

جداسازی اتوماتیک انواع رزین‌های پلاستیک به روش الگوریتم مشتق مرتبه‌ی دوم بر مبنای طیف‌سنجی بازتابشی NIR

سید محسن صفوی^۱، حامد معصومی^{۲*}، سید سعید میریان^۳، محمود تبریزی^۴

۱. استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

۲. مربی مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد گلپایگان (h.masoumi@giau.ac.ir)*

۳. دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

۴. استاد دانشکده شیمی، دانشگاه صنعتی اصفهان

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله :

دریافت ۲۶ اسفند ۱۳۸۷

دریافت پس از اصلاحات ۲۶ اردیبهشت ۱۳۸۹

پذیرش نهایی ۹ تیر ۱۳۸۹

کلمات کلیدی :

پلاستیک

جداسازی

طیف‌سنجی بازتابشی

مادون قرمز نزدیک

مشتق مرتبه‌ی دوم

نرم‌افزار LabVIEW

چکیده

در این مقاله روشی مناسب، دقیق و سریع برای جداسازی اتوماتیک رزین‌های پلاستیکی از جریان زباله‌های پلاستیکی ارائه می‌شود. در سیستم جداسازی، نمونه‌های پلاستیکی بر روی نوارنقاله‌ی جداسازی تغذیه می‌شوند و هنگام عبور نمونه‌ها از نزدیکی انتهای نوارنقاله، طیف بازتابشی مادون قرمز نزدیک (NIR) آن‌ها توسط یک دستگاه طیف‌سنج سریع گرفته می‌شود. واحد کنترل، از نمودار طیف، مشتق مرتبه‌ی دوم می‌گیرد و با انجام یک سری آنالیزها بر روی آن، جنس نمونه را تشخیص می‌دهد. سرانجام رزین هدف با جریان هوای فشرده به مکان مناسب پرتاب می‌شود. بر این اساس، امکان جداسازی رزین‌های PET، HDPE، PVC، PP و PS به صورت اتوماتیک با نرم‌افزار LabVIEW فراهم می‌گردد. دقت این روش بر روی رزین‌های مختلف نشان داده شده، و تأثیر پارامترهای مختلفی نظیر آلودگی سطحی، ضخامت نمونه، وجود برچسب و درپوش بر روی دقت سیستم شناسایی مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج آزمایشات، دقت بالای این روش جدید را تأیید کرده‌اند.

حقوق ناشر محفوظ است.

* عهده دار مکاتبات

مجازی یا واقعی دانسیته‌های مشابه به هم دارند [۴]. جداسازی ترموپلاستیک‌ها در مقیاس میکرو بر اساس دانسیته را می‌توان با استفاده از سیالات نزدیک بحرانی و فوق بحرانی نظیر دی‌اکسیدکربن مایع انجام داد. این روش می‌تواند پلاستیک‌های با اختلاف دانسیته‌ی تا 0.001 g/cm^3 را نیز جداسازی نماید. استفاده از سیالات نزدیک بحرانی برای جداسازی پلاستیک‌ها اولین بار در اواخر سال ۱۹۹۰ توسط بکمن^۱ و انیک^۲ پیشنهاد شد [۵].

هر گاه اختلاف دمای نرم‌شوندگی بین رزین‌های پلاستیکی قابل توجه باشد، می‌توان آن‌ها را بر اساس این اختلاف دما جداسازی نمود. این روش، جداسازی از طریق اختلاف در دمای نوب و دمای نرم‌شوندگی نام دارد. در این روش، از نوارنقاله‌ی جداساز گرم استفاده می‌شود. تحت دمای خاصی که نوارنقاله دارد، رزین هدف بر خلاف رزین‌های دیگر نرم شده و به نوارنقاله می‌چسبد. بنابراین سایر رزین‌ها در انتهای طول نوارنقاله به بیرون می‌افتند و جدا می‌شوند، در حالیکه رزین هدف به دلیل نرم شدن و چسبندگی به سطح نوارنقاله، بر روی آن باقی می‌ماند. مهمترین ضعف این روش آن است که تکه‌های پلاستیک باید به شکل تک لایه بر روی نوارنقاله قرار گیرند. همچنین وجود تکه‌های کاغذی و برچسب ظروف می‌تواند باعث بروز مشکل در این روش گردد [۴].

یک روش دیگر برای جداسازی پلاستیک‌ها، روش انحلال انتخابی است. این فرآیند بر مبنای انحلال پلاستیک‌های مخلوط با استفاده از حلال‌های مناسب استوار است. با انتخاب صحیح و دقیق حلال و با کنترل نمودن دما، جداسازی کامل پلاستیک‌ها امکان‌پذیر می‌گردد. در روش جداسازی انحلال انتخابی، تفاوت‌های ترمودینامیکی بین شش رزین مهم پلیمری باعث می‌گردد که هر پلیمر در دمای متفاوتی در یک حلال خاص حل شود. یکی از مهمترین حلال‌های مورد استفاده، حلال زایلین^۳ است. مهمترین محدودیت این روش، مسائل ایمنی و زیست‌محیطی مربوط به حلال‌ها است. علاوه بر این،

از سال ۱۹۴۰ که استفاده از پلاستیک‌ها در مقیاس صنعتی آغاز گردید، نرخ تولید و مصرف پلاستیک و نیز نرخ ایجاد زباله‌ی پلاستیکی به میزان قابل توجهی رو به فزونی نهاد [۱]. پلاستیک یکی از مواد پر مصرف در صنایع مختلف است. با توجه به عمر محدود این ماده، بازیافت آن با هدف بازگشت مجدد پلاستیک به چرخه‌ی مصرف از اهمیت بالایی برخوردار است. جداسازی و دسته‌بندی رزین‌های پلاستیکی یکی از بخش‌های اصلی بازیافت پلاستیک‌هاست، زیرا انواع مختلفی از رزین‌های پلاستیک مورد مصرف قرار می‌گیرند که اکثر آن‌ها در فرآیند بازیافت با یکدیگر سازگاری ندارند. به عنوان مثال اگر نسبت وزنی PVC به PET در یک مجموعه‌ی بازیافتی بیش از یک به ۲۰ هزار باشد، یعنی ۵۰ گرم PVC در یک تن PET، آن مجموعه غیر قابل بازیافت می‌گردد [۲]. جداسازی رزین‌های پلاستیک معمولاً با تفکیک بین شش رزین اصلی پلی‌اتیلن ترفتالات، پلی‌اتیلن دانسیته بالا، پلی‌وینیل کلراید، پلی‌اتیلن دانسیته کم، پلی-پروپیلن و پلی‌استایرن همراه است. این شش رزین به ترتیب با اسامی مخفف LDPE, PVC, HDPE, PET, PP و PS شناخته می‌شوند. انجمن صنایع پلاستیک آمریکا به این رزین‌ها به ترتیب کدهای شناسایی ۱ تا ۶ را اطلاق کرده است که سازندگان قطعات پلاستیکی موظف به درج این شماره‌ها بر روی قطعه‌ی پلاستیکی هستند [۳].

هدف از این مقاله ابداع روشی مناسب برای جداسازی رزین‌های پلاستیکی از یکدیگر است. امروزه روش‌های مختلفی برای جداسازی شش رزین اصلی وجود دارد. ساده‌ترین روش جداسازی دستی است که با مشکلاتی نظیر سرعت و دقت کم، بازدهی پایین جداسازی، خستگی و در خطر بودن سلامت نیروی انسانی همراه است. جداسازی پلاستیک بر مبنای دانسیته نیز شامل روش‌هایی است که در آن‌ها از اختلاف دانسیته‌ی بین رزین‌های پلاستیکی برای جداسازی استفاده می‌شود. محدودیت مهم روش‌های جداسازی بر مبنای دانسیته در این است که بسیاری از رزین‌های پلاستیکی به صورت

¹Beckman

²Enick

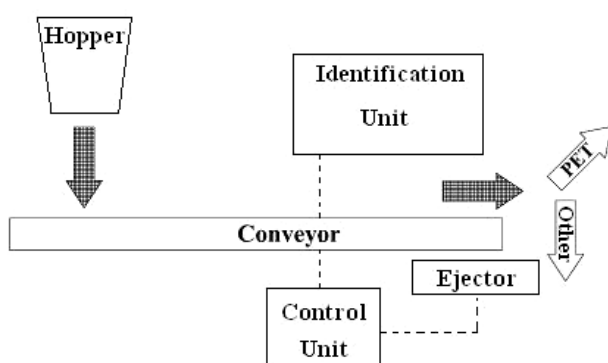
³xylylene

پلاستیک‌های بدون کالر پاسخ متفاوتی از خود نشان می‌دهند. مهمترین ضعف این روش در عمومی نبودن آن برای جداسازی بین شش رزین اصلی است. همچنین اشعه‌ی X برای انسان بسیار خطرناک است [۱۱]. جداسازی پلیمرها به روش طیف‌سنجی تشعشع فلورسانس اشعه X توسط بزاتی^۵ و همکارانش گزارش شده است [۱۲].

روش‌های ذکر شده برای جداسازی رزین‌های پلاستیک، مزایا و معایب خاص خود را دارند، اما هیچکدام از آنها یک روش کاملاً خودکار نیستند. اکثر این روش‌ها نیاز به یک عملیات اولیه یا تجهیزات گران-قیمت دارند. به هر حال هدف اصلی این مقاله دستیابی به روشی برای جداسازی رزین‌هاست که علاوه بر سرعت و دقت بالا، بدون دخالت انسان و کاملاً خودکار باشد. روش مورد نظر بر اساس طیف‌سنجی بازتابشی NIR است.

۲- سیستم جداسازی

سیستم جداسازی اتوماتیک از سه واحد اصلی تشکیل شده است: واحد شناسایی، واحد کنترل و واحد پرتاب. شکل (۱) شماتیکی از سیستم جداسازی طراحی شده را نشان می‌دهد.



شکل (۱): شماتیک سیستم جداسازی

مطابق شکل (۱)، مواد پلاستیکی قابل بازیافت از تغذیه-کننده بر روی سطح نوارنقاله‌ی متحرکی با سرعت بالا می‌افتند. سرعت بالای نوارنقاله به این منظور است که

باید میزان حلال باقیمانده در پلیمر بازیافت شده به دقت بررسی شود [۶].

جداسازی رزین‌های PMMA, PET, PVC, POM, PS, PC و ABS به روش انحلال انتخابی و با استفاده از متیل سلولز توسط شن^۱ و همکارانش گزارش شده است [۷].

پنگستابودی^۲ و همکارانش یک روش سه مرحله‌ای جدید ترکیبی با استفاده از روش غوطه‌وری-شناوری و تکنیک انحلال انتخابی برای جداسازی مخلوط پلاستیک-های مختلف ابداع کرده‌اند [۸].

روش‌های جداسازی الکترواستاتیک بر مبنای این حقیقت استوارند که هرگاه دو ماده‌ی غیر مشابه با یکدیگر تماس پیدا کنند، در محل تماس، تبادل بار الکتریکی انجام می‌شود، به این صورت که یکی از دو ماده بار منفی و دیگری بار مثبت پیدا می‌کند. ترکیب بارهای ایجاد شده به این طریق، تقریباً فقط به خصوصیات الکترواستاتیک پلاستیک بستگی دارد. شناسایی بر این اساس است که انواع مختلف پلاستیک-ها، ترکیب‌های متفاوتی از بار الکتریکی را نتیجه می‌دهند. از معایب روش جداسازی الکترواستاتیک زمان‌بر بودن آن است که در نتیجه برای جداسازی انبوه غیر قابل استفاده می‌باشد. در ضمن برای جداسازی بین هر دسته از رزین‌ها باید از هد سنسور خاصی استفاده کرد. همچنین تجهیزات مورد استفاده در این روش قیمت بالایی دارند [۹]. هرن^۳ و بالرد^۴ جداسازی موفقیت آمیز مواد پلاستیکی از غیر پلاستیکی، و نیز جداسازی انواع رزین‌های PP, PET, PS, PVC و HDPE از یکدیگر را به روش الکترواستاتیک گزارش داده‌اند [۱۰].

