شیمی سبز و فناوری های پایدار

سنسورهای شیمیایی بر پایه‌ی گوشی‌های همراه هوشمند

محمد حسن امینی* ، افروز شکیب فر، سید حمید احمدی

پژوهشکده محیط زیست و فناوری‌های پاک، پژوهشگاه شیمی و مهندسی شیمی ایران، تهران، ایران

Email: amini@ccerci.ac.ir

چکیده

گوشی های هوشمند به عنوان محبوب ترین دستگاه تلفن همراه پیشرفته، با قابلیت برنامه های مختلف، به عنوان سنسورهای فیزیکی و شیمیایی استفاده می شوند. ادغام سنسورهای شیمیایی با گوشی های هوشمند منجر به ابداع دستگاه های فشرده تر، سبک تر، با دوام تر به لحاظ عملکردی می باشند که تمامی معیارهای سازمان بهداشت جهانی از قبیل، ارزانی، سادگی روش، حساسیت و گزینش پذیری بالا، قابل حمل بودن، قابل دسترس بودن، عدم نیاز به تجهیزات پیچیده را دارند. سنسورهای شیمیایی هوشمند، به دلیل مزایای بیشماری که دارند برای مراقبت های شخصی، آنالیزهای بالینی، تشخیص آلرژن در غذا و نظارت بر محیط زیست وارد زندگی ما شده اند و مسیر را برای به کارگیری بیشتر این سنسورها در زندگی روزمره به خصوص تست های مراقبتی هموار می کند. در این مقاله ی مروری چند موضوع اصلی در رابطه با سنسورهای شیمیایی هوشمند مورد بحث قرار گرفته اند که مهمترین آنها شناسایی انواع سنسورهای شیمیایی بی سیم است که با به کار گیری قسمت های مختلف گوشی های همراه هوشمند مانند صفحه ی ال ای دی، باتری گوشی، دوربین گوشی، سیستم انتقال داده ها و برنامه های مخصوص ایجاد شده اند . در ادامه به کاربرد آن ها مانند سنسورهای زیست محیطی برای کنترل کیفیت آب و هوا، سنسورهای پوشیدنی و تست های مراقبتی اشاره شده است. مهم ترین کاربرد گوشی های همراه در این سنسورها، استفاده از دوربین گوشی به عنوان آشکارساز برای ثبت تصاویر تغییر رنگ و مرتبط کردن آن با غلظت آنالیت است.

واژگان کلیدی: سنسورهای نوری هوشمند، پایش زیست محیطی، کنترل کیفیت آب و هوا، سنسورهای پوشیدنی، تست های مراقبتی

Mohammad Hassan Amini*, Afrooz Shakibfar, Seyed Hamid Ahmadi

Faculty of Clean Technologies, Chemistry& Chemical Engineering Research Center of Iran, Tehran, Iran

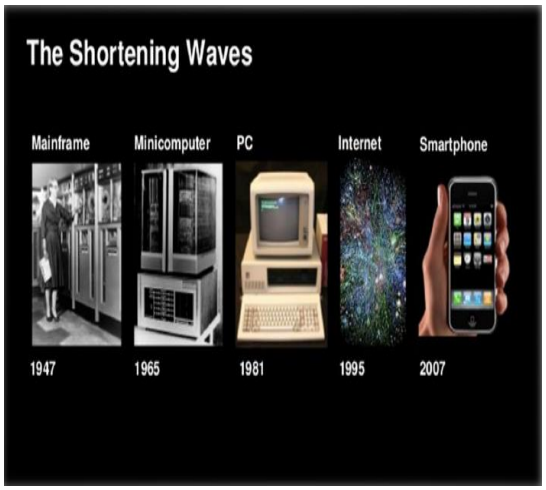
Email: amini@ccerci.ac.ir

Abstract: A growing set of physicochemical sensors have been embedded; these include accelerometers, microphones, cameras, gyroscopes, and GPS units to access and perform data analysis. The integration of chemical sensors with smartphones leads to the creation of more compact, lightweight, more durable devices in terms of performance, which meet all the criteria of the World Health Organization, such as cost-effective, simplicity of the method, high sensitivity and selectivity, portability, availability, no need for complex equipment. Smart chemical sensors have entered our lives due to their numerous advantages for in point-of-care (POC), clinical analysis, allergen detection in food, and environmental monitoring, paving the way for more applications of these sensors in daily life, especially in point-of-care (POC) tests. Smart chemical sensors are non-invasive in point-of-care tests due to the need for a very small amount of analyte. In this review article, several main topics related to smart chemical sensors are discussed, the most important of which are the identification of wireless chemical sensors, which use different parts of smart phones such as LED screen, battery, camera, data transmission system and special programs have been created and their application such as environmental sensors to control the quality of air and weather, wearable sensors and point-of-care tests have been mentioned. The most important application of mobile phones in these sensors is to use the phone's camera as a detector to record color change images and relate it to the analyte concentration.

Keywords: Smartphone based optical Sensors, Environmental monitoring, Air and water quality, Wearable sensors, Point of care tests

۱. مقدمه

اوایل دهه ی ۱۹۹۰، اولین گوشی های همراه هوشمند در بازار ظاهر شدند که از آنالوگ به دیجیتال تبدیل شده بودند. ظهور باتری های لیتیومی قابل شارژ، به کاهش وزن و کاهش هزینه های آن کمک کرد. اولین گوشی های همراه هوشمند تجاری نوکیا ۱۰۱۱ مجهز به میکروفن به عنوان سنسور بودند. سال ۲۰۰۷ با معرفی آیفون توسط شرکت اپل، این گوشی ها محبوبیت گسترده ای پیدا کردند (شکل ۱). در سال ۲۰۲۱، تعداد کاربران گوشی های هوشمند، به ۶/۳ میلیارد نفررسید که ۸۰ درصد از جمعیت جهان را تشکیل می دهند [۱]. دوربین های نوری گوشی های همراه هوشمند بیشترین استفاده را توسط کاربران دارند. گوشی های همراه هوشمند دارای پردازشگر سریع، حافظه ی بالا، باتری کافی، صدا، پورت USB، صفحه ی نمایشی لمسی برای ارائه ی قابلیت محاسباتی قدرتمند، ذخیره سازی داده ها، منبع تغذیه ی قابل حمل هستند و رابط کاربری مناسب برای تعامل با دنیای خارج را دارند [۲].

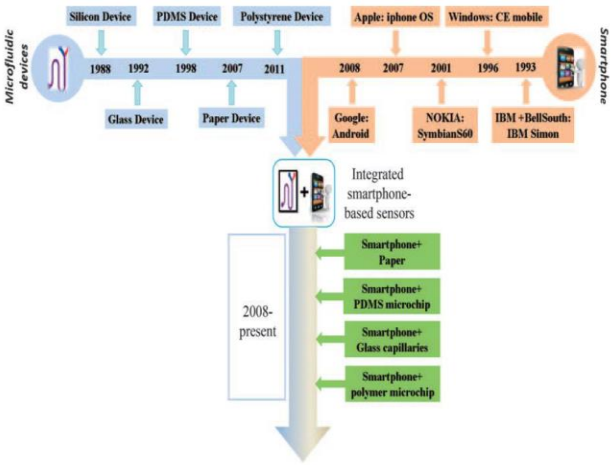


شکل ۱- روند توسعه ی گوشی های همراه هوشمند

هوشمند شدن سنسورهای شیمیایی به واسطه ی گوشی های همراه است، به این منظور که سنسورها از طریق شبکه ای موسوم به اینترنت فراگیر به همدیگر و در نهایت به کاربرها، وصل می شوند و بعد از وصل شدن تحت کنترل و مدیریت ما قرار می گیرند. بعد از هوشمند شدن سنسورها، می توان اطلاعات آن ها را، در کمتر از ثانیه برای هر کسی در هر نقطه ای از جهان فرستاد. هوشمند شدن سنورها بسیاری از معیارهای سازمان بهداشت جهانی را دارد که مهم ترین آن ها مطابق شکل ۲ در حروف کلمه ی هوشمند جای گرفته اند، مانند گزینش پذیر، قابل اندازه گیری، در دسترس، قابل اعتماد و سریع.

