# مروری بر کاربرد طیف‌سنجی امپدانس الکتریکی در کیفیت‌سنجی محصولات کشاورزی و دامی

**مهدی نوجوان[1]، سعید مینایی[2]**

[1]دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه تربیت مدرس؛ mehdi.nojavan@modares.ac.ir
[2]استاد گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه تربیت مدرس؛ minaee@modares.ac.ir

**چکیده**

بسیاری از محصولات کشاورزی و دامی بر اثر عوامل مکانیکی یا آفات و امراض دچار آسیب شده، کیفیت خود را از دست می‌دهند و زودتر خراب می‌شوند. به همین دلیل جداسازی این محصولات نقش مهمی در افزایش میزان فروش محصولات دارد. در برخی موارد می‌توان با استفاده از ویژگی‌های ظاهری این جداسازی را انجام داد ولی گاهی عیوب موجود ظاهری نبوده و تشخیص و جداسازی توسط روش‌های معمول امکان ندارد. بهترین فناوری برای تشخیص ویژگی‌های درونی محصولات آزمایش غیرمخرب است. در این مقاله افزون بر بیان آزمون‌های ارزیابی درونی و بیرونی غیر مخرب، به مروری بر کاربردهای مختلف این فناوری‌ها در محصولات گیاهی و دامی پرداخته و روش طیف‌سنجی امپدانس الکتریکی به عنوان فناوری نوظهور در این مبحث بیشتر و کامل‌تر توضیح داده می‌شود. نتایج این بررسی برای مهندسان کشاورزی و صنایع غذایی در تعیین کیفیت محصولات کشاورزی و دامی قابل استفاده است.

**کلمات کلیدی:** آزمون‌های غیر مخرب، کیفیت سنجی، امپدانس، فرکانس

# Study of the application of electrical impedance spectrometry in the quality measurement of agricultural and livestock products

**M. Nojavan, S. Minaei**
minaee@modares.ac.ir

***ABSTRACT***

Many agricultural and livestock products are damaged by mechanical impacts, pests and diseases, resulting in loss of quality and faster deterioration lose their quality and deteriorate faster. For this reason, separation of these products plays an important role in increasing the sale rate. In some cases, the separation can be made by using the apparent features, but sometimes the defect is not exterior, so the detection and separation is possible using customary methods. The best technology for detecting intrinsic properties is non-destructive testing. This paper, explains non-destructive internal and external evaluation tests as well as the various applications of these technologies in agricultural and livestock products. The electrical impedance spectroscopy method as a new technology is described in more detail. The is study will be in formative for agricultural engineers and food technologists for determining the quality of agricultural and livestock products.

**Keywords:** Non-Destructive Test, Quality Measurement, Impedance, Frequency

یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم و ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون ایران

دکتر سعید مینایی، استاد گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه تربیت مدرس
minaee@modares.ac.ir

## ۱- مقدمه

امروزه کیفیت و سلامت محصولات کشاورزی و دامی در تعیین قیمت و میزان فروش نقش مهمی دارد. به دلیل افزایش تقاضای مصرف کنندگان برای استفاده از محصولات با کیفیت بالا، صنعت کشاورزی و غذایی کشورها با چالش‌های جدیدی روبرو شده است. کارهایی که در جهت کاهش این چالش‌ها صورت گرفته، می‌توان به عدم اعتماد به ارزیابی کیفی ذهنی و بالابردن پذیرش روش‌های عینی، کمی، غیر مخرب ارزیابی کیفی است (Jamshidi et al., 2014). در سال‌های اخیر استفاده از روش‌های غیر مخرب برای ارزیابی محصولات کشاورزی و دامی افزایش قابل توجهی داشته است. کمترین آسیب به نمونه از مزیت اصلی این روش‌ها نسبت به آزمون‌های مخرب می‌باشد که باعث شده محصول مورد بررسی به چرخه تولید برگشته و منجر به کاهش تولید ضایعات شود. برخی از فناوری‌های غیر مخرب برای ارزیابی خارجی محصولات و برخی دیگر برای تعیین کیفیت داخلی محصولات کاربرد دارد. ماشین بینایی برای ارزیابی بیرونی محصولات به کار می‌رود و مبنای کارکرد آن بر اساس رنگ، شکل، اندازه و عیب‌های بیرونی محصولات می‌باشد (Magwaza et al., 2012).

پژوهش‌های زیادی در حوزه کاربرد آزمون‌های غیر مخرب ماشین بینایی، طیف‌سنجی فروسرخ (NIR)، صوت و ماشین بویایی و بینی الکترونیک در ارزیابی محصولات کشاورزی و دامی انجام شده است. نخستین سامانه ماشین بینایی که برای اندازه‌گیری رنگ مواد غذایی استفاده شد ترکیبی از دوربین دیجیتال و یک نرم افزار بود. نتایج نشان داد که به کارگیری ماشین بینایی و شبکه عصبی مصنوعی روش موفق در اندازه‌گیری و تحلیل رنگ مواد غذایی است (Yam and Papadakis, 2004). همچنین در پژوهشی برای اصلاح عملکرد دستگاه پوست‌کن شلتوک و کاهش ضایعات برنج، سامانه‌ای طراحی و ساخته شد که با استفاده از ماشین بینایی میزان شکستگی برنج در مرحله پوست تشخیص داده شده و اگر این شکستگی از میزان استاندارد بیشتر بود تنظیمات لازم روی دستگاه پوست‌کن انجام می‌شد. نتایج نشان داد که با نصب آن روی دستگاه، مناسب‌ترین شرایط کاری برای دستگاه پوست‌کن به‌صورت خودکار فراهم می‌آید (Shaker et al., 2016).

بخشی از پژوهش‌های مهمی که در حوزه ماشین بینایی انجام شده، در جدول (۱) نشان داده شده است.