جداسازی از طریق تشعشع فلورسانس اشعه‌ی X یک روش جداسازی مختص رزین‌های PVC است. هنگامی که اشعه‌ی X به بطری‌ها، ظروف، قطعات، و یا ذرات از جنس PVC برخورد می‌کند، اتم‌های کالر PVC، اشعه-های X با سطح انرژی پایین را نشر می‌کنند، در حالیکه

¹ Shen
² Pongstabodee
³ Hearn
⁴ Ballard

⁵ Bezati

می‌شوند. گستره‌ای از مکانیزم‌های جذب و طول موج‌های تابع آن، این امکان را می‌دهند تا اطلاعاتی در مورد خصوصیات ترکیب شیمیایی ماده، با مطالعه‌ی نور بازتابش شده از آن به دست آید [۱۳].

هرگاه جسمی تحت تابش نور قرار گیرد با انرژی تابشی نور برهم کنش می‌کند. این اثرات که با چشم انسان قابل رؤیت نیست را می‌توان با دستگاه‌های مناسب اندازه‌گیری کرد. جذب، عبور و بازتابش انرژی نور به طور تصادفی نیست، بلکه بین طول موج‌های نور با مقدار جذب، عبور و بازتابش قوانین بسیار منظمی وجود دارد. موضوع طیف‌سنجی درباره‌ی برهم کنش انرژی تابشی و ماده است [۱۴].

شدت جذب نور را می‌توان از رابطه‌ی انتقال نور بدست آورد. این رابطه به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۴].

$$T = I_1 / I_0 \quad (۱)$$

در معادله ۱، T میزان انتقال یا عبور نور از نمونه است. I_0 شدت انرژی نوری است که به نمونه برخورد می‌کند و I_1 شدت انرژی نور عبور کننده از نمونه است. برای طیف‌های جذبی، میزان جذب نور، A ، را می‌توان با قانون بی‌یر-لامبرت نیز بیان نمود [۱۴].

$$A = \log(I_0 / I) = \log(1/T) = abc \quad (۲)$$

A میزان جذب نور است که دانسیته‌ی نوری نیز نامیده می‌شود. a یک ثابت تناسب است که ثابت جذب مولکولی یا قابلیت جذب نمونه نام دارد و یک مشخصه برای هر نوع مولکول می‌باشد. b طول مسیری از نمونه است که انرژی تابشی از داخل آن عبور می‌کند، و c غلظت مولکول‌های نمونه‌ی جذب‌کننده‌ی نور است.

در طیف‌سنجی بازتابشی NIR، میزان بازتابش که با R نشان داده می‌شود را می‌توان از معادله ۳ محاسبه نمود [۱۴].

$$R = I_2 / I_0 \quad (۳)$$

در این رابطه I_0 شدت نوری است که به نمونه برخورد می‌کند و I_2 شدت نور بازتابش شده از نمونه است.

پلاستیک‌ها به صورت جداگانه و بدون هیچ تداخلی در مقابل واحد شناسایی حاضر شوند. نمونه‌های پلاستیکی در نزدیکی انتهای نوارنقاله مقابل واحد شناسایی قرار می‌گیرند. با شناسایی پلاستیک‌های هدف توسط واحد شناسایی و واحد کنترل، دستور پرتاب یا عدم پرتاب رزین‌ها به پرتاب‌کننده‌ی واحد پرتاب داده می‌شود. رزین هدف به نوارنقاله‌ی دورتری خواهد افتاد و سایر رزین‌ها بر اثر جاذبه از انتهای نوارنقاله بر روی نوارنقاله‌ی دیگری می‌افتند. بنابراین می‌توان جریان‌های جداگانه‌ای از انواع رزین‌ها را بدست آورد. رزین هدف در شکل (۱)، PET است.

واحد پرتاب از کمپرسور و شیرهای الکتروپنوماتیکی تشکیل شده است. شیرها دقیقاً در انتهای نوارنقاله کار گذاشته می‌شوند تا به محض دریافت فرمان از واحد کنترل، تحریک شده و رزین هدف را پرتاب کنند. در ادامه به بررسی واحدهای شناسایی و کنترل پرداخته می‌شود. اما از آنجاییکه اساس عملکرد واحد شناسایی بر مبنای طیف‌سنجی بازتابشی NIR استوار است، پیش از آن توضیحاتی در خصوص طیف‌سنجی بازتابشی NIR ارائه می‌شود.

۱-۲- طیف‌سنجی بازتابشی NIR

طیف‌سنجی بازتابشی مطالعه‌ی نور به عنوان تابعی از طول موج می‌باشد که از یک ماده‌ی جامد، مایع یا گاز بازتابش شده یا تفرق پیدا کرده است. هنگامیکه فوتون‌های نور داخل یک ماده می‌شوند، بخشی از آن‌ها از سطوح دانه‌های ماده بازتابش می‌شوند، قسمتی از آن‌ها از دانه‌های ماده عبور می‌کنند، و بخشی از آن‌ها نیز توسط ماده جذب می‌شوند. در مورد آن فوتون‌هایی که از سطوح دانه‌ی ماده بازتابش شده‌اند یا بواسطه‌ی نره‌ای از ماده انکسار پیدا کرده‌اند، اصطلاحاً اینگونه بیان می‌شود که تفرق پیدا کرده‌اند. فوتون‌های تفرق پیدا کرده ممکن است با دانه‌ی دیگری برخورد کنند یا ممکن است از سطح تفرق پیدا کنند. در حالت دوم می‌توان این فوتون‌ها را آشکار ساخت یا اندازه‌گیری نمود [۱۳].

فوتون‌ها در مواد از طریق مکانیزم‌های مختلفی جذب

طیف‌های NIR مشاهده شده که پیوندهای O-H، C-H، N-H و C-O می‌توانند به طور مشخصی به پلیمرهای خاص نسبت داده شوند [۴]، بنابراین شناسایی اکثر پلاستیک‌ها به روش طیف‌سنجی NIR ممکن می‌گردد. برای مثال در طیف NIR رزین HDPE پیک در طول موج حدود ۱۲۰۰ نانومتر مشاهده می‌شود که در این طول موج، در PET پیک وجود ندارد و تنها به مقدار کمی برای PVC وجود دارد. با در نظر گرفتن این نقاط پیک امکان شناسایی اکثر رزین‌های پلاستیکی به روش طیف‌سنجی NIR فراهم می‌گردد.

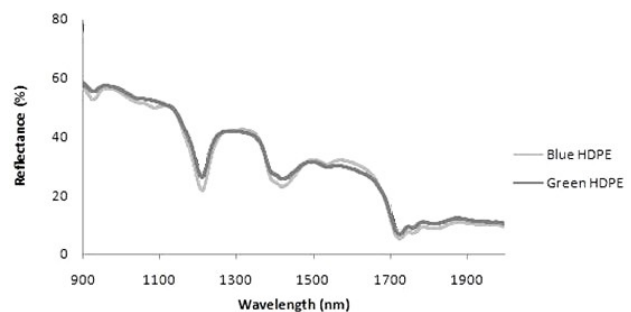
انتخاب طیف بازتابشی به جای طیف جذبی به این دلیل است که با توجه به سیستم جداسازی نشان داده شده در شکل (۱)، فرآیند جداسازی با حرکت سریع پلاستیک‌ها از روی نوارنقاله همراه می‌باشد. بنابراین استفاده از روش طیف‌سنجی جذبی غیرممکن است. زیرا از طرفی نمونه‌ها در حال حرکت بر روی سطح نوارنقاله هستند و از طرف دیگر در روش طیف‌سنجی جذبی لازم است که آشکارساز در قسمت پشت نمونه قرار گیرد تا پس از جذب و عبور نور از نمونه و رسیدن به آشکارساز، طیف جذبی آن ثبت شود. بنابراین سطح نوارنقاله مانعی در جهت استفاده از روش طیف‌سنجی جذبی است. در مقابل با توجه به روش پیشنهادی برای جداسازی، استفاده از طیف‌سنجی بازتابشی امکان‌پذیر است، زیرا می‌توان سطح نمونه را در حین حرکت بر روی نوارنقاله نوردی کرد و سپس از نور بازتابش شده از سطح، طیف بازتابشی را ثبت نمود.

در حالیکه فاکتورهایی از قبیل شفافیت پلیمر و وجود آلودگی بر روی سطح آن می‌توانند بر روی شدت جذب و بازتابش در ناحیه‌ی NIR تأثیر گذارند، پیک‌های ذاتی طیف پلیمر به سمت چپ و راست شیفته شده نمی‌شوند و در همان طول موج ظاهر می‌شوند. لذا می‌توان با آنالیز سریع مشتق طیف بدست آمده از پلاستیک‌ها، روشی مناسب برای شناسایی آن‌ها ابداع نمود. روش ابداعی، "روش مشتق دوم" نام دارد که مراحل آن در شکل (۳) نشان داده شده است. در این شکل به ترتیب نمودارهای طیف بازتابشی در ناحیه‌ی NIR، مشتق مرتبه‌ی اول،

در طیف‌سنجی بازتابشی NIR نور با طول موج ۸۰۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر از سطح قطعات جامد بازتابش می‌شود؛ که در صورت آنالیز نور بازتابش شده، اطلاعاتی در مورد ترکیبات ماده به دست می‌آید. این روش، روشی سریع، همزمان و غیر مخرب برای شناسایی اجزای اصلی ترکیبات در بسیاری از مواد آلی است [۱۵].

۲-۲- واحد شناسایی

همانگونه که پیش از این اشاره شد، اساس عملکرد واحد شناسایی بر مبنای طیف‌سنجی بازتابشی NIR استوار می‌باشد. یکی از دلایل انتخاب ناحیه‌ی NIR که گستره‌ی حدود ۷۰۰ تا ۲۵۰۰ نانومتر را شامل می‌شود، مستقل بودن طیف نمونه از رنگ در این ناحیه است. شکل (۲) که طیف بازتابشی NIR دو رزین HDPE آبی و سبز را نشان می‌دهد، مؤید این مطلب است.

