

معرفی و بررسی کاربرد تکنیک تلفیق داده‌ها در حسگرهای مصنوعی جهت ارزیابی کیفیت

محمد قوشچیان^{۱*}

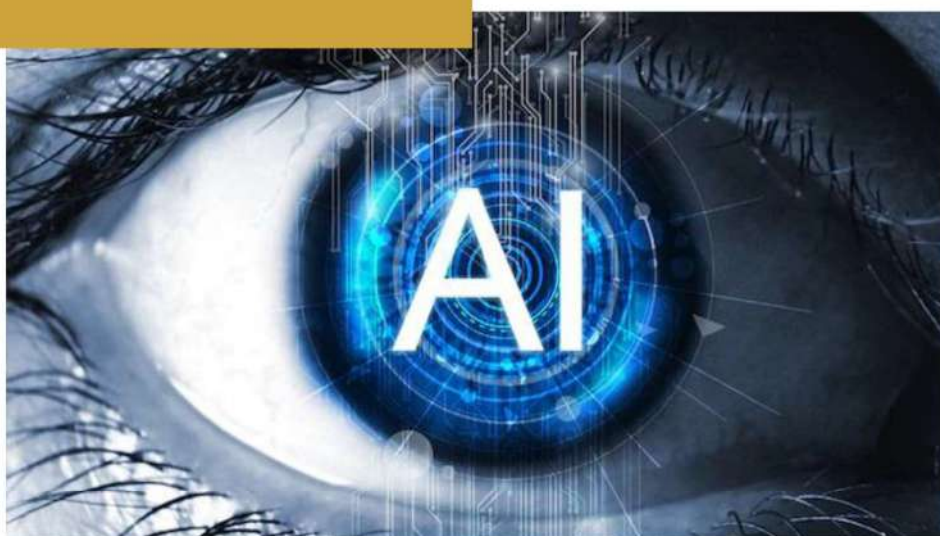
سیل سعید محتسبی^۲

شاهین رفیعی^۲

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی ماشین‌های
کشاورزی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه
تهران

۲- عضو هیأت علمی گروه مهندسی ماشین‌های
کشاورزی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه
تهران

✉ mghoushchian@ut.ac.ir



چکیده

تجزیه و تحلیل غذا با استفاده از حواس انسانی به شدت بر پاسخ‌های ارزیابی به دلیل خطاها و پیچیدگی روش‌های ارزیابی تأثیر گذاشت. از این رو، استفاده از ابزارهایی که قادر به تقلید حواس انسان باشند، رویکرد قابل قبول تری در نظر گرفته می‌شود. در سال‌های اخیر سامانه‌هایی که به نام‌های بینی الکترونیکی، زبان الکترونیکی و چشم الکترونیکی شناخته می‌شوند، برای مطالعه در محل با دست کاری کم یا بدون دست کاری نمونه ساخته شده‌اند. هدف نهایی می‌تواند ارزیابی پارامترهای کیفی کلی مانند ویژگی‌های حسی باشد که با «بو»، «طعم» و «رنگ» نمونه تحت بررسی یا در تشخیص کمی آنالیت‌ها باشد. به همان روشی که مغز انسان اطلاعات حاصل از حواس چندگانه را ترکیب می‌کند تا به دانش دقیق تری در مورد یک شی معین دست یابد، با استفاده از تکنیک‌های مناسب ادغام داده‌ها، ترکیب داده‌های جمع‌آوری شده از حسگرهای مصنوعی می‌تواند اطلاعات دقیق تری در مورد نمونه نسبت به هر یک از سامانه‌های حسگر مستقل ارائه دهد. در این پژوهش، استراتژی‌های مختلف تلفیق داده‌های اعمال شده در توسعه سامانه‌های ترکیبی بینی الکترونیکی، زبان الکترونیکی و چشم الکترونیکی برای ارزیابی کیفیت مواد غذایی معرفی و بررسی شده است.

کلمات کلیدی: حسگرهای مصنوعی، ماشین بویایی، ماشین بینایی، ماشین چشایی



مقدمه

علاقه روزافزون مصرف‌کنندگان و تولیدکنندگان به ویژگی‌های کیفی محصولات غذایی، مستلزم توسعه سامانه‌های تحلیلی کارآمد برای نظارت بر کیفیت محصول نهایی است.

