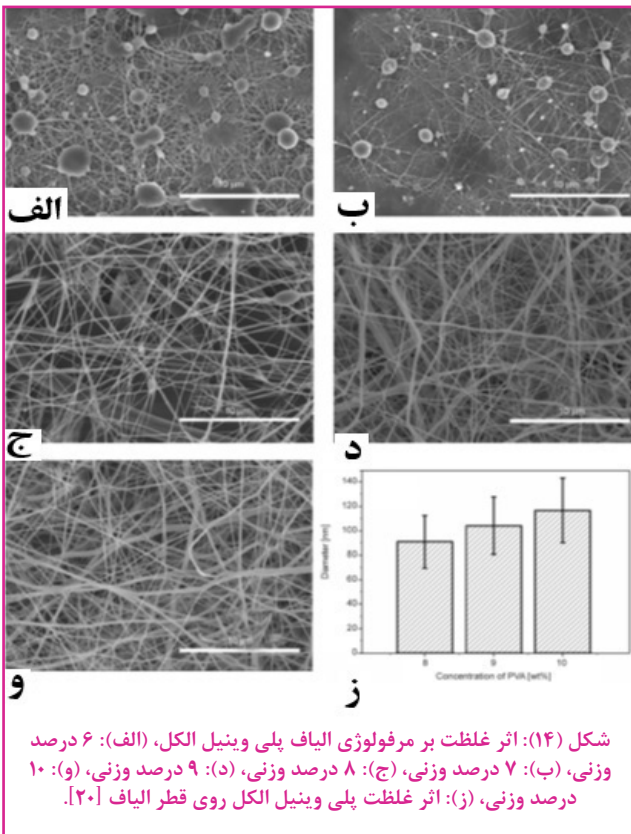
شکل (۱۲): دستگاه‌های الکتروسی صنعتی شرکت فناوران نانومقیاس [۲۵].

● نقایص احتمالی در فرایند الکتروسی

در طی فرایند الکتروسی با اعمال تغییر در عوامل فرایندی، احتمال بروز تغییر در مورفولوژی نانوالیاف حاصل شده و شکل‌گیری نواقصی همچون مهره، حباب و نیمکره‌های توخالی وجود دارد. در شکل (۱۳) نواقص موجود در فرایند الکتروسی نشان داده شده است.

عوامل متعددی در شکل‌گیری الیاف مهره مانند موثرند که از کلیدی‌ترین آنها می‌توان به کشش سطحی محلول پلیمری، مقدار دانستیه بار موجود در جریان و خاصیت ویسکوالاستیک به همراه ویسکوزیته محلول اشاره کرد. عوامل دیگری که در شکل‌گیری

وابسته به غلظت محلول پلیمری است. الیاف منقطع و مقدار زیادی قطره، زمانی که غلظت ۶ درصد وزنی است مشاهده می‌شود؛ در غلظت ۷ درصد می‌توان حضور مهره‌ها را مشاهده نمود. اگرچه الیاف یکنواخت را می‌توان در غلظت‌های بیشتر از ۷ درصد وزنی مشاهده نمود. میانگین ضخامت الیاف با افزایش غلظت پلیمری افزایش می‌یابد که محدوده آن ۹۱ nm در ۸ درصد وزنی تا ۱۱۸ nm برای ۱۰ درصد وزنی است که به دلیل گره خوردگی بیشتر زنجیرها و عدم تحرک در غلظت‌های بالا، الیاف ظریف‌تر در غلظت‌های بالا مشاهده شده‌است [۲۰].



شکل (۱۴): اثر غلظت بر مورفولوژی الیاف پلی وینیل الکل، (الف): ۶ درصد وزنی، (ب): ۷ درصد وزنی، (ج): ۸ درصد وزنی، (د): ۹ درصد وزنی، (و): ۱۰ درصد وزنی، (ز): اثر غلظت پلی وینیل الکل روی قطر الیاف [۲۰].

● تاثیر فاصله بین جمع کننده و رشته‌ساز

با ایجاد تغییر در فاصله بین جمع کننده و رشته‌ساز، هم مدت زمان پرواز و هم شدت میدان الکتریکی تحت تاثیر قرار می‌گیرند. بنابراین، در اثر افزایش فاصله، به دلیل طولانی بودن مدت زمان پرواز متوسط، قطر الیاف کاهش می‌یابد، چرا که در این حالت میزان کشش وارده بر الیاف افزایش پیدا می‌کند. اما در مواردی دیگر، با افزایش فاصله به دلیل کاهش شدت میدان الکترواستاتیک، میزان کشیدگی کمتر و در نتیجه، قطر لیف افزایش می‌یابد. بنابراین، چنانچه فاصله بین جمع کننده و رشته‌ساز بسیار زیاد باشد، به دلیل ضعیف شدن میدان و کاهش شدید در میزان بارها، میزان کشیدگی الیاف به شدت کاهش یافته و در نتیجه آن، هیچ‌گونه لیفی شکل نمی‌گیرد، و اگر این فاصله بسیار کم باشد به دلیل افزایش شدید در شدت میدان الکترواستاتیک، جت ناپایدارتر شده که در اثر آن، میزان مهره‌ها افزایش می‌یابد. به‌منظور جلوگیری از چسبندگی الیاف باید زمان لازم برای

● عوامل فرایندی (شرایط فرایندی)

عامل تاثیرگذار دیگر در فرایند الکتروریسی، مجموعه‌ای از چندین عامل خارجی است که بر جت اعمال می‌شود. این عوامل عبارتند از: ولتاژ مصرفی، سرعت چرخش رشته‌ساز، درجه حرارت محلول، نوع جمع کننده و فاصله بین جمع کننده تا رشته‌ساز. اگر چه این عوامل که از اهمیت کمتری نسبت به عوامل محلول برخوردارند اما بر مورفولوژی لیف حاصل شده تاثیر به‌سزایی دارند.

