

Journal Pre-proofs

A Review on the Application of Electrical Impedance Spectroscopy in Quality and Freshness Assessment of Seafood Products

Marzieh Monirifar, Seyed Vali Hosseini, Gholamreza Shah Hosseini

DOI: [https://doi.org/ 10.22104/ift.2026.8387.2311](https://doi.org/10.22104/ift.2026.8387.2311)

To appear in: Innovative Food Technologies (IFT)

Received Date: 2 July 2026

Revised Date: 27 September 2026

Accepted Date: 29 September 2026



Please cite this article as: Marzieh Monirifar, Seyed Vali Hosseini, Gholamreza Shah Hosseini, A Review on the Application of Electrical Impedance Spectroscopy in Quality and Freshness Assessment of Seafood Products, *Innovative Food Technologies* (2026), doi: [https://doi.org/ 10.22104/ift.2026.8387.2311](https://doi.org/10.22104/ift.2026.8387.2311)

This is a PDF file of an article that has undergone enhancements after acceptance, such as the addition of a cover page and metadata, and formatting for readability, but it is not yet the definitive version of record. This version will undergo additional copyediting, typesetting and review before it is published in its final form, but we are providing this version to give early visibility of the article. Please note that, during the production process, errors may be discovered which could affect the content, and all legal disclaimers that apply to the journal pertain.

© 2026 The Author(s). Published by iroast.org.

مروری بر کاربرد طیف‌سنجی امپدانس الکتریکی در ارزیابی کیفیت و تازگی فرآورده‌های آبزیان

مرضیه منیری فر^۱، سید ولی حسینی^۲، غلامرضا شاه حسینی^۳

^۱ کارشناسی ارشد فرآوری محصولات شیلاتی، گروه شیلات، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

^{۲*} دانشیار، گروه شیلات، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

^۳ دانشیار، پژوهشکده کشاورزی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، کرج، ایران

چکیده

فرآورده‌های آبزیان با وجود ارزش غذایی بالا، بسیار فسادپذیرند و ارزیابی سریع و غیرمخرب کیفیت و تازگی آنها یکی از نیازهای کلیدی در زنجیره تأمین به شمار می‌رود. روش‌های رایج شیمیایی و میکروبی، اغلب زمان‌بر و مخرب بوده و قابل اجرا در خط تولید نیستند. طیف‌سنجی امپدانس الکتریکی (Electrical impedance spectroscopy) به عنوان یک روش غیرمخرب، سریع و کم‌هزینه، با اندازه‌گیری پاسخ الکتریکی بافت در بازه‌ای از فرکانس‌ها، امکان سنجش تغییرات ساختاری و بیوشیمیایی بافت لاشه را فراهم می‌کند. هدف از این مقاله، مرور و تحلیل کاربردهای EIS در ارزیابی تازگی، فساد و کیفیت محصولات آبی و بررسی عوامل مؤثر بر قابلیت استفاده صنعتی این فناوری است. در این راستا، مطالعات انجام‌شده درباره اصول اندازه‌گیری، اثر فرکانس، نقش آرایش الکترودها، مدل‌های مکانیزمی، روش‌های استخراج ویژگی و مدل‌سازی داده‌های امپدانس بررسی شدند. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که پارامترهایی مانند دامنه امپدانس، زاویه فاز، ویژگی‌های استخراج‌شده از شکل طیف و ترکیب آن‌ها با روش‌های کمومتریک و یادگیری ماشین، قابلیت مناسبی برای ارتباط با شاخص‌های مرجع کیفیت مانند K-value، TVB-N، شمارش میکروبی و ارزیابی حسی دارند. همچنین، EIS در پایش تغییرات کیفیت طی نگهداری سرد و تفکیک مراحل مختلف فساد عملکرد قابل قبولی نشان داده، با وجود این مزایا، عواملی مانند وابستگی شدید به شرایط اندازه‌گیری، نوع و محل تماس الکترود، دما، ناهمگنی بافت و نبود پروتکل‌های استاندارد، همچنان از موانع اصلی توسعه کاربرد صنعتی این فناوری محسوب می‌شوند. بر اساس بررسی انجام‌شده، آینده کاربرد این روش در صنعت آبزیان به توسعه حسگرهای قابل حمل، استانداردسازی روش‌های اندازه‌گیری وابسته خواهد بود. بنابراین، EIS را می‌توان به عنوان یک فناوری مکمل و امیدوارکننده برای پایش سریع و غیرمخرب کیفیت محصولات شیلاتی در کنار سایر روش‌های ارزیابی موجود در نظر گرفت.

