

استفاده از بیناب‌نمایی فروشکست القایی لیزری و مدل ماشین بردار پشتیبان به منظور تفکیک پلیمرها در فرایند بازیافت

محمد وحید دستجردی^۱، سید جبار موسوی^۲، سید محمد رضا دربانی^۲، علی موسوی آذر^۲، محمود سلطان‌الكتابی^۱

^۱گروه فیزیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان

^۲پژوهشکده علوم و فناوری اپتیک و لیزر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان

چکیده - در این پژوهش قابلیت بیناب‌نمایی فروشکست القایی لیزری (LIBS) با به کارگیری مدل ماشین بردار پشتیبان برای امکان تفکیک پلیمرهای PVC از سایر پلیمرها در فرایند بازیافت ارزیابی شد. شدت‌های نسبی C_2/C و N/C به عنوان متغیرهای ورودی برای روش ماشین بردار پشتیبان انتخاب و از توابع کرنل پایه ساعی، چند جمله‌ای و یک تابع خطی برای انجام طبقه‌بندی روی ۱۵۰ داده استفاده گردید. با استفاده از تابع کرنل چندجمله‌ای درجه ۲ و چندجمله‌ای درجه ۵ پلیمرها با دقت ۹۰.۵٪ به درستی تفکیک شدند. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که روش LIBS با استفاده از مدل ماشین بردار پشتیبان در جداسازی PVC از پلیمرهای دیگر موفق است.

کلید واژه- بیناب‌نمایی فروشکست القایی لیزری، تفکیک پلیمرها، ماشین بردار پشتیبان.

Sorting of polymers in recycling process by laser induced breakdown spectroscopy (LIBS) combined with support vector machine (SVM) model

M. Vahid Dastjerdi¹, S. J. Mousavi², S. M. R. Darbani², A. Mousavi Azar², M. Soltanolkotabi¹

¹ Department of Physics, University of Isfahan, Isfahan

² Optics & Laser Science and Technology Research Center, Malek Ashtar University of Technology, Isfahan

Abstract- In this research, ability of laser induced breakdown spectroscopy (LIBS) with applying support vector machine (SVM) method was evaluated in order to separate Polyvinyl chloride (PVC) from other polymers in recycling process. Intensity ratio of C_2/C and N/C was selected as input variables for SVM and then Radial Basis and Polynomial kernel function and linear function in order to classify 150 data related to different kind of polymers were applied. With polynomial kernel function of degree 2 and 5, polymers were separated correctly with accuracy of 90.5%. The results of this research showed that LIBS method by application of SVM model in separating of PVC from other polymers is successful.

Keywords: Laser induced breakdown spectroscopy, Polymers discrimination, Support vector machine.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

مدل از توابع کرنل^۴ مختلف استفاده و با استفاده از نتایج، مدل‌های بهینه برای دستیابی به بیشترین دقیقت در تفکیک پلیمرها معرفی شدند.

۲- مواد و روش‌ها

نمونه‌های مورد آنالیز

ابتدا پنج نمونه از پلیمرها شامل پلی‌اتیلن^۵ (PE)، پلی‌متیل‌مکت‌ریلات^۶ (PMMA)، پلی‌پروپیلن^۷ (PP)، پلی‌استایرن^۸ (PS) و پلی‌وینیل‌کلراید (PVC) که عموماً در ساخت انواع مواد پلاستیکی به کار می‌روند، به صورت گرانول تهیه شد. سپس به منظور یکسان‌سازی شرایط تحلیل، گرانول نمونه‌ها با استفاده از سیستم فشار هیدرولیکی به قرص‌های همسکل و هم اندازه با سطحی صاف با قطر ۱۳ میلی‌متر و ضخامت ۳-۴ میلی‌متر تبدیل شد. با توجه به موارد فوق تنها عامل تفاوت در بیناب ثبت شده از پلیمرهای مختلف تفاوت ساختاری آن‌ها می‌باشد. سرانجام از هر نمونه ۳۰ بیناب ثبت شد.

