

جداسازی خودکار پلیمر PVC با استفاده از بیناب نمایی فروشکست

القایی لیزری و شبکه عصبی LQV

محمد وحید دستجردی^۱، محمود سلطان الکتابی^۲

تاریخ ارسال آبان ۹۵، پذیرش بهمن ۹۵

چکیده: در این پژوهش با بکارگیری روش بردار چندی ساز یادگیر (LVQ) در حوزه‌ی شبکه‌های عصبی مصنوعی و روش تحلیل مولفه اصلی (PCA)، توانایی روش بیناب نمایی فروشکست القایی لیزری در جداسازی پلیمر پلی وینیل کلراید (PVC) از سایر پلیمرها در فرآیند بازیافت مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در ابتدا ۵ نوع پلیمر آماده شد و شدت‌های مرتبط با خطوط اتمی، یونی و همچنین گسیل‌های مولکولی مرتبط با هر نمونه ثبت شد، سپس روش PCA به عنوان یکی از روش‌های آماری چند متغیره به منظور کاهش ابعاد داده‌ها و همچنین یافتن یک الگو در بیناب LIBS نمونه‌ها، مورد استفاده قرار می‌گیرد. پس از آن روش بردار چندی ساز یادگیر که اخیراً در حوزه‌ی روش‌های یادگیری ماشین مطرح شده است را برای جداسازی پلیمر PVC از سایر پلیمرها بکار می‌گیریم. نتایج نشان می‌دهد که تنها با دو متغیر خروجی از روش PCA که به عنوان متغیرهای ورودی برای روش LVQ از آنها استفاده کردیم، می‌توان پلیمرهای PVC را از سایر پلیمرهای مورد آنالیز در این پژوهش با دقت ۹۳/۳٪ تفکیک کرد.

واژه های کلیدی: بیناب نمایی فروشکست القایی لیزری، پلیمرها، شبکه عصبی مصنوعی، تحلیل مولفه اصلی، فرآیند بازیافت

۱. مقدمه

خواهد داشت. به علت ترکیبات ناسازگار پلاستیک‌ها، پلاستیک‌های مختلف نمی‌توانند هنگامی که بازیافت می‌شوند با هم ترکیب شوند. زمانی که انواع مختلف پلاستیک‌ها با هم ذوب می‌شوند مانند آب و روغن تمایل دارند که از هم جدا شوند و لایه‌های مختلفی را بوجود آورند.

به طور منطقی می‌توان فهمید که اگر تولید پلاستیک‌ها افزایش یابد مقدار زباله‌های پلاستیکی نیز افزایش می‌یابد. یکی از راه‌هایی که برای کاهش دفن زباله‌های پلاستیکی است، بهبود و سریع‌تر کردن فرآیند بازیافت است که باعث می‌شود نیاز به مراکز دفن و زباله سوزها کاهش و نیاز به تولید و یا واردات مواد خام کاهش یابد. بنابراین بازیافت هر چه بیشتر زباله‌های خانگی و صنعتی یک ضرورت محسوب می‌شود، در ضمن مزیت‌های اقتصادی فراوانی را هم در پی

²Department of Physics, University of Isfahan, Isfahan
(*Corresponding author: mvd_vahid@yahoo.com)

^۱ گروه فیزیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان.

LIBS همراه با سایر روش های تحلیلی، برای شناسایی روی خط پلاستیکها بسیار موثر است. از جمله مزایای روش LIBS می توان به آنالیز هم زمان چند عنصری، قابلیت سیار بودن، غیر مخرب بودن، قابلیت آشکارسازی درجا و آبی، توانایی آنالیز ماده در هر سه حالت جامد، مایع و گاز، عدم نیاز و یا نیاز کم به آماده سازی نمونه اشاره کرد [۶]. همانطور که گفته شد در فرآیند بازیافت الویت اصلی این است پلیمر PVC از سایر پلیمرها جدا شود به همین منظور در این تحقیق به دنبال ارائه مدلی هستیم که با آنالیز داده های حاصل از LIBS، پلیمر PVC را از سایر پلیمرها جدا کند. به دلیل ساختار مشابه پلیمرها، تفاوت های موجود در بیناب ثبت شده پلیمرها اندک است، به همین دلیل نیازمند یک مدل دقیق هستیم تا پلیمرهای مورد بررسی را تفکیک کنیم. برای تفکیک پلیمرها به روش LIBS تا کنون روش های تحلیلی مختلفی بکار گرفته شده که از جمله آنها می توان به روش حداقل مربعات جزئی [۷] و روش تحلیل تابع تشخیصی^۴ [۸] اشاره کرد. در این پژوهش برای نخستین بار به دنبال بکارگیری شبکه عصبی بردار چندی ساز یادگیر^۵ (LVQ) به دلیل دقت بالای آن در حوزه ی طبقه بندی، در ارتباط با تفکیک پلیمرها به روش LIBS هستیم. در این پژوهش ابتدا با استفاده از روش تحلیل مولفه اصلی^۶ (PCA) به پیدا کردن متغیرهای تفکیک کننده مورد نیاز برای تفکیک پلیمر مورد نظر می پردازیم و در نهایت شبکه عصبی LVQ را برای ایجاد یک تفکیک کننده خودکار به منظور جداسازی پلیمرهای PVC از سایر پلیمرها با استفاده از متغیرهای تولید شده توسط روش PCA به کار می گیریم.