**جدول ۱- کاربرد ماشین بینایی در ارزیابی کیفیت محصولات کشاورزی و دامی**

**Table 1. Application of machine vision systems in assessing the quality of plant and animal products**

| References | Application | Foodstuff |
|---|---|---|
| (Kiani and Minaei, 2016)<br>(kasali *et al.*, 2018) | Saffron quality characterization<br>Effect of the drying process on saffron petals color Features | saffron |
| (Tan *et al.*, 2000)<br>(Chen *et al.*, 2010)<br>(Jeyamkondan *et al.*, 2000) | Assessment of fresh pork color<br>Color grading of beef fat<br>Beef quality grading | meat |
| (Dowlati *et al.*, 2012) | fish-quality assessment | fish |
| (Rokunuzzaman and Jayasuriya, 2013)<br><br>(Yang, 1993) | sorting of tomatoes<br><br>Classification of apple surface features | Fruit and Vegetables |

اگرچه پارامترهایی مانند شکل، اندازه و رنگ توسط سامانه ماشین بینایی که از تصویربرداری مرئی بهره می‌گیرد به خوبی قابل اندازه گیری می‌باشد، اما با این وجود ارزیابی ترکیبات شیمیایی از جمله چربی، قند و پروتئین توسط این روش امکان پذیر نیست (Shafiee *et al.*, 2013).

از آنجا که کاربرد روش‌های طیف سنجی به ویژه روش NIR در حوزه تعیین ترکیبات شیمیایی مواد غذایی و محصولات کشاورزی موفقیت آمیز بوده است روش تصویربرداری فراطیفی یا طیف بینی تصویری، که اطلاعات طیفی و مکانی را در یک سامانه کنار هم قرار می‌دهد معرفی شده است (Du and Sun, 2004). پتانسیل کاربرد این روش، برای شناسایی و تعیین ترکیبات شیمیایی و نمایش توزیع مکانی آن‌ها به اثبات رسیده است. این سامانه امکان تعیین ترکیبات شیمیایی چند نمونه را به صورت همزمان و همچنین امکان مشاهده توزیع ترکیبات شیمیایی نمونه های مشابه را نیز فراهم نموده است (ElMasry *et al.*, 2012). این توسط پژوهشگران مختلف به منظور تشخیص عیوب میوه هایی چون سیب و خیار (ElMasry and Wold, 2008; Kim *et al.*, 2007; Xing *et al.*, 2007). تعیین پارامتر های کیفی سیب، توت فرنگی و پرتقال (Ariana and Lu, 2008; ElMasry *et al.*, 2007; Nagata *et al.*, 2006; Peng and Lu, 2008). و همچنین برای ارزیابی آبلیمو، عسل (Minaei *et al.*, 2017; Shafiee and Minaei, 2018) استفاده شده است.

پژوهش‌های زیادی نیز در حوزه ماشین بویایی و امواج فراصوت از دیگر آزمون‌های غیر مخرب، توسط محققان مختلف برای درجه‌بندی زعفران براساس عطر (Wojnowski *et al.*, 2017; kiani *et al.*, 2017) ارزیابی گوشت (Wojnowski *et al.*, 2017)، تشخیص تقلب فرمالین در شیر خام (TOHIDI *et al.*, 2017)، و همچنین در بخش امواج فراصوت، کیفیت سنجی میوه گلابی رقم شاه میوه (Dastjerdi *et al.*, 2014)، تشخیص آلودگی میکروبی در آبمیوه (TOHIDI *et al.*, 2017)، ارزیابی کیفیت آب گلابی (Saeeduddin *et al.*, 2015)، انجام شده است.

**طیف‌سنجی امپدانس الکتریکی**

روش‌های فوق هر یک معایب و مزایایی دارند که امکان استفاده از آن‌ها را در شرایط مختلف محدود می‌سازد. طیف سنجی امپدانس الکتریکی EIS روشی است برای بررسی ویژگی‌های الکتریکی مواد و سیستم‌ها با القای سیگنال الکتریکی متناوب با دامنه ثابت در فرکانس‌های مختلف و اندازه‌گیری پاسخ همان سیگنال‌ها به صورت یک تابع فرکانسی. EIS بر پایه اثر متقابل یک میدان الکتریکی خارجی می‌باشد و به‌طور گسترده برای تشخیص خواص مواد جامد کاربرد دارد (Bera, 2014; Prabakar and Rao, 2007; Santos et al., 2014). تجزیه دی‌الکتریک DEA اغلب با EIS اشتباه گرفته می‌شود. اگر چه DEA اساساً شبیه EIS است ولی اندازه‌گیری DEA معمولا در مناطق فرکانس بالا (۱۰MHz-100 GHz) برای تخمین مقدار رطوبت، بالک دانسیته و غیره ... استفاده می‌شود. محدوده فرکانسی که در EIS، تقریبا ۱۰ MHz تا ۱۰۰ Hz می‌باشد (Jha et al., 2011; McKeown et al., 2012; Trabelsi and Nelson, 2006).

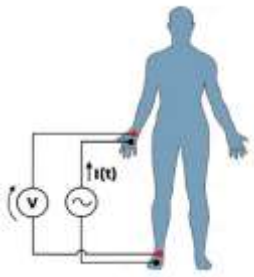
EIS به عنوان یک فناوری بسیار قدرتمند برای مشخص کردن ویژگی‌های غیر مخرب مواد در چندین حوزه مهندسی مانند مهندسی الکترونیک، مدارها، خصوصیات بیوسنسورها و همچنین قابلیت اطمینان آن‌ها به کار گرفته می‌شود (Bera, 2014; Laufer et al., 2012; McGivney et al., 2012; Santos et al., 2014).