● عوامل محیطی

وجود هر گونه ارتباط بین محیط اطراف و محلول پلیمری بر مورفولوژی لیف حاصل شده تاثیرگذار است؛ به‌عنوان مثال، رطوبت بالا باعث شکل‌گیری سوراخ‌هایی روی سطح الیاف می‌شود. از آنجایی که فرایند الکتروریسی تحت تاثیر میدان الکتریکی خارجی قرار می‌گیرد بنابراین، باید هر گونه تغییری در محیط اطراف نیز بر فرایند موثر باشد. این عوامل عبارتند از: دما، رطوبت، نوع اتمسفر و فشار [۹، ۱۲، ۱۵، ۲۰ تا ۲۸، ۳۰].

● تاثیر عوامل کلیدی بر مورفولوژی نانوالیاف تولید شده به روش الکتروریسی بدون نازل

● غلظت محلول

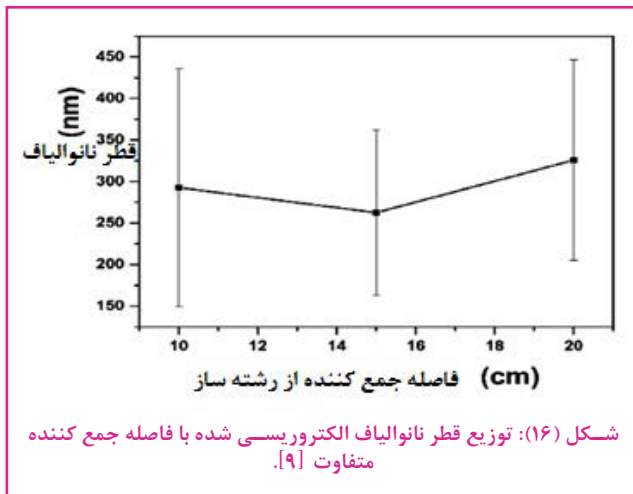
به دلیل غیر نیوتنی بودن سیال‌های پلیمری، جریان کششی از پاره شدن جت ویسکوالاستیک جلوگیری به عمل می‌آورد و در نهایت، منجر به شکل‌گیری چندین جت طویل می‌شود. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که مورفولوژی نانوالیاف به غلظت محلول پلیمری بستگی دارد [۳۰]. با افزایش غلظت، ویسکوزیته محلول پلیمری نیز افزایش می‌یابد. در واقع، غلظت محلول پلیمری، تعیین کننده ویسکوزیته و کشش سطحی قطره شکل گرفته در سر رشته‌ساز است. ویسکوزیته محلول پلیمری نیز بر قطر لیف حاصل شده، شکل قطره و مسیر حرکت جت تاثیرگذار است [۲۶].

همچنین در اثر افزایش غلظت محلول پلیمری، درگیری‌های فیزیکی بین زنجیره پلیمری افزایش و از میزان تحرک زنجیره کاسته می‌شود. در این حالت، در طول فرایند الکتروریسی جت پلیمری کمتر در معرض فرایند کشش قرار می‌گیرد و در نهایت، الیافی با ضخامت و قطر بیشتر را حاصل می‌شود [۲۸ تا ۳۰].

در غلظت‌های پایین‌تر از یک حد بحرانی، نواقص مهره مانند شکل می‌گیرند که بسیار برجسته‌اند، تعداد آنها بسیار زیاد است و کروی شکل هستند. با افزایش غلظت، از میزان مهره‌ها کاسته شده و از حالت کروی به دوکی شکل تبدیل می‌شوند [۲۶].

شکل (۱۴) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی^{۲۳} پلی وینیل الکل الکتروریسی شده در غلظت‌های مختلف روی زیرلایه پلی پروپیلن^{۲۴} را نشان می‌دهد. می‌توان مشاهده نمود که مورفولوژی و میانگین ضخامت نانوالیاف رسیده شده

الیاف افزایش می‌یابد. افزایش فاصله جمع کننده می‌تواند اثرات تضعیفی نانوالیاف را بهبود بخشد؛ با این حال با افزایش فاصله جمع کننده، قدرت کششی میدان الکتریکی به تدریج کاهش می‌یابد. هنگامی که فاصله جمع کننده ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شود، جت پلیمری در مقایسه با فواصل کمتر مشاهده شده و در محلول‌های انباشته شده بین فاصله سیم و رشته‌ساز، قطرات بزرگ محلول به بیرون کشیده شده و الیاف درشت‌تری تولید می‌شود. بنابراین، الیاف تولید شده در فاصله جمع کننده ۲۰ سانتی‌متری، درشت‌تر و با توزیع قطر پهن‌تر است [۹ و ۳۱].



شکل (۱۶): توزیع قطر نانوالیاف الکتروریسی شده با فاصله جمع کننده متفاوت [۹].