از نواحی مرزی این لایه ها، پلاستیک های بازیافتی حاصل می شوند که به علت ضعف های ساختاری کاربردهای محدودی دارند. اما نگرانی اصلی بوجود آمدن گازهای سمی به علت حضور پلی وینیل کلراید^۱ (PVC) است. به همین دلیل به منظور جلوگیری از آسیب رسیدن به کارگران مشغول به کار در کارخانه بازیافت و همچنین آسیب های زیست محیطی این نوع پلاستیک ها باید قبل از فرآیند بازیافت شناسایی و از هم جدا شوند [۱]. به دلایل گفته شده، یافتن روش ماشینی و مقرون به صرفه برای تفکیک پلاستیک ها در فرآیند بازیافت همواره مورد توجه بوده است. یکی از مرسوم ترین روش های موجود در این زمینه، بیناب نمایی مادون قرمز نزدیک است. در این روش ساختار مولکولی پلیمرها با آشکارسازی بیناب عبوری و بازتابی آنها شناسایی می شود. فرآیند شناسایی معمولاً سریع و در زمانی از مرتبه ۱۰۰ میلی ثانیه انجام می شود [۲ و ۳]. بر خلاف مزیت هایی چون دقت و سرعت، این روش نمی تواند نمونه های سیاه یا بسیار تاریک را تحلیل کند. در این حالت بیشتر تابش جذب می شود و هر چیزی که به سختی بازتاب می شود برای تحلیل استفاده می شود که منجر به بیناب های بدون ویژگی خاصی می شود. این روش نیاز دارد تا برای شناسایی نمونه با نمونه مورد نظر در تماس باشد. روش دیگری که در زمینه تفکیک پلاستیک ها وجود دارد، بیناب نمایی پرتو ایکس است. برای استفاده از پرتو ایکس خطر جانی وجود دارد و باید کارمندان را از پرتو ایکس محافظت کرد [۴]. در این پژوهش روش بیناب نمایی فروشکست القایی لیزری^۲ (LIBS) به عنوان یک روش جایگزین معرفی می شود LIBS پتانسیل زیادی در بر طرف کردن نیاز صنایع دارد. LIBS بر خلاف بیناب نمایی مادون قرمز نزدیک توان تحلیل نمونه های سیاه و بسیار تاریک را دارد. حتی LIBS می تواند عناصر فلزی و افزودنی های موجود در پلاستیک را نیز شناسایی کند [۵]. بنابراین بکارگیری