واژه‌های کلیدی: ارزیابی کیفیت فرآورده‌های شیلاتی، پایش زنجیره سرد، شاخص‌های فساد، طیف‌سنجی امپدانس الکتریکی.

۱. مقدمه

محصولات شیلاتی در سراسر جهان جایگاه ویژه‌ای داشته و به سبب دارا بودن ترکیبات مغذی همچون پروتئین و اسیدهای چرب امگا-۳ و فواید گوناگون، نقشی کلیدی در رژیم غذایی متعادل دارند (Khalili Tilami & Sampels, 2018; Skendrović et al., 2026). با این حال، این گروه از مواد غذایی بسیار فسادپذیر هستند و به سرعت دچار تغییرات نامطلوب بو و طعم و فرآیندهای تخریبی می‌شوند؛ این ویژگی ارزیابی دقیق و به موقع کیفیت و تازگی محصولات شیلاتی را به یک نیاز کلیدی در زنجیره تأمین و کنترل کیفیت تبدیل می‌کند (Arumugam et al., 2026; Don et al., 2025; Franceschelli et al., 2021). برای کاهش سرعت فساد و افزایش ماندگاری فرآورده‌های آبزیان، راهکارهای مختلفی مانند نگهداری سرد، استفاده از ترکیبات طبیعی، پوشش‌های خوراکی، پرتودهی و ترکیب این روش‌ها بررسی شده‌اند (Nahvi et al., 2025; Hosseini et al., 2020; Rezaeeian et al., 2018; Shahhosseini et al., 2018; Moini et al., 2009). با وجود نقش این روش‌ها در کنترل برخی عوامل فساد، ارزیابی اثربخشی آن‌ها

*نویسنده مسئول: hosseinisv@ut.ac.ir

و تعیین وضعیت واقعی تازگی محصول به روش‌های اندازه‌گیری دقیق و قابل‌اعتماد نیاز دارد. آزمون‌های حسی، شیمیایی و میکروبی متداول، اطلاعات ارزشمندی درباره کیفیت آبیان فراهم می‌کنند؛ اما برخی از آن‌ها زمان‌بر و مخرب‌اند، به آماده‌سازی نمونه نیاز دارند (Caicedo-Eraso et al., 2020; Kumaravel et al., 2025; Kundu et al., 2026).

تازگی یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های تعیین کیفیت ماهی است و معمولاً با استفاده از شاخص‌هایی مانند ارزیابی حسی، شمارش میکروبی، نیتروژن بازی فرار کل (TVB-N) ارزیابی می‌شود (Cheng et al., 2015; Wu et al., 2021). برای نمونه، از شاخص K-value بر پایه تجزیه ATP، برای تعیین سطح تازگی و کاربردهای مختلف استفاده شده است (Ocaño-Higuera et al., 2011; Shinohara et al., 2026). به‌طوری‌که ماهی با K-value حدود ۲۰ تا ۴۰ درصد برای پخت مناسب دانسته شده و مقادیر ≥ 60 درصد برای برخی کاربردهای فرآوری تجاری ذکر شده است. با این حال، روش‌های مبتنی بر K-value و بسیاری از آزمون‌های شیمیایی و میکروبی متداول، غالباً با محدودیت‌هایی مثل پیچیدگی مراحل انجام آنالیز و نمونه‌برداری مخرب همراه هستند (Sofos et al., 2012; Yuan et al., 2018) و در بسیاری از کاربردهای صنعتی و کارخانه‌ها، قادر به پایش سریع، کم‌هزینه و قابل‌استقرار در خط تولید نیستند. به همین دلیل، توسعه فناوری‌های سریع، غیرمخرب و قابل پیاده‌سازی به‌عنوان یک مسیر مهم در ارزیابی کیفیت مواد غذایی مطرح شده است (El-Mesery et al., 2019; J. Sun et al., 2020; Wang et al., 2025).