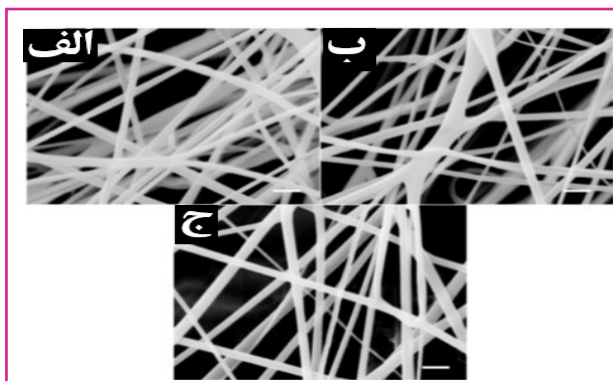
• ولتاژ اعمالی

یکی از عوامل بسیار موثر در فرایند الکتروریسی، اعمال ولتاژ بالا بر محلول پلیمری است. در حقیقت، ولتاژ الکتریکی به اختلاف پتانسیل بین دو نقطه گفته می‌شود. بر طبق مشاهدات صورت گرفته، ولتاژ اعمالی اثرات متفاوتی را بر قطر الیاف ایجاد می‌کند؛ اما به‌طور کلی، در اثر افزایش ولتاژ به تعداد بارها افزوده شده و در نتیجه، نیروی کلمبیک حاصل شده از رانش بارهای همنام افزایش و میدان الکتریکی قوی‌تری ایجاد می‌شود؛ بنابراین، جت در این حالت بیشتر دچار کشیدگی می‌شود و در نتیجه، قطر لیف حاصل شده کاهش می‌یابد. همچنین چنانچه از محلول‌هایی با ویسکوزیته پایین استفاده شود، تعدادی جت‌های ثانویه در طول فرایند بوجود می‌آیند که این خود دلیلی بر کاهش شدید در قطر الیاف است [۵]. یکی دیگر از عوامل تاثیرگذار بر قطر الیاف حاصل شده، مدت پرواز جت است؛ هرچه زمان پرواز طولانی‌تر باشد به الیاف مدت زمان بیشتری برای کشیده شدن و ازدیاد طول قبل از قرار گرفتن بر صفحه جمع کننده می‌دهد [۱۴].

بر طبق مشاهدات گزارش شده، با افزایش بیش از اندازه ولتاژ، دانسیته مهره‌ها افزایش می‌یابد به طوری که این مهره‌ها به یکدیگر می‌پیوندند و در نتیجه، الیافی را با قطر بزرگتر ایجاد می‌کنند. در ولتاژهای بالا، امکان شکل‌گیری مهره‌ها بیشتر است؛ زیرا در این حالت، بار افزایش می‌یابد و همچنین در اثر افزایش ولتاژ، اندازه مهره‌ها کوچکتر ولی در تعداد بیشتر ظاهر می‌شوند و این مهره‌ها از حالت دوکی

تبخیر حلال به فرایند داده شود. زمانی که این فاصله کاهش می‌یابد، جت، مسافت کمتری را تا قبل از رسیدن به جمع کننده می‌پیماید. از طرفی دیگر، هم‌زمان با آن، شدت میدان الکتریکی نیز افزایش و متعاقباً، سرعت جت به سمت جمع کننده بیشتر و تندتر می‌شود. بنابراین، الیاف فرصت کافی را به‌منظور تبخیر حلال تا قبل از رسیدن به جمع کننده پیدا نمی‌کند. زمانی که فاصله خیلی کم باشد، حلال اضافی باعث در هم فرو رفتن الیاف و چسبندگی بین آنها می‌شود که در نهایت، منجر به شکل‌گیری الیاف متقاطعی می‌شوند که به حباب معروفند [۹، ۱۲، ۱۵ و ۲۶]. فاصله جمع کننده را نمی‌توان تا بی‌نهایت (خیلی زیاد) کاهش داد. برای جمع کردن الیاف جامد، فاصله جمع کننده باید به قدری زیاد باشد تا از کفایت تبخیر محلول از جت، قبل از تغییر حالت اطمینان حاصل شود. حداقل فاصله جمع کننده، به مشخصات محلول و تولید کننده الیاف بستگی دارد. البته فاصله جمع کننده نباید خیلی زیاد شود، زیرا اگر خیلی زیاد باشد ولتاژ اعمالی بالاتری را نیز برای شروع الکتروریسی احتیاج دارد که ممکن است منتهی به تخلیه بار الکتریکی شود؛ باید یک توازن مناسب بین ولتاژ اعمالی و فاصله جمع کننده برای انجام الکتروریسی بدون سوزن بالای موفق، برقرار شود [۹ و ۲۶].

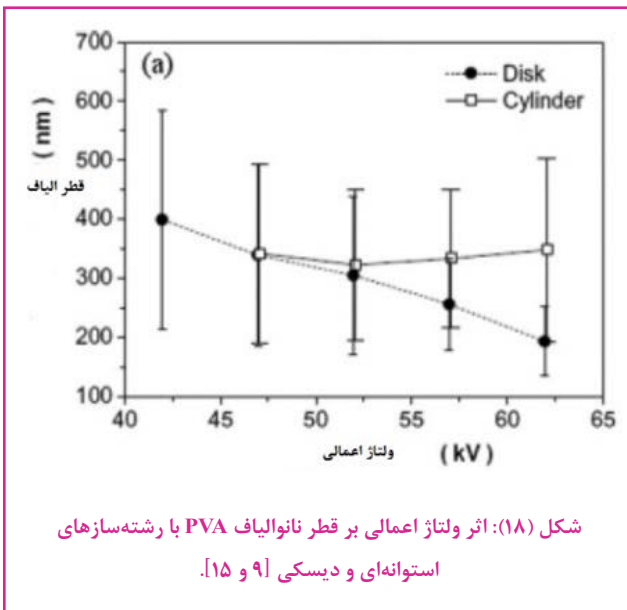
شکل (۱۵) نشان‌دهنده تصاویر SEM نانوالیاف PVA الکتروریسی شده در فاصله متفاوت جمع کننده از رشته‌ساز است. همه الیاف نازک بودند و اختلاف زیادی به جز شکل (۱۵-الف)، مشاهده نشد. هنگامی که فاصله جمع کننده ۲۰ سانتی‌متر است، به دلیل فاصله زیاد بین رشته‌ساز و جمع کننده حلال به خوبی تبخیر می‌شود؛ در نتیجه، الیاف به خوبی از هم جدا می‌شوند. با این حال در فاصله‌های کم بین جمع کننده و رشته‌ساز الیاف به یکدیگر گیر کرده و ساختار به هم پیوسته الیافی را نشان می‌دهد (شکل (۱۵-ب)).



شکل (۱۵): تصاویر SEM از نانوالیاف الکتروریسی شده محلول PVA ۹ درصد وزنی با فاصله جمع کننده متفاوت با ولتاژ اعمالی ۶۰ KV، (الف): ۱۰ cm، (ب) ۱۵ cm و (ج) ۲۰ cm [۹].