در این زمینه، استفاده از سامانه‌های حسگر مصنوعی که امکان به حداقل رساندن دست‌کاری نمونه را فراهم می‌کنند، مانند بین‌های الکترونیکی، زبان‌های الکترونیکی و چشم‌های الکترونیکی می‌تواند یک راه حل سودمند برای تعیین آنالیت‌های خاص یا تخمین کیفیت کلی ارائه‌شده توسط "بو"، "طعم" و "رنگ" نمونه مورد تجزیه و تحلیل باشد. اساساً، بین‌های الکترونیکی و زبان‌های الکترونیکی سامانه‌های حسگر غیراختصاصی هستند که به ترتیب قادر به تعامل با ترکیبات فرار و آنالیت‌های پراکنده در محلول هستند. به همین دلیل، سامانه‌های بین‌های الکترونیکی و زبان‌های الکترونیکی به نوعی با حس بویایی و چشایی انسان مرتبط هستند. برعکس، چشم‌های الکترونیکی برای تجزیه و تحلیل ویژگی‌های مربوط به رنگ و جنبه یک نمونه که توسط چشم انسان تشخیص داده می‌شود، طراحی شده است و معمولاً بر اساس بینایی کامپیوتری، رنگ سنجی یا اسپکتروفتومتری است.

همان‌طور که مغز انسان اطلاعات حاصل از حواس چندگانه را به منظور دستیابی به دانش دقیق‌تری در مورد یک شیء معین ترکیب می‌کند، ترکیب مجموعه داده‌های حاصل از حسگرهای مصنوعی مختلف می‌تواند اطلاعات جامعی را در مورد نمونه ارائه دهد که نمی‌توان آن را با تجزیه و تحلیل بلوک داده‌ها به‌طور جداگانه از یکدیگر به دست آورد.

بنابراین، تکنیک‌های تلفیق داده‌ها امروزه به‌طور مکرر در شیمی سنجی مورد استفاده قرار می‌گیرند و چندین مثال در مورد ترکیب تکنیک‌های تحلیلی مختلف در تحقیقات گزارش شده است.

در زمینه حسگرهای مصنوعی، استفاده از سامانه‌های سنجش ترکیبی بین‌الکترونیکی و زبان الکترونیکی اغلب مورد استفاده قرار گرفته است، درحالی‌که استفاده از سامانه‌های ترکیبی از جمله یک سامانه سنجش چشم الکترونیکی کمتر رایج است.

با حرکت به سمت چشم الکترونیکی، روش‌های سنتی مورد استفاده برای تعیین عینی خواص رنگ غذا شامل استفاده از رنگ‌سنج‌ها و اسپکتروفتومترها است، درحالی‌که در سال‌های اخیر، استفاده از سامانه‌های بینایی کامپیوتری مبتنی بر دوربین‌های قرمز-سبز-آبی (RGB) به سرعت ظهور کرده است.

ارزیابی حسی کلی غذا را می‌توان به صورت تحلیلی با استفاده از روش‌ها و تکنیک‌های حسی مورد مطالعه قرار داد. روش‌های عینی برای ارزیابی کیفیت شامل تجزیه و تحلیل ابزاری است، اما برای استفاده عملی برای صنایع غذایی، روش‌های ابزاری باید مقرون به صرفه باشند و نتایج سریع و قابل تکرار ارائه دهند. در این زمینه، استفاده از سامانه‌های حسگر، مانند بین‌های الکترونیکی، زبان‌های الکترونیکی و چشم‌های الکترونیکی می‌تواند سودمند باشد. هدف نهایی ممکن است شامل تخمین پارامترهای کلی کیفیت، همچنین مربوط به ویژگی‌های حسی باشد که توسط «بو»، «طعم» و «رنگ» نمونه تجزیه و تحلیل شده یا در تعیین کمی آنالیت‌ها ارائه می‌شود.

بین‌الکترونیکی برای تشخیص و تمایز بین بوهای پیچیده اجزای معطر یک نمونه غذا طراحی شده است. این شامل طیف گسترده‌ای از حسگرهای گاز ناهمگن با ویژگی جزئی و یک سامانه تشخیص الگو است (تان و زو، ۲۰۲۰). کاربرد گسترده بین‌الکترونیک به پیشرفت در حسگرها، بهبود مواد، نرم افزارهای نوآورانه و پیشرفت در طراحی‌ها، مدارها و سامانه‌ها کمک کرده است (Rodríguez-Mandez et al., 2016). در حال حاضر، بین‌الکترونیکی به‌طور گسترده در صنایع مختلف از جمله مواد غذایی، دارویی و سایر زمینه‌های تحقیقاتی علمی استفاده می‌شود (Yakubu et al., 2021).