طیف‌سنجی امپدانس الکتریکی^۴ یکی از روش‌های غیرمخرب بوده که در این روش، پاسخ الکتریکی بافت در برابر یک سیگنال متناوب و در گستره‌ای از فرکانس‌ها اندازه‌گیری می‌شود. پاسخ امپدانسی بافت به ویژگی‌هایی مانند غشای سلولی، توزیع آب و یون‌ها، ساختار عضله و تغییرات ایجادشده در جریان فساد وابسته است؛ بنابراین، تغییرات دامنه امپدانس و زاویه فاز می‌تواند برای بررسی وضعیت تازگی محصول به کار رود (Grossi & Riccò, 2017; Zhao et al., 2017). مطالعات انجام‌شده روی گونه‌های مختلف آبیان نشان داده‌اند که پارامترهای امپدانسی می‌توانند بین نمونه‌های دارای سطوح متفاوت تازگی تمایز ایجاد کنند و در ترکیب با روش‌های کمومتریک یا یادگیری ماشین، برای پیش‌بینی شاخص‌های مرجع کیفیت مورد استفاده قرار گیرند (Sun et al., 2020; Salazar et al., 2025). همچنین EIS به‌عنوان روشی که امکان استخراج اطلاعات از پاسخ الکتریکی نمونه در بازه‌ای از فرکانس‌ها را فراهم می‌کند، به دلیل ویژگی‌هایی همچون سرعت، عدم تخریب نمونه، هزینه کم و سادگی اجرا، مورد توجه قرار گرفته است (Grossi & Riccò, 2017). با وجود این ظرفیت‌ها، وجود چالش‌هایی، مانع از تعمیم‌پذیری یافته‌ها در زمینه EIS برای ارزیابی کیفیت ماهیان و دیگر فرآورده‌های آبیان است. افزون بر این، ضرورت بهینه‌سازی اندازه‌گیری برای کاهش اثراتی مانند قطبش الکتروود و همچنین توسعه مدل‌های تفسیرگر و روش‌های پردازش داده برای استخراج اطلاعات معنادار از داده‌های امپدانسی، به‌عنوان بخشی از چالش‌ها و روندهای آینده مطرح شده است (Zhao et al., 2017). از این‌رو، ارزیابی این فناوری نباید صرفاً به گزارش کاربردها و نتایج مطالعات محدود شود؛ بلکه لازم است قابلیت‌ها، محدودیت‌ها، میزان تکرارپذیری و الزامات کاربرد صنعتی آن به‌صورت مقایسه‌ای تحلیل شوند.

در این پژوهش، جستجو مقالات با استفاده از پایگاه اطلاعات علمی ScienceDirect و همچنین Google Scholar انجام شد. فرآیند جستجو با استفاده از کلیدواژه‌های *fish freshness*، *electrical impedance spectroscopy*، *fish spoilage* و *seafood quality* صورت گرفت. در مرحله نخست، جستجو با ترکیب این کلیدواژه‌ها در مجموع ۱۶۵ مقاله علمی انگلیسی شناسایی شده و پس از اعمال فیلتر موضوعی و محدود کردن جستجو به مقالاتی که مستقیماً به کاربرد طیف‌سنجی امپدانس الکتریکی در ارزیابی فساد و تازگی آبیان و غذاهای دریایی می‌پرداختند، ۳۹ مقاله شناسایی شد که پس از بررسی دقیق‌تر محتوا، ۳۸ مقاله با معیارهای پژوهش مطابقت داشت. در ادامه، برای پوشش مبانی نظری شامل اصول امپدانس بیولوژیکی، رفتار غشای سلولی، مدل‌های مکانیزمی و روش‌های مقایسه‌ای غیرمخرب، دامنه جستجو گسترش یافت و در مجموع ۸۹ مقاله مرتبط وارد فرایند بررسی شد. در نهایت با اعمال معیارها و تناسب با اهداف مرور، ۵۷ مقاله به‌عنوان منابع نهایی برای نگارش مقاله حاضر انتخاب گردید. در همین

⁴ Electrical Impedance Spectroscopy; EIS

راستا، مرورهای جامع اخیر در زمینه تشخیص ابزاری تازگی ماهی تأکید دارند که تلفیق فناوری‌های حسگری نوین از جمله EIS، هوش مصنوعی و تحلیل بی‌درنگ داده‌ها، آینده ارزیابی کیفیت آبزیان را شکل خواهد داد (Kundu et al., 2026). بر این اساس، مطالعه حاضر کاربردهای طیف‌سنجی امپدانس الکتریکی را در ارزیابی کیفیت و تازگی ماهی و فرآورده‌های آبزیان بررسی می‌کند و به مرور پیشرفت‌های اخیر این روش می‌پردازد.