شکل ۲- شکل حروف کلمه ی هوشمند

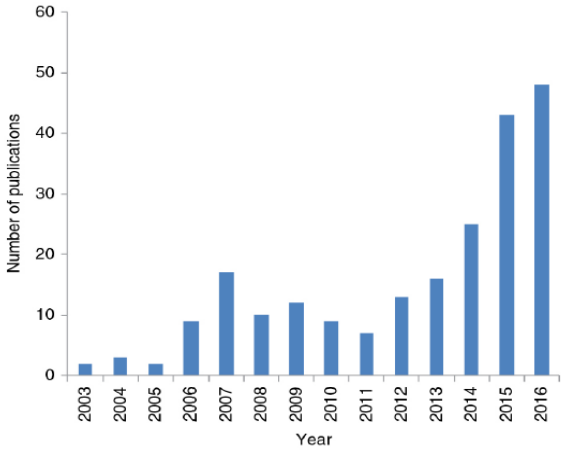
با توسعه ی گوشی های همراه هوشمند و توسعه ی ابزارهای آنالیزی میکروسیال مثل کیت های کاغذی و ترکیب این دو تکنولوژی، سنسورهای بر پایه ی گوشی همراه هوشمند ابداع شدند که شامل ترکیب کاغذ، میکروچیپ و لوله ی موئینه ی شیشه ای با گوشی هوشمند هستند (شکل ۳) [۳].



شکل ۳- تاریخچه ی ترکیب ابزارهای آنالیزی میکروسیال با گوشی های همراه هوشمند

دلایل جایگزینی سنسورهای بر پایه گوشی های همراه هوشمند با روش های مرسوم آنالیزی عبارتند از [۴]: نیاز به حجم کم معرف و نمونه، سرعت بالای تست کنترل و مدیریت داده ها، مقرون به صرفه بودن، زمان آنالیز کوتاه، سهولت انجام آن، قابل حمل بودن برای آنالیز در مناطق محروم و نقاط دوردست، مراحل عملیاتی ساده ی آن، نیاز داشتن به حداقل تجهیزات و مشارکت کاربر.

به تازگی پایگاه اطلاعاتی دانشگاهی[1]، تحقیقی در مورد سنسورهای شیمیایی و زیستی با استفاده از ترکیب کلمات کلیدی مانند بی سیم[2] و سیار[3] که ماهیت هوشمند شدن سنسورها را نشان می دهند، انجام داده است [۵]. برای سنسورهای نوری با حالت جذب و فلورسانس کلمه ی هوشمند جایگزین کلمات بی سیم و موبایل شدند. از سال ۲۰۰۳ به بعد این تحقیق در مورد کلمات به سنسورهای شیمیایی و بیوشیمیایی بر پایه ی گوشی های همراه هوشمند محدود شدند و تعداد مقالات چاپ شده در این زمینه رشد صعودی داشته است (شکل ۴) [۶].



شکل ۴- تعداد مقالات منتشر شده در سال برای سنسورها و سنسورهای شیمیایی نوری بی‌سیم، پوشیدنی بر پایه ی گوشی‌های هوشمند، بازیابی شده از پایگاه داده ی Web of Science [۵, ۶].

دلایل ادغام گوشی های همراه هوشمند در سنسورها به شرح زیر است [۷]:

۱. گوشی های هوشمند دارای قطعات الکترونیکی صوتی و نوری داخلی زیادی هستند که می توانند یا به عنوان سنسورهای مستقل و یا در بخشی از سنسورها استفاده شوند.
۲. گوشی های همراه هوشمند برای اصلاح و ادغام شدن با اجزای الکترونیکی صوتی و نوری خارجی انعطاف پذیرند.
۳. گوشی های همراه هوشمند کامپیوترهای کوچک قابل حمل هستند که با نصب برنامه ها و نرم افزارهای مخصوص جهت عملکرد بهتر سنسورها، پردازش سیگنال های اندازه گیری به منظور دسترسی آسان برای کاربر به کار می روند.
۴. گوشی های هوشمند امکان آنالیز داده ها را در مناطق دور افتاده فراهم می کنند.
۵. گوشی های همراه هوشمند دارای عملکرد های ارتباطی بی سیم هستند که از آن ها می توان برای ساخت شبکه ی سنسور بی سیم استفاده کرد.
۶. گوشی های هوشمند کاربر پسند هستند، کار با آن ها ساده بوده و نیاز به گذراندن هیچ دوره ی آموزش حرفه ای توسط کاربر را ندارند.

۲. اساس به کارگیری گوشی های همراه هوشمند در سنسورها

۲-۱. به کار رفته در ساختمان سنسور

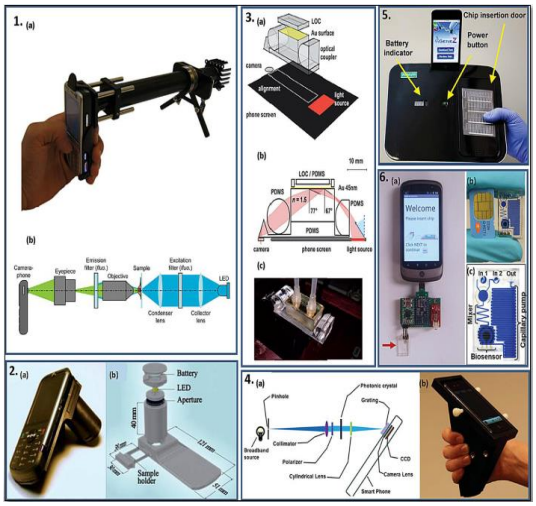
این طبقه بندی شامل دوربین ها، سرعت سنج ها، شتاب سنج ها، گام سنج ها، دماسنج ها، فشارسنج ها، پروژه های سنجش رطوبت هوا، آشکارسازهای نوری، مغناطیس سنج ها، سنسورهای اثر انگشتی هستند که در آیفون ها و گوشی های

1 -Web of Science
2 -wireless
3 -mobile

اندروید وجود دارند. به عنوان مثال، با ترکیب فشارسنج انگشتی و گوشی های هوشمند می توان فشار خون سیستولیک و دیاستولیک را به طور مستقیم اندازه گیری کرد و بر روی صفحه ی نمایش گوشی نمایش داد. این سنسورها با بهبود کیفیت عملکردشان جهت پایش فعالیت روزانه ی کاربران به ویژه در بحث های مراقبتی مانند تنظیم دمای بدن و فشار خون استفاده می شوند [۸].

۲-۲. اضافه شده به سنسور

گوشی‌های هوشمند تجاری با یک سری اصلاحات با سنسورها ترکیب می شوند که از آن ها می توان در اندازه گیری ها، کنترل عملکرد سنسور، پردازش سیگنال اندازه گیری و یا ارتباط با کاربران استفاده کرد. اضافه کردن سنسورهای خارجی به گوشی‌های هوشمند با هدف گسترش قابلیت دسترسی نمونه، بهبود قابلیت اطمینان، افزایش حساسیت و گزینش پذیری با تکنولوژی‌های پیشرفته مثل نانو، میکرو سیالات و پرینت سه بعدی صورت می گیرد [۹]. به طور کلی بیشترین کاربرد گوشی های هوشمند درسنسورهای شیمیایی یا به عنوان آشکارساز و یا به عنوان رابط می باشد (شکل ۵).



شکل ۵- کاربرد گوشی های همراه هوشمند را در سنسورهای شیمیایی نشان می دهد، که با کار گذاشتن صفحه ی ال ای دی روی سنسورها یک سیستمی شبیه به اسپکتروفوتومتری طراحی شده و از دوربین گوشی به عنوان آشکارساز استفاده شده که از تغییرات رنگ عکس گرفته و ثبت می شود و این تغییرات را طبق یک فرآیند به غلظت ماده ی موردنظر مرتبط می کند.