³ Partial least squares discriminant analysis

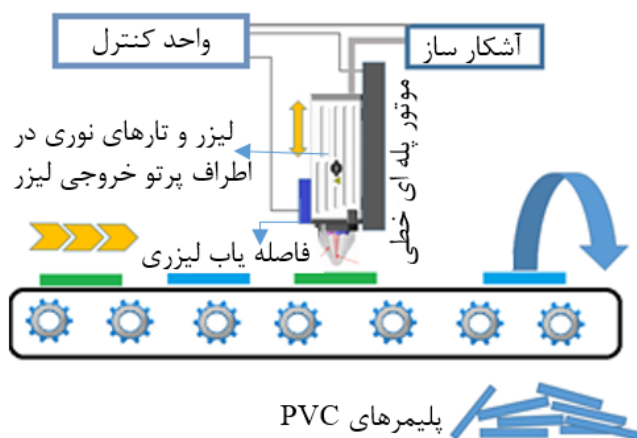
⁴ discriminant function analysis

⁵ learning vector quantization

⁶ principal component analysis

¹ Polyvinyl chloride

² Laser induced breakdown spectroscopy



شکل ۱. شماتیکی از طرح جداسازی پلیمر PVC توسط LIBS

می‌دانیم که زباله‌های پلاستیکی دارای ابعاد و اندازه‌های مختلف هستند به همین دلیل در این طرح به منظور اینکه فاصله سطح همه‌ی زباله‌های پلاستیکی تا خروجی لیزر در سیستم LIBS یکسان باشد. ابتدا فاصله سطح نمونه تا خروجی لیزر توسط فاصله یاب دقیق لیزری اندازه‌گیری می‌شود و سپس لیزر به همراه فیبرهای نوری توسط یک موتور پله ای خطی به گونه ای جا بجا می‌شوند تا فاصله سطح نمونه از خروجی لیزر برای همه‌ی نمونه‌ها یکسان شوند. این کار به این علت انجام می‌شود تا تنها عامل تفاوت در بیناب ثبت شده از نمونه‌ها تفاوت ساختاری آنها باشد و عوامل دیگر بر بیناب LIBS نمونه‌ها اثر نگذارد. همچنین می‌دانیم پلاستیک‌ها اغلب دارای آلودگی‌هایی در سطح خود هستند که می‌تواند فرآیند شناسایی آنها را مختل کند به همین دلیل باید از یک سیستم تمیز کننده هم استفاده کنیم، در این قسمت می‌توان با استفاده از فرآیندهای مختلف مانند استفاده از یک لیزر تپی و یا استفاده از فشار هوا و یا استفاده از برس‌های تمیز کننده صنعتی، آلودگی و یا برچسب‌های موجود در قسمتی از سطح را پاک کرد، سپس با پردازش اطلاعات موجود ثبت شده از بیناب LIBS

۲. مواد و چیدمان تجربی

ابتدا پنج نمونه از پلیمرها شامل پلی‌اتیلن^۱ (PE)، پلی‌متیل متاکریلات^۲ (PMMA)، پلی‌پروپیلن^۳ (PP)، پلی‌استایرن^۴ (PS) و پلی‌وینیل کلراید (PVC) که به طور معمول در ساخت انواع مواد پلاستیکی به کار می‌روند به صورت گرانول تهیه شد. سپس گرانول نمونه‌ها با استفاده از سیستم فشار هیدرولیکی به قرص‌های هم شکل و هم اندازه با سطحی کاملاً صاف با قطر ۱۳ میلی‌متر و ضخامت ۳ میلی‌متر تبدیل گردید تا همه نمونه‌ها در شرایط کاملاً مشابه آنالیز شده و تنها عامل تفاوت در بیناب ثبت شده از پلیمرهای مختلف، تفاوت ساختاری آنها باشد. برای آنالیز نمونه‌ها در این تحقیق از سامانه LIBSCAN100 ساخت شرکت Applied Photonics استفاده شده است. این سامانه مجهز به لیزر Nd:YAG با انرژی خروجی متغیر تا ۱۰۰ میلی ژول، پهنای تپ ۲-۷ نانوثانیه، فرکانس تکرار ۱ تا ۲۰ هرتز بوده که بیناب پلاسمای تولیدی توسط آشکارساز ساخت شرکت Avantes ثبت می‌گردد. توانایی تفکیک پذیری دستگاه در نواحی مختلف طول موجی بین ۰/۰۳ تا ۰/۱۵ نانومتر و قابلیت بیناب نگاری در ناحیه طول موجی ۱۸۰ تا ۱۰۵۷ نانومتر را دارا می‌باشد. از هر نمونه در اتمسفر هوا، ۳ بیناب ثبت شد و از میانگین این بیناب‌ها برای آنالیز هر نمونه استفاده شد. در این تحقیق ما یک طرح برای موقعیت واقعی در کارخانه بازیافت برای تفکیک پلیمرها ارائه می‌کنیم که شماتیکی از آن را در شکل شماره ۱ مشاهده می‌کنید.

¹ Polyethylene

² Polymethyl methacrylate

³ Polypropylene

⁴ Polystyrene

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & \dots & x_{1p} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & \dots & x_{np} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1^T \\ \vdots \\ x_n^T \end{pmatrix} \quad (1)$$

ماتریس کوواریانس نمونه که آن را با S نمایش می‌دهیم ماتریسی $p \times p$ و متقارن است که درایه سطر i ام و ستون j ام آن در واقع کواریانس نمونه بین متغیر i ام و j ام بوده و به طریق زیر تعریف می‌شود:

$$s_{ij} = \frac{1}{n-1} \sum_{r=1}^n (X_{ri} - \bar{X}_i) (X_{rj} - \bar{X}_j) \quad (2)$$

۳-۱-۲ تعریف مولفه‌های اصلی

مولفه‌های اصلی، p متغیر جدیدند که آنها را با Y_1, Y_2, \dots و Y_p نشان می‌دهیم. هر یک از متغیرهای جدید یک ترکیب خطی از p متغیر اولیه هستند که بر اساس ویژه بردارهای ماتریس کوواریانس داده‌های اولیه تعریف می‌شوند. فرض کنید $\lambda_1, \lambda_2, \dots$ و λ_p ویژه مقادیر مرتب شده ماتریس S هستند، به طوریکه $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_p$. فرض کنید q_1, q_2, \dots, q_p بردارهای ویژه یک متعامد به ترتیب متناظر با $\lambda_1, \lambda_2, \dots$ و λ_p هستند. در این صورت مولفه اصلی i ام به صورت زیر تعریف می‌شود [۹]:

$$Y_i = q_i^T X = q_{i1}X_1 + q_{i2}X_2 + \dots + q_{ip}X_p \quad (3)$$

$$q_i = (q_{i1}, q_{i2}, \dots, q_{ip})^T$$

۳-۲ بردار چندی ساز یادگیر LVQ

در این پژوهش برای طراحی یک مدل طبقه بندی کننده که بتواند پلیمر PVC را از سایر پلیمرهای مورد آنالیز در این تحقیق تفکیک کند از مدل بردار چندی ساز یادگیر (LVQ) استفاده کردیم. منظور از طبقه بندی طراحی مدلی است که ابتدا آن را با نمونه‌هایی که ماهیت آنها

