کاربرد سامانه ماشین بویایی (بینی الکترونیکی) به عنوان ابزاری غیرمخرب در طبقه بندی مراحل رسیدگی موز

علیرضا ثنایی فر[۱*]، سید سعید محتسبی[۲]، مهدی قاسمی ورنامخواستی[۳] و عبدالعباس جعفری[۴]

۱ و ۴- به ترتیب دانشجوی دکتری و استادیار بخش مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه شیراز، a.sanaei@ut.ac.ir

۲- استاد گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه تهران

۳- استادیار گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشگاه شهرکرد

چکیده

در این پژوهش توانایی کاربرد ماشین بویایی بر پایه حسگرهای نیمه هادی اکسید فلزی به عنوان ابزاری غیرمخرب برای پایش تغییرات مواد فرار تولید شده از موز در طی فرایند رسیدگی مورد مطالعه قرار گرفت. اجزای اصلی سامانه طراحی شده شامل سامانه دریافت نمونه، آرایه حسگرهای گازی، سامانه تحصیل داده، الگوریتم های تشخیص الگو و تحلیل داده می‌باشد. تحلیل مولفه‌های اصلی (PCA)، تحلیل تفکیک خطی (LDA) و آنالیز لودینگ روش‌های بودند که برای رسیدن به این هدف استفاده گردید. براساس نتایج حاصل شده، دقت در طبقه بندی دوره رسیدگی ۹۷/۳٪ بدست آمد و حسگر MQ-131 در مقایسه با دیگر حسگرها نقش کمتری در تمایز مراحل رسیدگی موز دارد. نتایج بدست آمده توانایی بالای ماشین بویایی را در تمایز بین مراحل دوره رسیدگی نشان داد که می‌توان این سامانه را به عنوان یک ابزار غیر مخرب برای پایش و کنترل کیفیت در طول نگهداری موز به کار برد.

واژه‌های کلیدی: تحلیل تفکیک خطی، تحلیل مولفه‌های اصلی، رسیدگی ، غیرمخرب ، ماشین بویایی

مقدمه

در سال‌های اخیر درجه بندی محصولات کشاورزی همواره موضوع تحقیق پژوهشگران بوده است و با به کارگیری تکنیک‌های پیشرفته، دقیق و سریع به ارزیابی غیرمخرب میوه‌ها و کنترل کیفیت آنان در مراحل تولید، حمل ونقل، انبارداری و بسته بندی پرداخته شده است. یکی از زمینه‌های مورد مطالعه، درجه بندی میوه براساس میزان رسیدگی آن است. درجه‌بندی خودکار و دقیق میوه‌ها بر پایه میزان رسیدگی برای مکانیزه کردن صنعت کشاورزی در بخش فرآوری و بسته‌بندی و افزایش سودآوری مفید می‌باشد (Soltani *et al.*, 2011).

در این میان، سنجش بو روشی پیشرفته و به ویژه موثر در کسب پارامترهای تاثیرگذار بر کیفیت محصولات کشاورزی می‌باشد چرا که بوی ساطع شده از میوه‌ها بسیار حساس به تغییر ترکیبات تشکیل دهنده آن می‌باشد. ماشین بویایی[1] (بینی الکترونیک[2]) وسیله ای است که شبیه سازی حس بویایی انسان را انجام می دهد (Peris and Escuder-Gilabert, 2009). بسته به گازهایی که توسط ماشین حس می‌شوند اطلاعاتی نسبتاً مطمئن در خصوص وضعیت محصولات غذایی بدست می‌آید. برای هر محصول غذایی، کاربرد این سیستم بویایی پیشرفته به منظور کنترل کیفیت مطمئن، می‌بایست مطالعه و تحقیق شود چرا که طراحی این نوع سیستم‌ها برای هر نوع ماده غذایی منحصر به فرد است (Balasubramanian *et al.*, 2009). این وسیله طراحی شده است تا تشخیص و درک بوهای پیچیده را با استفاده از آرایه‌ای از حسگرهای شیمیایی انجام دهد. یک ماشین بویایی می تواند ترکیب بودار را با تخمینی از غلظت آن و یا تعیین برخی از خواص ذاتی آن، کاری که بینی انسان به سختی قادر به انجام آن است، تشخیص دهد. به هر حال ماشین های بویایی هیچ اطلاعاتی در مورد ترکیبات ایجاد کننده بو و نیز مشخصات آن ها بدست نمی‌دهد (Ghasemi-Varnamkhasti *et al.*, 2011).