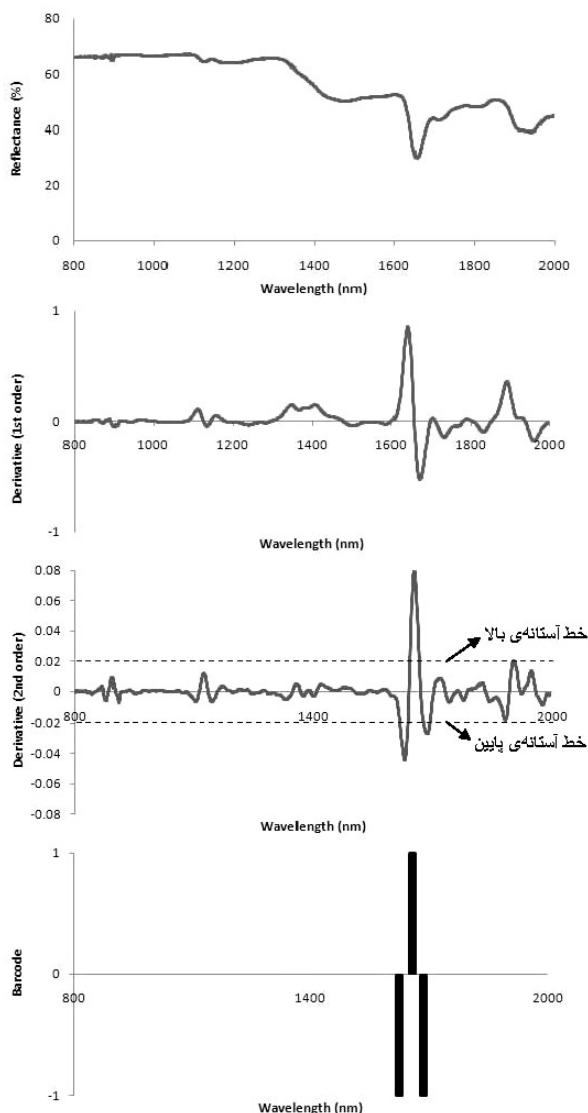


شکل (۲): طیف بازتابشی HDPE آبی و سبز در ناحیه‌ی NIR

تمام طیف‌های ناحیه‌ی NIR در این مقاله، با دستگاه طیف‌سنج UV-VIS-NIR با مارک تجاری JASCO V-570 در آزمایشگاه آنالیز دستگاهی دانشکده‌ی شیمی دانشگاه صنعتی اصفهان گرفته شده است. برای ثبت طیف‌های بازتابشی، مجموعه‌ی JASCO ARN-475 به دستگاه فوق متصل شده است.

در ناحیه‌ی NIR، حتی با تغییر ضخامت، شکل کلی طیف تغییر نمی‌کند و نقاط بروز پیک برای یک رزین خاص ثابت می‌ماند.

جذب و بازتابش نور در محدوده‌ی طیفی NIR، بدلیل ارتعاشات ترکیبی مولکول‌های رزین پلاستیک است. در



شکل (۳): مراحل روش مشتق دوم برای شناسایی رزین‌های پلاستیک

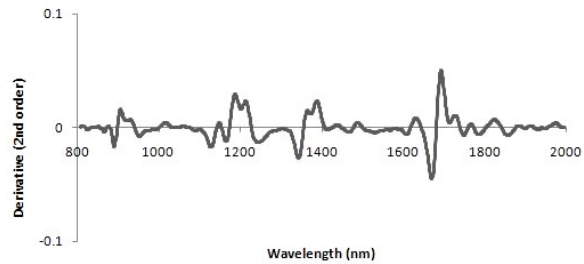
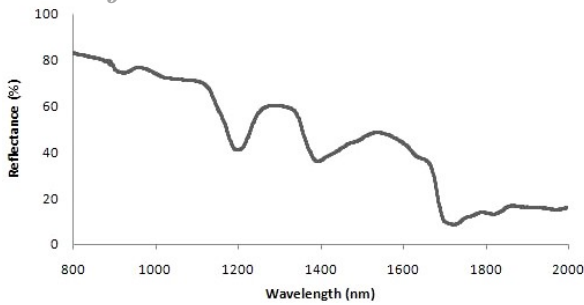
برای استخراج الگوریتم شناسایی به روش مشتق دوم، طیف بازتابشی NIR از ۳۰ نمونه‌ی پلاستیکی مورد بررسی قرار گرفت. این نمونه‌ها شامل ۷ نمونه PET، ۷ نمونه HDPE، ۵ نمونه PVC، ۶ نمونه PP و ۵ نمونه PS است. هیچکدام از نمونه‌ها شسته نشدند و برخی از آن‌ها آلودگی و کثیفی سطحی داشتند. همچنین از نمونه‌های با رنگ‌های بسیار تیره استفاده نشد. علت این مسئله در ادامه‌ی مقاله بیان خواهد شد. شکل‌های (۴ تا ۷) طیف بازتابشی NIR و طیف مشتق دوم طیف را به ترتیب برای نمونه‌های HDPE، PVC، PP و PS در ناحیه‌ی ۸۰۰ تا ۲۰۰۰ نانومتر نشان می‌دهند. طیف رزین PET در شکل (۳) نشان داده شده است.

مشتق مرتبه‌ی دوم و بارکد استخراج شده از نمودار مشتق دوم نشان داده شده است.

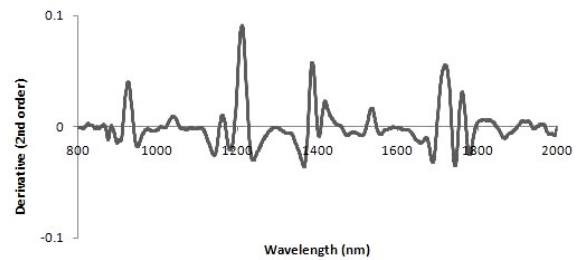
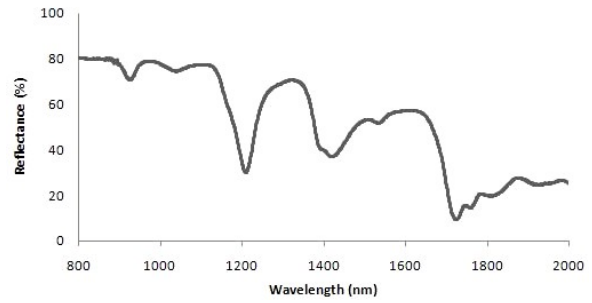
مطابق شکل، ابتدا طیف بازتابشی NIR نمونه‌ی مورد نظر گرفته می‌شود. نمونه‌ی مورد بررسی در شکل (۳)، رزین PET می‌باشد. سپس مشتقات مرتبه‌ی اول و مرتبه‌ی دوم طیف آن گرفته می‌شود. با این کار یک خط مبنا که همان خط صفر باشد، آشکار می‌شود. در نمودار مشتق دوم طیف، دو خط موازی با محور طول موج به نام‌های خطوط آستانه‌ی بالا و آستانه‌ی پایین در نظر گرفته می‌شود. پیکهای طیفی موجود در محدوده‌ی بین دو خط آستانه حذف می‌شوند. سپس پیکهای بالاتر از خط آستانه‌ی بالا و پایین‌تر از خط آستانه‌ی پایین، به ترتیب به صورت کدهای "+۱" و "-۱" نسبت به خط مبنا، در نمودار جداگانه‌ای ترسیم می‌شوند. به این ترتیب بارکد ساده‌ای بدست می‌آید که ملاک شناسایی انواع رزین‌ها است. برای نمونه‌ی PET که مراحل استخراج بارکد شناسایی آن در شکل (۳) نشان داده شده، با انتخاب خطوط افقی $+0.02$ و -0.02 به عنوان خطوط آستانه‌ی بالا و پایین، بارکد "-۱/+۱/-۱" حاصل شده است.

پس از اینکه بارکد شناسایی تمام رزین‌ها استخراج گردید، برای شناسایی جنس قطعه‌ی نامشخص، باید بارکدهای آن را با بارکدهای مبنای موجود برای رزین‌های مورد نظر مقایسه کرد. لازم به ذکر است مشتق‌گیری به روش مشتق عددی انجام گرفته است.

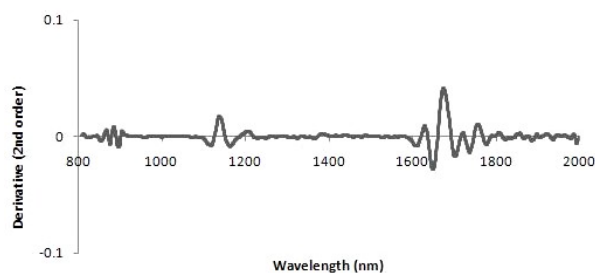
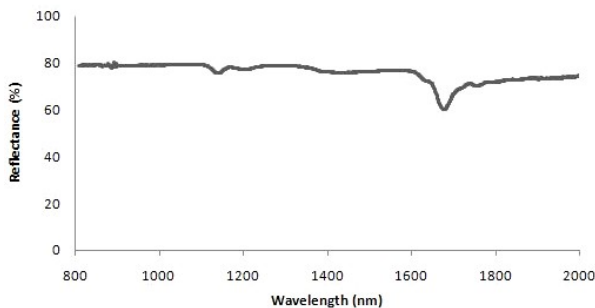
در شکل (۳) خطوط افقی $+0.02$ و -0.02 به عنوان خطوط آستانه‌ی بالا و پایین در نظر گرفته شده است. انتخاب محدوده‌ی خطوط آستانه بر اساس آزمایش‌های متعدد صورت گرفته است. باید از هر نوع رزین پلاستیکی چندین نمونه جمع‌آوری شود و طیف بازتابشی NIR آن‌ها گرفته شود. سپس نمودار مشتق دوم تمام رزین‌ها با یکدیگر مقایسه می‌شود. به این ترتیب می‌توان خطوط آستانه‌ی بالا و پایین را برای تعیین بارکد مبنای نهایی انتخاب کرد.



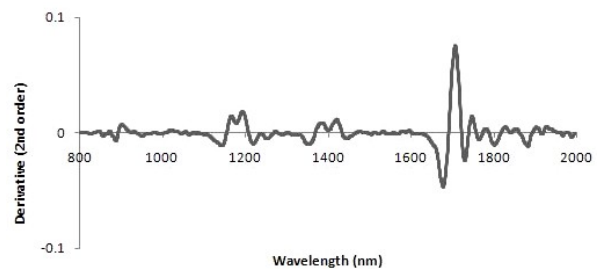
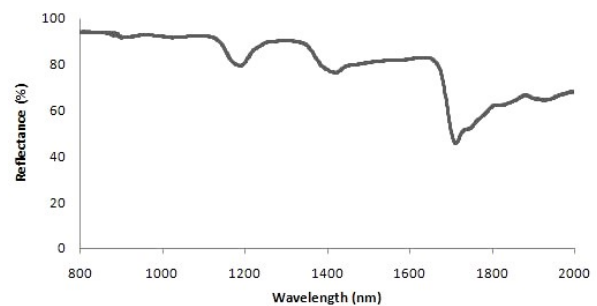
شکل (۶): طیف بازتابشی NIR رزین PP و نمودار مشتق دوم آن



شکل (۴): طیف بازتابشی NIR رزین HDPE و نمودار مشتق دوم آن



شکل (۷): طیف بازتابشی NIR رزین PS و نمودار مشتق دوم آن



شکل (۵): طیف بازتابشی NIR رزین PVC و نمودار مشتق دوم آن

همانگونه که در شکل‌های (۴ تا ۷) دیده می‌شود، پیک-های مشخصه در طیف بازتابشی هر نمونه، به نحوی دیگر در طیف مشتق مرتبه‌ی دوم آن بروز می‌کند. علت اینکه از مشتق دوم بجای مشتق اول استفاده شده است،

است. با انتخاب صحیح خطوط آستانه و استخراج بارکدهای مشخصه، رزین‌های اصلی قابل تشخیص در واحد شناسایی هستند.