۲-۲- چیدمان آزمایش

به منظور آنالیز نمونه‌ها در این پژوهش از سامانه LIBSCAN100 Applied Photonics ساخت شرکت استفاده شده است. این سامانه مججهز به لیزر Nd:YAG با انرژی خروجی متغیر تا 100 mJ ، پهنهای تپ $7 \pm 2\text{ ns}$ و فرکانس تکرار $1-20\text{ Hz}$ بوده و بیناب پلاسمای تولیدی توسط آشکارساز مدل Avantes ۱۳-A ساخت شرکت Avantes ثبت می‌شود. این سامانه قابلیت بیناب‌نگاری در ناحیه طول‌موجی 1057 تا 180 نانومتر را دارا بوده که در بازه‌های مختلف طول‌موجی دارای توان تفکیک‌پذیری متغیر 0.04 تا 0.15 نانومتر می‌باشد. نمایی از این سامانه در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: سامانه بیناب‌نمایی LIBSCAN100

⁴ Kernel functions

⁵ Polyethylene

⁶ Polymethyl methacrylate

⁷ Polypropylene

⁸ Polystyrene

۱- مقدمه

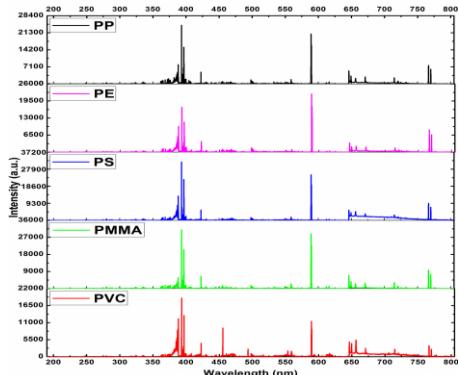
روش بیناب‌نمایی فروشکست القایی لیزری^۱ (LIBS) بر اساس آشکارسازی گسیلهای نوری پلاسمای نمونه حاصل از برخورد نپ لیزری اثری بالا با ماده استوار است. به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد روش LIBS از جمله قابلیت تحلیل سریع و همزمان چند عنصری، عدم نیاز و یا نیاز کم به آماده‌سازی نمونه و غیرمخرب بودن، کاربردهای آن در سالهای اخیر رشد چشم‌گیری داشته است[۱]. به دلیل ناسازگاری ترکیبات، انواع پلاستیک‌ها نمی‌توانند هنگامی که بازیافت می‌شوند با هم ترکیب شوند. این امر باعث ایجاد لایه‌های مختلف در هنگام ذوب این مواد با هم‌دیگر خواهد شد. از نواحی مرزی این لایه‌ها پلاستیک‌های بازیافتی حاصل می‌شوند که به علت ضعف‌های ساختاری کاربردهای محدودی دارند. تولید گازهای سمی در فرایند بازیافت به علت حضور PVC^۲ مهمترین نگرانی در این چرخه است. به منظور جلوگیری از آسیب رسیدن به کارگران مشغول به کار در کارخانه بازیافت این نوع پلاستیک‌ها باید قبل از فرایند بازیافت شناسایی و از هم جدا شوند[۲]. یکی دیگر از روش‌های معمول برای شناسایی پلیمرها بیناب‌نمایی مادون قرمز (FTIR) است. نیاز این روش به تماس با نمونه و محدودیت بررسی نمونه‌های سیاه‌رنگ استفاده از آن را در کارخانه بازیافت محدود می‌کند. در حالی که روش LIBS می‌تواند بر این مشکلات غلبه کند [۳]. در این پژوهش روش LIBS با بکارگیری مدل ماشین بردار پشتیبانی^۳ (SVM) به منظور ارزیابی تفکیک پلیمرهای PVC از سایر پلیمرها به صورت مکانیزه استفاده شده است. روش SVM به همراه روش LIBS پیش از این در پژوهش‌های گوناگونی به کار رفته است[۴-۵]. ابتدا پلیمرهایی که به طور معمول در ساخت پلاستیک‌ها به کار می‌روند و در فرایند بازیافت حضور دارند، تهیه و پس از ثبت و شناسایی بیناب LIBS نمونه‌ها از روش SVM به منظور تفکیک بهینه پلیمرها و همچنین تفکیک داده‌هایی که به صورت غیر خطی تفکیک‌پذیرند و بر اساس شدت‌های نسبی C/C₂ و N/C استفاده شد. برای گسترش و بهبود