برای تجزیه و تحلیل کیفیت گوشت، ماهی، پیتزا، پنیر، نان و غلات استفاده شده است (کویاما و همکاران، ۲۰۲۱).

قابلیت‌های عالی این حواس مصنوعی برای شناسایی، تشخیص و تمایز ترکیب‌های پیچیده مواد شیمیایی منجر به توسعه مشابه‌های الکترونیکی سامانه‌های بیولوژیکی شده است (Amoli et al., 2019). این ابزارها برای ارزیابی کیفیت، مطالعات ماندگاری و ارزیابی حسی محصولات غذایی مختلف به صورت جداگانه موفق هستند. با این حال، فن تلفیقی که مبتنی بر ترکیبی از حواس مصنوعی به همراه سایر ابزارهای تحلیلی است، می‌تواند یک ابزار تحلیلی قدرتمند و عینی را تشکیل دهد که قادر به عملکرد بهتر از حواس مصنوعی به صورت مجزا است (دی روزا و همکاران، ۲۰۱۸).

تکنیک تلفیق داده‌ها

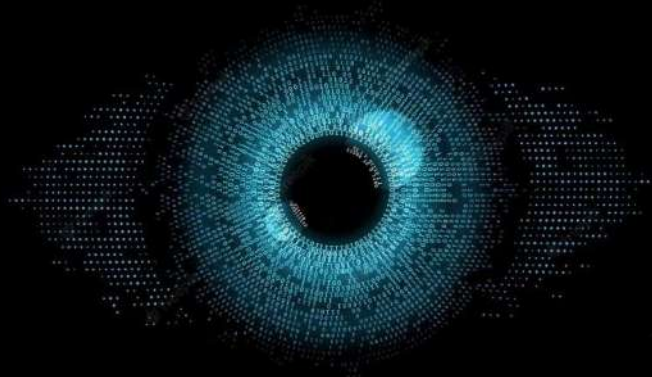
روش‌های ترکیب داده‌ها به روش‌های مختلفی طبقه‌بندی می‌شوند، با توجه به حوزه کاربردی که در آن درگیر هستند. در شیمی سنتزی، به طور کلی از سه سطح اصلی برای توصیف استراتژی‌های تلفیق داده‌ها استفاده می‌شود:

- ادغام داده‌های سطح پایین، که شامل پیوستن مستقیم داده‌ها از منابع مختلف است.
 - ادغام داده‌های سطح متوسط، که رویکردی است برای ادغام ویژگی‌های انتخاب شده یا استخراج شده از هر مجموعه داده جداگانه با استفاده از تکنیک‌های تجزیه و تحلیل داده مناسب.
 - ادغام داده‌های سطح بالا، که در آن هر بلوک داده به طور مستقل تجزیه و تحلیل می‌شود و سپس خروجی های مدل‌های مختلف برای تولید پاسخ نهایی ترکیب می‌شوند.
- هنگام استفاده از بینی الکترونیکی، زبان الکترونیکی و چشم الکترونیکی، رویکردی که در تعیین پارامترهای

زبان الکترونیکی که به عنوان زبان مصنوعی یا حسگر طعم نیز شناخته می‌شود، می‌تواند به عنوان یک ابزار تحلیلی که برای طبقه‌بندی طعم‌های مختلف مواد شیمیایی مختلف در یک نمونه مایع استفاده می‌شود، تعریف شود (Jain et al., 2010). معمولاً در تشخیص پزشکی، تجزیه و تحلیل میکروبی، پایش محیطی و فناوری مواد غذایی استفاده می‌شود (تان و زو، ۲۰۲۰). زبان الکترونیکی دارای مزایای اندازه‌گیری مواد سمی، انجام تجزیه و تحلیل عینی و عدم خستگی تشخیص است (جیانگ و همکاران، ۲۰۱۸).