۲. روش EIS: مبانی و کاربرد

۲-۱. تعریف امپدانس مختلط، دامنه و فاز

در طیف‌سنجی امپدانس الکتریکی، یک سیگنال ولتاژ یا جریان متناوب^۵ با دامنه مشخص به نمونه اعمال و پاسخ الکتریکی آن اندازه‌گیری می‌شود، این اندازه‌گیری در مجموعه‌ای از فرکانس‌ها تکرار می‌گردد تا رفتار الکتریکی نمونه در قالب یک طیف فرکانسی به دست آید (Damez et al., 2008)؛ این روند در در مطالعات مربوط به آبزیان، سیگنال از طریق الکترودهای در تماس با بافت اعمال می‌شود و پاسخ حاصل می‌تواند اطلاعاتی درباره وضعیت ساختاری و ترکیبی عضله فراهم کند (Teixeira et al., 2021). امپدانس الکتریکی در هر فرکانس از نسبت ولتاژ اندازه‌گیری‌شده به جریان عبوری محاسبه می‌شود:

$$Z(f) = \frac{V(f)}{I(f)}$$

در این رابطه، $Z(f)$ امپدانس، $V(f)$ ولتاژ و $I(f)$ جریان اندازه‌گیری‌شده در فرکانس است. امپدانس یک کمیت مختلط است و از دو مؤلفه حقیقی و موهومی تشکیل می‌شود:

$$Z = Z' + jZ''$$

در این رابطه، Z' مؤلفه حقیقی امپدانس و عمدتاً بیانگر رفتار مقاومتی بافت است. مؤلفه Z'' بخش موهومی امپدانس را نشان می‌دهد و رفتار راکتیو بافت، به‌ویژه آثار خازنی غشاهای سلولی، را منعکس می‌کند. نماد j نیز واحد موهومی و برابر با $\sqrt{-1}$ است. دامنه امپدانس از مؤلفه‌های حقیقی و موهومی آن محاسبه می‌شود:

$$|Z| = \sqrt{(Z')^2 + (Z'')^2}$$

زاویه فاز امپدانس نیز از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{Z''}{Z'}\right)$$

زاویه فاز θ ، اختلاف فاز میان ولتاژ اعمال‌شده و جریان عبوری را نشان می‌دهد و اطلاعاتی درباره سهم نسبی رفتار مقاومتی و خازنی بافت فراهم می‌کند (Lazanas & Prodromidis, 2023; Nowak & Lankheet, 2022). مراحل انجام اندازه‌گیری، امپدانس معمولاً به‌صورت نسبت سیگنال ولتاژ اندازه‌گیری‌شده به جریان تزریق‌شده^۶ در هر فرکانس محاسبه و به عنوان تابعی از فرکانس گزارش می‌شود (Clemente et al., 2024; El-Azazy et al., 2020). نتایج روش EIS اغلب به شکل منحنی‌های فرکانسی ارائه شده و از مهم‌ترین منحنی‌ها می‌توان به نمودار بُد^۷ که شامل تغییرات دامنه امپدانس و زاویه فاز بر حسب فرکانس و نمودار نایکوئیست^۸ که رابطه بین دو بخش اصلی امپدانس را نشان می‌دهند اشاره کرد، در نمودار بُد، دامنه امپدانس و زاویه فاز به‌صورت تابعی از فرکانس ارائه می‌شوند اما در نمودار نایکوئیست، مؤلفه موهومی امپدانس، معمولاً به‌صورت $-Z''$ ، در برابر مؤلفه حقیقی آن، یعنی Z' ، ترسیم می‌شود (Magar et al., 2021). این نمودارها به‌تنهایی شاخص مستقیم تازگی محسوب نمی‌شوند؛ بلکه تغییر شکل منحنی، جابه‌جایی نقاط مشخص و تغییر پارامترهای استخراج‌شده از آن‌ها باید با زمان نگهداری یا شاخص‌های مرجع کیفیت مقایسه شود. در مطالعات آبزیان، تغییر دامنه امپدانس و زاویه فاز در طول نگهداری برای بررسی تخریب ساختار بافت و پیشرفت فساد به کار رفته است (N. Zhang et al., 2022).