EIS ابتدا در پژوهش‌هایی که بر روی سیستم‌های الکترو شیمیایی بود، کاربرد داشت. از سال ۱۹۲۰ میلادی شروع به استفاده از این فناوری در سیستم‌های بیولوژیکی شد. تاکنون EIS نقش مهمی در تحقیقات بیولوژیکی داشته است. بر این اساس می‌توان کابرد این روش را به سه بخش تقسیم بندی کرد(Karsten et al., 2015; Repo et al., 2014; Zhao et al., 2017):

۱- توموگرافی[۲] امپدانس الکتریکی در تصویر برداری پزشکی
۲- ارزیابی کیفیت و ایمنی در صنایع غذایی
۳- فایتو فیزیولوژی[۳] در زراعت

**توموگرافی امپدانس الکتریکی در تصویر برداری پزشکی (تجزیه و تحلیل ترکیب بدن انسان)**

طیف سنجی امپدانس الکتریکی به طور عمده به عنوان یک روش سریع، غیر مخرب و کم هزینه برای ارزیابی ساختار بدن انسان (مقدار پروتئین، چربی و آب) مورد استفاده قرار می‌گیرد. این فناوری در کاربردی خاص، به عنوان تحلیل امپدانس الکتریکی (BIA)[۴] نامیده می شود. همان گونه که در شکل (۱) نشان داده شده، دستگاه دارای چهار الکترود است که با توجه به شکل دو الکترود به دست و دو الکترود به پا وصل می شود تا جریان سینوسی میان WE[۵] و CE[۶] و افت ولتاژ میان WSE[۷] و RE[۸] را اندازه گیری کند.



**شکل۱- یک نمونه چهار الکترودی برای اندازه گیری BIA**

**Figure 1. A typical four-electrode configuration for BIA measurements**

۱- Electrical Impedance Spectroscopy
۲- Tomography
۳- Phytophysiology
۴- Bioelectrical Impedance Analysis
۵- Working Electrode
۶- Counter Electrode
۷- Working Sensing Electrode
۸- Reference Electrode

**ارزیابی کیفیت و ایمنی در صنایع غذایی و فایتو فیزیولوژی در زراعت**

در این زمینه، طیف سنجی امپدانس الکتریکی یک فناوری نوظهور، سریع و کم هزینه در سال‌های اخیر برای کنترل کیفیت محصولات غذایی می‌باشد (Scandurra et al., 2013).

**کاربرد EIS در لبنیات**

این فناوری کاربرد زیادی در تعیین و تشخیص محصولات مختلفی دارد. مبروک و پتی در سال ۲۰۰۳ میلادی رابطه‌ی بین ترکیبات شیر و هدایت الکتریکی را مورد بررسی قرار دادند (Mabrook and Petty, 2003). نمونه‌های مختلف شیر گاو (چربی کامل، بدون چربی، نیم چرب و کم لاکتوز) با یک جفت الکترود طلا (۱۵ میلیمتر،۶ میلیمتر،با فاصله ۱ میلیمتر) در محدوده فرکانسی ۵ هرتز تا ۱ مگاهرتز در دمای ۸ درجه سلسیوس بررسی شد. ولتاژ مورد استفاده، سینوسی URMS، mv700 بود. نتایج نشان داد که هدایت الکتریکی شیر اطلاعات خوبی در فرکانس‌های بالای ۱۰۰kHz، جایی که قطبی شدن الکترودها خیلی کمتر است به‌دست می‌دهد. هدایت الکتریکی شیر تحت تاثیر مقدارهای نمک و چربی قرار می‌گیرد که این تاثیر باعث افزایش یا کاهش هدایت‌پذیری می‌شود در حالی که لاکتوز اثرات قابل توجهی در هدایت الکتریکی شیر ندارد. همین پژوهشگران در سال ۲۰۰۵ میلادی از EIS برای تشخیص تقلب آب مخلوط در شیرگاو (غلظت۰ تا ۸ درصد) استفاده کردند. نتایج نشان داد که با اضافه کردن آب هدایت الکتریکی شیر تغییر می‌کند اما تغییرات بسیار وابسته به نوعی شیر بود. در آزمایش شیر بدون چربی، با اضافه کردن آب، هدایت الکتریکی به طور یکنواخت کاهش می‌یابد در حالی که شیر پرچرب و شیرخامه‌ای چنین واکنشی را نشان نمی‌دهند (Mabrook et al., 2005).

پژوهش‌های زیادی در زمینه کاربرد طیف سنجی امپدانس در محصولات لبنی مانند به دست آوردن زمان دوشیدن شیر گاو (Durante et al., 2016) و همچنین برای تعیین میزان مواد افزودنی در آب‌میوهای طبیعی (Nakonieczna et al., 2016)، فرآیند تخمیر نان (Toyoda et al., 2007) و ارزیابی کیفیت روغن پخت و پز (Khaled et al., 2014) انجام شده است.

فرایند انجماد در تولید بستنی تاثیر زیادی بر کیفیت، طعم و عملکرد محصول نهایی دارد. در دستگاه‌های فریز روش‌های کنترلی مختلف برای نظارت بر فرایند انجماد بر اساس متغیرهای دما و گرانروی محصول به کار می‌رود. پژوهشگران در این ترکیب با استفاده از EIS و با اندازه‌گیری پارامترهای الکتریکی بستنی اطلاعات کیفی آن را در طی انجماد به دست آوردند و با مقایسه با نتایج گذشته به این نتیجه رسیدند که استفاده از EIS نه تنها یک روش غیرمخرب برای بررسی کیفیت محصول است بلکه کمبودهای روش‌های دیگر هم‌چون نیاز به زمینه بندی را ندارد (Grossi et al., 2011).

**کاربرد EIS در میوه و سبزیجات**

بافت میوه‌ها و سبزیجات توسط ساختار دیواره سلولی و وضعیت غشای سلولی تعیین می‌شود. دیواره سلول‌های پارانشیم که بخش خوراکی میوه‌ها و سبزیجات را تشکیل می‌دهند، نازک اما محکم هستند. سلول‌های مجاور در بافت‌های گیاهی به وسیله لایه میانی متصل شده‌اند که عمدتاً از مواد پکتیک تشکیل می‌شوند (Van Buggenhout et al., 2009).