وجود برنامه های متنوع در گوشی های همراه هوشمند، پیشرفت سیستم عامل ها، ریزپردازنده ها با عملکرد عالی، دامنه ی وسیعی از اندازه گیری و تکنولوژی بی سیم باعث به کارگیری آن ها در سنسورهای شیمیایی به عنوان منبع نوری، آشکارساز، رابط، منبع تغذیه و پردازشگر می‌شوند. به دلیل در دسترس بودن همگان استفاده از آن ها در سنسورهای شیمیایی و ارتباط با میکرو سیال و یا چیپ در برنامه های مراقبتی و سلامتی، مقرون به صرفه بوده و اجرای آسانی دارند. امکان انتقال داده ها توسط برنامه هایی مثل بلوتوث [۱۰]،[4] Zigbee [۱۱]، فرکانس رادیویی[5] [۱۲] و NFC [۱۳]، فراهم است که داده ها را به افراد حرفه ای مثل پزشک منطقه انتقال می دهد، تا امکان بررسی و مدیریت داده ها از راه دور میسر شود.

۳. طبقه بندی سنسورهای شیمیایی بر پایه ی گوشی های هوشمند

اکثر سنسورهای شیمیایی بر پایه ی گوشی های هوشمند به صورت الکتروشیمیایی، نوری، کالریمتری و میکروسکوپ بدون لنز با مقیاس تراشه هستند، که سنسورهای نوری هوشمند شامل روش های لومینسانس، بایوکمی لومینسانس، الکتروکمی لومینسانس و فوتولومینسانس بوده و سنسورهای کالریمتری هوشمند هم شامل روش های جذبی و انعکاسی هستند.

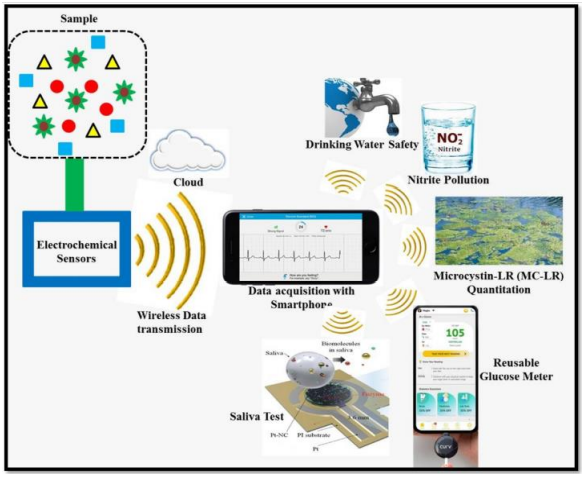
۳-۱. سنسورهای الکتروشیمیایی بر پایه ی گوشی های هوشمند

سنسورهای الکتروشیمیایی بر پایه ی گوشی های هوشمند به طور گسترده وظیفه ی پایش زیست محیطی مثل کیفیت آب را بر عهده دارند. این سنسورها با گوشی های هوشمند از چهار جزء کلیدی تشکیل شده اند که شامل سنسور الکتروشیمیایی از جنس مس، آشکارساز، گوشی‌های هوشمند با برنامه های

4- نوعی سیستم انتقال دهنده ی داده مثل بلوتوث و وای فای است

5 -RFIED

مخصوص و برنامه ی انتقال داده ها هستند [۱۴]. این سنسورها نیاز به اصلاح گوشی هوشمند با ماژول الکترونیکی دارند، که این ماژول می تواند از طریق پورت USB، شارژر یا میکروفون به سیستم اضافه شود [۱۵]. برای اندازه گیری الکتروشیمیایی می توان یک تراشه ی میکروسیال را با گوشی هوشمند ادغام کرد. تراشه های میکروسیال می‌توانند بازدهی بالا و مینیاتوری شدن را برای سیستم فراهم کنند. ارتباط بین گوشی و تراشه، از طریق برنامه های میکروکنترلر برقرار می شود. در نتیجه رفتار نمونه پمپاژ و اندازه گیری روی تراشه ی میکروسیال توسط گوشی کنترل می شود. علاوه بر این، یک دستورالعمل مرحله به مرحله ای گرافیکی روی صفحه ی نمایشی نمایش داده می شود و در نهایت نتایج آزمایش توسط برنامه ی مخصوص آنالیز شده و بر روی صفحه گوشی مشخص می شود (شکل ۶) [۱۶].

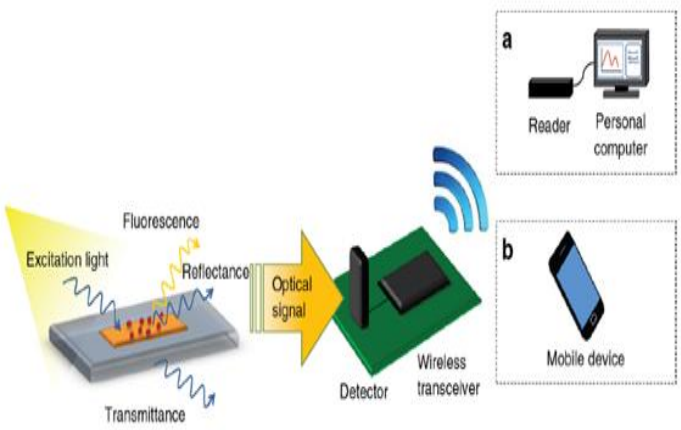


شکل ۶- کاربرد سنسورهای الکتروشیمیایی بر پایه ی گوشی های هوشمند [۱۶]

۳-۲. سنسورهای نوری بر پایه ی گوشی های هوشمند

این سنسورها به دلیل سادگی روش، عدم نیاز به الکترود مرجع، حساسیت بالا، مکانیسم اندازه گیری بر اساس جذب، انعکاس و یا فلورسانی و کاربرد وسیع آن ها با نصب برنامه های مخصوص، جذابیت زیادی پیدا کرده اند. این سنسورها هنگام برهمکنش آنالیت شیمیایی و بیولوژیکی با گیرنده، باعث تغییر در سیگنال های نوری می شوند و در ساده ترین شکل خود، جذب آنالیت را در محلول به طور مستقیم نشان می دهند، که حاصل برهم کنش آنالیت با مولکول نشانگر حساس به آنالیت است و یا در پیچیده ترین حالت شدت نور فلورسانس نشر شده توسط مولکول نشانگر را در گیرنده مشخص می کنند و سیگنال نوری تولید شده توسط آشکارساز به سیگنال الکتریکی تبدیل می شود. در نهایت این داده‌ها برای آنالیز بیشتر توسط شبکه ی اینترنتی بی سیم به گوشی فرستاده شده و آنالیز با برنامه های مخصوص انجام می گردد.

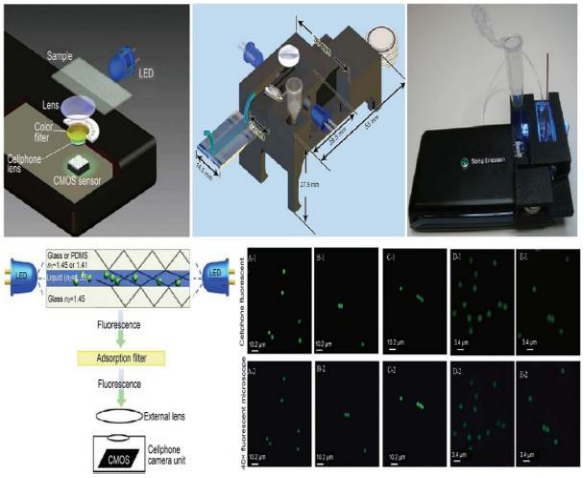
سنسورهای پوشیدنی بر پایه ی گوشی‌های هوشمند که زیر مجموعه ای از سنسورهای نوری هستند، به حوزه ی کاربردی کلیدی در سنسورهای نوری تبدیل شده اند، که باعث شده شیمی دان های تجزیه توجه زیادی به این سنسورها داشته باشند. در این سنسورها سیگنال خروجی را می توان با چشم غیر مسلح یا دوربین گوشی هوشمند آنالیز کرد (شکل ۷) [۱۷].