^۵ AC

^۶ V/I

^۷ Bode plot

^۸ Nyquist plot

۲-۲. نقش فرکانس و مسیر جریان در بافت زیستی

بافت زیستی از مایعات داخل سلولی و خارج سلولی حاوی یون‌ها، غشای سلولی و اجزای ساختاری تشکیل شده و مایعات بافت مسیرهای رسانا را ایجاد می‌کنند، درحالی‌که غشای سالم سلول رفتاری شبه‌خازنی دارد. به همین دلیل، مسیر عبور جریان در بافت به فرکانس سیگنال اعمال شده وابسته است (Huh et al., 2021). در مطالعه‌ای بر روی ماهی سالمون اطلس^۹، مسیر جریان در فرکانس‌های پایین و بالا به صورت مفهومی نشان داده شده که غشای سلولی در فرکانس‌های پایین نقش شبه‌خازنی دارد و سالم بودن غشا می‌تواند رفتار امپدانس را تحت تأثیر قرار دهد (Z. Sun et al., 2020). مشابه همین موضوع در مطالعات بین‌رشته‌ای نیز برای دیگر بافت‌های زیستی استفاده و به نقش فرکانس در نفوذ جریان و بازتاب وضعیت غشایی اشاره شده زیرا فرکانس تعیین می‌کند که جریان چقدر می‌تواند وارد سلول‌ها شود و همچنین می‌تواند شاخصی از وضعیت سلول یا سلامت غشاء باشد (Huh et al., 2021). در پژوهش‌های قبلتر نیز، EIS برای تازگی چند گونه ماهیان در بازه‌ی ۰.۱Hz تا ۱۰۰kHz و در دماهای نگهداری مختلف به کار رفته و تغییرات کمیت‌هایی مثل زاویه فاز به‌عنوان داده‌هایی از وضعیت تازگی مطرح شده‌اند (Niu & Lee, 2000).

۲-۳. مدل‌های مکانیزمی پاسخ امپدانس

برای اینکه بازه امپدانس قابل تفسیر و مقایسه باشد، معمولاً از مدل‌های مکانیزمی استفاده می‌شود مانند مدل فریک^{۱۰} که یک مدل ساده برای نشان دادن رفتار بافت در فرکانس‌های مختلف و ارتباط آن با میزان نفوذ جریان در محیط سلولی می‌باشد (Huh et al., 2021). همچنین مدل مدار معادل سه‌جزئی^{۱۱} که این مدار معمولاً شامل مؤلفه‌ای برای مقاومت فضای خارج سلولی و شاخه‌ای برای نمایش مقاومت داخل سلولی همراه با رفتار خازنی غشا است. پارامترهای حاصل از این مدار می‌توانند برای بررسی تغییرات ساختار عضله طی نگهداری مورد استفاده قرار گیرند (Z. Sun et al., 2020). با این حال، مقادیر این پارامترها تنها زمانی قابل مقایسه‌اند که شرایط اندازه‌گیری و روش برازش در نمونه‌ها یکسان باشد. مدل کول-کول^{۱۲} نیز رویکرد دیگری برای توصیف پاسخ فرکانسی بافت است. این مدل، علاوه بر مقاومت‌های حدی، پارامتری را برای نمایش پراکندگی و رفتار غیرایده‌آل بافت در نظر می‌گیرد. چنین رفتاری می‌تواند از ناهمگنی سلولی و ساختاری بافت ناشی شود (Clemente et al., 2024). در مجموع مدل‌ها، ابزارهایی برای تفسیر پاسخ امپدانس‌اند و نباید به‌عنوان مدرک مستقل تازگی در نظر گرفته شوند. اعتبار کاربرد آن‌ها زمانی افزایش می‌یابد که پارامترهای استخراج شده با شاخص‌هایی مانند TVB-N، شاخص K، شمارش میکروبی، ارزیابی حسی یا مدت نگهداری مقایسه و اعتبارسنجی شوند.