نمونه‌ها، مشخص می‌شود که کدام یک از زباله‌های پلاستیکی از جنس PVC است و در نهایت در مرحله آخر نمونه‌های PVC توسط یک بازوی مکانیکی، از روی نوار نقاله به خارج از آن هدایت می‌شوند. در ادامه فقط روی سیستم LIBS و تفکیک زباله‌های پلاستیکی توسط این سیستم تمرکز می‌کنیم.

۳. روش تحلیل داده‌ها

در ابتدا روش تحلیل مولفه اصلی به عنوان یکی از روش‌های آماری چند متغیره مورد استفاده قرار می‌گیرد، سپس از متغیرهای خروجی از این روش به عنوان متغیرهای ورودی برای شبکه عصبی LVQ استفاده خواهد شد.

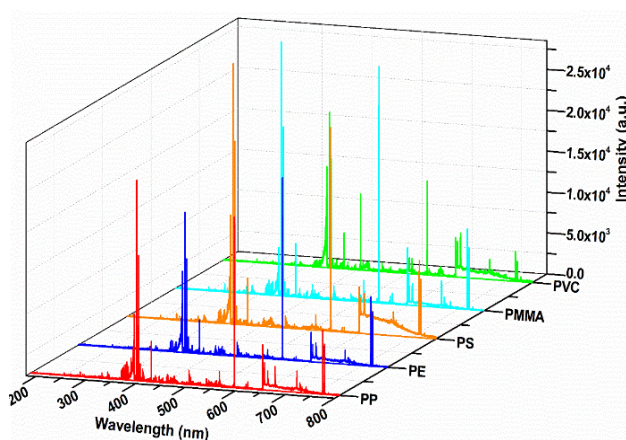
۳-۱ تحلیل مولفه اصلی

تحلیل مولفه اصلی برای تقلیل بعد داده‌ها و کاهش پیچیدگی تحلیل متغیرهای اولیه مسئله به کار می‌رود. همچنین این روش یک تکنیک آماری بسیار کارآمد برای یافتن یک الگو در داده‌هایی با تعداد متغیرهای زیاد به منظور تفکیک نمونه‌ها است [۹]. در ادامه به چگونگی ساخت ماتریس ورودی به روش PCA (ماتریس داده‌ها) و چگونگی محاسبه مولفه‌های اصلی (متغیرهای خروجی) می‌پردازیم.

۳-۱-۱ ساخت ماتریس داده‌ها و کوواریانس نمونه

تعداد اعضای نمونه (۵۰) با n و تعداد متغیرها (شدت‌های متناظر با طول موج‌های مختلف) با p نشان داده می‌شود. ماتریس داده‌های نمونه که با X نشان داده می‌شود ماتریسی $n \times p$ است که نمونه‌ها روی سطر این ماتریس و متغیرها روی ستون آن قرار می‌گیرند.

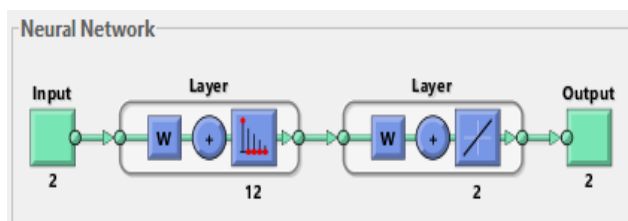
بیناب LIBS ثبت شده مربوط به پنج نمونه‌ی پلیمری PE، PMMA، PP، PS و PVC در ناحیه طول‌موجی ۸۰۰-۱۹۰ نانومتر در شکل ۳ نشان داده شده است. خطوط اتمی کربن و هیدروژن که از عناصر اصلی تشکیل دهنده پلیمرها هستند و همچنین عناصر ناخالصی کلسیم، منیزیم، تیتانیوم، سدیم و پتاسیم در بیناب پلیمرها مشاهده می‌شوند.