شکل ۷- (الف) شماتیک عملکرد یک سنسور بی سیم نوری (بیو) شیمیایی (ب) سنسورهای نوری سیار مرحله ی خوانش را با چشم غیر مسلح یا دوربین از راه دور، بدون ارتباط رادیویی امکان پذیر می کنند [۱۷].

۳-۲-۱. سنسورهای فلورسانس برپایه ی گوشی های هوشمند

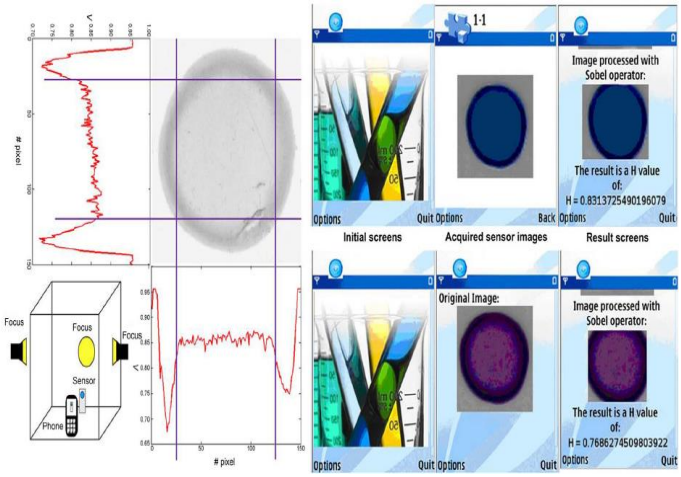
قسمت هایی از سنسور مثل منبع نور، فیلتر داخلی و لنز شیئی با گوشی هوشمند ادغام شده‌اند. به منظور دستیابی به قابل حمل بودن و تست مراقبتی، سایز لوازم جانبی سنسورهای فلورسانس مینیاتوری شده اند. با ادغام شدن با گوشی هوشمند امکان استفاده از آن برای کاربردهای پزشکی از راه دور، تصویر برداری و میکروسکوپ فلورسنت فراهم می شود. این دستگاه با کوچک کردن میکروسکوپ از طریق اتصال مکانیکی نوری به ماژول دوربین گوشی با وزن ۱۸۶ گرم قادر به تصویربرداری از نانو ذره و ویروس با استفاده از دوربین داخلی گوشی است (شکل ۸) [۱۸]. به عنوان مثال، این دستگاه می تواند به تجسم مولکول های مستقیم DNA تکی با دوربین گوشی در میدان دید بزرگ ۲ میلی متری برسد. برای سهولت در تصویربرداری می توان از نمونه های فلورسنت به عنوان فیبر نوری در آنالیز استفاده کرد [۱۹].



شکل ۸- شمای ادغام شدن سنسورهای فلورسانس با دوربین گوشی های هوشمند و تصاویر به دست آمده با استفاده از تصویربرداری فلورسنت [۱۸]

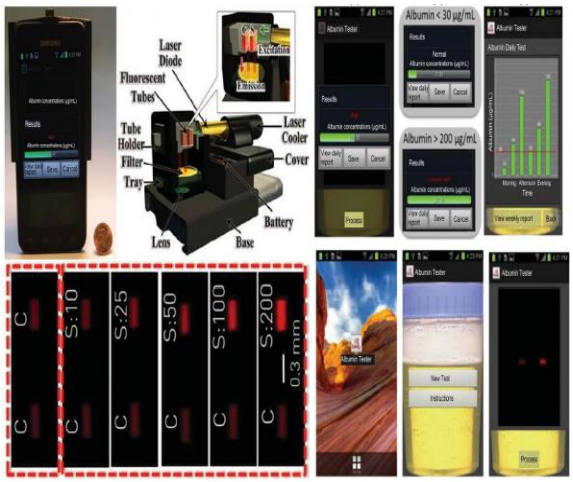
۳-۲-۲. سنسورهای کالریمتری برپایه گوشی‌های هوشمند

وقتی سنسورهای کالریمتری با گوشی‌های هوشمند ادغام شوند، دوربین گوشی به عنوان دتکتور عمل کرده و سیستم قرائت خوان سیگنال مورد نظر را حس می کند [۲۰]. با یک سری برنامه های مخصوص می توان، عملکرد سنسور و پردازش سیگنال را توسعه داد، بنابراین به یک سیستم قرائت خوان کالریمتری یا کامپیوتر نیاز نیست. تصاویر رنگارنگ را می توان از طریق شدت رنگ های قرمز و سبز و آبی (RGB)، با استفاده از دوربین گوشی که به عنوان آشکارساز (CMOS) است، می توان برنامه های پردازش تصویر را تجزیه کرد. به این دلیل که نور محیط و محیط اطراف و جابجایی گوشی روی کیفیت تصویر تاثیر می گذارد، حفظ ثبات و دقت تشخیص در طول تصویربرداری کار دشواری است، در این حالت برای از بین بردن تداخل نور و محیط به پلتفرم نیاز است تا گوشی روی آن تعبیه شود و کیفیت و کمیت رنگ تصویر را بهتر کند. این پلتفرم می تواند با گرفتن تصاویر و به دست آوردن ویژگی های آن غلظت یون مورد نظر را شناسایی کند. یک دوربین HD خوب باید بتواند تا ۱۶۷۷۷۲۱۶ رنگ را تشخیص بدهد [۲۱]. به عنوان مثال: با این پلتفرم کاربر غیرحرفه ای نیز می تواند غلظت پتاسیم را در آب تشخیص دهد (شکل ۹) [۲۲].



شکل ۹- شمایی از پلتفرم گوشی همراه برای تشخیص پتاسیم و نرم افزار مخصوص پردازش سیگنال در صفحه ی نمایش داده شده [۲۲]

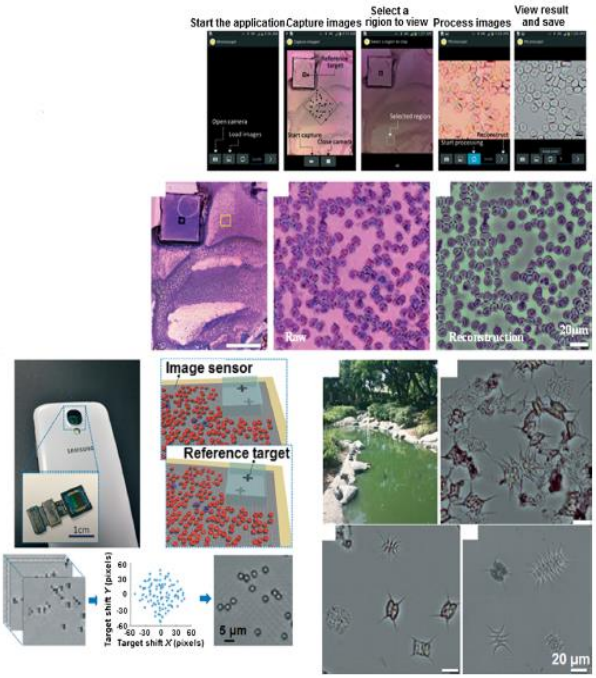
از سنسورهای کالریمتری هوشمند می توان در حوزه ی سلامت هم استفاده کرد، که نمونه ی آن تصویربرداری و تجزیه ی آلبومین در ادرار بوده که با گوشی هوشمند و پلتفرم با وزن ۱۴۸ گرم انجام شده است (شکل ۱۰) [۲۳].