¹ Laser Induced Breakdown Spectroscopy

² Polyvinyl chloride

³ Support Vector Machine

شده‌های نسبی C_2/C و N/C به عنوان متغیرهای ورودی روش ماشین بردار پشتیبان به منظور تفکیک پلیمر PVC از سایر پلیمرها انتخاب شدند.



شکل ۲: بیناب‌های LIBS حاصل از نمونه‌های پلیمری

در این پژوهش برای آموزش مدل و ارزیابی آن بر روی داده‌های آزمایش از نرم افزار MATLAB استفاده شده است. برای ایجاد مدل ماشین بردار پشتیبان، داده‌ها به دو دسته آموزش و آزمون تقسیم‌بندی می‌شوند. در این پژوهش از مجموع ۱۵۰ داده ثبت شده از نقاط مختلف پلیمرهای مورد مطالعه ۱۰۵ داده (۷۰٪) برای آموزش و ۴۵ داده (۳۰٪) برای آزمودن کارایی مدل، مورد استفاده قرار گرفتند. ابتدا از یکتابع خطی به منظور تفکیک پلیمر PVC از سایر پلیمرها استفاده گردید. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، داده‌های مربوط به آموزش مدل برای پلیمر PVC با ستاره‌ی سبز رنگ و برای سایر پلیمرها (PMMA, PS, PE, PP) با علامت‌های بعلاوهی قرمز رنگ نشان داده شده‌اند. داده‌های آزمون که نتایج طبقه‌بندی مدل هستند با ستاره‌ی آبی رنگ برای سایر پلیمر PVC و علامت‌های بعلاوهی بنفش برای سایر پلیمرها نشان داده شده‌اند. همچنین پلیمرهایی که به اشتباه طبقه‌بندی شده‌اند یک مربع قرمز رنگ به دور خود دارند. مرزهای تصمیم‌گیری برای طبقه‌بندی داده‌های آزمون با خطوط مشکی رنگ و بردارهای پشتیبان نیز با دایره‌های مشکی علامت گذاری شده‌اند. میزان طبقه‌بندی صحیح این مدل برای داده‌های آزمون ۷۵/۶٪ محاسبه شد که با توجه به دقت به نسبت کم این مدل برای بهبود فرایند تفکیک و دستیابی به مدلی با دقت بیشتر در ادامه از توابع کرنل چند جمله‌ای و پایه شعاعی استفاده شد.

همچنین جهت بهبود ثبت گسیلهای مورد نظر با بیشینه‌ی نسبت سیگنال به نویه از یک مدار تاخیرانداز الکترونیکی با قابلیت اعمال تاخیر زمانی $1.27\text{ }\mu\text{s}$ استفاده شده است.