شکل ۳. بیناب ثبت شده از پلیمرهای PE، PP، PMMA، PS و PVC

می‌دانیم که پلیمر PVC در ساختار شیمیایی خود حاوی اتم کلر است، حال نکته‌ی قابل توجه مشاهده نشدن خطوط اتمی کلر در بیناب نمونه‌ی PVC است که این امر ناشی از انرژی زیاد مورد نیاز برای برانگیختگی و همچنین قرار گرفتن خطوط اصلی اتمی کلر در ناحیه طول موجی خارج از بازه آشکارسازی ما (۱۴۰-۱۳۴ نانومتر) و نیاز به انجام آزمایش در محیط خلا می‌باشد [۱۱]. علاوه بر خطوط یونی و اتمی شناسایی شده، گسیل‌های مولکولی CN متعلق به گذار $B^2\Sigma^+ - X^2\Sigma^+$ و همچنین گسیل‌های مولکولی C_2 متعلق به گذار $d^3\Pi_g - a^3\Pi_u$ نیز به ترتیب در دو ناحیه طول‌موجی ۴۲۲-۳۸۵ و ۵۶۴-۴۶۹ نانومتر مشاهده

مشخص است آموزش می‌دهیم و سپس با استفاده از مدل طراحی شده تشخیص می‌دهیم پلاستیک‌هایی با ماهیت مجهول متعلق به کدام نوع از انواع پلیمرها هستند. این مدل‌ها نیاز به پارامترهای ورودی دارند که این ویژگی را داشته باشند که داده‌ها را از هم تفکیک کنند که این پارامترها را توسط روش PCA بدست می‌آوریم. شبکه عصبی LVQ یک شبکه عصبی نظارت شده و دو لایه‌ای است [۱۰]. مدل به طور کلی با تقسیم مجموعه داده‌های ثبت شده به سه دسته‌ی آموزش، اعتبارسنجی و داده‌های آزمون طراحی می‌شود. داده‌های آزمون که به عنوان پلیمرهایی با ماهیت مجهول به مدل معرفی می‌شود به ما کمک می‌کند تا قدرت مدل طراحی شده را برای تفکیک پلیمر PVC از سایر پلیمرها بررسی کنیم. در این پژوهش ۵۵٪ از داده‌های ثبت شده برای آموزش مدل، ۱۵٪ برای اعتبارسنجی و ۳۰٪ درصد از داده‌ها به عنوان داده‌های آزمون استفاده شد. در این پژوهش برای طراحی شبکه عصبی LVQ از نرم افزار Matlab استفاده شد. نمایه‌ای از مدل طراحی شده با ۱۲ عصب در لایه پنهان و دو متغیر ورودی (دو متغیر اول خروجی از روش PCA) را در شکل ۲ مشاهده می‌کنید.



شکل ۲. نمایه‌ای از شبکه عصبی LVQ طراحی شده

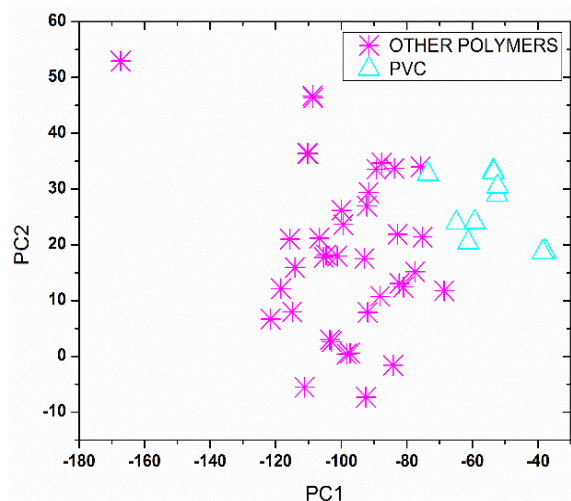
۴. بحث و تحلیل نتایج

۴-۱ تحلیل بیناب LIBS نمونه‌ها

	۴۱۸/۰۶; ۴۱۹/۶۹; ۴۲۱/۵۵
O I	۷۷۷/۳
NI	۷۴۲/۳۶; ۷۴۴/۲۳; ۷۴۶/۸۳

۴-۲ نتایج روش PCA

پس از انجام فرآیند PCA در نرم افزار Matlab و تعیین ویژه مقادیر و ویژه بردارهای ماتریس کوواریانس نمونه، تصویر داده‌های اولیه در صفحه مولفه‌های اصلی اول و دوم (PC1-PC2)، دوم و سوم (PC2-PC3) و اول و سوم (PC1-PC3) ترسیم و به ترتیب در شکل‌های ۴، ۵ و ۶ نشان داده شده است. همانطور که در شکل‌های ۴ الی ۶ مشاهده می‌شود با استفاده از ۳ متغیر اول خروجی از روش PCA به جای استفاده از چندین شدت گسیلی ورودی به روش PCA می‌توان پلیمر PVC را از سایر پلیمرها تفکیک کرد.