۲-۲-۱- بررسی تأثیر عوامل مختلف بر الگوریتم شناسایی

در حین جداسازی ممکن است عواملی بر عملکرد الگوریتم شناسایی تأثیر منفی بگذارند. از مهمترین این عوامل می‌توان به ضخامت نمونه، وجود برچسب بر روی نمونه و وجود درپوش برای نمونه اشاره کرد. یکی دیگر از فاکتورهای مهم رنگ نمونه است و عامل دیگر آلودگی‌ها و کثیفی‌های سطحی است.

تأثیر ضخامت نمونه

مطابق قانون بی‌یر- لامبرت، میزان جذب مطلق مواد به ضخامت نمونه وابسته است. قانون بی‌یر- لامبرت با رابطه‌ی ۴ بیان می‌شود [۱۴].

$$A = abc \quad (۴)$$

در این رابطه، A مقدار جذب، a قابلیت جذب نور توسط نمونه و b طول مسیری است که نور در داخل جسم طی می‌کند. c نیز غلظت ماده‌ی جذب کننده‌ی نور است. برای هر نوع رزین، قابلیت جذب نور و غلظت ثابت است. بنابراین میزان جذب مطلق آن مستقیماً به تغییرات ضخامت وابسته است. اما جذب نسبی و در نتیجه بازتابش نسبی مواد، مستقل از ضخامت نمونه است. منظور از جذب و بازتابش نسبی، نسبت جذب و بازتابش در دو طول موج مجزا می‌باشد. از طرفی مشتق عددی به نوعی با بازتابش نسبی در ارتباط است. در الگوریتم شناسایی، مشتق عددی با رابطه‌ی ۵ محاسبه شده است.

$$\frac{\delta y}{\delta x} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (۵)$$

اما این ارتباط یک رابطه‌ی مستقیم نیست، بنابراین نمی‌توان با قطعیت بیان کرد که تغییر ضخامت تأثیری بر الگوریتم شناسایی ندارد. لذا به لحاظ تجربی این امر بررسی شده است.

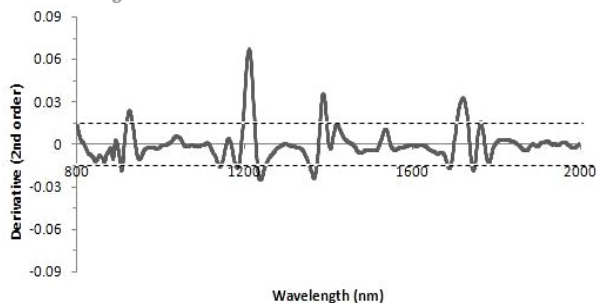
وجود نقاط پیک بیشتر در طیف مشتق دوم در مقایسه با طیف مشتق اول است. این مسئله در شکل ۲ قابل مشاهده است. با توجه به بررسی‌های انجام شده، مناسب‌ترین خطوط آستانه برای پنج نوع رزین مورد نظر، $+0/015$ و $-0/015$ می‌باشد. با در نظر گرفتن این خطوط آستانه، بارکدهای مشخصی برای هر پنج نوع رزین به دست می‌آید. این بارکدها در جدول (۱) نشان داده شده است.

جدول (۱): بارکد پنج رزین اصلی با در نظر گرفتن خطوط آستانه‌ی بالایی و پایینی $+0/015$ و $-0/015$

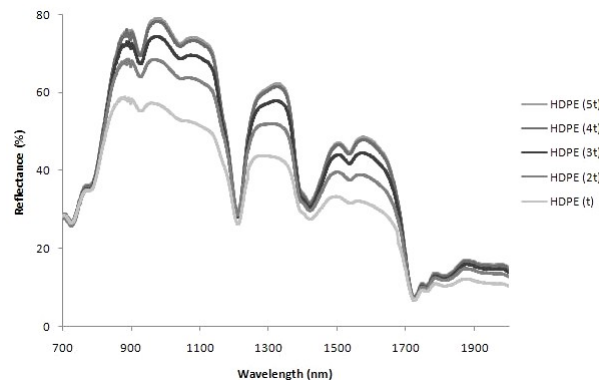
Barcode	Plastics
-1/+1/-1/-1/+1	PET
-1/+1/-1/-1/+1/-1/-1/+1/-1/+1/-1/+1	HDPE
+1/-1/+1/-1	PVC
-1/+1/-1/+1/-1/+1/-1/+1	PP
+1/-1/+1/-1	PS

مقادیر جدول (۱) برای تمامی ۳۰ نمونه‌ی مورد آزمایش صادق است. جداسازی رزین LDPE به روش مشتق دوم بررسی نشده است. علت این مسئله، تداخل آن با HDPE در فرآیند جداسازی است، که می‌تواند باعث بروز خطا در روش شناسایی گردد. بنابراین لازم است پیش از آنکه این رزین به واحد شناسایی برسد بصورت جداگانه تفکیک شود. از طرفی چون مورد عمده‌ی مصرف LDPE در ایران برای نایلون‌ها است، می‌توان براحتی آن را با جریان هوای فشرده از دیگر رزین‌ها جداسازی نمود.

تعداد بارکدهای هر طیف تابعی از مقدار خطوط آستانه‌ی بالایی و پایینی، و تعداد پیک‌های مشخصه‌ی آن طیف می‌باشد. تعداد پیک‌های مشخصه‌ی طیف در ناحیه‌ی NIR نیز تابعی از جنس رزین بوده و مقداری ثابت است. با بیشتر شدن تعداد پیک‌های مشخصه‌ی طیف بازتابشی، تعداد بارکدها نیز افزایش می‌یابد. مطابق جدول (۱) بیشترین تعداد بارکد در رزین HDPE ملاحظه می‌شود؛ علت این امر تعداد پیک‌های بیشتر طیف بازتابشی NIR رزین HDPE نسبت به سایر رزین‌ها

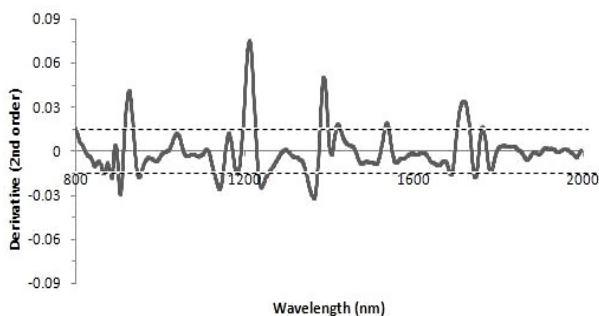


برای بررسی اثر ضخامت بر کارایی روش مشتق دوم، از پنج نمونه‌ی HDPE با ضخامت‌های یک تا پنج میلی‌متر استفاده شده است. طیف بازتابشی NIR این پنج نمونه در شکل (۸) نشان داده شده است.



شکل (۹): نمودار مشتق دوم طیف بازتابشی NIR رزین HDPE با ضخامت یک میلی‌متر و با خطوط آستانه‌ی ± 0.015

شکل (۸): طیف بازتابشی NIR پنج رزین HDPE به ضخامت‌های یک تا پنج میلی‌متر



شکل (۱۰): نمودار مشتق دوم طیف بازتابشی NIR رزین HDPE با ضخامت پنج میلی‌متر و با خطوط آستانه‌ی ± 0.015

مطابق شکل (۸)، با افزایش ضخامت، مقادیر مطلق بازتابش نیز افزایش یافته که با قانون بی‌یر- لامبرت سازگاری دارد. اما شکل کلی طیف حفظ شده و نقاط بروز پیک شیفیت پیدا نکرده است.

جدول (۲): مقادیر بارکد برای HDPE با ضخامت‌های یک تا پنج میلی‌متر

Barcode	Plastics
-1/+1/-1/-1/+1/-1/+1/-1/+1/-1/+1	HDPE(1t)
-1/-1/+1/-1/-1/+1/-1/-1/+1/+1/-1/+1/-1/+1	HDPE(2t)
-1/-1/+1/-1/-1/-1/+1/-1/-1/+1/+1/+1/-1/+1/-1/+1	HDPE(3t)
-1/-1/+1/-1/-1/-1/+1/-1/-1/+1/+1/+1/-1/+1/-1/+1	HDPE(4t)
-1/-1/-1/+1/-1/-1/-1/+1/-1/+1/+1/+1/-1/+1/-1/+1	HDPE(5t)

نمودار مشتق دوم هر پنج نمونه‌ی شکل (۸) بدست آورده شده و با در نظر گرفتن خطوط آستانه‌ی بالایی و پایینی ± 0.015 و -0.015 بارکدهای شناسایی آن‌ها استخراج شده است. برای نمونه، نمودارهای مربوط به ضخامت‌های یک و پنج میلی‌متر به ترتیب در شکل‌های (۹ و ۱۰) نشان داده شده است.

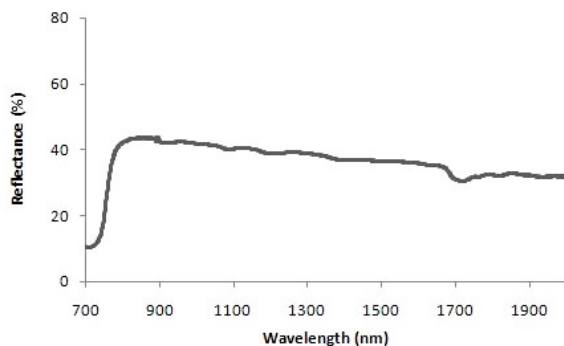
مطابق جدول (۲) با افزایش ضخامت، بارکدها دستخوش تغییر اندکی شده‌اند. این تغییر در بارکد می‌تواند منجر به گمراه شدن سیستم در شناسایی رزین‌ها گردد. اما این به معنای عدم کارایی روش مشتق دوم با تغییر ضخامت نیست؛ زیرا با تغییر مقدار خطوط آستانه‌ی بالایی و پایینی می‌توان این مشکل را برطرف نمود. همانگونه که در شکل‌های (۹ و ۱۰) ملاحظه می‌شود، مشخص‌ترین پیک‌ها در طیف مشتق دوم رزین HDPE،

با مقایسه‌ی شکل‌های (۹ و ۱۰) ملاحظه می‌شود که با افزایش ضخامت نمونه، شدت پیک‌ها در نمودارهای مشتق دوم افزایش یافته و در نتیجه تعداد بارکدها نیز زیاد شده است. با در نظر گرفتن خطوط آستانه‌ی ± 0.015 ، با افزایش ضخامت رزین HDPE از یک به پنج میلی‌متر، تعداد بارکدها از ۱۲ عدد به ۱۷ عدد افزایش یافته است. در جدول (۲) ترتیب بارکدهای هر پنج رزین نشان داده شده است.

تأثیر وجود برچسب بر روی سطح نمونه

اکثر بطری‌ها و ظروف پلاستیکی برچسب تجاری دارند. این برچسب درصدی از سطح قطعه را می‌پوشاند. در طیف‌سنجی بازتابشی، سطح قطعه تحت تابش نور قرار می‌گیرد و امکان دارد درصدی از این سطح شامل برچسب باشد.

برای بررسی تأثیر برچسب، شش بطری PET با برچسب‌های مختلف جمع‌آوری شد. ابتدا طیف بازتابشی NIR رزین PET و برچسب به طور جداگانه گرفته شد. طیف بطری‌های مختلف PET دقیقاً مشابه یکدیگر بود. شکل کلی آن‌ها شبیه نمودار اول شکل (۳) است. نمونه‌ای از طیف برچسب‌ها نیز که نوعاً از جنس کاغذ هستند در شکل (۱۲) نشان داده شده است.

