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

محمد قوشچیان[1*]
سیدسعید محتسبی[2]
شاهین رفیعی[2]

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران
۲- عضو هیأت علمی گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران

mghoushchian@ut.ac.ir

SCAN ME

چکیده

تجزیه‌وتحلیل غذا با استفاده از حواس انسانی به‌شدت بر پاسخ‌های ارزیابی به دلیل خطاها و پیچیدگی روش‌های ارزیابی تأثیر گذاشت. ازاین‌رو، استفاده از ابزارهایی که قادر به تقلید حواس انسان باشند، رویکرد قابل‌قبول‌تری 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 دست‌کاری کم یا بدون دست‌کاری نمونه ساخته‌شده‌اند. 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 دقیق‌تری در مورد یک شی معین دست یابد، با استفاده از تکنیک‌های مناسب ادغام داده‌ها، ترکیب داده‌های جمع‌آوری‌شده از حسگرهای مصنوعی می‌تواند اطلاعات دقیق‌تری در مورد نمونه نسبت به هر یک از سامانه‌های حسگر مستقل ارائه دهد. در این پژوهش، استراتژی‌های مختلف تلفیق داده‌های اعمال‌شده در توسعه سامانه‌های ترکیبی بینی الکترونیکی، زبان الکترونیکی و چشم الکترونیکی برای ارزیابی کیفیت مواد غذایی معرفی و بررسی‌شده 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 بینی‌های الکترونیکی، زبان‌های الکترونیکی و چشم‌های الکترونیکی می‌تواند یک‌راه حل سودمند برای تعیین آنالیت های خاص یا تخمین کیفیت کلی ارائه‌شده توسط "بو"، "طعم" و "رنگ" نمونه مورد تجزیه‌وتحلیل باشد. اساساً، بینی‌های 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 بینی‌های الکترونیکی و زبان‌های الکترونیکی به‌نوعی با حس بویایی و چشایی انسان مرتبط هستند. برعکس، چشم‌های الکترونیکی برای تجزیه‌وتحلیل ویژگی‌های مربوط به رنگ و جنبه یک نمونه که توسط چشم انسان تشخیص داده می‌شود، طراحی‌شده است و معمولاً بر اساس بینایی کامپیوتری، رنگ سنجی یا اسپکتروفتومتری است.

همان‌طور که مغز انسان اطلاعات حاصل از حواس چندگانه را به‌منظور دستیابی به دانش دقیق‌تری در مورد یک شی 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 تجزیه‌وتحلیل بلوک داده‌ها به‌طور جداگانه از یکدیگر به دست آورد.

بنابراین، تکنیک‌های تلفیق داده‌ها امروزه به‌طور مکرر در شیمی‌سنجی مورداستفاده قرار می‌گیرند و چندین مثال در مورد ترکیب تکنیک‌های تحلیلی مختلف در تحقیقات گزارش‌شده است.

در زمینه حسگرهای مصنوعی، استفاده از سامانه‌های سنجش ترکیبی بینی‌الکترونیکی و زبان الکترونیکی اغلب مورداستفاده قرارگرفته است، درحالی‌که استفاده از سامانه‌های ترکیبی ازجمله یک سامانه سنجش چشم الکترونیکی کمتر رایج است.

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

ارزیابی حسی کلی غذا را می‌توان به‌صورت تحلیلی با استفاده از روش‌ها و تکنیک‌های حسی موردمطالعه قرار داد. روش‌های عینی برای ارزیابی کیفیت شامل تجزیه‌وتحلیل ابزاری است، اما برای استفاده عملی برای صنایع غذایی، روش‌های ابزاری باید مقرون‌به‌صرفه باشند و نتایج سریع و قابل تکرار ارائه دهند. در این زمینه، استفاده از سامانه‌های حسگر، مانند بینی‌های 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 تجزیه‌وتحلیل‌شده یا در تعیین کمی آنالیت‌ها ارائه می شود.