EIS یک روش ساده و سریع برای تخمین وضعیت فیزیولوژیک بافت‌های مختلف بیولوژیکی است. رسیدگی پرتقال (Chowdhury, Singh, et al., 2017)، موز (Chowdhury, Kanti Bera, et al., 2017)، انبه، شکل۲ (Figueiredo Neto et al., 2017)، له‌شدگی و کبودی بر اثر انبارداری مانند سیب (Greenham, 1966) و آسیب یخزدگی غده‌های سیب‌زمینی (Zhang et al., 1993) از مواردی است که از این فناوری استفاده شده و نتایج مهمی به دست آمده که به بعضی از این موارد در ادامه اشاره می‌شود. در چنین مطالعاتی، اکثرا از یک مدار معادل الکتریکی برای مشخص کردن طیف اندازه‌گیری شده مواد استفاده می‌شود. اگر چه چند مدار معادل براساس ساختار سلولی برای بافت‌های بیولوژیک پیشنهاد شده است (Wu et al., 2008) اما مدل پیشنهاد شدی هایدن و همکاران در سال ۱۹۶۹ میلادی، ظرفیت و مقاومت غشای سلولی و مقاومت مایع بیرون سلولی و درون سلولی را در نظر می‌گیرد و به عنوان یک مدل مناسب برای سلول‌های مواد بیولوژیک شناخته شده است (H. Ando et al., 2012; Y. Ando et al., 2014; Wu et al., 2008).

**شکل۲ – موقعیت الکترودها برای تعیین ویژگی‌های الکتریکی انبه**

**Figure 2. Electrodes disposition for electrical characterization determination of mango**

یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم (ماشین‌های کشاورزی) و مکانیزاسیون ایران

با اصلاح مدل هایدن می‌توان برای توصیف ویژگی‌های امپدانس بافت‌های بیولوژیک ازجمله تشخیص آسیب‌های غشایی سلول‌های سبزیجات و میوه در جهت فرآوری آن‌ها به کار برد (H. Ando et al., 2012; Y. Ando et al., 2014).

در میوه‌ها و سبزیجات که باعث یخ زدگی شده‌اند، شکل بلورهای بزرگ یخ می‌تواند باعث جداسازی سلول و در نهایت پارگی آن شود. در آخر میوه‌ها و سبزیجات یخ زده نسبت به مواد خام و اولیه آن‌ها پایداری کمتری خواهند داشت. براساس این مطالب می‌توان گفت که آسیب به غشای سلولی یکی از مهم‌ترین عوامل موثر بافت میوه و سبزیجات می‌باشد(Paciulli et al., 2015) .

در پژوهشی که توسط آندو و همکارانش انجام گرفت، خشک کردن هوا به عنوان یک روش پیش‌گیری از انجماد هویج به کار گرفته شد. در این تحقیق آسیب غشای سلولی با استفاده از بررسی EIS در حین خشک کردن و پس از آن، در شرایط مختلف دمایی و مقدار آب حذف شده، اندازه گیری شد. نتایج نشان داد که غشای سلولی هویج در حین خشک کردن و پس از آن در دمای بالا آسیب دیده و با دمای کمتر این پدیده رخ نمی‌دهد.

داده‌های امپدانس نمونه‌های یخ‌زده و منجمد نشان می دهد که خشک کردن در هر شرایط قبل از انجماد نمی‌تواند از آسیب به غشای سلولی در هنگام انجماد جلوگیری کند. آسیب غشای سلولی در طی انجماد رخ می‌دهد و نه در زمانی که آب شروع به کاهش یافتن کند (Y. Ando et al., 2016). ساختار سلولی بر کیفیت محصول کشاورزی به ویژه خواص فیزیکی مانند بافت و ویژگی‌های مکانیکی در طول ذخیره‌سازی تاثیر می‌گذارد. فناوری‌های زیادی برای بررسی ساختار محصولات کشاورزی در طول ذخیره سازی مورد مطالعه قرار گرفته است.

واتانبه و همکاران از EIS به عنوان شاخص تغییرات خواص الکتریکی در بافت سلولی برای بررسی غشای سلولی سیب بهره بردند. نتایج نشان داد که اگر غشای سلولی دچار آسیب شود، خواص الکتریکی آن کاهش می‌یابد (Watanabe et al., 2018).

بعد از آسیب لهشدگی یکی دیگر از مواردی که باعث کاهش صادرات محصولات کشاورزی می‌شود، رسیدگی بیش از حد آن‌ها می‌باشد. رسیدگی میوه‌ها با تغییرات زیادی در ساختار فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی همراه است. در سال ۲۰۱۷ میلاد، فیگوریدو و همکاران از طریق طیف سنجی امپدانس میوه انبه زمان رسیدگی آن را بررسی کرده و نتایجی که به دست آوردند بیانگر مفید بودن این روش به دلیل غیر مخرب بودن آن در تشخیص رسیدگی انبه بود (Figueiredo Neto et al., 2017). در تحلیل دیگر چاودی و همکاران در سال ۲۰۱۷ میلادی ازEIS برای تشخیص رسیدگی موز استفاده کردند که نتایج نشان می‌دهد با افزایش رسیدگی، میزان امپدانس و فاز افزایش می‌یابد (Chowdhury, Kanti Bera, et al., 2017).

بررسی های زیادی در مورد کاربرد EIS در محصولات کشاورزی، از جمله: ارزیابی برگ‌های چای (Mizukami et al., 2006)، در رسیدگی آواکادو (Bean et al., 1960) و بررسی مغز میوه (Vozáry and Benko, 2010) و ارزیابی دقیق کیفیت گوشت و ماهی (Zhao et al., 2017) انجام شده است. جدول ۲ پژوهش‌هایی را که در حوزه طیف‌سنجی امپدانس الکتریکی در بخش‌های مختلف انجام شده است را نشان می‌دهد.