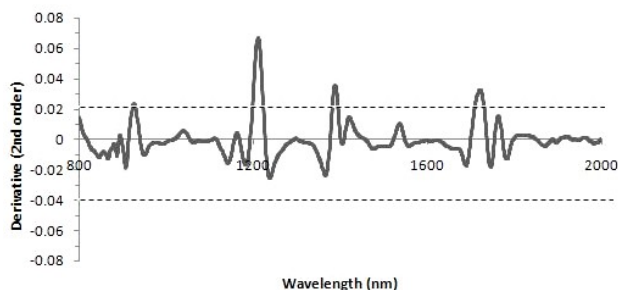


شکل (۱۳): طیف بازتابشی NIR برچسب

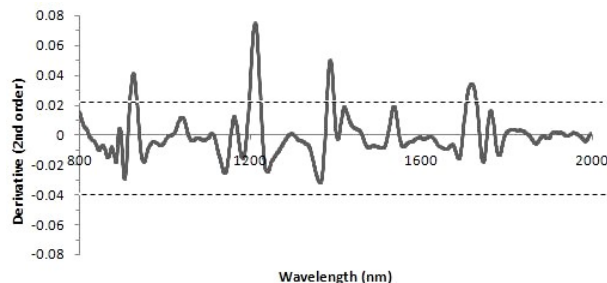
مطابق شکل (۱۳)، طیف برچسب پیک قابل توجهی ندارد و مقدار بازتابش آن از حدود ۸۰۰ تا ۲۰۰۰ نانومتر تغییر اندکی دارد. نمودار طیف بازتابشی بطری‌های PET با ۱۰، ۲۰، ۲۵ و ۳۵ درصد برچسب گرفته شده است. طیف بطری‌های با ۱۰ و ۳۵ درصد برچسب در شکل‌های (۱۴) و (۱۵) نشان داده شده است. جهت جلوگیری از اطاله‌ی کلام تمام نمودارها نشان داده نشده است.

در بالای خط مبنا دیده می‌شوند. لذا با انتخاب خط آستانه‌ی پایینی بگونه‌ای که این خط هیچکدام از پیک‌های نمودار را قطع نکند و نیز انتخاب خط آستانه‌ی بالایی به ترتیبی که فقط پیک‌های مشخص‌تر را قطع کند، امکان شناسایی صحیح رزین HDPE حتی با تغییر ضخامت فراهم می‌گردد. بنابراین در مورد رزین HDPE با انتخاب خطوط آستانه‌ی بالایی و پایینی به ترتیب به اندازه‌ی $+0.022$ و -0.04 برای هر پنج نمونه‌ی با ضخامت‌های مختلف، مقادیر بارکد یکسان و به صورت $+1/+1/+1/+1$ خواهد شد. این مطلب در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) برای نمونه‌های یک و پنج میلیمتری نشان داده شده است.

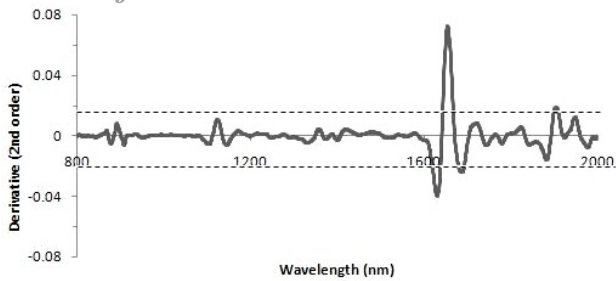
در نهایت می‌توان اینگونه نتیجه‌گیری کرد که با انتخاب صحیح خطوط آستانه، تغییر ضخامت رزین بر شناسایی رزین‌ها اثر منفی نخواهد داشت.



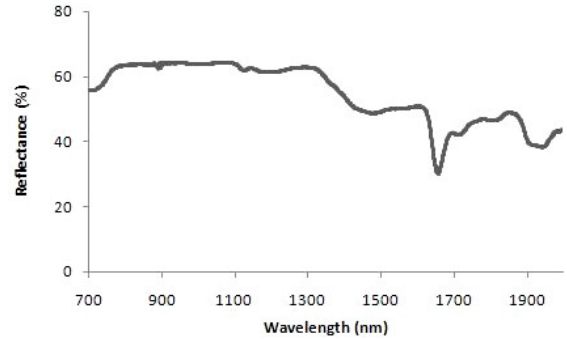
شکل (۱۱): نمودار مشتق دوم طیف بازتابشی NIR رزین HDPE با ضخامت یک میلیمتر و با خطوط آستانه‌ی $+0.022$ و -0.04



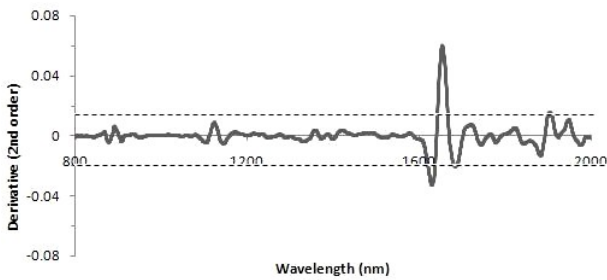
شکل (۱۲): نمودار مشتق دوم طیف بازتابشی NIR رزین HDPE با ضخامت پنج میلیمتر و با خطوط آستانه‌ی $+0.022$ و -0.04



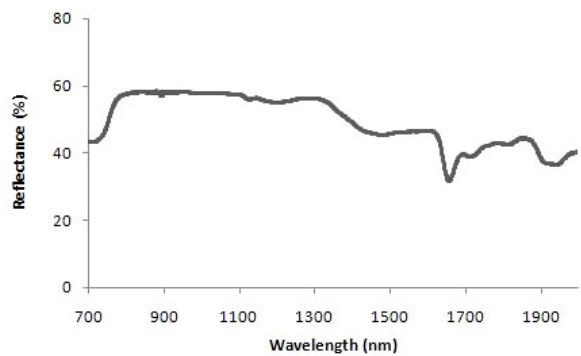
شکل (۱۶): نمودار مشتق دوم طیف بازتابشی NIR رزین PET با ۱۰ درصد برچسب، با خطوط آستانه‌ی $+0.015$ و -0.02



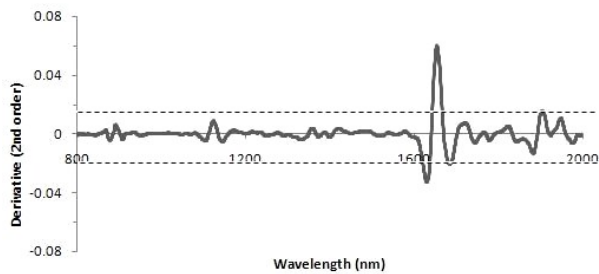
شکل (۱۴): طیف بازتابشی NIR رزین PET با ۱۰ درصد برچسب



شکل (۱۷): نمودار مشتق دوم طیف بازتابشی NIR رزین PET با ۲۰ درصد برچسب، با خطوط آستانه‌ی $+0.015$ و -0.02

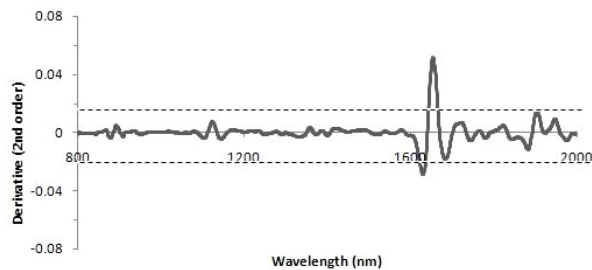


شکل (۱۵): طیف بازتابشی NIR رزین PET با ۲۵ درصد برچسب



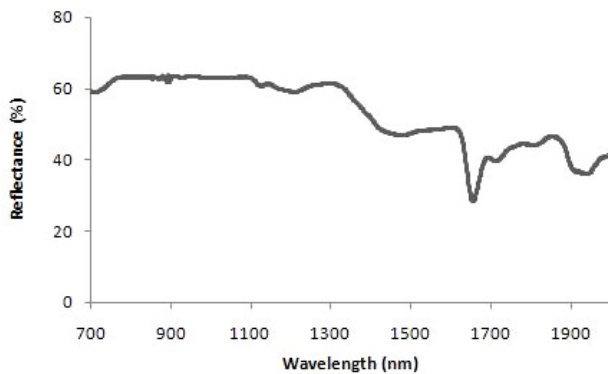
شکل (۱۸): نمودار مشتق دوم طیف بازتابشی NIR رزین PET با ۲۵ درصد برچسب، با خطوط آستانه‌ی $+0.015$ و -0.02

با مشاهده‌ی شکل‌های (۱۴ و ۱۵) ملاحظه می‌شود که با افزایش درصد برچسب، شکل طیف PET به سمت شکل طیف برچسب میل می‌کند. اما در ۳۵ درصد برچسب هم هنوز شکل کلی و پیک اصلی طیف حفظ شده است. نمودار مشتق دوم طیف‌های بطری PET با ۱۰، ۲۰، ۲۵ و ۳۵ درصد برچسب به ترتیب در شکل‌های ۱۶، ۱۷، ۱۸ و ۱۹ آورده شده است.

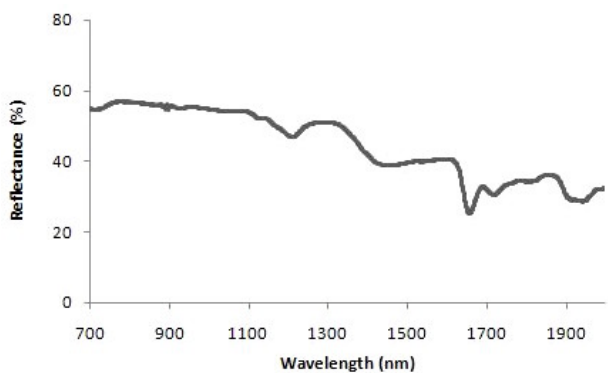


شکل (۱۹): نمودار مشتق دوم طیف بازتابشی NIR رزین PET با ۳۵ درصد برچسب، با خطوط آستانه‌ی $+0.015$ و -0.02

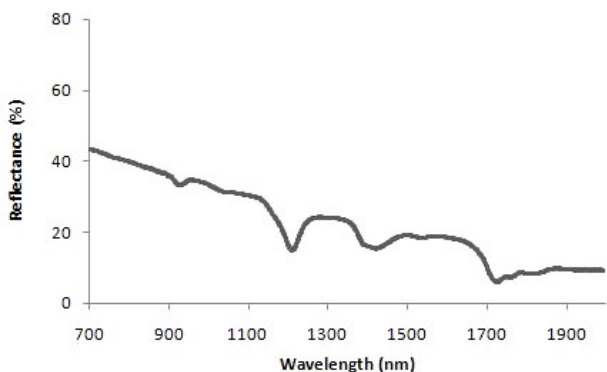
جنس PET با ۱۰ و ۳۰ درصد درپوش، و طیف درپوش از جنس PP را نشان می‌دهند. برای جلوگیری از اطاله‌ی کلام فقط نمودار طیف‌های ۳ و ۲۰ درصد درپوش نشان داده شده است.