بندتی[3] و همکاران در سال ۲۰۰۸ قابلیت ماشین بویایی تجاری PEN 2 را برای طبقه بندی چهار رقم هلو بررسی کردند و به ارزیابی مراحل رسیدگی آن‌ها در طول دوره عمردهی پرداختند. اول آنکه PCA و LDA روی هلوها با استفاده از پاسخ‌های جمع آوری شده از حسگرها پس از برداشت انجام شد و هر دو روش توانایی تمایز بین ارقام را داشتند. دوم آنکه PCA به کار برده شده روی داده های جمع آوری شده در طول دوره عمردهی از زمان برداشت تا دوره پیری نشان داد که تنها یک حسگر در تفکیک کردن هلوها در طول رسیدگی موثر بوده و هلوها را به نارس، رسیده و بیش از حد رسیده طبقه بندی کرد (Benedetti *et al.*, 2008). از تحقیقات دیگر بر روی میوه‌ها به وسیله ماشین بویایی می‌توان به بررسی رسیدگی آناناس (Torri *et al.*, 2010)، انبه (Zakaria *et al.*, 2012) و گیلاس (Benedetti *et al.*, 2010) اشاره کرد.

لیوبیت و همکاران در سال ۱۹۹۹ ماشین بویایی با چهار حسگر نیمه هادی اکسید فلزی را ارزیابی کردند. عملکرد روش‌های LVQ[4] و BP-MLP[5] و FAM[6] در تعیین مراحل رسیدگی موز مقایسه شد. سامانه مورد استفاده ابتدایی بود و شرایط استاندارد

[1] Machine olfaction

[2] Electronic nose

[3] Benedetti

[4] Back Propagation-trained Multi Layer Perceptron

[5] Learning vector quantization

[6] Fuzzy ARTMAP

رسیدگی موز در انبار را در نظر نگرفته بود. LVQ با دقت ۹۲ درصد موزها را در هفت مرحله رسیدگی طبقه بندی کرد، در حالی که شبکه‌های FAM و BP-MLP با دقت ۹۰ و ۸۳ درصد طبقه بندی را انجام دادند (Llobet *et al.*, 1999).

هدف از این پژوهش بکارگیری سامانه ماشین بویایی به عنوان ابزاری غیر مخرب در آشکار سازی رداثر رسیدگی موز و مقایسه توانایی روش‌های تشخیص الگو مختلف در طبقه بندی مراحل رسیدگی موز می باشد.

مواد و روش ها

در این پژوهش میوه‌های موز از گونه کاوندیش وارداتی از کشور فیلیپین مورد آزمایش قرار گرفت. نمونه‌های موز در دمای ۱۴°C نگهداری و با کشتی به ایران حمل شده و با استفاده از کانتینرهای یخچال‌دار به انبار بهشتی واقع در زیبادشت کرج منتقل می‌شود. در این انبار میوه‌ها در طول چهار روز با استفاده از گاز اتیلن رسانده می‌شوند. در روز اول موزها در دمای ۲۰°C ذخیره می‌شوند. و در روز دوم اتیلن در اتاق تزریق می شود و در روز سوم دما به ۱۸°C رسانده شده و اتیلن از اتاق خارج می‌شود تا روز چهارم دما به مرور کاهش داده شده تا در نهایت به ۱۱°C برسد. موزها قبل از ورود به اتاق‌های رنگ‌آوری در مرحله اول (به طورکامل سبز) و در روز چهارم در مرحله پنجم رسیدگی قرار دارند. کنترل دما، رطوبت نسبی و غلظت گاز اتیلن در اتاق بسیار مهم است. رسیدگی موزها در رطوبت نسبی ۸۵٪ تا ۸۸٪ در چهار روز انجام شد. آزمایشات مربوط به رسیدگی در پنج مرحله تا زمانی که موز در انبار است انجام پذیرفت برای این منظور ۱۵ عدد موز در هر مرحله با شرایط رسیدگی، وزن و اندازه یکسان از اتاق رنگ‌آوری جهت انجام آزمایشات به آزمایشگاه پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران منتقل شد. اجزای اصلی سامانه ماشین بویایی شامل سامانه دریافت نمونه[1]، آرایه حسگرهای گازی، سامانه تحصیل داده[2]، الگوریتم‌های تشخیص الگو و تحلیل داده می‌باشد. سامانه دریافت نمونه شامل یک محفظه نمونه و حسگرها، پمپ، شیرهای برقی، کپسول اکسیژن، منبع تغذیه و جعبه واسطه[3] می‌باشد. سامانه ماشین بویایی طراحی شده مجهز به یک پمپ هوا (HAILEA ACO-5501) با دبی ۱/۳ لیتر بر دقیقه در داخل محفظه‌ی نمونه می‌باشد. این پمپ وظیفه دارد تا بوی نمونه را به آرامی از روی حسگرها عبور دهد. به منظور کنترل خودکار سامانه و گرفتن الگوی بو، ماشین بویایی به سه شیر برقی دو راهه (UNI-DO 2/2) یک چهارم اینچ با تحریک برقی ۱۲ ولت مجهز شد. به منظور تمیز کردن محفظه حسگرها از بوی نمونه قبلی و تصحیح خط مبنا، از هوای تمیز موجود در کپسول اکسیژن استفاده شد. در این سامانه ماشین بویایی، از کارت NI USB-6009 (National Instruments Corporation, USA) استفاده شد، کارت‌های تحصیل داده (DAQ)[4] یک مدار مجتمع برای اخذ و ثبت داده، و با هدف کلی کاربردهای کنترلی می‌باشد. از کارت DAQ جهت