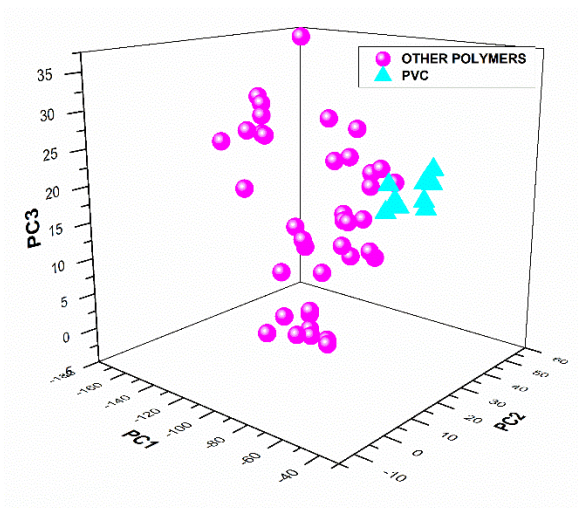


شکل ۴. تصویر داده‌ها در صفحه (PC1-PC2)

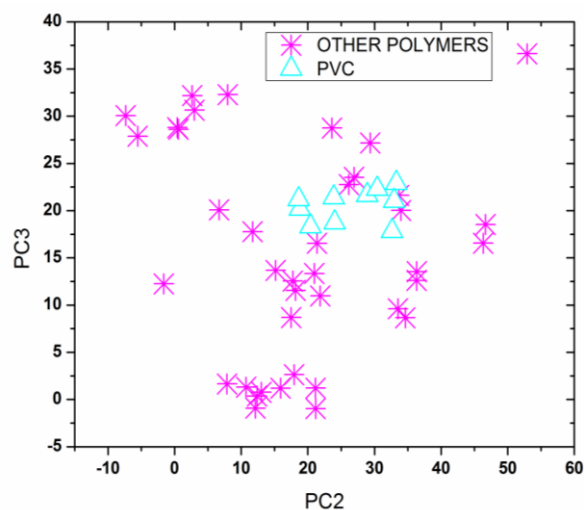
می‌شوند. قله‌های بینایی مربوط به عناصر مختلف در طول موج‌های مشخصه‌ی آن‌ها و همچنین گسیل‌های مولکولی، با مراجعه به پایگاه اطلاعاتی NIST [۱۲] و مطالعات صورت گرفته بر روی گسیل‌های مولکولی [۱۳] شناسایی و در جدول ۱ گزارش شده است.

جدول ۱. خطوط گسیلی شناسایی شده در بیناب پلیمرها

اتم / یون / مولکول	طول موج (nm)
Ca II	۳۱۵/۸۸; ۳۱۷/۹۳; ۳۷۰/۶۰; ۳۷۳/۶۹; ۳۹۳/۳۶; ۳۹۶/۸۴
Ca I	۴۲۲/۶۷; ۴۲۸/۳۰; ۴۲۸/۹۳; ۴۲۹/۸۹; ۴۳۰/۲۵; ۴۳۰/۷۷; ۴۳۱/۸۶; ۴۴۲/۵۴; ۴۴۳/۴۹; ۴۴۵/۴۷; ۵۵۸/۱۹; ۵۵۸/۸۷; ۵۵۹/۴۴; ۵۸۵/۷۴; ۶۱۰/۲۷; ۶۱۲/۲۲;
C I	۱۹۳/۰۰; ۲۴۷/۸۵
Mg II	۲۷۹/۵۵; ۲۸۰/۲۷
Mg I	۲۸۵/۲۱
Si I	۲۸۸/۱۵
Ti II	۳۲۳/۴۵; ۳۲۳/۶۵; ۳۲۳/۹۰; ۳۳۴/۹۴; ۳۳۶/۱۲; ۳۳۷/۲۷; ۳۳۸/۳۷; ۳۷۵/۹۳
Ti I	۳۶۴/۲۸; ۳۶۵/۳۴; ۳۶۸/۵۲; ۳۷۵/۲۸; ۳۹۸/۱۷; ۳۹۸/۹۷; ۳۹۹/۸۶; ۴۹۸/۱۷
Al I	۳۹۴/۴۰; ۳۹۶/۱۵
Na I	۵۸۸/۹۹; ۵۸۹/۵۹
K I	۷۶۶/۴۹; ۷۶۹/۸۹
H	۶۵۶/۲۸
C ₂	۴۶۹/۶۵; ۴۷۱/۴۵; ۴۷۳/۶۱; ۵۱۲/۸۰; ۵۱۶/۴۲; ۵۵۸/۵۰; ۵۶۳/۴۸
CN	۳۸۵/۰۵; ۳۸۵/۴۴; ۳۸۶/۱۲; ۳۸۷/۰۸; ۳۸۸/۲۹; ۴۱۵/۲۲; ۴۱۵/۷۹; ۴۱۶/۷۵;