توزیع قطر در شکل (۱۶) آمده است. بیشترین قطر نانوالیاف برای فاصله ۲۰ سانتی‌متری جمع کننده حدود ۳۰۰ نانومتر است که بیشتر از دیگر فواصل جمع کننده با رشته‌ساز است. هنگامی که فاصله جمع کننده کمتر از ۱۰ سانتی‌متر باشد، جت‌های پلیمری ناقص کشیده می‌شوند و قطر و توزیع قطر

استوانه تا هنگامی که مقدار ولتاژ به ۴۷ KV نرسد، تشکیل نمی‌شود. افزایش بیشتر ولتاژ اعمالی، منجر به تولید جت از تمام سطح بالای رشته‌ساز استوانه‌ای می‌شود، اگر چه پوشش‌دهی رشته‌ساز (توسط محلول پلیمری) ناهموار و نامتوازن می‌شود. مقایسه بین قطر الیاف در میان رشته‌سازهای استوانه‌ای و دیسکی با ولتاژ اعمالی مختلف در شکل (۱۸) آورده شده‌است که مشخص می‌کند رشته‌ساز دیسکی بهترین عملکرد را داشته‌است. رشته‌ساز دیسکی نانوالیاف PVA را با قطر کوچک و توزیع قطر باریک تولید می‌کند. نازل استوانه‌ای وابستگی بسیار کم قطر الیاف و همچنین توزیع آنها به ولتاژ اعمالی را نشان می‌دهد [۹، ۱۲ و ۱۵].

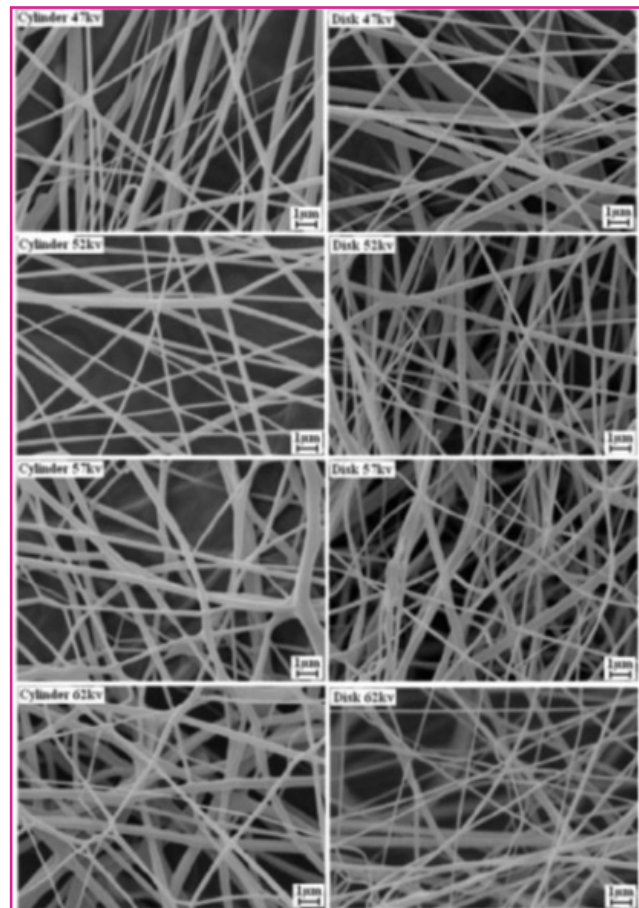


• نرخ تغذیه (سرعت چرخش رشته‌ساز)

نرخ تغذیه (دبی) نشان‌دهنده میزان محلول موجود به‌منظور انجام فرایند الکتروریسی است. برای اینکه مخروط تیلاور حفظ شود، باید میزان نرخ تغذیه متناسب با ولتاژ تنظیم شود. با افزایش دبی، قطر لیف و یا اندازه مهره‌ها افزایش می‌یابد. چنانچه میزان دبی جریان با سرعت ریسندگی یکسان باشد، متناسب با افزایش نرخ تغذیه به تعداد بارها نیز اضافه می‌شود و به طریق مشابه، میزان کشش وارده به محلول به همان نسبت افزایش یافته و در نتیجه این کشش، قطر لیف کاهش می‌یابد هر چند که میزان دبی افزایش یافته‌است. به دلیل افزایش حجم محلول خروجی از رشته‌ساز، جت به زمان بیشتری برای خشک شدن نیاز دارد. بنابراین، چنانچه مدت زمان پرواز کوتاه باشد، حلال موجود در لیف حاصل شده فرصت کافی را برای تبخیر شدن پیدا نمی‌کند که در این صورت، حلال‌های باقی مانده باعث چسبیدن الیاف به هم می‌شوند که در اثر این اتصالات بافته‌هایی (تارهایی) شکل می‌گیرند [۲۶ و ۳۲].

در الکتروریسی بدون نازل، سرعت چرخش رشته‌ساز بر میزان محلولی که روی سطح رشته‌ساز قرار می‌گیرد، تاثیرگذار است. در سرعت‌های چرخش پایین، پوشش نامتوازن

به‌صورت دایره‌ای تغییر شکل پیدا می‌کنند [۷، ۲۱ و ۳۲]. ولتاژ اعمالی عاملی بسیار مهم و موثر بر فرایند الکتروریسی بدون نازل و مشخصات الیاف است. ولتاژ اعمالی بالا (به‌طور معمول بالای ۴۰ KV) به‌منظور آغاز کردن یک الکتروریسی بدون نازل رو به بالا لازم است. ولتاژ مورد نیاز برای شروع الکتروریسی، شدیداً مربوط به مشخصات مواد، محیط (رطوبت، درجه حرارت و غیره) و نیز فاصله رشته‌ساز تا جمع‌کننده است [۱۲ و ۱۵]. شکل (۱۷)، مورفولوژی نانوالیاف الکتروریسی شده از محلول ۹ درصد وزنی PVA با ولتاژ اعمالی متفاوت از رشته‌سازهای استوانه‌ای و دیسکی را نشان می‌دهد. در رشته‌ساز دیسکی تمامی الیاف بدون مهره بودند. در نازل دیسکی با ولتاژهای کمتر از KV ۴۲ جتی تشکیل نمی‌شود. همچنین با افزایش مقدار ولتاژ، تعداد جتی که روی رشته‌ساز تشکیل می‌شود، افزایش پیدا می‌کند. فرایند الکتروریسی با استفاده از رشته‌ساز استوانه‌ای، وابستگی زیادی به ولتاژ اعمالی نشان می‌دهد. یک ولتاژ اعمالی بحرانی به‌منظور تولید جت از رشته‌ساز استوانه‌ای در حدود ۴۷ KV است.