چشم الکترونیکی را می‌توان با سامانه‌ای به نام تحلیل تصویر کامپیوتری یا بینایی کامپیوتری توضیح داد. بینایی کامپیوتری با ایجاد زمینه‌های نظری و الگوریتم‌هایی برای استخراج و تجزیه و تحلیل اطلاعات مفید در مورد یک شی، بینایی انسان را تقلید می‌کند (Hong et al., 2014). این روش با بازرسی بصری ویژگی‌های کیفی محصولات غذایی با گرفتن، پردازش و تجزیه و تحلیل تصاویر همراه است. با توجه به مقرون به صرفه بودن، سرعت، دقت و قوام برتر، چشم الکترونیکی با موفقیت





ترکیب داده‌های سطح پایین

ادغام داده‌های سطح پایین ساده‌ترین راه را برای تجزیه و تحلیل مشترک بلوک‌های داده‌های متعدد از سنسورهای تحلیلی مختلف نشان می‌دهد. در ادغام داده‌های سطح پایین، متغیرهای به دست آمده از حسگرهای مختلف به سادگی به صورت ردیفی باهم ادغام می‌شوند و ماتریس داده به دست آمده به اندازه تعداد نمونه‌های تجزیه و تحلیل شده دارای سطر و به اندازه مجموع تعداد متغیرهای هر بلوک داده ستون دارد. سپس، این ماتریس داده ادغام شده را می‌توان برای ساخت مدل‌های کالیبراسیون چند متغیره یا طبقه‌بندی استفاده کرد. یکی از جنبه‌های کلیدی ادغام داده‌های سطح پایین، پیش‌پردازش است که به طور کلی در دو مرحله بعدی انجام می‌شود: اول، هر بلوک داده به طور جداگانه پیش‌پردازش می‌شود، و سپس روش‌های مقیاس‌بندی برای الحاق مناسب بلوک‌های داده مختلف ضروری است. در مرحله اول، هر بلوک سیگنال به منظور کاهش اثر نویز یا تغییرات سامانمند غیر اطلاعاتی به طور جداگانه پیش‌پردازش می‌شود. با توجه به ماهیت سیگنال‌های به دست آمده و نمونه‌های تجزیه و تحلیل شده، روش‌های پیش‌پردازش مختلفی را می‌توان اعمال کرد، به عنوان مثال می‌توان از هموارسازی ساویتسکی - گولای برای تصحیح سیگنال‌های پر اغتشاش استفاده کرد.

مورد علاقه دنبال می‌شود، مبتنی بر تکنیک‌های "تجزیه و تحلیل کور" است که سیگنال‌های اندازه‌گیری شده با روش‌های شیمی‌سنجی تجزیه و تحلیل می‌شوند، که نیازی به هیچ فرضی در مورد گونه‌هایی که یک الگو نسبت داده شده است وجود ندارد. در واقع، با استفاده از این نوع رویکرد، برای به دست آوردن نتایج منسجم و مفید، نیازی به اختصاص جزئیات واحد پاسخ نیست.

ترکیب داده‌های به دست آمده توسط بین‌های الکترونیکی، زبان‌های الکترونیکی و چشم‌های الکترونیکی از طریق تکنیک‌های مناسب ترکیب داده‌ها، می‌تواند اطلاعات دقیق‌تری را در مورد یک نمونه نسبت به هر یک از دستگاه‌های حسگر منفرد ارائه دهد. به همان روشی که مغز انسان اطلاعات حاصل از حواس چندگانه را ترکیب می‌کند تا به دانش دقیق‌تری در مورد یک شی معین دست یابد. تکنیک‌های تلفیق داده‌ها به روش‌های مختلفی طبقه‌بندی می‌شوند، با توجه به حوزه کاربردی که در آن دخالت دارند، و امروزه اغلب در شیمی سنجی زمانی که ترکیبی از تکنیک‌های تحلیلی مختلف استفاده می‌شود، استفاده می‌شوند. در زمینه حسگرهای مصنوعی، اغلب در مورد سامانه‌های سنجش ترکیبی بین‌های الکترونیکی و زبان‌های الکترونیکی مورد استفاده قرار می‌گیرند، در حالی که استفاده از سامانه‌های ترکیبی از جمله یک سامانه سنجش چشم‌های الکترونیکی کمتر رایج است.

اصلی دسته‌بندی کرد: روش‌های فیلتر، روش‌های پوششی و روش‌های تعبیه‌شده.