**جدول ۲- کاربرد طیف‌سنجی امپدانس الکتریکی در ارزیابی کیفیت محصولات کشاورزی و دامی**

**Table 1. Application of Electrical Impedance Spectroscopy in assessing the quality of agricultural and livestock products**

| References | Application | Foodstuff |
|---|---|---|
| (Nguyen and Nguyen, 2015) | Rapid and non-invasive evaluation of pork meat quality during storage | meat |
| (Guermazi *et al.*, 2014) | Investigation of long time beef and veal meat behavior | |
| (T.-H. Chen *et al.*, 2017) | Classification of chicken | |
| (Y. Yang *et al.*, 2013) | muscle with different freeze-thaw cycles | |
| (Oliver *et al.*, 2001) | Moisture content prediction of porcine meat | |
| (Altmann and Pliquett, 2006) | ham meat quality selection<br>Prediction of intramuscular fat | |
| (Curić *et al.*, 2017) | Salt and moisture content determination of fish | fish |
| (Dean *et al.*, 2008) | study of biological tissues | |
| (KITAMURA *et al.*, 2000) | yogurt processing | dairy |
| (Durante *et al.*, 2016) | real-time detection of bovine milk adulteration y | |
| (Fuentes *et al.*, 2014) | determination of the effect of temperature on potato microstructure and texture | Fruit and Vegetables |
| (Watanabe *et al.*, 2017) | Effect of short time heating on the mechanical fracture of spinach | |
| (Kuson and Terdwongworakul, 2013) | Minimally-destructive evaluation of durian maturity | |
| (A Chowdhury *et al.*, 2015) | Studying the electrical impedance variations in banana ripening | |
| (Nakonieczna *et al.*, 2016) | detecting artificial chemical additives in liquid food products | drinks |

مزیت این روش نسبت به روش‌های قدیمی غیر مخرب در ارزیابی کیفیت گوشت مانند طیف سنجی فروسرخ (Barbin et al., 2015; De Marchi et al., 2017)، تصویر برداری فراطیفی (Ma et al., 2016) و یا فناوری بینی الکترونیک (Wang et al., 2016)، بیشتر است. هر یک از روش‌های قدیمی مزایای خود را دارند که در جدول۳ نیز اشاره شده است.

**جدول۳- مقایسه چهار فناوری جدید (Zhao et al., 2017)**

**Table 3. Comparison of four new technologies**

| Technologies | Fast | Nondestructive | Easily implemented | Inexpensive |
|---|---|---|---|---|
| Near infrared spectroscopy | * | * | * | - |
| Hyperspectral image | * | * | * | - |
| Electronic nose technology | * | * | - | - |
| EIS | * | * | * | * |

همان گونه که مشاهده می‌شود، طیف سنجی امپدانس الکتریکی نسبت به روش‌های دیگربرتری دارد. یعنی افزون بر غیر مخرب و سریع بودن، ارزان‌تر بوده و دارای قابلیت اجرای مناسب است.

## ۲- نتیجه‌گیری

از بهترین روش‌های غیر مخرب، روش‌هایی هستند که بر مبنای پردازش تصویر کار می‌کنند. این فناوری‌ها در حالی که قابلیت‌های زیاد در صنایع جداسازی، بسته‌بندی و درجه‌بندی محصولات کشاورزی و دامی دارند ولی به دلیل تصویربرداری سطحی از محصول، در اندازه گیری خصوصیات کیفی (درونی) محصولات با محدودیت‌هایی رو به رو هستند. در حالیکه طیف سنجی فروسرخ ، در این زمینه برتری نسبی به آزمون‌های تعیین کیفیت درونی دیگر داشته و مطالعات زیادی در جهان برای کمک به صنعتی شدن این فناوری انجام گرفته است ولی یکی از مشکل‌هایی که دارد، گران و پیچیده بودن آن است. این کاستی، عمده دلیل عدم پیشرفت فناوری‌هایی همچون فراصوت، تحلیل دی‌الکتریک، ماشین بویایی و NIR می‌باشد. طیف سنجی امپدانس الکتریکی (EIS) روش امید بخشی است که در سال‌های اخیر برای مشخص کردن ویژگی‌های محصولات غذایی به کار برده می‌شود. EIS شامل اعمال یک ولتاژ آزمایشی سینوسی در طیف وسیعی از فرکانس‌ها به نمونه مورد نظر و اندازه‌گیری رفتار الکتریکی آن است. این فناوری جدید، سریع، غیر مخرب، ارزان قیمت و قابل استفاده در صنعت می‌باشد. از قابلیت‌های مهم دیگر این روش عدم نیاز به افراد ماهر است که حاکی از راحت‌تر بودن انجام آزمایش نسبت به آزمون‌های دیگر می‌باشد.

## ۳- مراجع

**Altmann, M. and Pliquett, U.** 2006. Prediction of intramuscular fat by impedance spectroscopy. *Meat science*, **72**(4): 666-671.

**Ando, H., Kajiwara, K., Oshita, S. and Suzuki, T.** 2012. The effect of osmotic dehydrofreezing on the role of the cell membrane in carrot texture softening after freeze-thawing. *Journal of Food Engineering*, **108**(3): 473-479.

**Ando, Y., Maeda, Y., Mizutani, K., Wakatsuki, N., Hagiwara, S. and Nabetani, H.** 2016. Effect of air-dehydration pretreatment before freezing on the electrical impedance characteristics and texture of carrots. *Journal of Food Engineering*, **169**: 114-121.

**Ando, Y., Mizutani, K. and Wakatsuki, N.** 2014. Electrical impedance analysis of potato tissues during drying. *Journal of Food Engineering*, **121**: 24-31.

**Ariana, D.P. and Lu, R.** 2008. Quality evaluation of pickling cucumbers using hyperspectral reflectance and transmittance imaging: Part I. Development of a prototype. *Sensing and Instrumentation for Food Quality and Safety*, **2**(3): 144-151.

**Barbin, D.F., Kaminishikawahara ,C.M., Soares, A.L., Mizubuti, I.Y., Grespan, M., Shimokomaki, M. and Hirooka, E.Y.** 2015. Prediction of chicken quality attributes by near infrared spectroscopy. *Food chemistry*, **168**: 554-560.

**Bean, R.C., Rasor, J.P. and Porter, G.G.** 1960. Changes in electrical characteristics of avocados during ripening. *California Avocado Society, Yearbook*, **44**: 75-78.

**Bera, T.K.** 2014. Bioelectrical impedance methods for noninvasive health monitoring: a review. *Journal of medical engineering*, **2014**.

**Bhargava, A. and Bansal ,A.** 2018. Fruits and Vegetables Quality Evaluation Using Computer Vision: A Review. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*.