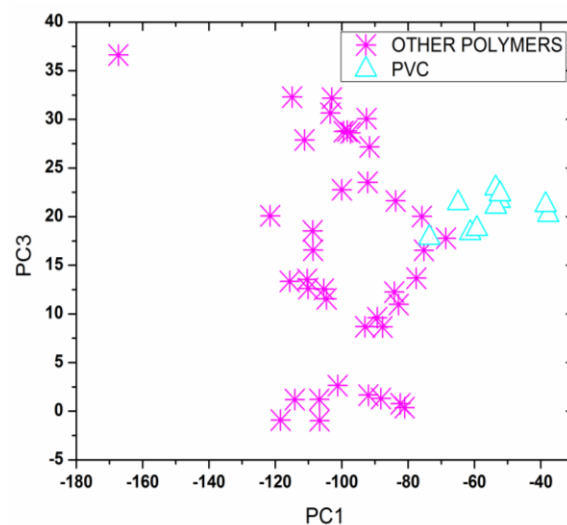
شکل ۷. تصویر داده ها در فضای سه بعدی PC1-PC2-PC3



شکل ۵. تصویر داده ها در صفحه (PC2-PC3)

۳-۴ نتایج طبقه بندی پلیمرها با استفاده از شبکه عصبی LVQ

نتایج حاصل از مدلی که برای طبقه بندی و تفکیک خودکار پلیمر PVC از سایر پلیمرها طراحی شد، در قالب ماتریس های درهم ریختگی^۱ در شکل های ۸ و ۹ نشان داده شده است.



شکل ۶. تصویر داده ها در صفحه (PC1-PC3)

		train confusion matrix		
		PVC	other polymers	
Predicted	PVC	6 21.4%	1 3.6%	85.7% 14.3%
	other polymers	0 0.0%	21 75.0%	100% 0.0%
		PVC	other polymers	
		100% 0.0%	95.5% 4.5%	96.4% 3.6%
		Actual class		

شکل ۸. ماتریس درهم ریختگی برای مجموعه داده های آموزش

همچنین تصویر داده های اولیه در فضای سه بعدی (PC1-PC2-PC3) برای هر مجموعه از پلیمرها در شکل ۷ رسم شده است.

¹ confusion matrix

را برای تفکیک خودکار پلیمر PVC را از سایر پلیمرها مورد ارزیابی قرار دهیم. بدین منظور ابتدا از روش تحلیل مولفه اصلی به عنوان یکی از روش‌های آماری چند متغیره به منظور کاهش ابعاد داده‌ها و همچنین یافتن یک الگو در بیناب LIBS نمونه‌ها، مورد استفاده قرار گرفت. پس از آن روش بردار چندی ساز یادگیر (LVQ) را برای جداسازی پلیمر PVC از سایر پلیمرها بکار گرفتیم. نتایج نشان داد که می‌توان تنها با دو متغیر خروجی از روش PCA که به عنوان متغیرهای ورودی برای روش LVQ از آنها استفاده شد، پلیمرهای PVC را از سایر پلیمرهای مورد آنالیز در این پژوهش با دقت ۹۳/۳٪ تفکیک کرد. در ضمن باید توجه شود که میزان طبقه بندی صحیح ذکر شده مربوط به کل سیستم مورد استفاده در این تحقیق است و فقط مربوط به مدل LVQ-PCA نیست. برای مثال ممکن است به علت ناپایداری لیزر متغیرهای ثبت شده در بیناب یک پلیمر متفاوت با سایر هم گروهی‌های خود باشد و پلیمر به اشتباه در گروه دیگری دسته بندی شود. البته با افزایش تعداد بیناب ثبت شده از هر نمونه می‌توان عملکرد سیستم را به مراتب افزایش داد. ولی این کار مستلزم صرف زمان بیشتری خواهد بود که ممکن است به دلیل حجم بالای زباله‌های پلاستیکی درد سر ساز باشد. نکته قابل توجه دیگر این است که دقت تفکیک ذکر شده در این پژوهش، دقتی است که در محیط آزمایشگاهی بدست آمده است و ممکن است این دقت در محیط واقعی به علت عوامل مخرب مانند آلودگی‌ها دستخوش تغییر شود.

		test confusion matrix		
		PVC	other polymers	
Predicted	PVC	3 20.0%	1 6.7%	75.0% 25.0%
	other polymers	0 0.0%	11 73.3%	100% 0.0%
		100% 0.0%	91.7% 8.3%	93.3% 6.7%
		PVC	other polymers	
		Actual class		

شکل ۹. ماتریس درهم ریختگی برای مجموعه داده‌های آزمون

با استفاده از این ماتریس‌ها می‌توان مدل طراحی شده را ارزیابی کرد. تمام درایه‌های غیر قطری این ماتریس تعداد نمونه‌هایی را نشان می‌دهند که به اشتباه گروه بندی شده‌اند، یعنی ماهیت واقعی آن نمونه‌ها متفاوت با چیزی است که مدل پیش بینی می‌کند. یک مدل طبقه بندی کننده خوب مدلی است که ماتریس در هم ریختگی آن قطری باشد. همانطور که در شکل‌های ۸ و ۹ مشخص است ماتریس در هم ریختگی هم برای مجموعه داده‌های آموزش و هم مجموعه داده‌های آزمون یک ماتریس تقریباً قطری است و نوع پلیمرهایی که مدل تشخیص می‌دهد با ماهیت واقعی آنها یکسان است. همانطور که در شکل ۹ هم مشخص است، مدل توانسته پلیمرهای مجهولی که به آن معرفی شده را با دقت ۹۳/۳٪ به درستی شناسایی کند و پلیمر PVC را از سایر پلیمرها با دقت ۹۳/۳٪ به درستی تفکیک کند.