[1] Sampling system

[2] Data acquisition

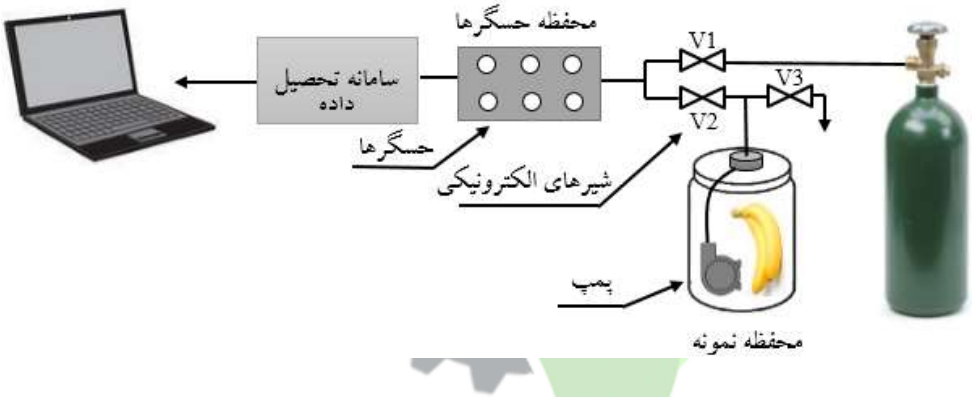
[3] Interface

[4] Data acquisition

جمع‌آوری داده‌ها و تولید سیگنال‌های آنالوگ و دیجیتال استفاده می‌شود. این سامانه بر پایه‌ی حسگرهای نیمه هادی اکسید فلزی (MOS) طراحی و ساخته شده است. شکل ۱ طرحواره سامانه ماشین بویایی طراحی شده را نشان می‌دهد. حسگرهای استفاده شده و کاربردها و محدوده‌های تشخیص آن‌ها در سامانه ماشین بویایی طراحی شده در جدول ۱ نشان داده شده است.

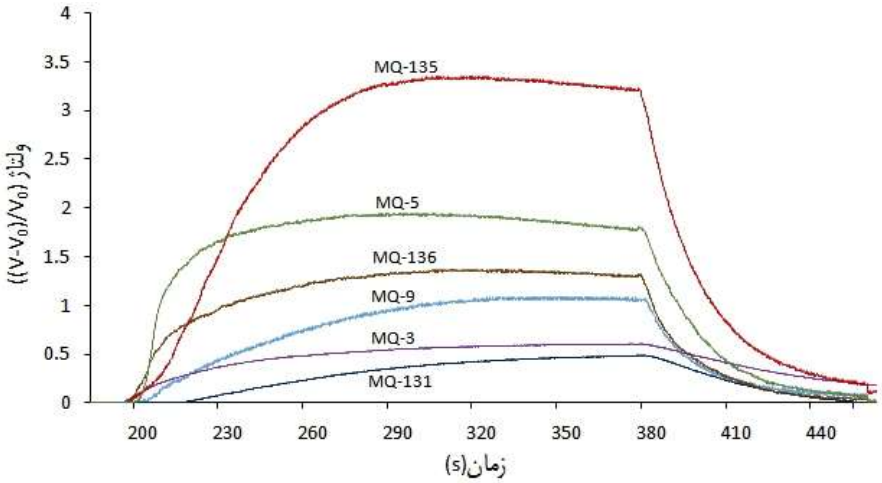
جدول ۱. حسگرهای مورد استفاده در سامانه ماشین بویایی طراحی شده