**Chen, K., Sun, X., Qin, C. and Tang, X.** 2010. Color grading of beef fat by using computer vision and support vector machine. *Computers and Electronics in Agriculture*, **70**(1): 27-32.

**Chen, T.-H., Zhu, Y.-P., Han, M.-Y., Wang, P., Wei, R., Xu, X.-L. and Zhou, G.-H.** 2017. Classification of chicken muscle with different freeze–thaw cycles using impedance and physicochemical properties. *Journal of Food Engineering*, **196**: 94-100.

**Chowdhury, A., Bera, T., Ghoshal, D. and Chakraborty, B.** 2015. *Studying the electrical impedance variations in banana ripening using electrical impedance spectroscopy (EIS).* Paper presented at the Computer, Communication, Control and Information Technology (C3IT), 2015 Third International Conference on.

**Chowdhury, A., Kanti Bera, T., Ghoshal, D. and Chakraborty, B.** 2017. Electrical impedance variations in banana ripening: an analytical study with electrical impedance spectroscopy. *Journal of Food Process Engineering*, **40**.(۲)

**Chowdhury, A., Singh, P., Bera, T.K., Ghoshal, D. and Chakraborty, B.** 2017. Electrical impedance spectroscopic study of mandarin orange during ripening. *Journal of Food Measurement and Characterization*, **11**(4): 1654-1664.

**Ćurić, T., Marušić Radovčić, N., Janči, T., Lacković, I. and Vidaček, S.** 2017. Salt and moisture content determination of fish by bioelectrical impedance and a needle-type multi-electrode array. *International Journal of Food Properties*, **20**(11): 2477-2486.

**Dastjerdi, R.M., Minaei, S. and Khoshtaghaza, M.** 2014. Quality Analysis of Pear Fruit of Shah Miveh variety Using Nondestructive Ultrasonic Technique. *Journal of Agricultural Machinery*, **4**(2): 324-334.

**De Marchi, M., Manuelian, C.L., Ton, S., Manfrin, D., Meneghesso, M., Cassandro, M. and Penasa, M.** 2017. Prediction of sodium content in commercial processed meat products using near infrared spectroscopy. *Meat science*, **125**: 61-65.

**Dean, D., Ramanathan ,T., Machado, D. and Sundararajan, R.** 2008. Electrical impedance spectroscopy study of biological tissues. *Journal of electrostatics*, **66**(3-4): 165-177.

**Dowlati, M., de la Guardia, M. and Mohtasebi, S.S.** 2012. Application of machine-vision techniques to fish-quality assessment. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, **40**: 168-179.

**Du, C.-J. and Sun, D.-W.** 2004. Recent developments in the applications of image processing techniques for food quality evaluation. *Trends in food science & technology*, **15**(5): 230-249.

**Durante, G., Becari, W., Lima, F.A. and Peres, H.E.** 2016. Electrical impedance sensor for real-time detection of bovine milk adulteration. *IEEE Sensors Journal*, **16**(4): 861-865.

**ElMasry, G., Kamruzzaman, M., Sun, D.-W. and Allen, P.** 2012. Principles and applications of hyperspectral imaging in quality evaluation of agro-food products: a review. *Critical reviews in food science and nutrition*, **52**(11): 999-1023.

**ElMasry, G., Wang, N., ElSayed, A. and Ngadi, M.** 2007. Hyperspectral imaging for nondestructive determination of some quality attributes for strawberry. *Journal of Food Engineering*, **81**(1): 98-107.

**ElMasry, G. and Wold, J.P.** 2008. High-speed assessment of fat and water content distribution in fish fillets using online imaging spectroscopy. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **56**(17): 7672-7677.

**Fengxia, S., Yuwen, C., Zhanming, Z. and Yifeng, Y.** 2004. Determination of beer color using image analysis. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, **62**(4): 163-167.

**FERNÁNDEZ-VÁZQUEZ, R., Stinco, C.M., MELÉNDEZ-MARTÍNEZ, A.J., Heredia, F.J. and Vicario, I.M.** 2011. VISUAL AND INSTRUMENTAL EVALUATION OF ORANGE JUICE COLOR: A CONSUMERS'PREFERENCE STUDY. *Journal of Sensory Studies*, **26**(6): 436-444.

**Figueiredo Neto, A., Cárdenas Olivier, N., Rabelo Cordeiro, E. and Pequeno de Oliveira, H.** 2017. Determination of mango ripening degree by electrical impedance spectroscopy. *Computers and Electronics in Agriculture*, **143**: 222-226.

**Fuentes, A., Vázquez-Gutiérrez, J.L., Pérez-Gago, M.B., Vonasek, E., Nitin ,N. and Barrett, D.M.** 2014. Application of nondestructive impedance spectroscopy to determination of the effect of temperature on potato microstructure and texture. *Journal of Food Engineering*, **133**: 16-22.

**Greenham, C.** 1966. Bruise and pressure injury in apple fruits. *Journal of Experimental Botany*, **17**(2): 404-409.

**Grossi, M., Lazzarini, R., Lanzoni, M. and Riccò, B.** 2011. A novel technique to control ice cream freezing by electrical characteristics analysis. *Journal of Food Engineering*, **106**(4): 347-354.

**Guermazi, M., Kanoun, O. and Derbel, N.** 2014. Investigation of long time beef and veal meat behavior by bioimpedance spectroscopy for meat monitoring. *IEEE Sensors Journal*, **14**(10): 3624-3630.

**Jamshidi, B., Minaei, S., Mohajerani, E. and Ghassemian, H.** 20 .۱٤Effect of Spectral Pre-Processing Methods on Non-Destructive Quality Assessment of Oranges Using NIRS. *Journal of Agricultural Engineering Research*, **15**(2): 27-44.

**Jeyamkondan, S., Ray, N., Kranzler, G.A. and Biju, N.** 2000. *Beef quality grading using machine vision.* Paper presented at the Biological Quality and Precision Agriculture II.