شکل (۱۷): اثر ولتاژ اعمالی بر مورفولوژی نانوالیاف PVA ریسیده شده با رشته‌سازهای استوانه‌ای و دیسکی با کمک SEM [۹ و ۱۵].

با وجود اعمال ولتاژ بالا، جت‌ها به‌طور عمده در دو منطقه انتهایی (حدود ۲ سانتی‌متر عرضی) از سطح استوانه تشکیل می‌شوند. همچنین مشاهده شده‌است که چند جت هم در دو طرف استوانه تولید شده‌است. هیچ جت/فیلامنتی روی سطح

پی‌نوشت

1. Drawing
2. emplate Synthesis
3. Phase Separation
4. Self-Assembly
5. Electrospinning
6. Base Region
7. Taylor Cone
8. Stable Zone
9. Splaying
10. Instable Zon
11. Beads Fiber
12. Collection Region
13. Scanning Electron Microscopy (SEM)
14. Wang
15. Thoppey
16. Yarin
17. Zussman
18. Jriska
19. Niu
20. Polyvinyl alcohol (PVA)
21. Elmarco
22. Fanavaran nano-meghyas (FNM)
23. Scanning Electron Microscopy (SEM)
24. Polypropylene (PP)

محلول مشهود است، بنابراین جت‌ها به‌طور پیوسته نمی‌توانند تشکیل شوند. در سرعت‌های چرخش بالا، سطح رشته‌ساز به‌طور مساوی از یک لایه نازک محلول پلیمری پوشش داده شده‌است در نتیجه، جت‌ها / فیلامنت‌ها به‌طور پیوسته تشکیل می‌شوند. با این حال، افزایش بیش از حد سرعت چرخش به دلیل نیروی گریز از مرکز باعث پرتاب محلول به بیرون می‌شود [۹، ۲۲ و ۳۱].

نتیجه‌گیری

با توجه به کاربرد روز افزون نانوالیاف در تولیدات صنعتی برای بهبود خواص شیمیایی، فیزیکی و مکانیکی آنها، استفاده از روش‌های قدیمی و آزمایشگاهی برای تولید نانوالیاف به دلیل پایین بودن بهره‌وری مقرون به صرفه نیست. با تحقیقات انجام گرفته در زمینه رفع مشکلات الکتروریسی در مقیاس آزمایشگاهی، پیشرفت‌های خوبی در این زمینه حاصل شد و روش تولید به سمت روش‌های بدون نازل سوق داده شد. در روش‌های بدون نازل، مشکلات گرفتگی سوزن، سرعت پایین تولید و نواقص ساختاری نانوالیاف به‌طور تقریبی حل شده‌است. هم‌اکنون در سرتاسر دنیا، بیشتر نانوالیاف به روش صنعتی تولید می‌شوند. در کشور ایران نیز شرکت فناوران نانومقیاس در این زمینه پیش قدم بوده و دستگاه‌هایی را در همین زمینه طراحی، تولید و به بازار ارائه کرده است.

مراجع

- [1] E. Ranjbari, S. Bazgir, MMA. Shirazi, Polym. Test. 2020, 84, 106403 Needleless electrospinning of poly (acrylic acid) superabsorbent: Fabrication, characterization and swelling behavior.
- [2] S Omer, L Forgách, R Zelkó, I Sebe, Pharmaceutics 2021, 13(2), 286, Scale-up of electrospinning: Market overview of products and devices for pharmaceutical and biomedical purposes.
- [3] E Tören, A Mazari, preprints.org, Preprints 2024, 2024010272, Needleless Electrospun Collagen/Hyaluronic Acid Nanofibers for Skincare Applications: Research.
- [4] Wee, Tong Teo, Teik, Cheng Lim, Zuwei, Ma. (2005). An Introduction to Electrospinning and Nanofibers. World Scientific Publishing CO. Pte. Ltd. S Toh. Tuck Link, Singapore 96224.
- [5] Jon, Staiger, Nick, Tucker, Mark, Staiger. (2005). Electrospinning. Volume 16. Smithers Rapra Technology, Shawbury, Shrewsbury, United Kingdom. Shropshire SY44NR.
- [6] Zheng-Ming, Huang, Y-Z. Zhang, M. Kotaki, S. Ramakrishna. (2003). A review on polymer nanofibers by Electrospinning and their applications in nanocomposites, Composites science and Technology, 63, 2223-2253.
- [7] Anthony, L. Andrad. (2008). Science and Technology of Polymer Nanofibers. Hoboken, New Jersey. Published by John Wiley & Sons, Inc. 2007027362.
- [8] Monkika, Ragput. (2012). Optimization of Electrospinning Parameters to Fabricate Aligned Nanofibers for

Neural Tissue Engineering. Master of Technology In Biotechnology & Medical Engineering.