شکل ۱۰- عکس های تستر آلبومین نصب شده گوشی همراه هوشمند و نرم افزار مخصوص تستر آلبومین روی صفحه ی نمایش برای تعیین غلظت کمی آلبومین در ادرار [۲۳]

۳-۲-۳. میکروسکوپ بدون لنز در مقیاس تراشه

این میکروسکوپ قابل حمل بوده و از آن در مراقبت های سلامتی سیار و پایش محیط زیست استفاده می شود. منبع نوری این دستگاه باعث روشنایی محیط شده و یک سری برنامه های معمولی برای بازسازی تصویر، مثل تصاویر اسمیر خون، تصاویر جلبک سبز آب شیرین و تصاویر میکروکره استفاده می شود (شکل ۱۱) [۲۴]. به طور کلی این میکروسکوپ شامل مراحل نمونه برداری مستقیم روی سطح سنسور، تکنیک تصویربرداری سایه در روشنایی محیط، بازسازی پیکسل ها با وضوح فوق العاده با ثبت تصاویر متعدد از زوایای مختلف، تصویربرداری با بزرگنمایی زیر میکرون و برنامه های مخصوص است.



شکل ۱۱- اصول کار، عکس ها و نتایج تشخیص با استفاده از میکروسکوپ بدون لنز در مقیاس تراشه با گوشی های همراه هوشمند [۲۴]

۴. کاربرد سنسورهای نوری هوشمند

این سنسورها بسته به کاربردشان می توانند در مراقبت های سلامتی به عنوان سنسورهای پوشیدنی، قابل کاشت و بلعیدنی مورد استفاده قرار گیرند [۲۵]، که مهم ترین آن ها شامل موارد پایش زیست محیطی مثل کنترل کیفیت هوا و آب، مراقبت از سلامتی و تناسب اندام، مدیریت پسماند، امنیت عمومی، اتوماسیون خانگی، تشخیص نشتی گاز و آب، تست های خانگی، معاینات پزشکی، ارزیابی خطرات مواد غذایی هستند. در این بخش به مهم ترین کاربرد های سنسورهای نوری بر پایه ی گوشی های همراه هوشمند پرداخته می شود.

۴-۱. سنسورهای نوری جهت پایش زیست محیطی بر پایه ی گوشی های هوشمند

سنسورهای زیست محیطی بر پایه ی سیستم هوشمند از ابتدای سال ۲۰۰۰ ابداع شده و به سرعت در حال پیشرفت هستند. بیشتر از نیمی از کاربرد سنسورهای شیمیایی هوشمند به پایش محیط زیست اختصاص پیدا کرده اند که به طور مساوی بین کنترل کیفیت آب و هوا توزیع شده اند (جدول ۱). در این جدول آنالیت های مختلف مثل pH، رطوبت و فسفات در نمونه های آب و هوا با حالت های جذب، انعکاس و یا فلورسانس و با نشانگرهای متفاوتی مثل برموکروزول و برمو فنول وبسترهای ساکن مانند فیلم، شیشه و کاغذ توسط قسمت های متفاوتی از گوشی های هوشمند مثل Zigbee، بلوتوث و دوربین اندازه گیری می شوند [۲۶].

جدول ۱- کاربرد سنسورهای شیمیایی نوری هوشمند جهت پایش محیط زیست [۲۶]

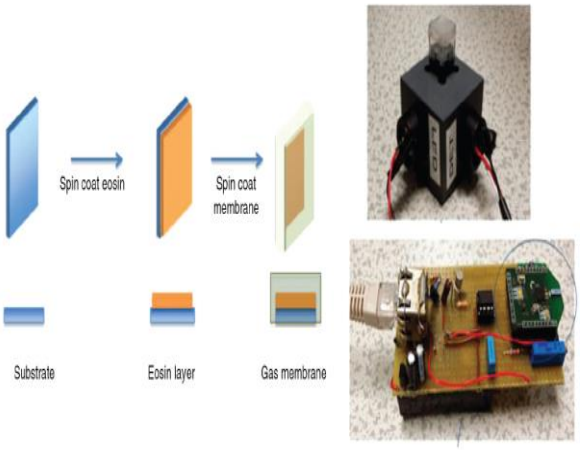
Analyte	Sample	Detection mode	Detection chemistry	Immobilisation method	Wireless communication	Reference
pH (acetic acid vapour)	Air	Absorbance	Bromophenol blue	Ethyl cellulose	ISM/SRD	Shepherd et al. (2007)
pH (NH_3 gas)	Air	Absorbance	3′-3″-Dichlorophenol sulfonephthalein	Sol-gel	ZigBee	Llorente-Alonso et al. (2013)
NO_2	Air	Absorbance	Diazo coupling	Porous glass	ISM/SRD	Maruo et al. (2012)
Humidity	Air	Absorbance (IR)	Direct optical	-	ZigBee	Cao et al. (2014)
Phosphate	Water	Absorbance	Molybdovanado phosphoric acid	None - wet chemistry	GSM	Slater et al. (2007)
$KMnO_4$ (model)	Water	Absorbance	Direct optical	-	Bluetooth	Camarillo-Escobedo, Valdés-Perezgasga, and Rodríguez-Rivera (2013)
pH	Water	Absorbance	Bromocresol purple	Ionogel film	Bluetooth	Czugala et al. (2012)
pH	Water	Reflectance	Universal Indicator	Paper, ethyl cellulose	Proprietary (wireless camera)	Fay et al. (2010)
NH_3 dissolved	Water	Fluorescence	Eosin, pH-sensitive fluorophore	Glass substrate	Xbee	Deng et al. (2016)

۴-۱-۱. سنسورهای هوشمند جهت کنترل کیفیت هوا

اولین سنسورهای هوشمند جهت کنترل هوا، سنسور اندازه گیری pH بر پایه ی جذب برای پایش اسیدیته ی محیطی است که اسید استیک به عنوان آنالیت، اندازه‌گیری می‌شود. در این سیستم از آشکارساز فوتودیودی (PEDD) استفاده می شود که منبع نور و آشکارساز هر دو ال ای دی هستند و جریان نوری به طور غیر مستقیم با کنترل بر زمان تخلیه ی بار الکتریکی در میکرو ثانیه اندازه گیری می شود. این دو ال ای دی با اتیل سلولز آغشته شده به برومو فنول آبی (رنگ نشانگر pH) دوپ می شوند تا اندازه گیری صورت گیرد. برنامه ی به کار رفته Crossbow است [۲۷]. به عنوان مثال، برای اندازه گیری بخار آمونیاک، رنگ نشانگر pH (دی کلروفنول سولفو نفتالین) استفاده می شود، منبع آن ال ای دی و آشکارسازش فوتو دیودی و بستر آن سل ژل بوده که با ماژول Zigbee یکپارچه شده است [۲۸].

۴-۱-۲. سنسورهای هوشمند جهت کنترل کیفیت آب

در کنترل کیفیت آب روشی برای پایش کیفیت آب از راه دور توسط سیستم رباتیک توسعه داده شده، که می تواند داده‌های pH آب را از چند ایستگاه اندازه گیری مختلف جمع‌آوری کند. ایستگاه ها مجهز به نوار نشانگر هستند که با اتیل سلولز پوشانده شده تا شسته نشوند. این سیستم رباتیک دارای دوربین بی سیم است که رنگ ایستگاه ها را ضبط کرده و اطلاعات را از راه دور به ایستگاه پایه ارسال می‌کند که در نهایت pH را می توان با نرم افزار پردازشگر تصویر محاسبه کرد [۲۹]. به عنوان مثال، سنسور هوشمند بر پایه ی فلورسانس برای اندازه گیری آمونیاک محلول به کار می رود. در این سیستم از ائوزین به عنوان رنگ فلورسنت حساس به pH که روی یک لایه ی شیشه ای توسط لایه ی محافظ نفوذ پذیر گاز ساکن شده، استفاده می شود. افزایش غلظت آمونیاک باعث افزایش فلورسانس ائوزین شده، که با ال ای دی و آشکارساز فوتو دیودی اندازه گیری می شود و در نهایت اطلاعات با استفاده از ماژول Zigbee به ایستگاه پایه منتقل می گردد (شکل ۱۲) [۳۰].