شکل (۲۰): طیف بازتابشی NIR بطری PET با ۱۰ درصد درپوش



شکل (۲۱): طیف بازتابشی NIR بطری PET با ۳۰ درصد درپوش

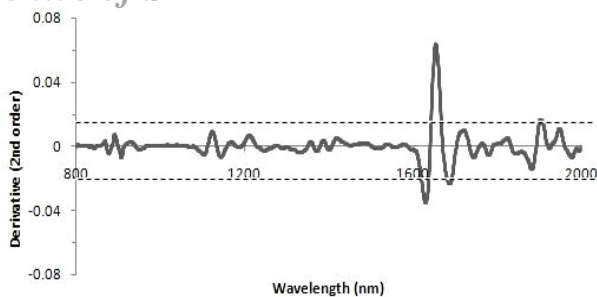


شکل (۲۲): طیف بازتابشی NIR درپوش از جنس PP

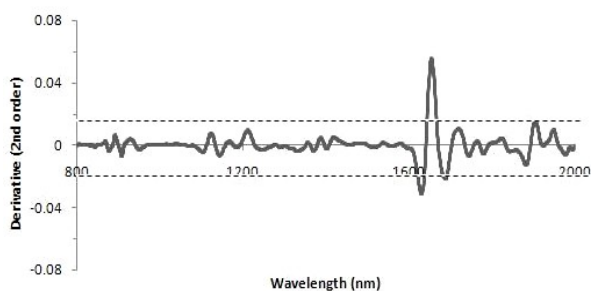
در نمودارهای شکل‌های (۱۶ تا ۱۹)، خطوط آستانه‌ی بالایی و پایینی به ترتیب $+0/0.15$ و $-0/0.20$ در نظر گرفته شده‌اند. با انتخاب این خطوط آستانه، ملاحظه می‌شود که با افزایش درصد برچسب تا ۲۵ درصد، تغییری در بارکد شناسایی بوجود نمی‌آید. برای نمونه‌های PET بدون برچسب و PET با ۱۰، ۲۰ و ۲۵ درصد برچسب، بارکد شناسایی به صورت $-1/+1$ بدست می‌آید. در خصوص نمونه‌ی با ۲۵ درصد برچسب، خطوط آستانه به انتهای نقاط پیک بسیار نزدیک شده‌اند. بنابراین با افزایش درصد برچسب به بیش از ۲۵ درصد، خطوط آستانه، پیک‌های کمتری را قطع می‌کنند. این مسئله در نمودار مشتق دوم PET با ۲۵ درصد برچسب، یعنی شکل (۱۹)، بوضوح دیده می‌شود. بارکد شناسایی این نمودار به صورت $-1/+1$ بدست می‌آید. البته به ندرت برچسب‌هایی با بیش از ۲۵ درصد سطح مؤثر دیده می‌شود. ضمن آنکه از زمان استفاده از قطعات پلاستیکی تا زمانیکه آن‌ها به سطل زباله انداخته شوند، و نیز از زمان حمل زباله‌های پلاستیکی تا کارخانه‌ی بازیافت، امکان دارد بخشی از برچسب سطح پلاستیک یا تمام آن برداشته شود. بنابراین در صورت انتخاب آگاهانه‌ی خطوط آستانه، وجود برچسب اثر منفی بر الگوریتم شناسایی نخواهد داشت.

تأثیر وجود درپوش برای نمونه

بسیاری از بطری‌ها و ظروف پلاستیکی آماده برای جداسازی دارای درپوش نیز می‌باشند. سطح مؤثر درپوش، بسیار کمتر از برچسب است. درپوش‌ها عمدتاً از جنس PP هستند. در این بخش، تأثیر درپوش بر روی الگوریتم شناسایی، از طریق بطری‌هایی از جنس PET با درپوش PP مورد بررسی قرار گرفته است. در نمونه‌های مورد بررسی در این بخش، درپوش‌های از جنس PP بین دو تا چهار درصد از سطح مؤثر PET را پوشانده‌اند. با این حال تأثیر ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد درپوش نیز مورد بررسی قرار گرفته است. شکل‌های (۲۰، ۲۱ و ۲۲) به ترتیب طیف بازتابشی NIR بطری از



شکل (۲۵): نمودار مشتق دوم طیف بازتابشی NIR بطری PET با ۲۰ درصد درپوش و با خطوط آستانه‌ی ± 0.15 و -0.2

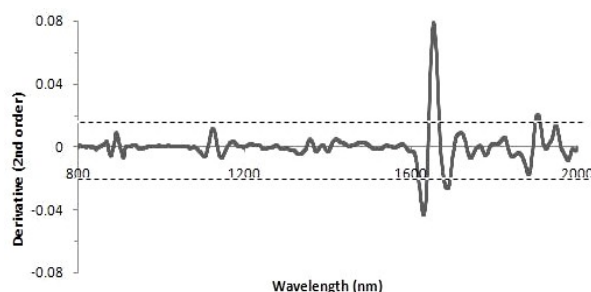


شکل (۲۶): نمودار مشتق دوم طیف بازتابشی NIR بطری PET با ۳۰ درصد درپوش و با خطوط آستانه‌ی ± 0.15 و -0.2

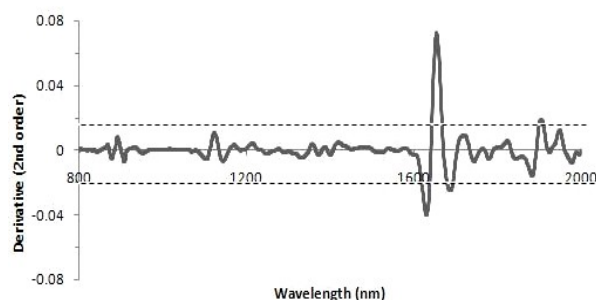
نمودار مشتق دوم PET با سه درصد برچسب، تا حدود زیادی منطبق بر نمودار مشتق دوم PET بدون برچسب است. با انتخاب خطوط آستانه‌ی بالایی و پایینی ± 0.15 و -0.2 ، بارکد شناسایی در هر دو نمودار به صورت " $1/1-1/1-1/1$ " بدست می‌آید. حتی با افزایش درصد سطح مؤثر برچسب به ۱۰ و ۲۰ درصد نیز بارکد شناسایی تغییری نمی‌کند. این مطلب در شکل‌های (۲۴ و ۲۵) نشان داده شده است. با افزایش بیشتر درصد سطح مؤثر درپوش به ۳۰ درصد، مطابق شکل (۲۶) بارکد شناسایی به صورت " $1/1-1/1$ " خواهد شد. اما به ندرت سطح مؤثر درپوش یک بطری به این مقدار می‌رسد. سطح مؤثر اکثر درپوش‌ها کمتر از پنج درصد است. بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که وجود درپوش برای بطری، اثر منفی بر سیستم جداسازی نخواهد داشت.

نمودار طیف PET با ۳ درصد درپوش بسیار شبیه به نمودار طیف PET بدون درپوش که در شکل (۳) نشان داده شده است، می‌باشد. با افزایش درصد سطح مؤثر درپوش، شکل کلی طیف‌ها از طیف بطری PET خالص فاصله گرفته و به سمت طیف PP میل می‌کنند. با این حال حتی در شکل (۲۱) که مربوط به بطری با ۳۰ درصد سطح مؤثر درپوش است نیز، شکل کلی طیف PET حفظ شده است.

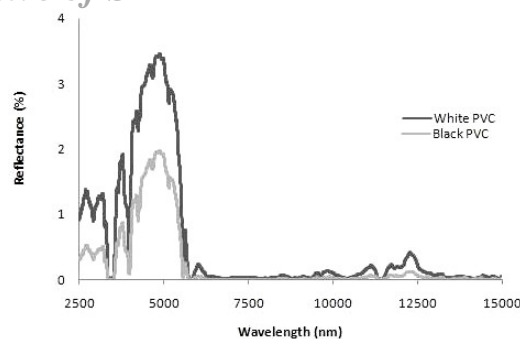
شکل‌های (۲۳ تا ۲۶) به ترتیب نمودارهای مشتق دوم نمونه‌های PET با ۳، ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد درپوش را نشان می‌دهند.



شکل (۲۳): نمودار مشتق دوم طیف بازتابشی NIR بطری PET با سه درصد درپوش و با خطوط آستانه‌ی ± 0.15 و -0.2



شکل (۲۴): نمودار مشتق دوم طیف بازتابشی NIR بطری PET با ۱۰ درصد درپوش و با خطوط آستانه‌ی ± 0.15 و -0.2



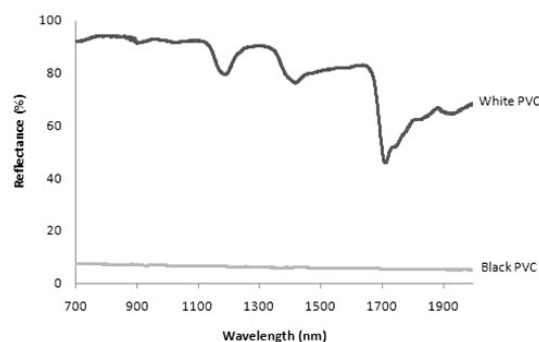
شکل (۲۸): طیف بازتابشی PVC سفید و سیاه در ناحیه‌ی مادون قرمز متوسط

مطابق شکل (۲۸)، طیف بازتابشی در ناحیه‌ی MIR کاملاً مستقل از رنگ است. در این شکل فرم کلی نمودار طیف دو نمونه‌ی PVC با اینکه رنگ یکی از آن‌ها روشن و دیگری تیره است، مشابه یکدیگر می‌باشد. نقاط طول موج که در آن‌ها پیک اتفاق افتاده است بر هم منطبق می‌باشد. با این وجود استفاده از ناحیه‌ی NIR به جای MIR برتری‌هایی نیز دارد. در ناحیه‌ی MIR میزان عمق نفوذ نور در نمونه کمتر از ناحیه‌ی NIR است [۴]. بنابراین لایه‌های رنگ و کثیفی می‌توانند اثر منفی بر روی سیستم‌های جداسازی بر مبنای طیف بازتابشی MIR بگذارند. اما در ناحیه‌ی NIR چنین مشکلی وجود ندارد. همچنین برای طیف‌سنجی MIR باید زبری سطح پلاستیک بسیار کم باشد تا نتایج بهتری حاصل شود [۴]. با وجود مزیت روش طیف‌سنجی MIR در قابلیت شناسایی پلاستیک‌های سیاه یا بسیار تیره، معایب ذکر شده از این روش، روش NIR را روش بهتری جلوه می‌دهد. از طرفی در صنایع بسته‌بندی، استفاده از پلاستیک‌های با رنگ بسیار تیره محدود است و این پلاستیک‌ها درصد کمی از کل مواد پلاستیکی موجود در زباله‌های پلاستیکی را شامل می‌شوند.

همانگونه که اشاره شد، رنگ‌های بسیار تیره اکثر نور NIR را جذب می‌کنند. بنابراین باید سطح نوارنقاله‌ی جداسازی را سیاه نمود تا در زمانیکه نمونه‌ای از مقابل واحد شناسایی عبور نمی‌کند، سیستم جداسازی به درستی عدم عبور نمونه را تشخیص دهد.