۳. ابزارها و نحوه اندازه‌گیری EIS در ارزیابی کیفیت آبزیان

۳-۱. ساختار سامانه و روش ثبت طیف

یک سامانه طیف‌سنجی امپدانس الکتریکی معمولاً از سه بخش اصلی، تولید و پردازش سیگنال، مجموعه الکترودها یا واحد حسگری و بخش ثبت و تحلیل داده تشکیل می‌شود. واحد تولید سیگنال، ولتاژ یا جریان متناوب را در فرکانس‌های تعیین شده به نمونه اعمال می‌کند. الکترودها وظیفه انتقال سیگنال و دریافت پاسخ الکتریکی بافت را بر عهده دارند و بخش پردازش نیز دامنه امپدانس، زاویه فاز یا مؤلفه‌های حقیقی و موهومی امپدانس را محاسبه می‌کند. کوچک‌سازی مدارهای پردازش سیگنال و کاهش هزینه آن‌ها، یکی از الزامات توسعه تجهیزات قابل حمل برای اندازه‌گیری در محل است (Buscaglia et al., 2021). در مطالعات ارزیابی کیفیت و تشخیص تازگی آبزیان، دو ساختار سیستمی رایج استفاده شده است، ساختار طیف‌گیری کامل^{۱۳} که سیستم در یک بازه فرکانسی، طیف امپدانس را ثبت می‌کند به‌عنوان مثال در مطالعه فساد لاشه بازه فرکانسی ۰.۱Hz تا ۱۰۰kHz تنظیم شده و نرم‌افزار دستگاه برای ثبت طیف امپدانس در بازه‌های زمانی مختلف برنامه‌ریزی شده است (N. Zhang et al., 2022)، ساختار

⁹ Atlantic salmon

¹⁰ Fricke model

¹¹ Three-component equivalent circuit model

¹² Cole- Cole model

¹³ Frequency sweep

دیگر اندازه‌گیری چندفرکانسی و انتخاب فرکانس‌های کلیدی است. از دید ابزارسازی، یک سامانه طیف‌سنجی امپدانس را می‌توان به سه بخش کلی شامل واحد پردازش سیگنال، واحد حسگری و واحد تحلیل داده تقسیم کرد. در این میان، توسعه مدارهای پردازش سیگنال کوچک و کم‌هزینه، شرط لازم برای تحقق حسگرهای امپدانسی قابل حمل و تشخیص در محل است (Buscaglia et al., 2021)؛ این رویکرد در پایش سریع کیفیت آبزیان اهمیت بالایی دارد. برخی مطالعات به جای طیف‌گیری کامل، به دلیل کاهش زمان و کاستن پیچیدگی آزمایش، از مجموعه فرکانس‌های منتخب استفاده می‌کنند؛ برای نمونه در یک مطالعه، امپدانس را در چند فرکانس مشخص ۲، ۵، ۲۰، ۵۰، ۱۰۰ ثبت کرده و شاخص‌های مبتنی بر این نقاط فرکانسی را برای تفسیر میزان تازگی استفاده کردند (Yuan et al., 2018). در آخرین مطالعات صورت گرفته، ترجیح به ادغام سنسور امپدانس با سامانه‌های هوشمند و دریافت بی‌سیم داده‌ها نیز انجام شده است (X. Zhang et al., 2025).

از منظر کنترل کیفیت برخی پروتکل‌ها روی تکرارپذیری حساس‌اند؛ مثلاً در یک مطالعه بر ماهی سالمون، دمای نمونه هنگام اندازه‌گیری کنترل شده و ثبت داده با چندین بار تکرار در یک نقطه انجام گشته و شاخصی نیز برای حذف داده‌هایی که تطبیق‌پذیر نیستند، تعریف نموده‌اند (Z. Sun et al., 2020).