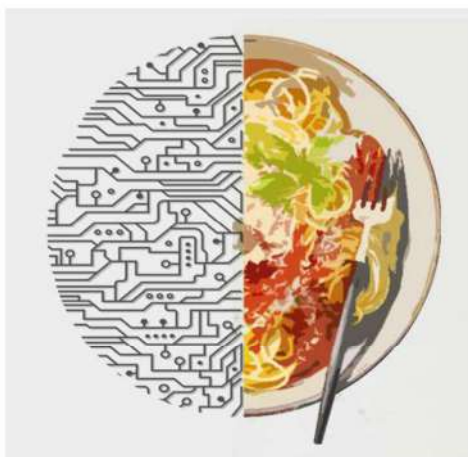
ترکیب داده‌های سطح بالا

برعکس استراتژی‌های سطح پایین و سطح متوسط، در ترکیب داده‌های سطح بالا، اطلاعات مربوط به حسگرهای مختلف در سطح تصمیم‌گیری ترکیب می‌شوند و این نوع رویکرد عمدتاً برای اهداف طبقه‌بندی استفاده می‌شود. با جزئیات بیشتر، مدل‌های مجزا به‌طور مستقل برای هر بلوک سیگنال محاسبه می‌شوند و پیش‌بینی‌های به‌دست‌آمده از مدل‌های مجزا برای تصمیم‌گیری نهایی به یکدیگر متصل می‌شوند. استراتژی‌های مختلفی را می‌توان برای ترکیب پیش‌بینی‌های حاصل از مدل‌های واحد برای به دست آوردن خروجی نهایی می‌توان به کار برد. چالش اصلی در تلفیق داده‌های سطح بالا شامل شناسایی مدل طبقه‌بندی بهینه برای هر بلوک است به‌طوری‌که ترکیب خروجی‌ها بهتر از مدل‌های منفرد عمل می‌کند.

با توجه به مرحله دوم، روش‌های مقیاس بندی یا وزن دهی کافی برای در نظر گرفتن ابعاد مختلف بلوک‌های داده ضروری است. درواقع، زمانی که بلوک‌های داده دارای تعداد بسیار متفاوتی از متغیرها هستند؛ نتایج تجزیه و تحلیل در صورتی که روش‌های مقیاس‌بندی مناسب انجام نشوند به شدت تحت تأثیر بزرگ‌ترین بلوک قرار می‌گیرد. برای حل این مشکل، رایج‌ترین روش پیش‌پردازش که برای داده‌های ادغام‌شده سطح پایین اعمال می‌شود، مقیاس‌بندی بلوک است که شامل مقیاس‌بندی هر بلوک داده بر اساس انحراف استاندارد کلی آن است. به این ترتیب، با حفظ وزن نسبی متغیرها در هر بلوک، محاسبه بعدی مدل‌های چند متغیره تحت تأثیر بلوک‌های داده مختلف با وزن برابر قرار می‌گیرد. ادغام داده‌های سطح پایین دارای مزیت اصلی این است که امکان تفسیر مستقیم نتایج را از نظر سهم متغیرهای اصلی فراهم می‌کند و همبستگی بین متغیرهای متعلق به بلوک‌های مختلف نیز به راحتی قابل بررسی است ولی از سوی دیگر، محتوای نوین بلوک‌های مختلف داده اضافه می‌شود.

ترکیب داده‌های سطح متوسط

در ادغام داده‌های سطح متوسط (ادغام داده‌های سطح ویژگی)، سیگنال‌های اصلی به‌طور جداگانه برای استخراج یا انتخاب ویژگی‌های مربوطه تجزیه و تحلیل می‌شوند، و سپس این ویژگی‌ها برای به دست آوردن مجموعه داده‌های تلفیق‌شده به هم متصل می‌شوند. دو رویکرد را می‌توان برای به دست آوردن ویژگی‌های موردعلاقه از سیگنال‌های اصلی اتخاذ کرد. اول انتخاب متغیر و دوم استخراج ویژگی است. رویکرد انتخاب متغیر شامل انتخاب مرتبط‌ترین متغیرها از هر بلوک داده با استفاده از الگوریتم‌های انتخاب متغیر است که به‌طور خودکار متغیرهای مفید را شناسایی می‌کند و بر اساس پیش‌بینی‌های مدل، متغیرهای غیر اطلاعاتی را کنار می‌گذارد. روش‌های انتخاب متغیر را می‌توان به سه دسته