تأثیر رنگ نمونه و آلودگی‌های سطحی

پیش از این اشاره شد که در نمونه‌های مورد بررسی برای استخراج الگوریتم شناسایی، از نمونه‌های با رنگ بسیار تیره استفاده نشده است. علت آن است که مهمترین محدودیت سیستم‌های جداسازی بر مبنای طیف NIR، در جداسازی پلاستیک‌های با رنگ بسیار تیره می‌باشد. در ناحیه‌ی NIR برخلاف MIR، مادون قرمز متوسط، اجسام به رنگ بسیار تیره تقریباً تمام نور را جذب می‌کنند. بنابراین در طیف بازتابشی NIR آن‌ها پیک مشخصه‌ی موجود در نمونه‌های به رنگ‌های دیگر ملاحظه نمی‌شود. اما طیف MIR اجسام تیره کاملاً مستقل از رنگ نمونه است. در شکل (۲۷)، طیف بازتابشی نمونه‌های PVC سفید و سیاه رنگ در ناحیه‌ی NIR نشان داده شده است. مطابق شکل (۲۷)، طیف بازتابشی PVC سیاه رنگ، نور NIR را بیشتر جذب کرده و بازتابش قابل توجهی نداشته است. در نتیجه، طیف آن با طیف PVC سفید کاملاً متفاوت است. اما در ناحیه‌ی MIR وضعیت متفاوت است. در شکل (۲۸) طیف بازتابشی همین دو نمونه در ناحیه‌ی MIR نشان داده شده است.

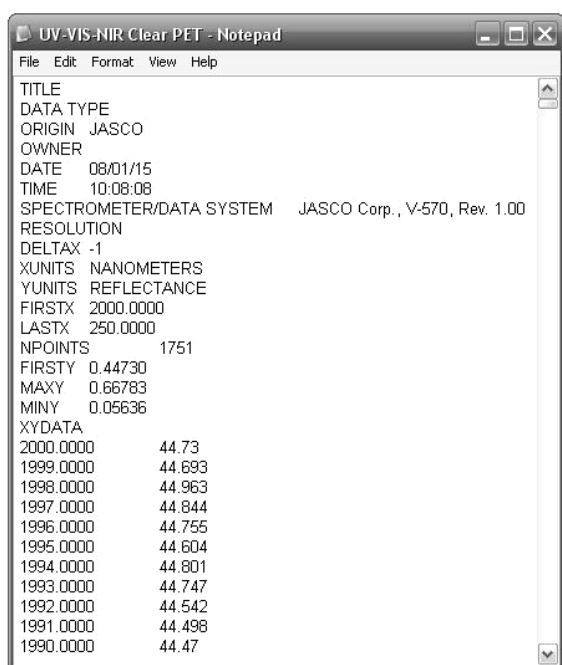


شکل (۲۷): طیف بازتابشی PVC سفید و سیاه در ناحیه‌ی مادون قرمز نزدیک

طیف بازتابشی در ناحیه‌ی MIR توسط دستگاه طیف-سنج FT-IR با مارک تجاری JASCO FT/IR-680 PLUS در آزمایشگاه آنالیز دستگاهی دانشکده‌ی شیمی دانشگاه صنعتی اصفهان گرفته شده است.

سپس این بارکد با بارکدهای مینا مقایسه شده و به این ترتیب جنس رزین تشخیص داده شود. خروجی واحد کنترل، فرمان تحریک یا عدم تحریک شیرهای الکتروپنوماتیکی است.

طیف ثبت شده توسط طیف‌سنج مستقیماً به کامپیوتر فرستاده می‌شود. طیف دستگاه UV-VIS-NIR یک فایل متنی است که در یکی از درایوهای از پیش انتخاب شده‌ی کامپیوتر ذخیره می‌شود. شکل (۲۹) یک نمونه فرمت اطلاعات فایل متنی که با Notepad قابل خواندن است را نشان می‌دهد.



شکل (۲۹): نمونه‌ای از فایل متنی طیف

فایل متنی شکل (۲۹) مربوط به طیف گرفته شده از یک نمونه‌ی PET شفاف در نواحی UV-VIS-NIR، یعنی از طول موج ۲۵۰ تا ۲۰۰۰ نانومتر است. از خط هجدهم به بعد اعداد ستون اول، طول موج برحسب نانومتر، و اعداد ستون دوم، درصد بازتابش را نشان می‌دهند. برنامه‌ی ایجاد شده در محیط LabVIEW این فایل را دریافت کرده و مراحل استخراج بارکد شناسایی را انجام می‌دهد. شکل‌های (۳۰ و ۳۱) به ترتیب صفحات نمودار بلوکی و پانل برنامه را نشان می‌دهند.

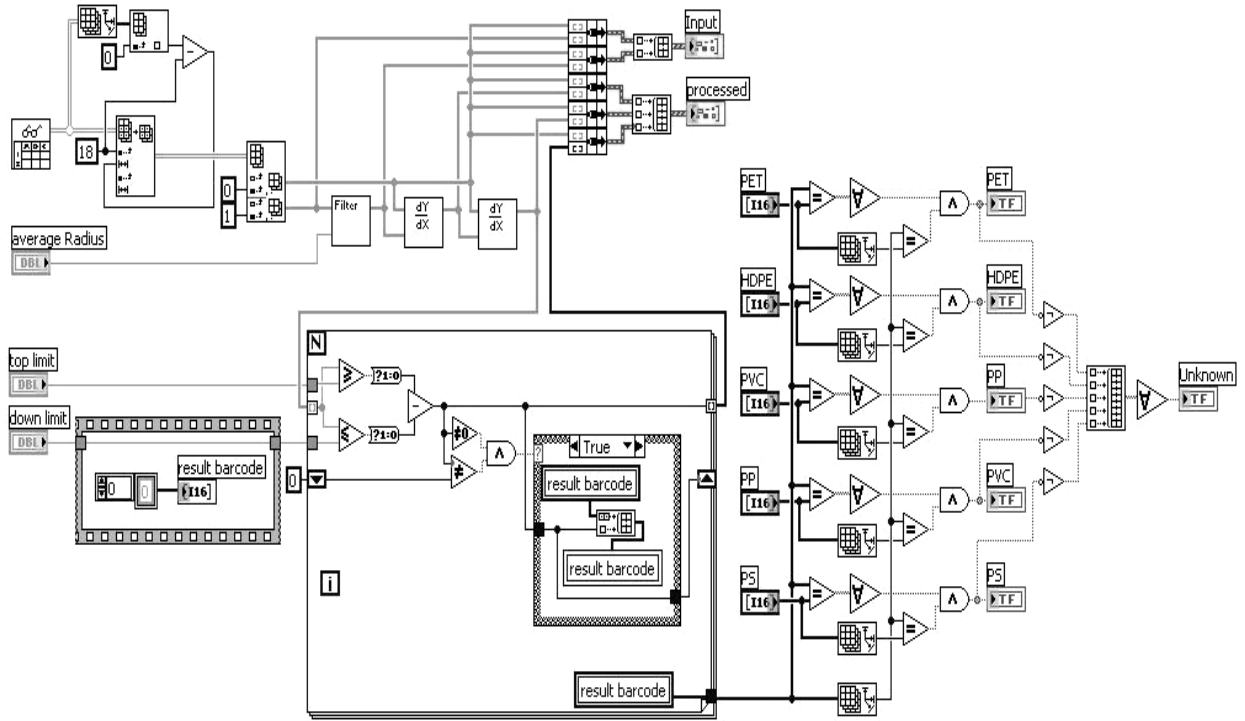
همانگونه که پیش از این اشاره شد، نمونه‌های انتخاب شده جهت طیف‌سنجی، شسته و تمیز نشدند. برخی از آن‌ها نیز سطحی کثیف و آلوده داشتند. با این وجود پس از گرفتن طیف‌ها، مشخص شد که طیف نمونه‌های کثیف یک رزین خاص با نمونه‌های غیر آلوده از همان رزین مطابقت دارد. زیرا میزان عمق نفوذ نور در ناحیه‌ی NIR بیشتر از ضخامت آلودگی‌های سطح پلاستیک است.

۳-۲- واحد کنترل

وظیفه‌ی اصلی واحد کنترل اجرایی نمودن آنالیزها و محاسبات مربوط به الگوریتم شناسایی و صدور دستور مناسب به واحد پرتاب است. اساس کار واحد کنترل بر مبنای کارت اکتساب داده یا کارت DAQ^۱ و نرم‌افزار LabVIEW است. بنابراین باید با توجه به ورودی‌ها و خروجی‌های مورد نیاز در فرآیند کنترل، کارت اکتساب داده‌ی مناسب انتخاب شده و برنامه‌ی کاربردی در محیط LabVIEW ایجاد شود. LabVIEW یک زبان برنامه‌نویسی خاص دارد که بر خلاف زبان‌های برنامه‌نویسی متنی از برنامه‌نویسی گرافیکی سود می‌برد. محیط نرم‌افزار LabVIEW از دو صفحه‌ی اصلی تشکیل شده است: صفحه‌ی پانل و صفحه‌ی نمودار بلوکی. با کمک نرم‌افزار LabVIEW می‌توان یک صفحه‌ی پانل برای مشاهده‌ی وضعیت سیستم ایجاد نمود و در آن شکل ظاهری المان‌های سیستم و ارتباط آن‌ها با یکدیگر را شبیه‌سازی کرد. صفحه‌ی نمودار بلوکی برای ایجاد برنامه‌ی گرافیکی مورد نظر جهت کنترل سیستم و ارتباط اجزا با یکدیگر است. در واقع صفحه‌ی پانل، رابط کاربر می‌باشد و برنامه‌نویسی گرافیکی در صفحه‌ی نمودار بلوکی انجام می‌شود [۱۶].

ورودی واحد کنترل در روش مشتق دوم، طیف ثبت شده توسط یک دستگاه طیف‌سنج سریع است. باید از این طیف دو بار مشتق گرفته شود و با در نظر گرفتن خطوط آستانه، بارکد متناظر با طیف استخراج شود.

^۱data acquisition card



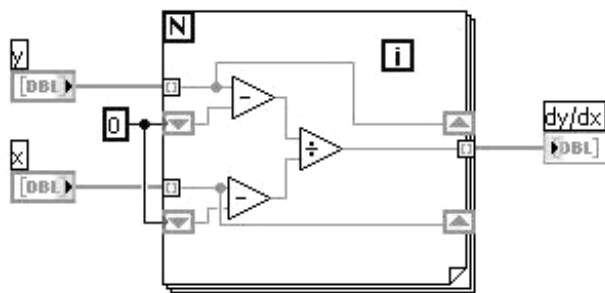
شکل (۳۰): صفحه‌ی نمودار بلوکی برنامه‌ی اصلی جهت اجرای الگوریتم مشتق دوم



شکل (۳۱): صفحه‌ی پانل برنامه‌ی اصلی پس از اجرای برنامه با نمونه‌ی PET با شعاع متوسط ۵

تعدادی بازتابش قبل و بعد آن است. برای مثال اگر شعاع متوسط پنج باشد، مقدار بازتابش در طول موج ۱۰۰۰ نانومتر با میانگین مقادیر بازتابش در طول موج‌های ۹۹۵ تا ۱۰۰۵ نانومتر جایگزین می‌شود. خروجی یا output نیز آرایه‌ای یک بعدی مقادیر بازتابش طیف فیلتر شده است. زیربرنامه‌ی فیلتر کردن در شکل (۳۰) با برچسب Filter استفاده شده است.

برای مشتق‌گیری نیز از زیربرنامه‌ای مطابق شکل (۳۳) استفاده شده است.