- [9] Tong, Lin, Xungai, Wang. (2013). Needleless Electrospinning of Nanofibers. 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300. Version Data: 20131021.
- [10] P. Gupta, G. Wilkes, R. Davis, Th. Ward, T. long, Erd. Kiran.(2004). Processing-structure-property studies. Virginia polytechnic Institute and state University.
- [11] M. Sazegar, S. Bazgir, AA. Katbab, Preparation and characterization of water-absorbing gas-assisted electrospun nanofibers based on poly (vinyl alcohol)/chitosan Materials Today Communications, Volume 25, December 2020, 101489.
- [12] Tong, Lin.(2011). Nanofibers - Production, Properties and Functional Applications. No.65, Yan An Road (West), Shanghai, 200040, China. Publisher InTech.ch 1-2.
- [13] Yong, Liu, Ji-Huan, He, Jian-Yong, YU.(2008).Bubble- Electrospinning A Novel Method for Making Nanofibers. Journal of Physics, Confrence Series 96,012001.
- [14] Feng-Lei, Zhou, Rong-Hua, Gong, Isaac Porat.(2009). Needle and Needleless Electrospinning for Nanofibers. Journal of Applied Polymer Science,Vol. 115, 2591–2598 .
- [15] Haitao, Niu, Tong, Lin, Xungai Wang.(2009). Needleless Electrospinning. I. A Comparison of Cylinder and Disk Nozzles. Journal ofAppliedPolymer Science,Vol. 114, 3524–3530.
- [16] Xin, Wang, Haitao, Niu, Tong, Lin, Xungai, Wang.(2009). Needleless Electrospinning of Nanofibers With a Conical Wire Coil. Published online in Wiley InterScience, Society of Plastics Engineers, DOI 10.1002/pen.21377.
- [17] Zheng-Ming, Huang, Y-Z. Zhang, M. Kotaki, S. Ramakrishna.(2003).A review on polymer nanofibers by Electrospinning and their applications in nanocomposites, Composites science and Technology, 63, 2223-2253.
- [18] Eva, Kostakova, Laszlo, Meszaros, Jan Gregr.(2009). Composite nanofibers produced by modified needleless electrospinning. Journal of Materials Letters 63 2419–2422.
- [19] P.Pokorny, E.Kostakakova, F.Sanetnik.(2014).Effective AC needleless and collectorless Electrospinning for yaran production. Phys. Chem. Chem. Phys., 2014, 16, 26816-26822.
- [20] Feng-Lei, Zhou, Rong-Hua, Gong, Isaac Porat.(2009). Needle and Needleless Electrospinning for Nanofibers. Journal of Applied Polymer Science,Vol. 115, 2591–2598 .
- [21] Haitao, Niu, Xungai, Wang and Tong, Lin.(2011). Needleless electrospinning: influences of fibre generator geometry. The Journal of The Textile Institute, Vol. 103, No. 7, July 2012, 787–794.
- [22] Xin, Wang, Tong, Lin, Xungai, Wang.(2013). Scaling up the Production Rate of Nanofibers by Needleless Electrospinning from Multiple Ring. Fibers and Polymers 2014, Vol.15, No.5, 961-965.
- [23] Wanjun, Liu1, Haifeng, Zhang1, Dawei, Li1, Chen, Huang, Xiangyu, Jin.(2013). Study on needle and needleless electrospinning for nanofibers. Advanced Materials Research Vols. 750-752 (2013) pp 276-279.
- [24] <http://www.elmarco.com>, (Accessed in September and October 2012).
- [25] <http://www.fnm.ir/>. Needleless Electrospinning.
- [26] Zheng-Ming, Huang, Y-Z. Zhang, M. Kotaki, S. Ramakrishna.(2003).A review on polymer nanofibers by Electrospinning and their applications in nanocomposites, Composites science and Technology, 63, 2223-2253.
- [27] P. Gupta, G. Wilkes, R. Davis, Th. Ward, T. long, Erd. Kiran.(2004). Processing-structure-property studies. Virginia polytechnic Institute and state University.
- [28] O. S. Yo`rdem, M. Papila, Y. Z. Mencilog`lu.(2008). Effects of electrospinning parameters on polyacrylonitrile nanofiber diameter: An investigation by response surface methodology, Materials and Design. 29, 34–44.
- [29] A. Baji, Y.-W. Mai, Sh.-Ch. Wong, M. Abtahi, P. Chen.(2010). Electrospinning of polymer nanofibers: Effects on oriented morphology, structures and tensile properties. Composites Science and Technology, 70, 703-718.
- [30] Sh. Zhang, W. S. Shim, J. Kim.(2009). Design of ultra-fine nonwovens via electrospinning of Nylon 6: Spinning parameters and filtration efficiency. Materials and Design. 30, 3659-3666.
- [31] Guojun, Jiang, Sai, Zhang, Xiaohong Qin.(2013). High throughput of quality nanofibers via on stepped pyramid-shaped spinneret. Journal of Materials Letters. 106 (2013)56–58.
- [32] Shamim.Zargham, Saeed.Bazgir, Amir.Tavakoli.(2012).The Effect of Flow Rate on Morpholgy and Deposition Area of Electrospun Nylon 6 Nanofiber.Journal of Engineered Fibers and Fabrics.Volume 7, Issue 4.

Author

Esmail Ranjbari

esmaeil.ranjbari@srbiau.ac.irScience and Research Branch, Islamic
Azad University, Tehran, IranA microscopic image showing a dense network of thin, tangled nanofibers. The fibers are light-colored, possibly white or light blue, and are set against a dark background. The fibers vary in thickness and are oriented in various directions, creating a complex, web-like structure.

Production of Nanofibers with New Electrospinning Methods

Abstract

Many approaches have been proposed in the literature to increase productivity and eliminate structural defects of nanofibers. They have focused more on increasing the number of jets through needle modification, using multiple needles, and needleless electrospinning, each of which has advantages and disadvantages. It is true that needleless electrospinning has solved the problem of needle clogging and low production speed; But the problem of rapid evaporation of volatile solvents, which leads to a decrease in accuracy and lack of reproducibility in the manufacturing process, has not yet been completely solved. Today, the production of nanofibers has become very important due to their many applications in various fields in the world. Although the production of nanofibers in the laboratory is easy, but when it comes to production on an industrial scale, it seems a bit difficult due to the difficult conditions of controlling environmental and machine factors that have a direct effect on the structure and properties of nanofibers.

Keywords

Nanofibers; Needleless Electrospinning; Affecting Parameters.