۳-۲- روش طبقه‌بندی ماشین بردار پشتیبان

ماشین بردار پشتیبان یک روش طبقه‌بندی نظارت شده و بر اساس یادگیری آماری است که در آن یک تابع که به صورت یک ابرصفحه توصیف می‌شود، برای تفکیک بهینه دو کلاس از داده‌ها از یکدیگر تعیین می‌شود. فرض کنیم مجموعه نقاط $\{(x_1, c_1), (x_2, c_2), \dots, (x_n, c_n)\}$ را در اختیار داریم و می‌خواهیم آنها را به دو کلاس $\{-1, 1\} = \{c_i\}$ تفکیک کنیم. هر x_i یک بردار p بعدی از اعداد حقیقی است که در واقع همان شدت‌های بیناب مرتبط با هر پلیمر هستند. در این تحقیق $p=2$ است که متناظر با شدت‌های نسبی C_2/C و N/C است. کلاس $\{1\}$ مرتبط با پلیمر PVC و PMMA $\{-1\}$ مرتبط به سایر پلیمرها (PE, PP) است. نخستین مرحله برای تعیین ابرصفحه بهینه پیدا کردن نزدیک‌ترین نمونه‌هایی است که برای آموزش^۹ مدل استفاده می‌شود. این نمونه‌های آموزشی بردارهای پشتیبان^{۱۰} نام دارند. هرگاه یک تابع خطی نتواند داده‌ها دو کلاس را از هم تفکیک کند (داده‌ها تفکیک‌پذیر خطی نباشند)، در این حالت با استفاده از توابع کرنل داده‌ها از فضای اصلی به فضای دیگری با بعد معمولًاً بزرگ‌تر انتقال یافته و ابرصفحه‌های جداکننده در آن فضا تعیین می‌شوند. در نتیجه این فرایند تفکیک‌پذیری بهتری صورت خواهد گرفت. عمومی‌ترین‌ها کرنل‌ها، کرنل‌های چندجمله‌ای، تائزات هایپربولیک و تابع پایه شعاعی^{۱۱} (RBF) هستند [۶].

۳- نتایج و بحث

شکل ۲ بیناب‌های LIBS پنج نمونه پلیمری مورد بررسی را در بازه‌ی طول‌موجی $800-190\text{ nm}$ نشان می‌دهد. با شناسایی خطوط اتمی و گسیلهای مولکولی مختلف از جمله کربن (247.85 nm), نیتروژن (746.93 nm) و پیک مربوط به گذار ارتعاشی (140 cm^{-1}) متعلق به باند $d^3\Pi_g - a^3\Pi_u$ Swan band () $\Delta v = +1$ گسیل مولکولی C_2

⁹ Train

¹⁰ Support vectors

¹¹ Radial basis function

پلیمرها با بیشترین دقیقیت (۹۰/۵٪) به درستی تفکیک شده‌اند.

جدول ۱: نتایج مربوط به میزان طبقه‌بندی صحیح داده‌های آزمون

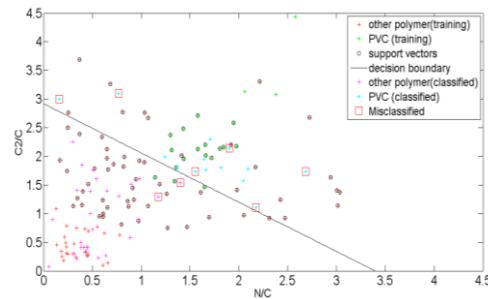
| میزان طبقه‌بندی صحیح داده‌های آزمون | |
|-------------------------------------|--------|
| تابع کرnel | آزمون |
| چندجمله‌ای درجه ۲ | % ۹۰/۵ |
| چندجمله‌ای درجه ۳ | % ۸۵/۸ |
| چندجمله‌ای درجه ۴ | % ۸۸/۱ |
| چندجمله‌ای درجه ۵ | % ۹۰/۵ |
| چندجمله‌ای درجه ۶ | % ۸۸/۱ |
| (RBF) | % ۸۸/۱ |

۴- نتیجه‌گیری

روش بیناب‌نمایی فروشکست القایی لیزری با به کارگیری مدل ماشین بردار پشتیبانی برای ارزیابی تفکیک مکانیزه پلیمرهای PVC از سایر پلیمرها در فرایند بازیافت استفاده شد. برای گسترش و بهبود مدل از توابع کرnel مختلف استفاده و مدل بهینه با بیشترین دقیقیت (۹۰/۵٪) برای تفکیک پلیمر PVC از سایر پلیمرها با استفاده از توابع کرnel چندجمله‌ای درجه ۲ و درجه ۵ حاصل شد. کارایی روش LIBS با به کارگیری مدل ماشین بردار پشتیبانی به منظور تفکیک پلیمرهای PVC از سایر پلیمرها در فرایند بازیافت با دقیقیت قابل قبولی به اثبات رسید.