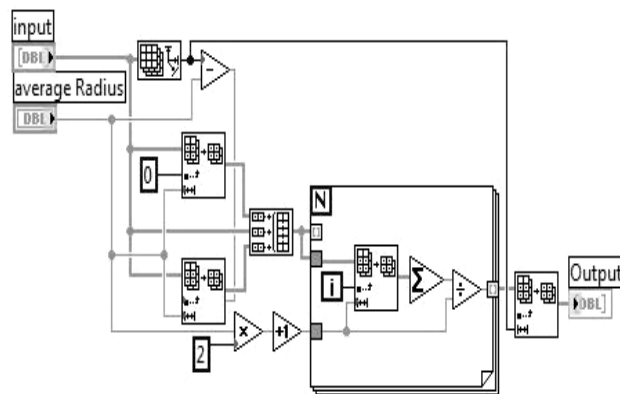
شکل (۳۳): زیربرنامه‌ی مشتق گرفتن از طیف

در زیربرنامه‌ی شکل (۳۳)، مشتق به روش عددی محاسبه شده است. در زیربرنامه از یک حلقه‌ی For به همراه ثبات‌های انتقال آن استفاده شده است. از دستورالعمل‌های Subtract و Divide نیز برای ایجاد رابطه‌ی مشتق عددی استفاده شده است. این زیربرنامه، در برنامه‌ی اصلی شکل (۳۰)، با برچسب $\frac{dy}{dx}$ استفاده شده است. برای گرفتن مشتق دوم، دو بار پیاپی از آن استفاده شده است.

صفحه‌ی پانل برنامه‌ی اصلی، شکل (۳۱)، از دو گراف و سه المان کنترل ورودی تشکیل شده است. در گراف سمت چپ، نمودار طیف بازتابشی ثبت شده و نمودار طیف فیلتر شده‌ی آن به ترتیب با برچسب‌های input و filtered رسم می‌شوند. با فیلتر کردن نمودار طیف، نویزهای آن گرفته می‌شود. در گراف سمت راست صفحه‌ی پانل، نمودارهای مشتق اول طیف، مشتق دوم طیف و استخراج بارکد، به ترتیب با برچسب‌های $\frac{dy}{dx}$

در صفحه‌ی نمودار بلوکی، از ابزار مجازی Read From Spreadsheet File.vi برای خواندن فایل متنی از محل ذخیره شده و فراخوانی آن به LabVIEW استفاده شده است. برای تعریف طول آرایه در دستورالعمل Array Subset، از ترمینال element در دستورالعمل Index Array، ۱۸ واحد کم شده و نتیجه‌ی آن به ترمینال length از دستورالعمل Array Subset سیم‌کشی شده است. علت آن است که در فایل متنی طیف، ۱۸ خط اول مربوط به توضیحات جنبی است و داده‌های طول موج و درصد بازتابش از خط نوزدهم دیده می‌شوند.

نمودار طیف‌های ثبت شده معمولاً همراه با نویز است. اگر اصلاح سیگنال بر روی این نمودارها انجام نگیرد و نویز آن‌ها فیلتر نشود، پس از گرفتن مشتق دوم پیک‌های گمراه کننده‌ای در نمودار پدیدار می‌شود. لذا حتماً باید پس از رسم نمودار و پیش از مشتق‌گیری در LabVIEW، طیف حاصل فیلتر شود. شکل (۳۲) زیربرنامه‌ای را نشان می‌دهد که جهت فیلتر کردن طیف نوشته شده است.



شکل (۳۲): زیربرنامه‌ی فیلتر کردن طیف جهت حذف نویزهای آن

ورودی average Radius شعاع متوسط منحنی طیف برای فیلتر کردن را مشخص می‌کند. منظور از ورودی input آرایه‌ای یک بعدی از مقدار Y نمودار طیف، یعنی همان بازتابش است. یک مقدار بازتابش مشخص با مقداری جایگزین می‌شود که میانگین آن بازتابش و

رزین مهم پلیمری را با دقت بالایی شناسایی و جداسازی نماید. آزمایشات نشان داد که کثیفی یا آلودگی سطحی نمونه‌های پلاستیکی نمی‌تواند مانع شناسایی نوع رزین با این روش گردد. همچنین عواملی مانند تغییرات ضخامت نمونه و وجود برچسب و درپوش برای نمونه، در صحت شناسایی رزین به روش مشتق دوم ایجاد اشکال نخواهند کرد. استفاده از کارت DAQ و نرم‌افزار LabVIEW باعث می‌شود که سیستم جداسازی از قدرت تشخیص بالا و سرعت شناسایی قابل قبول برخوردار باشد. روش مطرح شده در این مقاله برای جداسازی پلاستیک‌های به رنگ بسیار تیره مناسب نیست.

۴- تشکر و قدردانی

در این بخش از آقایان عتباتی و حاج‌ابراهیمی که در انجام آزمایش‌های طیف‌سنجی در آزمایشگاه آنالیز دستگاهی دانشکده‌ی شیمی دانشگاه صنعتی اصفهان به اینجانبان کمک نمودند، و نیز از آقایان دکتر سیدمجید سیدصالحی و مهندس کمال‌الدین کریمی نهایت سپاسگزاری را داریم.

مراجع

- [1] Al-Salem, S. M., Lettieri, P., Baeyens, J., (2009), "Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review", *Waste Management* 29, 2625–2643.
- [2] Gartner, L. L., (2006), "Dufferin MRF Optical Sorting Feasibility Study", *Stewardship Ontario's Effectiveness & Efficiency Fund*, Toronto.
- [3] Lardinois, I., Klundert, A. V., (1995), "Plastic Waste", TOOL Publications, Technology Transfer for Development Amsterdam, Netherlands.
- [4] Scheirs, J., (1998), "Polymer Recycling", Wiley Publication.
- [5] Enick, R., Beckman, J., (1996), "The Microsortation of Post-Consumer

$\frac{d_y^2}{d_x^2}$ ، و Process رسم می‌شوند. در المان کنترل عددی average Radius شعاع متوسط منحنی طیف برای فیلتر کردن وارد می‌شود. المان‌های top limit و down limit نیز به ترتیب خطوط آستانه‌ی بالایی و پایینی برای استخراج بارکد را مشخص می‌کنند.

در شکل (۳۱)، صفحه‌ی پانل در اجرای برنامه با ثبت طیف نمونه‌ی PET نشان داده شده است. شعاع متوسط جهت فیلتر کردن ۵ انتخاب شده است. نمودار فیلتر شده-ی طیف PET تا حدود زیادی منطبق بر نمودار اصلی طیف است. به همین دلیل در این شکل، نمودار طیف فیلتر شده قابل تفکیک از نمودار اصلی نمی‌باشد. به دلیل نویزهای قابل توجه در نمودار اصلی، مرحله‌ی فیلتر کردن اجتناب‌ناپذیر است. در نظر گرفتن شعاع متوسط صفر به معنای عدم فیلتر کردن است. خطوط آستانه‌ی بالایی و پایینی به ترتیب $+0/015$ و $-0/015$ در نظر گرفته شده‌اند. با توجه به این خطوط آستانه، بارکدهای مبنای پنج رزین اصلی مطابق جدول (۱)، در آرایه‌های یک بعدی برنامه با نام رزین‌ها قرار داده شده است. نمودار بارکد نتیجه در گراف سمت راست قابل مشاهده است. بارکد استخراج شده در آرایه‌ی result barcode دقیقاً منطبق بر بارکد مبنای رزین PET است. بنابراین المان نشان‌دهنده‌ی جبری رزین PET روشن شده و مقدار جبری آن True شده است.

از کارت DAQ برای ارتباط برقرار کردن بین کامپیوتر و واحد پرتاب استفاده می‌شود. پس از تشخیص جنس رزین، با توجه به برنامه‌ی ایجاد شده در محیط LabVIEW، فرمان تحریک یا عدم تحریک توسط کارت DAQ به شیر الکتروپنوماتیکی ارسال می‌شود. لازم است کارت DAQ برای کامپیوتر، پیکربندی شود.

۳- جمع‌بندی

روش پیشنهاد شده برای جداسازی پلاستیک که بر مبنای طیف‌سنجی بازتابشی مادون قرمز نزدیک استوار است، قادر می‌باشد به سرعت پلاستیک‌ها را بر اساس نوع رزین جداسازی کند. روش مشتق دوم می‌تواند پنج

[15] Cozzolino, D., (2002), "Prediction of Chemical Composition of Ruminant Feeds by Near Infrared Reflectance Spectroscopy in Uruguay", Rev. Arg. Prod. Anim, Vol 22.

[۱۶] فرید قابوسی، (۱۳۸۲)، "راهنمای جامع LabVIEW زبان برنامه‌نویسی گرافیکی"، نشر آفرنگ.

Thermoplastics Using Near-Critical Liquids", Proc. Globec Davos, Switzerland, Paper 18.

[6] Nauman, E. B., Lynch, J. G., Norwalk, S., (1996), "Overcoming Challenges in Recycling High Value Plastics from Durable Goods", Charlotte Symposium on Plastics Recycling, University of North Carolina.

[7] Shen, H., Forssberg, E., Pugh, R. J., (2002), "Selective flotation separation of plastics by chemical conditioning with methyl cellulose", Resources, Conservation and Recycling, 35, 229-241.

[8] Pongstabodee, S., Kunachitpimo, N., Damronglerd, S., (2008), "Combination of three-stage sink-float method and selective flotation technique for separation of mixed post-consumer plastic waste", Waste Management 28, 475-483.

[9] Mucci, P., (1994) "British patent PCT/GB94/001101".

[10] Hearn, G. L., Ballard, J. R., (2005), "The use of electrostatic techniques for the identification and sorting of waste packaging materials", Resources, Conservation and Recycling 44, 91-98.

[11] Mikofalvy, B. K., Boo, H., (1992), "Technical Aspects of Vinyl Recycling", ACS Symposium on Plastic Recycling, Emerging Technologies.

[12] Bezati, F., Froelich, D., Massardier, V., Maris, E., (2010), "Addition of tracers into the polypropylene in view of automatic sorting of plastic wastes using X-ray fluorescence spectrometry", Waste Management 30, 591-596.

[13] Clark, R. N., (1995), "Reflectance Spectra", United States Survey, MS 964, Denver Federal Center, Denver.

[۱۴] جیمز رابینسون، ترجمه‌ی دکتر شهین برهانی، جلد اول (۱۳۷۹) "تجزیه‌ی دستگاهی"، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

Automated Separation of Plastic Resins Types by the Second Order Derivative Method Based on NIR Reflectance Spectroscopy

Seyed Mohsen Safavi¹, Hamed Masoumi², Seyed Saeid Mirian³, Mahmoud Tabrizchi⁴

1. Assistant Professor of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology.
2. Instructor of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Golpayegan Branch.
3. PhD Student of Mechanical Engineering, Isfahan University of Technology.
4. Professor of Chemistry, Isfahan University of Technology.

ARTICLE INFO

Article history :

Received 14 February 2009

Received in revised form 16 May 2010

Accepted 30 June 2010

Keywords:

Plastic
Separation
reflectance spectroscopy
near infrared
2nd order derivative
LabVIEW software

ABSTRACT

In this paper, an appropriate, accurate and fast method for automated separation of plastic resins from post consumer plastic wastes is presented. The principle of sorting system operation is based on Near Infrared (NIR) reflectance spectroscopy. In this system, the plastic samples are fed on the sorting conveyor. When the samples are crossing from the near of conveyor end, their NIR reflectance spectrum is taken by a rapid spectrometer device. The control unit takes the second derivative of spectrum graph and then recognizes the sample material by analyzing this graph. Finally the target plastic resin is thrown to proper location by compressed air jet. According to current study, it is possible to separate PET, HDPE, PVC, PP and PS resins automatically by LabVIEW software. The accuracy of this method has been demonstrated for different resins. Also the effect of various parameters such as surface pollution, sample thickness and existence of label and cap has been studied on identification system. Experimental results, have confirmed the high accuracy of this new method.

All rights reserved.