بینی الکترونیکی برای تشخیص و تمایز بین بوهای پیچیده اجزای معطر یک نمونه غذا طراحی‌شده است. این شامل طیف گسترده‌ای از حسگرهای گاز ناهمگن با ویژگی جزئی و یک سامانه تشخیص الگو است (تان و زو، ۲۰۲۰). کاربرد گسترده بینی الکترونیک 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، بینی الکترونیکی به‌طور گسترده در صنایع مختلف ازجمله مواد غذایی، دارویی و سایر زمینه‌های تحقیقاتی علمی استفاده می‌شود (Yakubu et al., 2021).

زبان الکترونیکی که به‌عنوان زبان مصنوعی یا حسگر طعم نیز شناخته می‌شود، می‌تواند به‌عنوان 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، تجزیه‌وتحلیل میکروبی، پایش محیطی و فناوری مواد غذایی استفاده می‌شود (تان و زو، ۲۰۲۰). زبان الکترونیکی دارای مزایای اندازه‌گیری مواد سمی، انجام تجزیه‌وتحلیل 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 تجزیه‌وتحلیل 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 تجزیه‌وتحلیل تصاویر همراه است. با توجه به مقرون‌به‌صرفه بودن، سرعت، دقت و قوام برتر، چشم الکترونیکی با موفقیت برای تجزیه‌وتحلیل کیفیت گوشت، ماهی، پیتزا، پنیر، نان و غلات استفاده‌شده 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 به‌صورت جداگانه موفق هستند. بااین‌حال، 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 به‌صورت مجزا است (دی روزا و همکاران، ۲۰۱۸).

تکنیک تلفیق داده‌ها

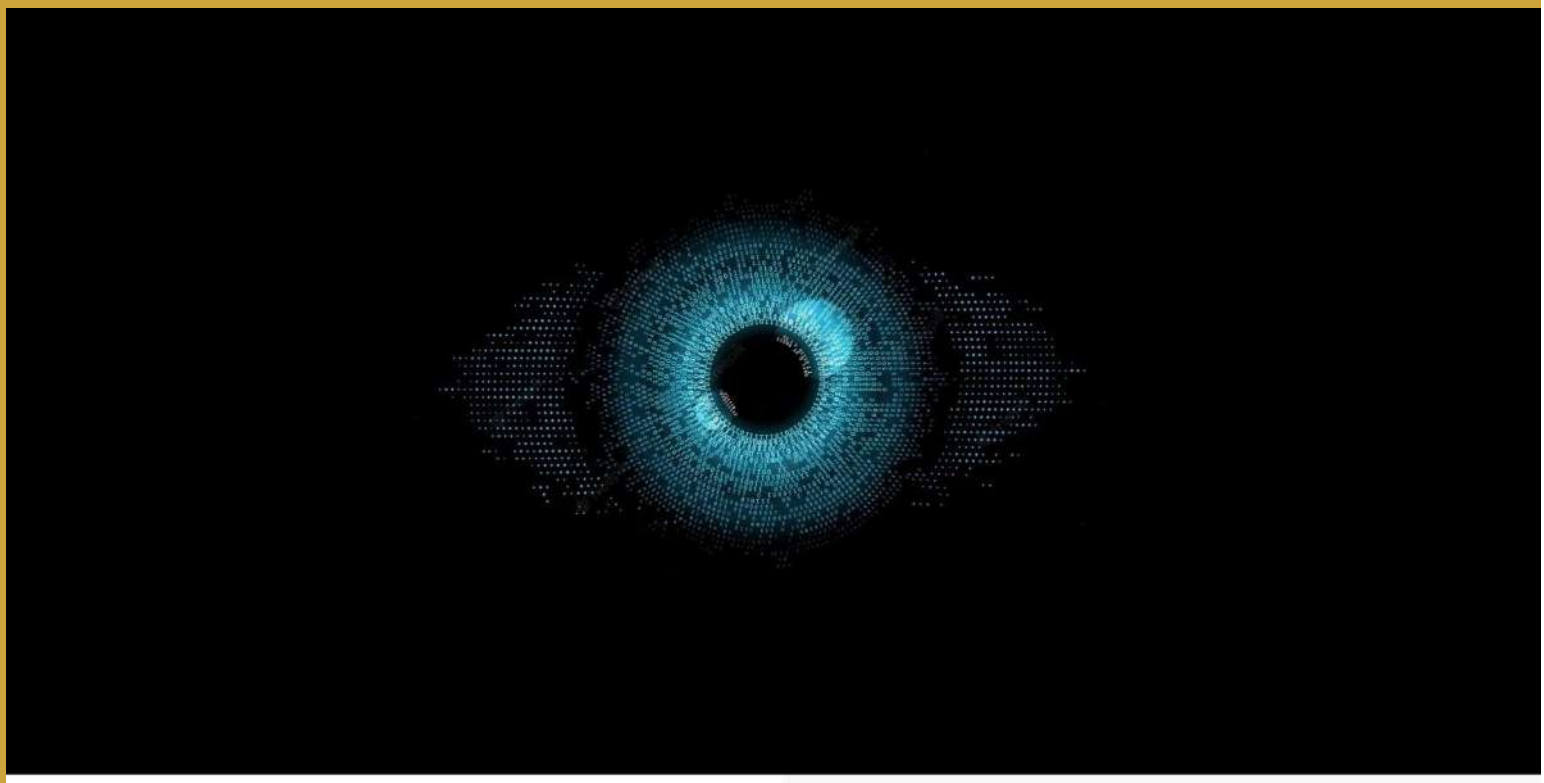
روش‌های ترکیب داده‌ها به روش‌های مختلفی طبقه‌بندی می‌شوند، با توجه به حوزه کاربردی که در آن درگیر هستند. در شیمی سنجی، به‌طورکلی از سه سطح اصلی برای توصیف استراتژی‌های تلفیق داده‌ها استفاده می‌شود:

– ادغام داده‌های سطح پایین، که شامل پیوستن مستقیم داده‌ها از منابع مختلف است.

– ادغام داده‌های سطح متوسط، که رویکردی است برای ادغام ویژگی‌های انتخاب‌شده یا استخراج‌شده از هر مجموعه داده جداگانه با استفاده از تکنیک‌های تجزیه‌وتحلیل داده مناسب.

– ادغام داده‌های سطح بالا، که در آن هر بلوک داده به‌طور مستقل تجزیه‌وتحلیل 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



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

ترکیب داده‌های به‌دست‌آمده توسط بینی‌های 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. درزمینهٔ حسگرهای مصنوعی، اغلب در مورد سامانه‌های سنجش ترکیبی بینی‌های الکترونیکی و زبان‌های الکترونیکی مورداستفاده قرار می‌گیرند، درحالی‌که استفاده از سامانه های ترکیبی ازجمله یک سامانه سنجش چشم‌های الکترونیکی کمتر رایج است..

ترکیب داده‌های سطح پایین

ادغام داده‌های سطح پایین ساده‌ترین راه را برای تجزیه‌وتحلیل مشترک بلوک‌های داده‌های متعدد از سنسورهای تحلیلی مختلف نشان می‌دهد. در ادغام داده‌های سطح پایین، متغیرهای به‌دست‌آمده از حسگرهای مختلف به‌سادگی به‌صورت ردیفی باهم ادغام می‌شوند و ماتریس داده به‌دست‌آمده به‌اندازه تعداد نمونه‌های تجزیه‌وتحلیل شده دارای سطر و به‌اندازه مجموع تعداد متغیرهای هر بلوک داده ستون دارد. سپس، این ماتریس داده ادغام‌شده را می‌توان برای ساخت مدل‌های کالیبراسیون چند متغیره یا طبقه‌بندی استفاده کرد. یکی از جنبه‌های کلیدی ادغام داده‌های سطح پایین، پیش‌پردازش است که به‌طورکلی در دو مرحله بعدی انجام می‌شود: اول، هر بلوک داده به‌طور جداگانه پیش‌پردازش می‌شود، و سپس روش‌های مقیاس‌بندی برای الحاق مناسب بلوک‌های داده مختلف ضروری است. در مرحله اول، هر بلوک سیگنال به‌منظور کاهش اثر نویز یا تغییرات سامانمند غیر اطلاعاتی به‌طور جداگانه پیش‌پردازش می‌شود. با توجه به ماهیت سیگنال‌های به‌دست‌آمده و نمونه‌های تجزیه‌وتحلیل‌شده، روش‌های پیش‌پردازش مختلفی را می‌توان اعمال کرد، به‌عنوان‌مثال می‌توان از هموارسازی ساویتسکی – گولای برای تصحیح سیگنال‌های پر اغتشاش استفاده کرد.

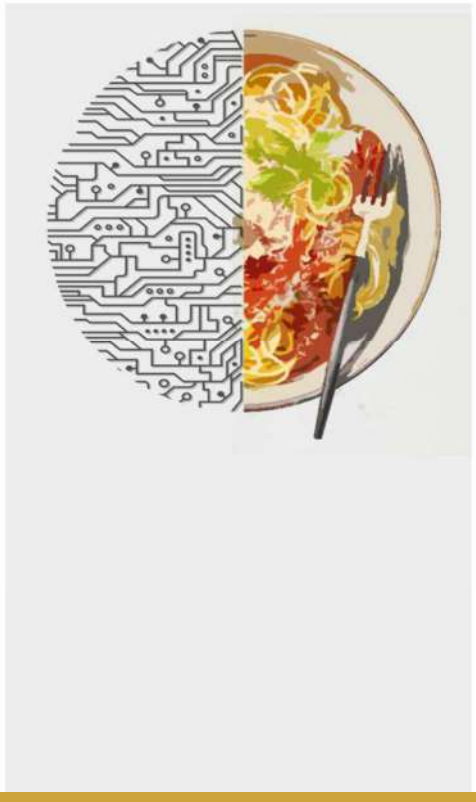
با توجه به مرحله دوم، روش‌های مقیاس بندی یا وزن دهی کافی برای در نظر گرفتن ابعاد مختلف بلوک‌های داده ضروری است. درواقع، زمانی که بلوک‌های داده دارای تعداد بسیار متفاوتی از متغیرها هستند؛ نتایج تجزیه‌وتحلیل درصورتی‌که روش‌های مقیاس‌بندی مناسب انجام نشوند به‌شدت تحت تأثیر بزرگ‌ترین بلوک قرار می‌گیرد. برای 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. به‌این‌ترتیب، 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 ازنظر سهم متغیرهای اصلی فراهم می‌کند و همبستگی بین متغیرهای متعلق به بلوک‌های مختلف نیز به‌راحتی قابل‌بررسی است ولی از سوی دیگر، محتوای نویز 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 تجزیه‌وتحلیل می شوند، 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 می گذارد. روش‌های انتخاب متغیر را می‌توان به سه دسته 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 می شوند 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 پیش‌بینی های 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.



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 مورداستفاده قرارگرفته‌اند. 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 متغیره، 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 انجام‌شده 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 درنتیجه صرفه‌جویی اقتصادی مربوطه می‌شود. با توانایی تقلید حواس انسان، تکنیک‌های بینی الکترونیکی، زبان الکترونیکی، چشم الکترونیکی و تلفیق آن‌ها می‌توانند بر پیامدهای تحلیل حسی ذهنی غلبه کنند. در این بررسی به تشریح نحوه کار و ساخت این ابزارها پرداخته‌شده است و کاربردهای مختلف این دستگاه‌ها در صنایع غذایی موردبحث قرارگرفته 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. ازاین‌رو، 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.