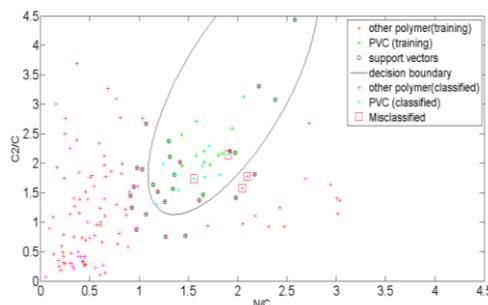
مراجع

- [1] Noll, R, *Laser-induced breakdown spectroscopy*, Springer, 2012.
- [2] Feldhoff, R., et al., "On-line post consumer package identification by NIR spectroscopy combined with a FuzzyARTMAP classifier in an industrial environment." *Applied spectroscopy* **51**(3): 362-368, 1997.
- [3] S. Grégoire, M. Boudinet, F. Pelascini, F. Surma, V. Detalle, and Y. Holl, "Laser-induced breakdown spectroscopy for polymer identification," *Analytical and bioanalytical chemistry* **400**, 3331-3340 (2011).
- [4] Cisewski, J., et al., "Support vector machine classification of suspect powders using laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) spectral data." *Journal of Chemometrics* **26**(5): 143-149, 2012.
- [5] L. Liang, T. Zhang, K. Wang, H. Tang, X. Yang, X. Zhu, Y. Duan, and H. Li, "Classification of steel materials by laser-induced breakdown spectroscopy coupled with support vector machines," *Applied optics* **53**, 544-552 (2014).
- [6] Cristianini, N. and J. Shawe-Taylor, *An introduction to support vector machines and other kernel-based learning methods*, Cambridge university press, 2000.

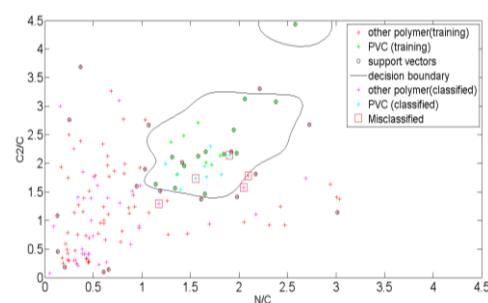


شکل ۳: نمودار مدل SVM برای تفکیک پلیمر PVC از سایر پلیمرها با استفاده از یک تابع تفکیک کننده خطی و شدت‌های نسبی C_2/C و N/C .

به عنوان نمونه نمودارهای مربوط به مدل ماشین بردار پشتیبانی با تابع کرnel چند جمله‌ای درجه ۲ و پایه شعاعی در شکل های ۴ و ۵ مشاهده می‌شود.



شکل ۴: نمودار مدل SVM برای تفکیک پلیمر PVC از سایر پلیمرها با استفاده از تابع کرnel چندجمله‌ای درجه ۲ ($d=2$) که در آن $\vec{K}(\vec{x}_i, \vec{x}_j) = (\vec{x}_i \bullet \vec{x}_j + 1)^d$ بردار پشتیبانی و x_i بردار ورودی است.



شکل ۵: نمودار مدل SVM برای تفکیک پلیمر PVC از سایر پلیمرها با استفاده از یک تابع کرnel پایه شعاعی

نتایج مربوط به میزان طبقه‌بندی صحیح داده‌های آزمون که از مقایسه خروجی مدل SVM با ماهیت واقعی پلیمرها بدست آمده برای هر کدام از توابع کرnel مورد استفاده در جدول ۱ نشان داده شده است. همانطور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، با استفاده از توابع کرnel چندجمله‌ای درجه ۲ و درجه ۵، پلیمرهای PVC از سایر