شکل ۱۲- سنسور اندازه گیری آمونیاک بر پایه ی فلورسانس (سمت چپ)، عکس های ماژول سنسور نوری و ابزار الکترونیکی با میکرو کنترلر (سمت راست) [۳۰]

۴-۲. سنسورهای نوری جهت پایش مراقبت های سلامتی بر پایه ی گوشی های هوشمند

دومین دسته از کاربردهای سنسورهای نوری هوشمند جهت پایش مراقبت های سلامتی است. سایز سنسورهای نوری هوشمند در این گروه بسیار کوچک بوده تا قابل کاشتن و بلعیدن باشند. به عنوان مثال، یک سنسور گلوکز کاشته شده به صورت زیر جلدی که سیستم تشخیص نوری کوچک بر پایه فلورسانس است، که از هیدروژل فلورسنت و گلوکز غیر آنزیمی استفاده می شود. مشتق فلورسنت بیس بورونیک اسید در هیدروژل ساکن و با اتصال گلوکز، در انتقال الکترونی ناشی از عکس درون مولکولی تغییر ایجاد شده، که باعث افزایش شدت فلورسانس شده و این تغییر در فلورسانس با UV ال ای دی و دو فوتو دیود تشخیص داده می شود. منبع تغذیه ی این سیستم NFC و سیستم قرائت خوان مجهز به ماژول بلوتوث است، که قابلیت ارسال داده ها به فواصل طولانی تر را دارد. به این دلیل که گوشی مجهز به باتری است، پس قابلیت شارژ کردن را نیز دارد. این سیستم غیر آنزیمی بوده و تابع محدودیت های آنزیمی نیست و کمتر از سنسورهای الکتروشیمیایی تحت تأثیر رسوب زیستی قرار می گیرد، زیرا سیگنال از کل بخش هیدروژل مشتق می شود نه فقط از سطح آن [۳۱].

۴-۳. سنسورهای نوری پوشیدنی بر پایه ی گوشی های هوشمند

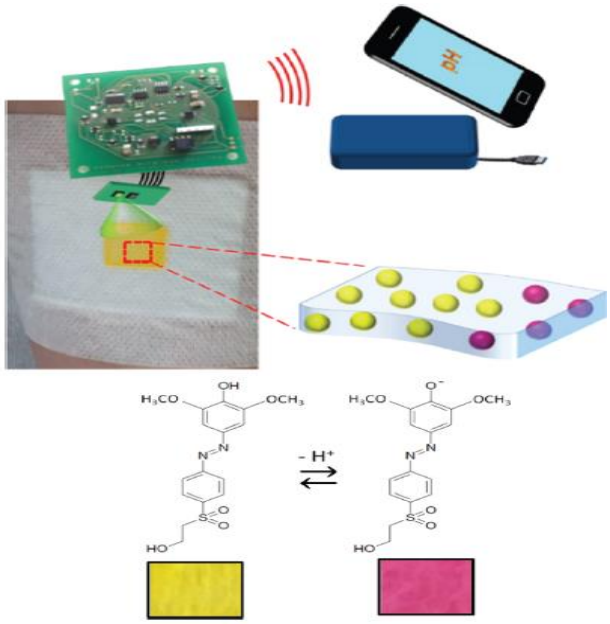
سومین دسته از کاربردها، سنسورهای پوشیدنی هستند که جهت استفاده بایستی کوچک شده و یا می توانند با لوازم جانبی پوشیدنی و لباس ها ادغام شوند تا برای پایش مراقبت های شخصی به کار روند [۳۲]. در سال‌های اخیر سنسورهای شیمیایی و بیوشیمیایی پوشیدنی به دلیل سرعت و سهولت بالای انجام تست، غیر تهاجمی بودن، کنترل بسیاری از آنالیت های مرتبط با تناسب اندام و مراقبتهای بهداشتی، بسیار محبوب شده اند [۳۳]، ولی باز هم سنسورهای الکتروشیمیایی پوشیدنی محبوبیت بیشتری نسبت به سنسورهای نوری پوشیدنی دارد، چون در سنسورهای نوری نیاز به منبع نور و آشکارساز دارند که اجزای سفت و سختی بوده و در پیاده سازی در سیستم های پوشیدنی چالش‌برانگیز است. حوزه ی کاربردی آنها در ورزش، تناسب اندام و تست های مراقبتی هستند که بیشتر توضیح داده می شود [۳۴].

۴-۳-۱. سنسورهای نوری پوشیدنی هوشمند در ورزش و تناسب اندام

اولین کاربرد سنسورهای پوشیدنی در ورزش و تناسب اندام است. آنالیز در این سنسور ها به صورت در لحظه بوده و از عرق بدن به عنوان نمونه استفاده می شود، چون به راحتی قابل دسترس و حاوی چندین آنالیت اند که برای پارامتر فیزیولوژی ورزشی مهم هستند. به عنوان مثال، سنسور pH نوری پوشیدنی از جنس پارچه ی نخی است که از شناساگر pH متیل قرمز تثبیت شده در ماتریکس سل ژل هیبریدی تشکیل شده است [۳۵]. لوازم الکترونیکی مینیاتوری آن شامل اپتو الکترونیک تشخیص رنگ ال ای دی سفید، فوتو دیود و میکروکنترلر هستند. این سنسور مصرف انرژی پایینی داشته، کارایی واحد pH آن ۰/۵ و محدوده ی دینامیکی آن از pH ۴ تا ۸ است که برای آنالیز pH عرق بدن محدوده ی مناسبی بوده و از بلوتوث برای انتقال داده ها استفاده می شود [۳۶].

۴-۳-۲. سنسورهای نوری پوشیدنی هوشمند در مراقبت های سلامتی جهت پایش بهبود زخم

پایش زخم، یک حوزه ی کاربردی کلیدی در سنسورهای پوشیدنی جهت مراقبت های سلامتی است. در کنترل زخم، انتقال داده های هوشمند باید امکان ارزیابی غیرتهاجمی زخم را در کاهش ناراحتی بیمار فراهم کند [۳۷]. به عنوان مثال، یک سنسور با هیدروژل های پاسخ دهنده به pH و گیرنده های فسفریل ساکن شده درون فیبرهای نوری جهت تشخیص pH و غلظت پروتئین واکنشگر C در زخم گنجانده می شوند. عملکرد سطحی فیبر با استفاده از پوشش دکستران فوتواکتیو که به صورت کووالانسی به سطح متصل شده که این پیوند کووالانسی اتصال به مولکولهای زیستی هدف را امکان پذیر می‌کند. سیستم سنسور پرتابل حاوی فیبرهای نوری متصل به منبع نوری ال ای دی و آشکارساز است که امکان پایش تغییرات ضریب شکست در سطح فیبر را فراهم می‌کند. فیبرهای پلی متیل متاکریلات، پتانسیل زیادی جهت استفاده در سیستم های سنسور بر پایه ی الیاف را دارند (شکل ۱۳) [۳۸].



شکل ۱۳- سنسور هوشمند جهت پایش بهبود زخم [۳۸]

۵. سنسورهای نوری هوشمند بر پایه ی دوربین گوشی های همراه

چهارمین دسته از کاربردهای سنسورهای نوری هوشمند، استفاده از دوربین گوشی همراه است. این گوشی ها تقریباً در همه جا در دسترس هستند و به لطف قابلیت های پردازشی قدرتمند، می توانند هم به عنوان واحد قرائت خوان و هم به عنوان واحد آنالیز داده‌ها عمل کنند. معمولاً از امواج رادیویی استاندارد مثل بلوتوث، وای فای، NFC و GSM در قرائت خوان استفاده می شوند، ولی در حال حاضر با افزایش کیفیت دوربین های گوشی، آن ها را قادر کرده تا به عنوان آشکارساز در سیستم های اندازه گیری نوری به کار رود. گوشی ها به دلیل ماژول های دوربین مثل لنز و سنسور (CMOS) و نور ال ای دی پلتفرم عالی در کاربردهای سنسورهای نوری هستند، که در آن سیگنال نوری توسط دوربین گوشی اندازه گیری می شود و می‌تواند در حوزه ی مراقبتی، نظارت محیطی و کنترل سلامت غذا باشد [۳۹].