حسگرها	کاربردهای اصلی	محدوده‌های تشخیص (ppm)
MQ-3	الکل	۰/۰۵–۱۰
MQ-5	گاز مایع، گاز طبیعی، گاز ذغال سنگ	۲۰۰–۱۰۰۰۰
MQ-9	گاز منو اکسید کربن و گازهای قابل احتراق	(کربن منو اکسید) ۲۰–۲۰۰۰ (گاز مایع) ۵۰۰–۱۰۰۰۰ (متان) ۵۰۰–۱۰۰۰۰
MQ-	اوزون	۱۰–۱۰۰۰
MQ-13	کنترل کیفیت هوا	(بنزن، گاز آمونیاک، هیدروژن)۱۰–۱۰۰۰
MQ-136	سولفید هیدروژن	۱–۲۰۰



شکل ۱. سامانه ماشین بویایی ساخته شده

شکل ۲ پاسخ آرایه حسگری در طول اندازه‌گیری نمونه را نشان می‌دهد. داده‌های نشان داده شده مرحله تصحیح خط مبنا را در پیش پردازش اطلاعات گذرانده است که $(V-V_0)/V_0$ تغییرات کسری ولتاژ می‌باشد. V_0 بیان کننده ولتاژ حسگرها در زمان عبور گاز اکسیژن می‌باشد. هر منحنی پاسخ یک حسگر از آرایه بوده که در مرحله تزریق گاز فضای هد موز افزایش در پاسخ حسگرها نشان داده شده است.



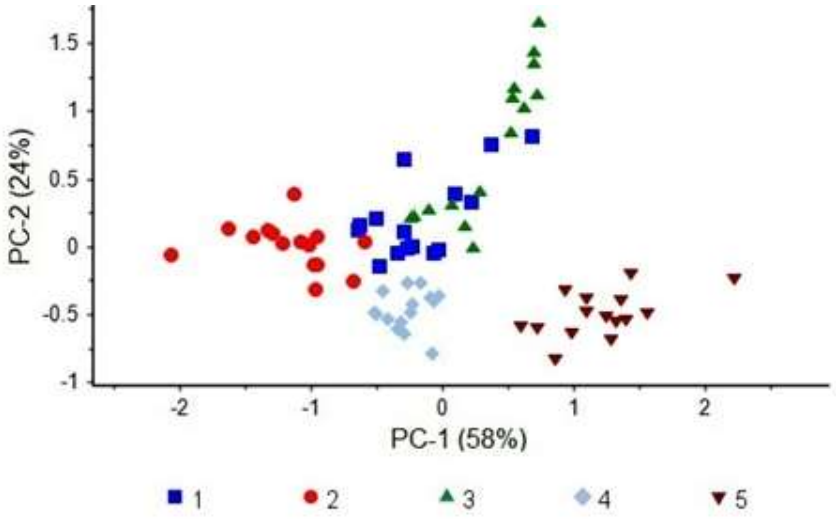
شکل ۲. پاسخ آرایه حسگری

تحلیل مولفه اصلی (PCA) یکی از رایج‌ترین روش‌های کمومتری چند متغیره بدون ناظر است، و روشی شناخته شده در فشرده سازی داده های خطی و استخراج ویژگی‌ها می‌باشد. تحلیل تفکیک خطی (LDA) یک روش طبقه بندی نظارت شده است. در این روش هدف این است که داده‌های مربوط به یک کلاس تا حد امکان در زیر فضای جدید ایجاد شده به هم نزدیک و داده‌های کلاس‌های مختلف از هم دور باشند، به عبارت دیگر پراکندگی بین کلاسی داده‌ها حداکثر و پراکندگی درون کلاسی داده‌ها حداقل شود (Tudu *et al.*, 2012Benedetti *et al.*, 2008 ;).