**Jha, S.N., Narsaiah, K., Basediya, A., Sharma, R., Jaiswal, P., Kumar, R. and Bhardwaj, R.** 2011. Measurement techniques and application of electrical properties for nondestructive quality evaluation of foods—a review. *Journal of food science and technology*, **48**(4): 387-411.

**Karsten, J., Stueber, T., Voigt, N., Teschner, E. and Heinze, H.** 2015. Influence of different electrode belt positions on electrical impedance tomography imaging of regional ventilation: a prospective observational study. *Critical Care*, **20**(1): 3.

**kasali, s., Minaei, S. and ayyari, m.** 2018. Effect of the drying process on saffron petals color Features using the vision machine. *Saffron agronomy and technology*.- :

**Khaled, A., Aziz, S. and Rokhani, F.** 2014. Development and evaluation of an impedance spectroscopy sensor to assess cooking oil quality. *International Journal of Environmental Science and Development*, **5**(3): 299.

**Kiani, S. and Minaei, S.** 2016. Potential application of machine vision technology to saffron (Crocus sativus L.) quality characterization. *Food chemistry*, **212**: 392-394.

**Kim, M.S., Chen, Y.-R., Cho, B.-K., Chao, K., Yang, C.-C., Lefcourt, A.M. and Chan, D.** 2007. Hyperspectral reflectance and fluorescence line-scan imaging for online defect and fecal contamination inspection of apples. *Sensing and Instrumentation for Food Quality and Safety*, **1**(3): 151.

**KITAMURA, Y., TOYODA, K. and PARK, B.** 2000. Electric impedance spectroscopy for yogurt processing. *Food science and technology research*, **6**(4): 310-313.

**Kuson, P. and Terdwongworakul, A.** 2013. Minimally-destructive evaluation of durian maturity based on electrical impedance measurement. *Journal of Food Engineering*, **116**(1): 50-56.

**Laufer, S** ,.**Solomon, S.B. and Rubinsky, B.** 2012. Tissue characterization using electrical impedance spectroscopy data: a linear algebra approach. *Physiological measurement*, **33**(6): 997.

**Ma, J., Sun, D.-W. and Pu, H.** 2016. Spectral absorption index in hyperspectral image analysis for predicting moisture contents in pork longissimus dorsi muscles. *Food chemistry*, **197**: 848-854.

**Mabrook, M., Darbyshire, A. and Petty, M.** 2005. Quality control of dairy products using single frequency admittance measurements. *Measurement Science and Technology*, **17**(2): 275.

**Mabrook, M. and Petty, M.** 2003. Effect of composition on the electrical conductance of milk. *Journal of Food Engineering*, **60**(3): 321-325.

**Magwaza, L.S., Opara, U.L., Nieuwoudt, H., Cronje, P.J., Saeys, W. and Nicolaï, B** .۲۰۱۲ .NIR spectroscopy applications for internal and external quality analysis of citrus fruit—a review. *Food and Bioprocess Technology*, **5**(2): 425-444.

**McGivney, D., Calvetti, D. and Somersalo, E.** 2012. Quantitative imaging with electrical impedance spectroscopy. *Physics in Medicine & Biology*, **57**(22): 7289.

**McKeown, M.S., Trabelsi, S., Tollner, E.W. and Nelson, S.O.** 2012. Dielectric spectroscopy measurements for moisture prediction in Vidalia onions. *Journal of Food Engineering*, **111**(3): 505-510.

**Minaei, S** ,.**Shafiee, S., Polder, G., Moghadam-Charkari, N., van Ruth, S., Barzegar, M., Zahiri, J., Alewijn, M. and Kuś, P.M.** 2017. VIS/NIR imaging application for honey floral origin determination. *Infrared Physics & Technology*.

**Mizukami, Y., Sawai, Y. and Yamaguchi, Y.** 2006. Moisture content measurement of tea leaves by electrical impedance and capacitance. *biosystems engineering*, **93**(3): 293-299.

**Nagata, M., Tallada, J.G. and Kobayashi, T.** 2006. Bruise detection using NIR hyperspectral imaging for strawberry (Fragaria× ananassa Duch.). *Environmental Control in Biology*, **44**(2): 133-142.

**Nakonieczna, A., Paszkowski, B., Wilczek, A., Szyplowska, A. and Skierucha, W.** 2016. Electrical impedance measurements for detecting artificial chemical additives in liquid food products. *Food Control*, **66**: 116-129.

**Nguyen, H.B. and Nguyen, L.T.** 2015. Rapid and non-invasive evaluation of pork meat quality during storage via impedance measurement. *International Journal of Food Science & Technology*, **50**(8): 1718-1725.

**Oliveira, A. and Balaban, M.** 2006. Comparison of a colorimeter with a machine vision system in measuring color of Gulf of Mexico sturgeon fillets. *Applied engineering in agriculture*, **22**(4): 583-587.

**Oliver, M.À., Gobantes, I., Arnau, J., Elvira, J., Riu, P., Grèbol, N.s .and Monfort, J.M.** 2001. Evaluation of the electrical impedance spectroscopy (EIS) equipment for ham meat quality selection. *Meat science*, **58**(3): 305-312.

**Paciulli, M., Ganino, T., Pellegrini, N., Rinaldi, M., Zaupa, M., Fabbri, A. and Chiavaro, E.** 2015. Impact of the industrial freezing process on selected vegetables—Part I. Structure, texture and antioxidant capacity. *Food Research International*, **74**: 329-337.

**Peng, Y. and Lu, R.** 2008. Analysis of spatially resolved hyperspectral scattering images for assessing apple fruit firmness and soluble solids content. *Postharvest Biology and Technology*, **48**(1): 52-62.

**Prabakar, K. and Rao, S.M.** 2007. Complex impedance spectroscopy studies on fatigued soft and hard PZT ceramics. *Journal of alloys and compounds*, **437**.۳۱۰-۳۰۲ :(۲-۱)

**Repo, T., Korhonen, A., Laukkanen, M., Lehto, T. and Silvennoinen, R.** 2014. Detecting mycorrhizal colonisation in Scots pine roots using electrical impedance spectra. *biosystems engineering*, **121**: 139-149.