۵. نتیجه گیری

در این پژوهش جداکردن پلیمر PVC از سایر پلیمرها در فرآیند بازیافت به عنوان یک نیاز مطرح شد، سپس سعی کردیم توانایی روش LIBS به همراه شبکه عصبی LVQ

breakdown spectroscopy together with the DFA method", *Polymer testing*, Vol. 31, 2012, pp. 759-764.

[9] Johnson R.A., Wichern D.W., *Applied Multivariate Statistical Analysis*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice hall; 1992.

[10] Lloyd G. R., Breerton R. G., Faria R., and Duncan J. C., "Learning vector quantization for multiclass classification", *Journal of chemical information and modeling*, Vol. 47, 2007, pp. 1553-1563.

[11] Pedarnig J., Haslinger M., Bodea M., Huber N., Wolfmeir H., and Heitz J., "Sensitive detection of chlorine in iron oxide by single pulse and dual pulse laser-induced breakdown spectroscopy", *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, Vol. 101, 2014, pp. 183-190.

[12] NIST, atomic spectra database.

<http://physics.nist.gov/physRefdata/ASD/>.

[13] Mousavi S., Farsani M. H., Darbani S., Asadorian N., Soltanolkotabi M., and Majd A. E., "Identification of atomic lines and molecular bands of benzene and carbon disulfide liquids by using LIBS" *Applied Optics Spectroscopy*, Vol. 54, 2015, pp. 1713-1720.

مراجع

[1] Kassouf A., Maalouly J., Rutledge D. N., Chebib H., and Ducruet V., "Rapid discrimination of plastic packaging materials using MIR spectroscopy coupled with independent components analysis (ICA)", *Waste Management*, Vol. 34, 2014, pp. 2131-2138.

[2] Anzano J., Gornushkin I., Smith B., and Winefordner J., "Laser-induced plasma spectroscopy for plastic identification", *Polymer engineering & science*, Vol. 40, 2000, pp. 2423-2429.

[3] Sattmann R., Monch I., Krause H., Noll R., Couris S., Hatzia Apostolou A., Mavromanolakis A., Fotakis C., Larrauri E., and Miguel R., "Laser-induced breakdown spectroscopy for polymer identification", *Applied Spectroscopy*, Vol. 52, 1998, pp. 456-461.

[4] Riise B. L., Biddle M. B., and Fisher M. M., "X-ray fluorescence spectroscopy in plastic recycling", American Plastics Council, APC/MBA Polymer Project, 2000.

[5] Huth-Fehre T., Feldhoff R., Kantimm T., Quick L., Winter F., Cammann K., van den Broek W., Wienke D., Melssen W., and Buydens L., "NIR-

Remote sensing and artificial neural networks for rapid identification of post-consumer plastics", *Journal of molecular structure*, Vol. 348, 1995, pp. 143-146.

[6] Musazzi S., Perini U., *Laser-Induced Breakdown Spectroscopy*, Springer Series in Optical Sciences, 2014.

[7] DeLucia F.C., Gottfried J.L., "Influence of variable selection on partial least squares discriminant analysis models for explosive residue classification", *Spectrochim. Acta*, Vol. B 66, 2011, pp. 122-128.

[8] Banaee M., and Tavassoli S., "Discrimination of polymers by laser induced

Automated Separation Of PVC Polymer By Laser Induced Breakdown Spectroscopy And LVQ Neural Network

M. Vahid Dastjerdi, M. Soltanolketabi

Abstract

In this study by applying learning vector quantization (LVQ) in artificial neural networks (ANN) and principal component analysis (PCA), capability of laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) is evaluated in order to separate Polyvinyl chloride (PVC) from other polymers in the recycling process. At first, five kinds of polymer samples were prepared and intensities related to atomic and ionic lines as well as molecular emissions for each sample were recorded, then PCA is applied as one of the statistical multivariate analysis methods with aim of reducing dimensions of data and also finding a pattern in LIB spectra. Then learning vector quantization (LVQ) as a method that has recently been reported in the machine learning literature, is applied for discriminating PVC from other ones. The results show that with only two output variables from PCA method which are used as input variables for LVQ ANN, we can discriminate PVC from other analyzed polymers with precision of 93.3%.

Keywords: LIBS, polymers, artificial neural networks, principal component analysis, recycling proc