۵-۱. سنسورهای نوری هوشمند بر پایه ی دوربین گوشی های همراه جهت پایش مراقبت های سلامتی

متداول ترین کاربرد این سنسورها در بحث مراقبت های سلامتی و تست های مراقبتی است. به دلیل افزایش حساسیت و دقت این دستگاه ها، بحث پزشکی از راه دور توسعه پیدا کرده است. سنسورهای زیستی بر پایه ی گوشی‌های هوشمند در آزمایش های تشخیصی مثل نشانگر ویروس ایدز، هپاتیت و نشانگرهای زیستی سرطان تخمدان، کراتنین در نمونه های ادرار و باکتری های موجود هم در خون و هم در ادرار استفاده می شوند [۴۰]. به عنوان مثال، تست مراقبتی کنترل گلوکز، متداول ترین نوع از این سنسورها هستند. به دلیل تعداد زیاد بیماران دیابتی و نیاز به پایش قند خون که منجر به ساخت کیت های تشخیص گلوکز شده است. سنسورهای نوری، برخلاف سنسورهای الکتروشیمیایی جهت تعیین گلوکز هم در نمونه برداری و هم در پروسه ی تشخیص بر اساس مکانیسم غیرتهاجمی و بدون درد عمل می کنند. تشخیص گلوکز با ساکن کردن اکسیداز گلوکز و پرکسیداز تربچه ی

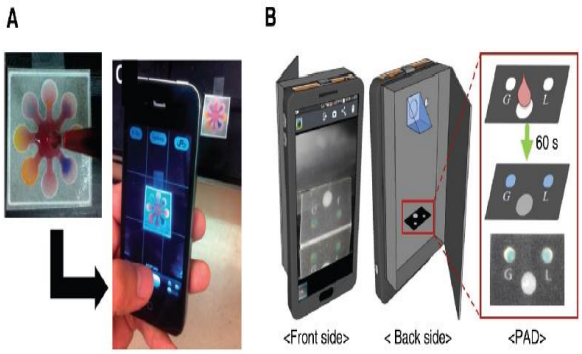
کوهی که رنگ حساس به pH است، انجام می گیرد. تشکیل اسید گلوکونیک در طی واکنش آنزیمی با تغییر رنگ همراه بوده، که تشخیص آن با گوشی هوشمند سازگار است [۴۱].

۵-۲. سنسورهای نوری هوشمند بر پایه ی دوربین گوشی های همراه جهت پایش زیست محیطی

پایش محیط زیست با گوشی هوشمند در ماتریکس های مختلف مثل خاک، آب و گاز و آنالیزهای متفاوت مانند pH، کلر، باکتری و فلزات سنگین در کنترل کیفیت آب با کنترل pH انجام می‌شود. علاوه بر این با گوشی های هوشمند می توان نیتریت، اکسیژن و کاتکول را هم اندازه گیری کرد [۴۲]. به عنوان مثال، پایش محیطی کم هزینه با کاربری آسان، مورد نیاز استاندارد جهانی است. آنالیز یون های جیوه در نمونه آب با حساسیت ppb توسط پلتفرم متصل به گوشی و نانوذرات طلای پلاسمونیک و کالریمتری با آپتامر صورت می گیرد [۴۳].

۵-۳. سنسورهای نوری هوشمند بر پایه ی دوربین گوشی های همراه جهت پایش مواد غذایی

سومین دسته از کاربرد دوربین گوشی به عنوان آشکارساز در فرآیند کنترل کیفیت غذا است. دوربین گوشی های هوشمند به طور موثری می توانند جایگزین ابزارهای حجیم و گران قیمت در تجزیه توسط کالریمتری شوند. این نوع سنسورها روش های کم هزینه تر و آسان تری را برای پایش و تشخیص سلامت غذا ارائه می دهند. تشخیص باکتری ها و آمین های متناسب با فاسد شدن مواد غذایی با کاربری آسان توسط گوشی هوشمند انجام می شود [۴۴]. به عنوان مثال، روش کالریمتری بر پایه ی گوشی هوشمند در تجزیه ی میکروسیال و مینیاتوری کردن سنسور با تقلید از بینی و زبان اپتوالکترونیکی برای تست نوشیدنی استفاده می شود (شکل ۱۴) [۴۵].



شکل ۱۴- تجزیه ی کالریمتری با گوشی هوشمند بر روی بستر کاغذی و تصویربرداری RGB از تراشه ی میکروسیال بر پایه ی کاغذ جهت تست نوشیدنی

نتیجه گیری

در نتیجه ی ظهور تکنولوژی های جدید، گوشی های هوشمند در دهه ی گذشته پیشرفت چشمگیری داشته و این پیشرفت به دو دلیل صورت گرفته است که سنسورهای به کار رفته در گوشی های هوشمند می‌توانند تعداد فزاینده ای از مقادیر فیزیکی را شناسایی کنند و یا می توانند با گزینه های اتصال بی سیم، ارسال و دریافت داده ها را آسان‌تر کنند. ساخت سنسورهای شیمیایی هوشمند بسته به کاربرد آن ها، بر اساس مکانیزم سنسور، مواد و فرایند ساکن سازی است، که با عوامل زیادی مثل حد تشخیص، حساسیت، مصرف انرژی، عمر باتری و سرعت انتقال داده ها مرتبط است. استانداردهای رادیویی سازگار با گوشی های هوشمند مثل بلوتوث و NFC به دلیل فراگیری، محبوبیت زیادی در سنسورهای شیمیایی پیدا کرده اند. در سال‌های آینده با پیشرفت گوشی های همراه و پردازش داده ها برای همه ی کاربران، کاربر پسند خواهد بود و امکان پیاده سازی در مناطق دور افتاده وجود داشته که منجر به کاهش مصرف زمان و انرژی خواهد شد. در آینده ما انتظار ادغام شدن سنسورهای شیمیایی را با پلتفرم های پوشیدنی مینیاتوری شده خواهیم داشت، که رابط نمونه، منبع نور، آشکارساز، ذخیره سازی داده ها، پردازش و ارتباط رادیویی را فراهم کنند. سنسورهای نوری پوشیدنی مشابه سنسور های الکتروشیمیایی پوشیدنی هستند ولی انعطاف پذیری سنسورهای نوری پوشیدنی بیشتر است.

منابع

[1] Krichen, M. *Anomalies Detection Through Smartphone Sensors: A Review. IEEE Sens. J.* **2021**, 21, 7207–7217.

[2] Lu, Y. Shi, Z. Liu, Q. *Smartphone-based biosensors for portable food evaluation. Curr. Opin. Food Sci.* **2019**, 28, 74–81.

[3] Liu, X. Lin, T.-Y. and Lillehoj, P. B. *Ann. Biomed. Eng.*, **2014**, 42, 2205

[4] Roda, A. Michelini, E. Zangheri, M. Di Fusco, M. Calabria, D. and Simoni, P. *TRAC-Trend Anal. Chem.*, **2016**, 79, 317.

[5] Capitán-Vallvey, L. F. Palma, A. J. *Recent developments in handheld and portable optosensing – a review. Anal. Chim. Acta.*, **2011**, *696*, 27–46.

[6] Capitán-Vallvey, L. F. López-Ruiz, N. Martínez-Olmos, A. Erenas, M. M. Palma, A. J. *Recent developments in computer vision-based analytical chemistry: a tutorial review. Anal. Chim. Acta.*, **2015**, *899*, 23–56.

[7] Woodward, B. Istepanian, R. and Richards, C. *IEEE Trans. Inf. Technol. Biomed.*, **2001**, 5, 13.

[8] Khan, W. Z. Xiang, Y. Aalsalem, M. Y. and Arshad, Q. *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, **2013**, 15, 402.

[9] Preechaburana, P. Suska, A. and Filippini, D. *Trends Biotechnol.*, **2014**, 32, 351.

[10] Liao, Y.-H. Chou, J.-C. *Potentiometric multisensor based on ruthenium dioxide thin film with a bluetooth wireless and web-based remote measurement system. IEEE Sens.* J., **2009**, 9, 1887–1894.