**Rokunuzzaman, M. and Jayasuriya, H** .۲۰۱۳ .Development of a low cost machine vision system for sorting of tomatoes. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, **15**.(۱)

**Saeeduddin, M., Abid, M., Jabbar, S., Wu, T., Hashim, M.M., Awad, F.N., Hu, B., Lei, S. and Zeng, X.** 2015. Quality assessment of pear juice under ultrasound and commercial pasteurization processing conditions. *LWT-Food Science and Technology*, **64**(1): 452-458.

**Santos, J., Janeiro, F.M. and Ramos, P.M.** 2014. Impedance frequency response measurements with multiharmonic stimulus and estimation algorithms in embedded systems. *Measurement*, **48**: 173-182.

**Scandurra, G., Tripodi, G. and Verzera, A.** 2013. Impedance spectroscopy for rapid determination of honey floral origin. *Journal of Food Engineering*, **119**(4): 738-743.

**Shafiee ,S. and Minaei, S.** 2018. Combined data mining/NIR spectroscopy for purity assessment of lime juice. *Infrared Physics & Technology*, **91**: 193-199.

**Shafiee, S., Minaei, S., Moghaddam-Charkari, N., Ghasemi-Varnamkhasti, M. and Barzegar, M.** 2013. Potential application of machine vision to honey characterization. *Trends in food science & technology*, **30**(2): 174-177.

**Shaker, M., Minaei, S., Khoshtaghaza, M.H., Banakar, A. and Jafari, A.** 2016. Use of Machine Vision to Improve Performance of and Reduce Loss from a Paddy Husker. *Engineering Research in Agricultural Mechanization and Systems*, **16**(65): 47-64.

**Tan, F., Morgan, M., Ludas, L., Forrest, J. and Gerrard, D.** 2000. Assessment of fresh pork color with color machine vision. *Journal of animal science*, **78**(12): 3078.۳۰۸۵-

**TOHIDI, M., GHASEMI, V.M., GHAFARINIA, V., MOHTASEBI, S.S. and BONYADIAN, M.** 2017. Fabrication and development of a machine olfaction system combined with pattern recognition techniques for detecting formalin adulteration in raw milk.

**Trabelsi, S .and Nelson, S.O.** 2006. Nondestructive sensing of bulk density and moisture content in shelled peanuts from microwave permittivity measurements. *Food Control*, **17**(4): 304-311.

**Van Buggenhout, S., Sila, D., Duvetter, T., Van Loey, A. and Hendrickx, M.** 2009 .Pectins in processed fruits and vegetables: Part III—Texture engineering. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, **8**(2): 105-117.

**Vozáry, E. and Benko, P.** 2010. *Non-destructive determination of impedance spectrum of fruit flesh under the skin.* Paper presented at the Journal of Physics: Conference Series.

**Wang, Y., Jia, W., Pan, L. and Ren, D.** 2016. Application of electronic nose technology in the rapid assessment of meat quality. *Journal of Food Safety and Quality*, **7**(2): 419-424.

**Watanabe, T ,.Ando, Y., Orikasa, T., Kasai, S. and Shiina, T.** 2018. Electrical impedance estimation for apple fruit tissues during storage using Cole–Cole plots. *Journal of Food Engineering*, **221**: 29-34.

**Watanabe, T., Ando, Y., Orikasa, T., Shiina, T. and Kohyama, K .**۲۰۱۷.Effect of short time heating on the mechanical fracture and electrical impedance properties of spinach (Spinacia oleracea L.). *Journal of Food Engineering*, **194**: 9-14.

**Wojnowski, W., Majchrzak, T., Dymerski, T., Gębicki, J. and Namieśnik, J.** 2017. Electronic noses: Powerful tools in meat quality assessment. *Meat science*, **131**: 119-131.

**Wu, L., Ogawa, Y. and Tagawa, A.** 2008. Electrical impedance spectroscopy analysis of eggplant pulp and effects of drying and freezing–thawing treatments on its impedance characteristics. *Journal of Food Engineering*, **87**(2): 274-280.

**Xing, J., Saeys, W. and De Baerdemaeker, J.** 2007. Combination of chemometric tools and image processing for bruise detection on apples. *Computers and Electronics in Agriculture*, **56**(1): 1-13.

**Yam, K.L. and Papadakis, S.E.** 2004. A simple digital imaging method for measuring and analyzing color of food surfaces. *Journal of Food Engineering*, **61**(1): 137-142.

**Yang, Q.** 1993. Classification of apple surface features using machine vision and neural networks. *Computers and Electronics in Agriculture*, **9**(1): 1-12.

**Yang, Y., Wang, Z.-Y., Ding, Q., Huang, L., Wang, C. and Zhu, D.-Z.** 2013. Moisture content prediction of porcine meat by bioelectrical impedance spectroscopy. *Mathematical and Computer Modelling*, **58**(3-4): 819-825.

**Yorulmaz, O., Pearson, T.C. and Çetin, A.E.** 2012. Detection of fungal damaged popcorn using image property covariance features. *Computers and Electronics in Agriculture*, **84**: 47-52.

**Zapotoczny, P.** 2012. Application of image texture analysis for varietal classification of barley. *International Agrophysics*, **26**(1): 81-90.

**Zhang, M., Willison, J., Cox, M. and Hall, S.** 1993. Measurement of heat injury in plant tissue by using electrical impedance analysis. *Canadian journal of botany*, **71**(12.۱۶۱۱-۱۶۰۵ :(

**Zhao, X., Zhuang, H., Yoon, S.-C., Dong, Y., Wang, W. and Zhao, W.** 2017. Electrical Impedance Spectroscopy for Quality Assessment of Meat and Fish: A Review on Basic Principles, Measurement Methods, and Recent Advances. *Journal of Food Quality*, **2017**: 1-16.

**Kiani, S., Minaei, S., & Ghasemi-Varnamkhasti, M.** (2017). Integration of computer vision and electronic nose as non-destructive systems for saffron adulteration detection. Computers and Electronics in Agriculture, 141, 46-53.