نتیجه‌گیری

بینی الکترونیکی، زبان الکترونیکی و سامانه‌ی بینایی کامپیوتری سه سامانه تحلیلی هستند که به‌طور جداگانه در صنایع غذایی و دارویی به‌عنوان روش‌های تعیین کیفیت مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این سه سامانه‌ی غیر مخرب، سریع، سازگار و اقتصادی هستند. ادغام آن‌ها می‌تواند یک ابزار بازرسی قدرتمند و عینی را تشکیل دهد که می‌تواند از تکنیک‌های منفرد بهتر عمل کند. تکنیک ارزیابی ترکیبی دارای کاربردهای متنوعی است که جایگزین سامانه‌ای می‌شود که ممکن است به‌صورت جداگانه عملکرد کافی برای استفاده‌های خاص نداشته باشد. روش‌های جدید ترکیب حواس مصنوعی می‌توانند به‌سرعت به نتایج دقیق در مقایسه با حسگرهای فردی دست یابند. استفاده از روش‌های تحلیل چند متنیره، همراه با حواس عینی، بسیار قدرتمند بود. در سال‌های اخیر، تحقیقات زیادی برای توسعه چندین استراتژی تلفیق داده‌ها، با ترکیب خروجی منابع ابزاری متعدد برای بهبود کیفیت غذا انجام شده است. سامانه‌های حسگر مصنوعی بینی الکترونیکی، زبان الکترونیکی و چشم الکترونیکی به‌عنوان ابزارهای تحلیلی در صنایع غذایی برای ارزیابی کیفیت غذا در حال افزایش ارتباط هستند. درواقع، حسگرهای مصنوعی می‌توانند اطلاعات مربوط به ویژگی‌های حسی و شیمیایی ماتریس غذایی تجزیه‌شده را ارائه دهند، که به حداقل رساندن نیاز به ارزیابی‌های حسی انجام‌شده توسط گروه‌های متخصص انسانی آموزش‌دیده یا تعیین‌های شیمیایی با استفاده از دستگاه‌های تحلیلی پیچیده امکان‌پذیر می‌شود. علاوه بر این، حسگرهای مصنوعی در مقایسه با روش‌های سنتی دارای مزایای زیادی هستند، ازجمله امکان آنالیز تعداد زیادی نمونه در زمان کوتاه و با مقادیر معرف محدود و در نتیجه صرفه‌جویی اقتصادی مربوطه می‌شود. با توانایی تقلید حواس انسان، تکنیک‌های بینی الکترونیکی، زبان الکترونیکی و چشم الکترونیکی و تلفیق آن‌ها می‌توانند بر پیامدهای تحلیل حسی ذهنی غلبه کنند. در این بررسی به تشریح نحوه کار و ساخت این ابزارها پرداخته شده است و کاربردهای مختلف این دستگاه‌ها در صنایع غذایی مورد بحث قرار گرفته است. تلفیق داده‌ها، ابزار تحلیلی سیستمی را با اطلاعات جامع و تکمیلی در مورد مواد غذایی ارائه می‌دهد که عملکرد هر ابزار را در صورت استفاده به‌صورت جداگانه افزایش می‌دهد. از این رو، می‌توان نتیجه گرفت که رشد و تحقیقات آینده‌نگر در این زمینه امکان درک بهتر این دستگاه‌ها را فراهم می‌کند که منجر به افزایش پیاده‌سازی در صنایع غذایی می‌شود.

منابع

- A. Loutfi, S. Coradeschi, G.K. Mani, P. Shankar, J.B.B. Rayappan, *Electronic noses for food quality: A review*, *J. Food Eng.*, 144 (2015) 103-111.
- Borràs, E.; Ferré, J.; Boqué, R.; Mestres, M.; Aceña, L.; Busto, O. *Data Fusion Methodologies for Food and Beverage Authentication and Quality Assessment—A Review*. *Anal. Chim. Acta* 2015, 891, 1–14.
- D. Wu, D.W. Sun, *Colour measurements by computer vision for food quality control – A review*, *Trends Food Sci. Tech.*, 29 (1) (2013) 5-20.
- E. Borràs, J. Ferré, R. Boqué, M. Mestres, L. Aceña, *Data fusion methodologies for food and beverage authentication and quality assessment - A review*, *Anal. Chim. Acta*, 891 (2015) 1-14.
- Escuder-Gilabert, L.; Peris, M. *Review: Highlights in Recent Applications of Electronic Tongues in Food Analysis*. *Anal. Chim. Acta* 2010, 665, 15–25.
- J. Gutiérrez, M.C. Horrillo, *Advances in artificial olfaction: Sensors and applications*, *Talanta*, 124 (2014) 95-105.
- L. Escuder-Gilabert, M. Peris, *Review: Highlights in recent applications of electronic tongues in food analysis*, *Anal. Chim. Acta*, 665 (1) (2010) 15-25.
- P. Jackman, D.W. Sun, *Recent advances in image processing using image texture features for food quality assessment*, *Trends Food Sci Technol.*, 29 (1) (2013) 35-43.