[11] Zhang, F. Jiang, W. Lin, Q. Wu, H. *ZigBee-based wireless sensor network for environment monitoring ZigBee. Sens. Transducers*., **2019**, 237, 144–149.

[12] Steinberg, I. M. Steinberg, M. D. *Radio-frequency tag with optoelectronic interface for distributed wireless chemical and biological sensor applications. Sens. Actuators B Chem.* **2009**, 138, 120–125.

[13] Olenik, S. Lee, H.S. Güder, F. *The future of near-field communication-based wireless sensing. Nat. Rev. Mater.*, **2021**, 6, 286–288.

[14] Liao, J. Chang, F. Han, X. Ge, C. Lin, S. *Wireless water quality monitoring and spatial mapping with disposable whole-copper electrochemical sensors and a smartphone. Sens. Actuators B Chem.* **2020**, 306, 127557.

[15] Sun, A. Wambach, T. Venkatesh, A. and Hall, D. A. *IEEE Biomed. Circuits. Syst. Conf.*, **2014**, 312.

[16] Delaney, J. L. Doeven, E. H. Harsant, A. J. and Hogan, C. F. *Anal. Chim. Acta.*, **2013**, 790, 56.

[17] Windmiller, J. R. Wang, J. *Wearable electrochemical sensors and biosensors: a review. Electroanalysis.* **2013**, *25*, 29–46.

[18] Zhu, H. Mavandadi, S. Coskun, A. F. *Optofluidic fluorescent imaging cytometry on a cell phone. Anal. Chem.* **2011**, 83, 6641–6647.

[19] Wei, Q. Luo, W. Chiang, S. Kappel, T. Mejia, C. Tseng, D. Chan, R. Y. L. Yan, E. Qi, H. and Shabbir, F. *ACS Nano*., **2014**, 8, 12725.

[20] Martinez, A. W. Phillips, S. T. Carrilho, E. S. Thomas III, W. Sindi, H. and Whitesides, G. M. *Anal. Chem.*, **2014**, 80, 3699 2008.

[21] Su, K. Zou, Q. Zhou, J. Zou, L. Li, H. Wang, T. Hu, N. and Wang, P. *Sensor Actual. B-Chem.*, **2015**, 216, 134.

[22] Garcı´a, A. Erenas, M. M. Marinetto, E. D. *Mobile phone platform as portable chemical analyzer. Sens. Actuators. B Chem*., **2011**, 156, 350–359.

[23] Coskun, A. F. Nagi, R. Sadeghi, K. *Albumin testing in urine using a smart-phone. Lab. Chip.*, **2013**, 13, .4231–4238

[24] Lee, S. A. Yang, C. A. *Smartphone-based chip-scale microscope using ambient illumination. Lab. Chip.*, **2014**, 14, 3056–3063

[25] Erickson, D. O'Dell, D. Jiang, L. Oncescu, V. Gumus, A. Lee, S. Mancuso, M. Mehta, S. *Smartphone technology can be transformative to the deployment of lab-on-chip diagnostics. Lab. Chip.*, **2014**, 14, 3159–3164.

[26] Sequeira, M. Bowden, M. Minogue, E. Diamond, D. *Towards autonomous environmental monitoring systems. Talanta.*, **2002**, *56*, 355–363.

[27] Shepherd, R. Beirne, S. Lau, K. T. Corcoran, B. Diamond, D. *Monitoring chemical plumes in an environmental sensing chamber with a wireless chemical sensor network. Sensors Actuators B Chem*., **2007**, *121*, 142–149.

[28] Llorente-Alonso, A. Pena-Poza, J. de Arcas, G. Garcia-Heras, M. Lopez, J. M. Villegas, *M. A. Interface electronic system for measuring air acidity with optical sensors. Sensors Actuators A Phys.*, **2013**, *194*, 67–74.

[29] Fay, C. Lau, K. T. Beirne, S. Conaire, C. O. McGuinness, K. Corcoran, B. O'Connor, N. E. Diamond, D. McGovern, S. Coleman, G. Shepherd, R.

Alici, G. Spinks, G. Wallace, G. *Wireless aquatic navigator for detection and analysis (WANDA). Sensors Actuators B Chem.*, **2010**, *150*, 425–435.

[30] Deng, S. J. Doherty, W. McAuliffe, M. A. P. Salaj-Kosla, U. Lewis, L. Huyet, G. *A low-cost, portable optical sensing system with wireless communication compatible of real-time and remote detection of dissolved ammonia. Photonic Sens*., **2016**, *6*, 107–114.

[31] Mortellaro, M. DeHennis, A. *Performance characterization of an abiotic and fluorescent-based continuous glucose monitoring system in patients with type 1 diabetes. Biosens. Bioelectron*., **2014**, *61*, 227–231.

[32] Steinberg, M. D. Kassal, P. Steinberg, I. M. *System architectures in wearable electrochemical sensors. Electroanalysis.*, **2016**, *28*, 1149–1169.

33. Bandodkar, A. J. Wang, J. *Non-invasive wearable electrochemical sensors: a review. Trends Biotechnol*., **2014**, *32*, 363–371.

[34] Matzeu, G. Florea, L. Diamond, D. *Advances in wearable chemical sensor design for monitoring biological fluids. Sensors Actuators B Chem*., **2015**, *211*, 403–418.

[35] Caldara, M. Colleoni, C. Guido, E. Re, V. Rosace, G. Development *of a textile-optoelectronic pH meter based on hybrid xerogel doped with methyl red. Sensors Actuators B Chem*., **2012**, *171*, 1013–1021.

[36] Caldara, M. Colleoni, C. Guido, E. Re, V. Rosace, G. *Optical monitoring of sweat pH by a textile fabric wearable sensor based on covalently bonded litmus-3-glycidoxypropyltrimethoxysilane coating. Sensors Actuators B Chem*., **2016**, *222*, 213–220.

[37] Mehmood, N. Hariz, A. Fitridge, R. Voelcker, N. H. *Applications of modern sensors and wireless technology in effective wound management. J. Biomed. Mater. Res. Part B Appl Biomater*., **2014**, *102*, 885–895.

[38] Pasche, S. Angeloni, S. Ischer, R. Liley, M. Lupranoe, J. Voirin, G. *Wearable Biosensors for Monitoring Wound Healing.* In *Biomedical Applications of Smart Materials, Nanotechnology and Micro/Nano Engineering*. **2009**, 57, 80–87.

[39] Preechaburana, P. Suska, A. Filippini, D. *Biosensing with cell phones. Trends Biotechnol*., **2014**, *32*, 351–355.

[40] Giavazzi, F. Salina, M. Ceccarello, E. Ilacqua, A. Damin, F. Sola, L. Chiari, M. Chini, B. Cerbino, R. Bellini, T. Buscaglia, M. A. *Fast and simple label-free immunoassay based on a smartphone. Biosens. Bioelectron*., **2014**, *58*, 395–402.

[41] Devadhasan, J. P. Kim, S. *An ultrasensitive method of real time pH monitoring with complementary metal oxide semiconductor image sensor. Anal. Chim. Acta*., **2015a**, *858*, 55–59.

[42] Hossain, M. A. Canning, J. Ast, S. Rutledge, P. J. Jamalipour, A. *Early warning smartphone diagnostics for water security and analysis using real-time pH mapping. Photon. Sens*., **2015a**, *5*, 289–297.

[43] Wei, Q. Nagi, R. Sadeghi, K. Feng, S. Yan, E. Ki, S. J. Caire, R. Tseng, D. Ozcan, A. *Detection and spatial mapping of mercury contamination in water samples using a smart-phone. Acs Nano*., **2014**, *8*, 1121–1129.

[44] Pavai, M. Orosz, E. Paszternak, A. *Smartphone-based extension of the curcumin/cellophane pH sensing method. Food. Anal. Methods*., **2016**, *9*, 1046–1052.

[45] Park, T. S. Baynes, C. Cho, S. I. Yoon, J. Y. *Paper microfluidics for red wine tasting. Rsc Adv*., **2014**, *4*, 24356–24362.