۲-۳. الکتروود و نحوه تماس با نمونه

در بافت‌های زیستی، الکتروود مرز تماس بین دستگاه و بافت است و می‌تواند بخش قابل توجهی از خطای داده‌ها را شامل شود (Abasi et al., 2022). در مطالعه‌ای بر روی ماهی تیلاپیا نیل^{۱۴}، روش EIS که به‌صورت کلاسیک با دو الکتروود روی نمونه انجام شده، بر حساسیت نوع انجام تکنیک و نیاز به تنظیمات مناسب مانند محیط و نوع الکتروود تأکید شده است (Teixeira et al., 2021). در مقابل، رویکردهای چهارالکتروودی یا تتراپل^{۱۵} برای کاهش اثرات قطبش و امپدانس تماس مورد استفاده هستند، در کل یکی از مزیت‌های چهارالکتروودی نسبت به دو الکتروودی این است که چون الکتروودهای سنجش ولتاژ جریان حمل نمی‌کنند، اثر قطبش و امپدانس تماس کاهش می‌یابد (Dipa et al., 2024). شمایی از قرارگیری الکتروودها در بافت لاشه در شکل (۱) نشان داده شده است.

از نظر کاربرد عملی، آرایش دو الکتروودی می‌تواند برای ابزارهای کم‌هزینه و غربالگری سریع مناسب باشد، مشروط بر آنکه فشار تماس، جنس الکتروود، فاصله و محل اندازه‌گیری ثابت نگه داشته شوند در مقابل، برای اندازه‌گیری‌های کمی، توسعه مدل‌های قابل انتقال و کاربردهایی که تکرارپذیری بالاتر اهمیت دارد، آرایش چهارالکتروودی گزینه مناسب‌تری است. بنابراین، نمی‌توان یک آرایش را برای تمام کاربردها برتر دانست؛ انتخاب نهایی باید با توجه به هدف اندازه‌گیری، دقت مورد نیاز، سرعت، هزینه و پیچیدگی طراحی انجام شود (Dipa et al., 2024).

در سنجش آبزیان، علاوه بر نحوه قرارگیری الکتروود، عوامل دیگری نیز قابل اهمیت هستند، مانند سنجشی بر روی اسکویید اروپایی^{۱۶} که ذکر شده تفسیر داده‌ها باید با توجه به عوامل مؤثر بر خواص الکتریکی مانند رطوبت، شوری، دما، ساختار، پیکربندی الکتروود و رابط الکتروود با نمونه انجام شود (Zavadlav et al., 2019). همچنین در برخی کارهای آزمایشی، از الکتروودهای ساده و حتی فروبردن الکتروود در بافت استفاده شده است (N. Zhang et al., 2022). بنابراین، برای تشخیص کیفیت و تازگی با استفاده از روش EIS برای ماهی و فرآورده‌های آبزیان، باید نوع الکتروود، فشار تماس، محل اندازه‌گیری، و کنترل دما را به‌عنوان پارامترهای تاثیرگذار و تکرارپذیر تعریف کرد (Teixeira et al., 2021; Zavadlav et al., 2019). همچنین تماس مستقیم و مکرر الکتروود با چند نمونه می‌تواند احتمال انتقال آلودگی را افزایش دهد. برای کاهش این خطر، می‌توان از نوک یا پوشش رسانای یک‌بارمصرف، الکتروودهای قابل تعویض، پروب‌های دارای قطعات تماس جداشونده و پروتکل مشخص شست‌وشو و ضدعفونی بین اندازه‌گیری‌ها

¹⁴ *Oreochromis niloticus*

¹⁵ Tetrapolar

¹⁶ *Loligo vulgaris*

استفاده کرد. در صورت استفاده از پوشش محافظ یا واسط تماسی، اثر آن بر امپدانس اندازه‌گیری شده باید بررسی و کالیبره شود؛ زیرا تغییر جنس یا ضخامت لایه تماس می‌تواند پاسخ الکتریکی را تغییر دهد.