Study on gluten amounts of foodstuffs by ELISA method

Abstract

Gluten is one of food ingredients that is widely used in food industry because of its technological and organoleptic properties.

Celiac is an autoimmune enteropathy disease caused by permanent intolerance to gluten. When genetically predisposed patients are exposed to gluten, which is the major protein of wheat, barley, rye, and related grains, a specific immune response is activated in their body. Currently, gluten-free diets are the only treatment for celiac patients. Eliminating high gluten foods containing wheat, barley, and rye reduces symptoms, improves quality of life and even reduces mortality.

For this purpose, in order to determine and confirm the absence of gluten in the products and foods it is necessary to carry out a control test. ELISA has been approved by the American Chemical Society as a conventional method for gluten detection.

ELISA is able to detect naturally and heat-treated gluten and measure it quantitatively. ELISA assay can estimate the quantitative amount of gliadins and hordeins in based on wheat and barley processed and unprocessed products, as well as the gluten content of hydrolyzed products.

Authors

Maryam Ahmadi^{1*}
Khosro Aghaeipour²

*Maryam.ahmadi3836@gmail.com

1. Biotechnology Department of Behesht Ain Laboratory Complex, Tehran, Iran
2. Management and technical manager of Behesht Ain Laboratory complex, Tehran, Iran

Keywords

gluten, gliadin, celiac disease, ELISA.

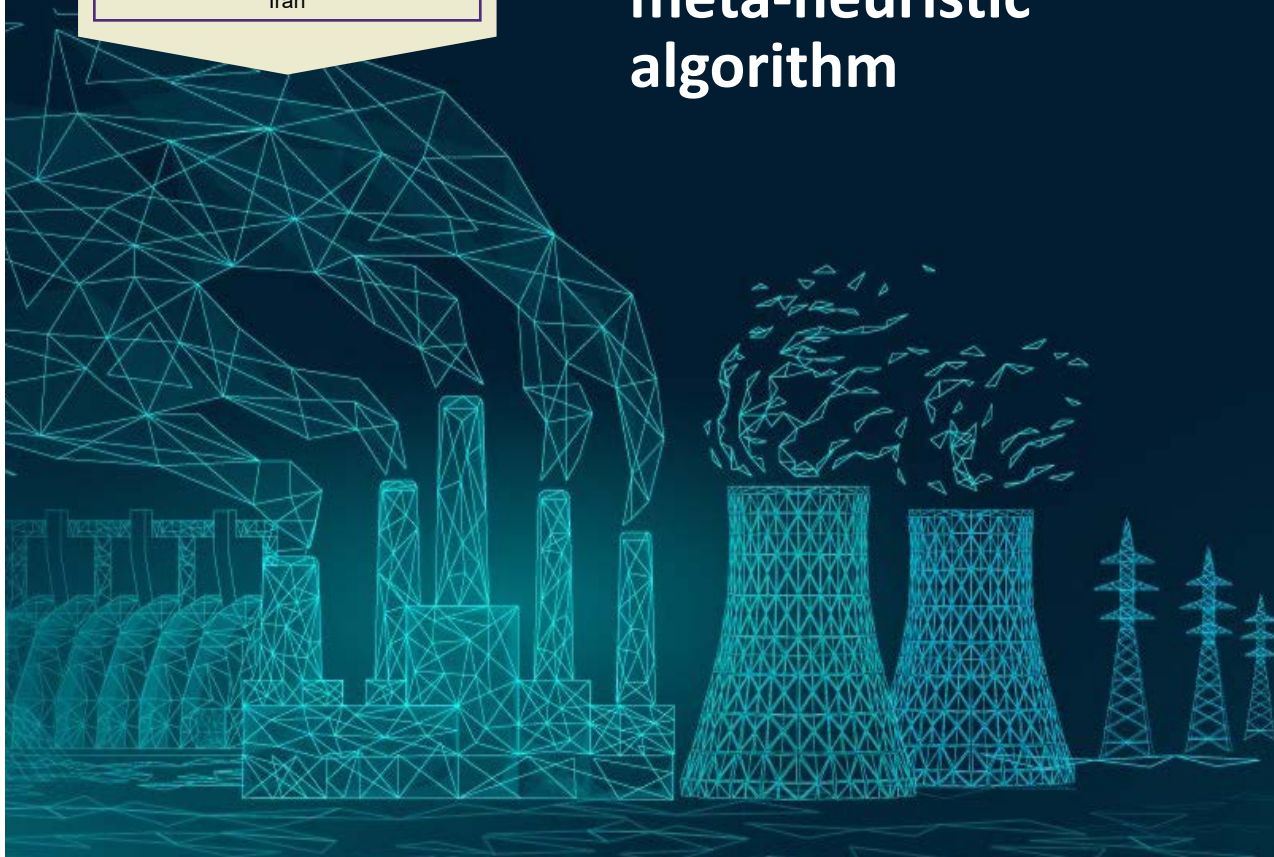
Authors

Ramin Fotouhi^{1*}
Mahdi Pourgholi²

*fotouhi@rcii.ir

1. Research center of informatic industries, Tehran, Iran
2. Electrical engineering department, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Optimization of gas-fired units using teaching-learning meta-heuristic algorithm

**Abstract**

The service companies that provide the task of operating the power grids of industrial cities obtain the electricity they need from the electricity markets or gas power plants. To minimize the company's cost, an objective function is introduced considering the energy supply constraints of consumers, gas unit constraints, and recycling system constraints. The algorithm used for optimization is the heuristic learning-learning algorithm, and finally, the simulation results of the introduced algorithm have been compared with the genetic algorithm. The codes related to the simulation are presented in the software of the article and the relevant results show that the teaching-learning algorithm can find the optimal solution to the problem faster than the genetic algorithm.

Keywords

teaching-learning algorithm, genetic algorithm, optimization, cogeneration, energy management.