نتایج و بحث

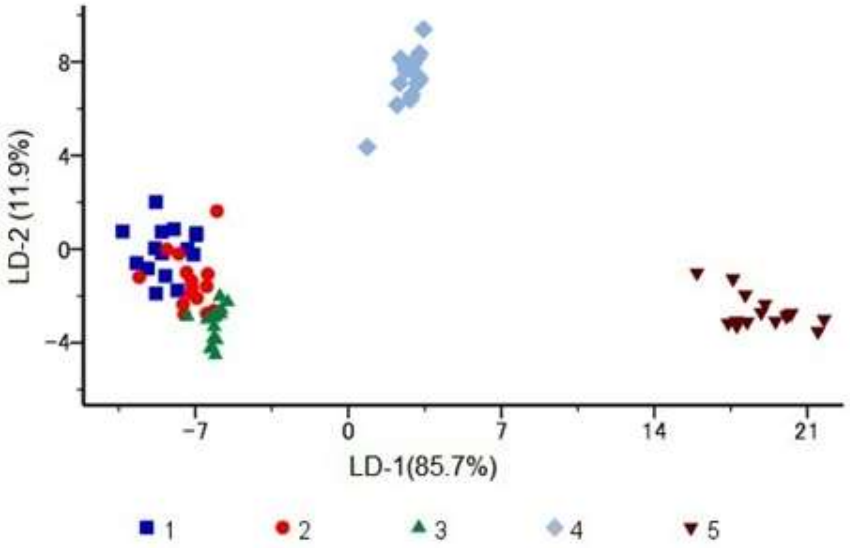
به منظور بررسی توانایی آرایه حسگرهای گازی در تمایز مراحل رسیدگی مختلف، تحلیل PCA و LDA انجام داده شد که نتایج آن در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است. نمودارهای اسکور با توجه به دو مولفه اصلی اول تصویر شده‌اند. دو مولفه اصلی دلالت بر بیشینه مقدار واریانس در داده‌های اصلی را دارد. مولفه‌های در بردارنده بیشترین واریانس در داده بر محور جدیدی توزیع می‌شوند تا نمودار کلاس‌های موز ایجاد شود که به نمودار اسکور خوانده می‌شوند. نمودار اسکور PCA در قالب PC1-PC2 یعنی دو مولفه اصلی اول، ۸۲٪ واریانس را برای دوره رسیدگی در بر می‌گیرد. نمودار اسکور LDA نیز در قالب LD1-LD2 یعنی دو مولفه اصلی اول، ۹۷/۶٪ واریانس را شامل می‌شود. این روش نیز همانند PCA به عنوان یک روش کاهش ویژگی که تعیین کننده صفحه فوقانی با بعد کوچکتر است که روی آن نقاط از بعد بیشتر تصویر می‌شوند. در حالی که PCA مسیری را در نظر می‌گیرد که ساختار بیشینه در داده حفظ شود، LDA جهتی را بر می‌گزیند که بیشینه تمایز میان کلاس‌های مورد نظر حاصل شود (قاسمی ورنامخواستی، ۱۳۹۰).

در نمودار PCA مراحل رسیدگی به خوبی از هم جدا شده اند. مراحل ۱، ۳ و ۴ در وسط شکل ۳ قرار دارند و مقداری هم‌پوشانی بین کلاس‌های مرحله ۱ و مرحله ۳ رسیدگی و همچنین بین کلاس‌های مرحله ۱ و ۲ وجود دارد.