Checking the normality of distribution of test results using minitab software

Authors

Mehri Nadiri Niri^{1*}
Safa Saraj Mehdizadeh¹

*mnadiriniri@yahoo.com

1. Tanin Peak Sabalan Company (Beta),
No. 2 Industrial Zone, Ardabil, Iran.



Abstract

After performing any type of measurement, a number of data (numbers) are always obtained, which must be discovered or categorized in order to be able to analyze them. To do this, first, the method of data distribution should be determined. Researchers usually try to find out which data distributions are closest to mathematical functions, so that they can have a correct analysis of the nature of the distribution and calculations on it. In fact, one of the most important statistical distributions is called "normal distribution". Checking the normality of the distribution of test results is a prerequisite for many statistical tests, and one of the softwares to perform this check is minitab software. In this research, in order to check the normality of the results obtained from measuring the vertical rebound of a size 5 rubber outdoor soccer ball, the Anderson Darling method was used with the help of minitab software. The parameter used to judge the normality of data distribution is p-value. According to the obtained result, the $p\text{-value} \geq 0.05$, which indicates the normality of data distribution.

Keywords

Measurement, Data, Normality, Vertical rebound, Minitab.

Authors

Amin safaie^{1*}
Marjan Jafari¹

*Amin.safaie2016@gmail.com

1.Laboratory Specialist in Shiraz
University Central Lab, Shiraz, Iran



MACHINE
LEARNING

Raman hyperspectral imaging and the implementation of machine learning algorithms: an innovative approach for molecular mapping of materials

Abstract

Nonlinear Raman scattering spectroscopy is an optical method used to detect vibrational modes of target molecules, enabling the analysis and detection of chemical species at the molecular scale. When combined with a confocal optical microscope, this system can scan the sample surface point-by-point and record the molecular information present. By processing the raw spectral data and spatial coordinates, two-dimensional hyperspectral images are generated, containing nonlinear Raman scattering information for each pixel. Advanced statistical methods in artificial intelligence and machine learning are then used to extract information about the spatial distribution of molecules and chemical phases with high sensitivity and accuracy. In this study, an integrated optical setup consisting of a confocal optical microscope and a Raman spectroscopic system was used to scan the surface of a heterogeneous polymer sample at 3900 points using a visible laser with a wavelength of 532 nanometers. The recorded hyperspectral images were then processed using artificial intelligence and machine learning statistical methods to extract a molecular map of the spatial distribution of polymers in the sample.

Keywords

Raman Hyperspectral Imaging, Unsupervised Machine Learning, PCA, HCA, K-median.

Authors

Nasrollah Abbasi^{1*}Safoora Shakeri²

*abbasi@znu.ac.ir

1. Rastin Zamin Pazhouhan Co, Incubator and Innovation Center, University of Zanjan, Zanjan, 45371-38971, Iran.

2. Research affairs office, Faculty of Engineering, University of Zanjan, Zanjan 45371-38971, Iran



Gemological and paleontological value of amber and laboratory methods of its detection

Abstract

Amber is known as jewel with organic origin, which was formed during the fossilization of the resin of some plants. The resin of plants in the early stages of petrification is called copaline. There are, however, some synthetic organic materials such as Bakelite, with amber-like appearance and are a counterfeit for amber. Main characteristics of natural ambers include: having a higher melting point and refractometry index, not dissolving in some organic solvents such as acetone, blue fluorescence under ultraviolet light and having a pleasant resinous smell in heat. Most ambers have been found from the Cretaceous, Eocene to Miocene sediments, and the largest numbers of ambers discovered is from the Baltic basin. Having some well-preserved fossils, and presence of gas, liquid and solid inclusions, cause to increase the valuable of amber in the paleontological studies. Simple physical tests as well as the use of Nuclear Magnetic Resonance (NMR) or Pyrolysis Gas Chromatography/Mass Spectrometry (Pyrolysis-GC-MS) are useful analysis methods in the amber detection.

Keywords

Amber, Copaline, Jewel, Spectroscopy, Resin.



Iranian Journal of Laboratory Knowledge

Volume 12 ■ Issue 1 ■ Spring 2024 ■ No.45

ISSN 2538-3450

Concessionaire:
Iran Nanotechnology Innovation Council

Managing Editor: Alireza Badiiei

Editor in Chief: Mojtaba Nasab

Executive Management: Iran Nanotechnology
Laboratory Network (INLN)

Article Editor: Davoud Gharailou

Authors:

Esmail Ranjbari, Maryam Ahmadi
Khosro Aghaeipour, Ramin Fotouhi
Mahdi Pourgholi, Mehri Nadiri Niri
Safa Saraj Mehdizadeh, Amin safaie
Marjan Jafari, Nasrollah Abbassi
Safoora Shakeri

Designer : Simin Rafipour Langroudi

Editor: Zeinab Zarincheh

Iran, Tehran, Po.Box: 14565-344

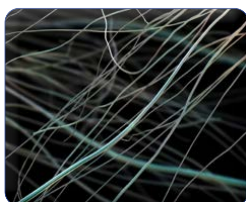
www.IJLK.ir

Email : info@ijlk.ir



Contents

Articles



Production of Nanofibers with New
Electrospinning Methods

>49



Study on gluten amounts of
foodstuffs by ELISA method

>50



Optimization of gas-fired units using
teaching-learning meta-heuristic algorithm

>51



Checking the normality of distribution
of test results using minitab software

>52



Raman hyperspectral imaging and
the implementation of machine
learning algorithms: an innovative
approach for molecular mapping of
materials

>53



Gemological and paleontological
value of amber and laboratory
methods of its detection

>54

Production of Nanofibers with New Electrospinning Methods



Gemological and paleontological value of amber and laboratory methods of its detection



Raman hyperspectral imaging and the implementation of machine learning algorithms: an innovative approach for molecular mapping of materials



Checking the normality of distribution of test results using minitab software



Optimization of gas-fired units using teaching-learning meta-heuristic algorithm



Study on gluten amounts of foodstuffs by ELISA method