شکل ۳. نمودار PCA مربوط به دوره رسیدگی

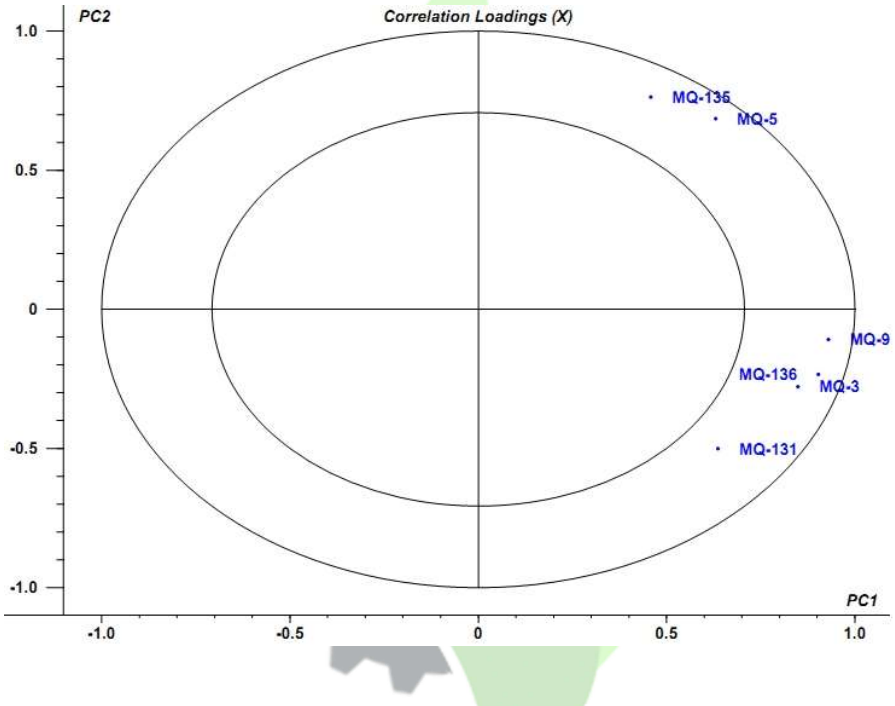
عملکرد روش LDA با استفاده از اعتبارسنجی leave-one-out تخمین زده شد. روش به کار گرفته شده شاخص مناسب و قابل قبولی را برای طبقه‌بندی نمونه‌های موز نشان داد. استفاده از این روش دقت طبقه‌بندی ۹۷/۳٪ را با استفاده از اعتبارسنجی leave-one-out برای دوره رسیدگی حاصل کرد.



شکل ۴. نمودار LDA مربوط به دوره رسیدگی

همان طور که از شکل ۴ مشخص است مرحله ۵ رسیدگی کاملاً از بقیه کلاس‌ها جدا شده است. و مقداری هم‌پوشانی بین مرحله ۱ با مراحل ۲ و ۳ وجود دارد.

حسگرها یا متغیرها نیز می‌توانند در نمودار مشابه‌ای به نام لودینگ[1] با مقادیر ضرایب معادلات مقادیر ویژه تصویر شوند. همان‌طوری که در شکل ۵ دیده می‌شود، نمودار لودینگ نقش نسبی حسگرهای مورد استفاده در سامانه ماشین بویایی برای هر مولفه اصلی را نشان می‌دهد. هر چه مقدار لودینگ حسگری روی یک مولفه اصلی بیشتر باشد یعنی نزدیکی بیشتر به دایره بیرونی، نشان از نقش بیشتر آن حسگرها در تشخیص و تمایز میان دوره رسیدگی موز دارد.



شکل ۵. نمودار لودینگ دوره رسیدگی

اطلاع از مهم‌ترین متغیرها می‌تواند نقش مهمی در مرحله تحلیل داده داشته باشد. چرا که در نظر گرفتن همه متغیرها منجر به بعضی مشکلات مانند فیت کردن[2] زیاد در آنالیز داده می‌شود. همچنین اگر حسگر(ها) تاثیر کمی در فرایند تشخیص داشت می‌توان از آرایه حسگری حذف کرد، زمانی که نیاز است تا هزینه ساخت آرایه حسگری سامانه ماشین بویایی کاهش یابد. همان‌طور که در شکل ۵ مشخص است حسگر MQ-131 در مقایسه با دیگر حسگرها نقش کمتری در تمایز مراحل رسیدگی موز دارد.

[1] Loadings

[2] Over fitting

نتیجه گیری

ماشین بویایی روشی بسیار امیدوار کننده برای تشخیص غیرمخرب رسیده بودن میوه است. این سامانه بر پایه حسگرهای MOS در ترکیب با روش‌های آنالیز تشخیص الگو توانایی آشکارسازی تغییرات رداثر رسیدگی موز را دارد، مراحل رسیدگی موز با استفاده از تحلیل تفکیک خطی (LDA) بهتر از تحلیل مولفه های اصلی (PCA) متمایز شدند. با توجه به نتایج بدست آمده از نمودار لودینگ آرایه حسگری در تشخیص و تمایز دوره رسیدگی از توانایی بالای برخوردار می‌باشد.

منابع

۱- قاسمی‌ورنامخواسنی، م.، (۱۳۹۰). طراحی، توسعه و پیاده سازی سیستم ماشین بویایی و زبان بیوالکتریک بر پایهٔ نیمه هادی های اکسید فلزی به منظور آشکارسازی تغییر کیفیت ماء الشعیر در ترکیب با روش های آنالیز تشخیص الگو. رسالهٔ دکتری. گروه مکانیک ماشین های کشاورزی. دانشگاه تهران. ۱۷۷ صفحه.

2- Balasubramanian, S., S. Panigrahi, C. Logue, H. Gu and M. Marchello. 2009. Neural networks-integrated metal oxide-based artificial olfactory system for meat spoilage identification. Journal of Food Engineering 91: 91-98.

3- Benedetti, S., S. Buratti, A. Spinardi, S. Mannino and I. Mignani. 2008. Electronic nose as a non-destructive tool to characterise peach cultivars and to monitor their ripening stage during shelf-life. Postharvest biology and technology 47: 181-188.

4- Benedetti, S., A. Spinardi, I. Mignani and S. Buratti. 2010. Non-destructive evaluation of sweet cherry (prunus avium l.) ripeness using an electronic nose. Italian journal of food science 22: 298-304.

5- Ghasemi-Varnamkhasti, M., S. S. Mohtasebi, M. Siadat, J. Lozano, H. Ahmadi, S. H. Razavi and A. Dicko. 2011. Aging fingerprint characterization of beer using electronic nose. Sensors and Actuators B: Chemical 159: 51-59.

6- Llobet, E., E. L. Hines, J. W. Gardner and S. Franco. 1999. Non-destructive banana ripeness determination using a neural network-based electronic nose. Measurement Science and Technology 10: 538-548.

7- Peris, M. and L. Escuder-Gilabert. 2009. A 21st century technique for food control: Electronic noses. Analytica Chimica Acta 638: 1-15.

8- Soltani, M. and R. Alimardani and M. Omid. 2011. Evaluating banana ripening status from measuring dielectric properties. Journal of Food Engineering 105: 625-631.

9- Torri, L. and N. Sinelli and S. Limbo. 2010. Shelf life evaluation of fresh-cut pineapple by using an electronic nose. Postharvest biology and technology 56: 239-245.

10- Tudu, B., L. Shaw, A. Jana, N. Bhattacharyya and R. Bandyopadhyay. 2012. Instrumental testing of tea by combining the responses of electronic nose and tongue. Journal of Food Engineering 110: 356-363.

11- Zakaria, A., A. Y. M. Shakaff, M. J. Masnan, F. S. A. Saad, A. H. Adom, M. N. Ahmad, M. N. Jaafar, A. H. Abdullah and L. M. Kamarudin. 2012. Improved maturity and ripeness classifications of magnifera indica cv. harumanis mangoes through sensor fusion of an electronic nose and acoustic sensor. Sensors 12: 6023-6048.

Application of machine olfaction system (electronic nose) as a nondestructive tool in the classification ripening stages of banana

Alireza Sanaeifar[1]* Seyed Saeid Mohtasebi[2] Mahdi Ghasemi-Varnamkhasti[3] and Abdolabbas Jafari[4]

1, 4- PhD Student and Assistant professor, Department of Agricultural Machinery Engineering, Shiraz University, a.sanaei@ut.ac.ir

2- Full professor, Department of Agricultural Machinery Engineering, University of Tehran

3- Assistant professor, Department of Biosystems Engineering, Shahrekord University

Abstract

In this work, potential application of a metal oxide semiconductor based electronic nose (machine olfaction) as a non-destructive instrument for monitoring the change in volatile production of banana during ripening process is studied.The main components are used in an electronic nose system include: sampling system, an array of gas sensors, data acquisition system and an appropriate pattern recognition algorithm. Principal Component Analysis (PCA), Linear Discriminant Analysis (LDA) and Loading Analysis techniques were used for this purpose. Based on the results the classification stages of ripeness accuracy of 97/3% was obtained and sensor MQ-131 has less influence in distinguish among different ripening stages. Results showed high ability of electronic nose for distinguishing between the stages of ripeness. It is concluded that the system can be considered as an nondestructive tool for quality control during banana shelf-life.

Key words: Linear Discriminant Analysis; Principal Component Analysis; Ripeness; Non-destructive; Machine olfaction.