۴. پردازش داده و مدل‌سازی از طیف امپدانس

برای افزایش قابلیت مقایسه نتایج و فراهم‌شدن زمینه پردازش صحیح داده‌ها، باید پارامترهای تاثیرگذار در پروتکل‌های EIS استاندارد شوند مانند شرایط دمایی نمونه هنگام اندازه‌گیری، جنس و سطح الکتروود و مشخصات سیگنال و ثبت داده که دامنه تحریک، بازه و تعداد فرکانس‌ها را شامل می‌شود. خروجی خام EIS معمولاً مجموعه‌ای از مقادیر امپدانس در فرکانس‌های مختلف است و برای تبدیل آن به ابزار تشخیص درجه کیفیت و تازگی، باید مدل‌سازی انجام گیرد. یک مسیر رایج، تبدیل طیف به چند شاخص کم‌بعد و سپس استفاده از روش‌های طبقه‌بندی یا رگرسیون می‌باشد؛ در یک مطالعه، ترکیب ویژگی‌های امپدانس با روش‌های کمومتریک به‌عنوان چارچوب تحلیل داده مطرح شده است (Z. Sun et al., 2020). در برخی مطالعات نیز، به‌جای استفاده از کل طیف، پیشنهاد شده تنها در یک یا چند فرکانس منتخب و ترجیحاً پایین قرائت و ثبت شود تا پیاده‌سازی صنعتی ساده‌تر باشد (Zavadlav et al., 2019).

هم‌زمان، بخشی از استخراج داده‌ها می‌تواند فیزیکی-تفسیری باشد؛ برای مثال در مطالعه فساد لاشه، ویژگی‌هایی مانند امپدانس، فاز و فرکانس بحرانی^{۱۷} به‌عنوان کمیت‌های تحلیلی ذکر شده‌است (N. Zhang et al., 2022). در پژوهش‌های مطالعه شده بر تازگی ماهیان نیز، رویکردهایی مثل مدل‌سازی برای پیش‌بینی شاخص‌های شیمیایی، مانند TVB-N، با مدل‌های رگرسیونی استفاده شده است (Pérez-Estève et al., 2014). برای کاهش این مشکل، می‌توان از روش‌هایی مانند نرمال‌سازی نسبت به مقدار اولیه، محاسبه نسبت یا اختلاف پاسخ در فرکانس‌های مختلف، تصحیح اثر دما و استفاده از پارامترهای کم‌حساس‌تر به مبدأ نمونه بهره گرفت (J. Sun et al., 2020).

افزون بر پارامترهای مستقیم طیف، استفاده از ویژگی‌های مورفولوژیک منحنی‌های امپدانس به‌عنوان راهکاری برای کاهش اثر تفاوت‌های اولیه میان نمونه‌ها پیشنهاد شده، ویژگی‌های مورفولوژیک، کمیت‌هایی هستند که از شکل هندسی منحنی امپدانس استخراج می‌شوند؛ نه صرفاً از مقدار امپدانس یا زاویه فاز در یک نقطه و موقعیت و ارتفاع قله منحنی، شیب بخش‌های مختلف منحنی، مساحت زیر منحنی یا تفاوت پاسخ در جهت‌های مشخص نمونه‌هایی از این نوع ویژگی‌ها هستند. در مطالعه‌ای بر روی کپور معمولی، انحراف معیار نسبی ویژگی مورفولوژیک EIS در نمونه‌هایی با مبدأهای متفاوت ۶.۴ درصد بود، در حالی که این مقدار برای اندازه امپدانس و زاویه فاز به‌ترتیب ۷.۸ و ۲۰.۱ درصد گزارش شد؛ این یافته نشان می‌دهد ویژگی‌های مورفولوژیک ممکن است نسبت به تفاوت‌های فردی و مبدأ نمونه پایداری بیشتری داشته باشند (J. Sun et al., 2016). همچنین در پژوهشی دیگر، از قله‌های موجود در منحنی ویژگی مورفولوژیک طیف امپدانس برای طبقه‌بندی مراحل فساد استفاده شده و دقت طبقه‌بندی این شاخص در نمونه‌های دارای مبدأهای مختلف ۷۸ درصد بود، در حالی که دقت طبقه‌بندی بر اساس اندازه امپدانس و زاویه فاز به‌ترتیب ۵۲ و ۵۵ درصد گزارش شده است (J. Sun et al., 2017). اگرچه دقت ۷۸ درصدی ویژگی مورفولوژیک طیف امپدانس برای طبقه‌بندی مراحل فساد نسبت به پارامترهای منفرد بهبود قابل‌توجهی نشان می‌دهد، برای تصمیم‌گیری صنعتی قطعی کافی نیست و باید روی تعداد بیشتری نمونه، گونه‌های متفاوت و شرایط واقعی زنجیره سرد ارزیابی شود. به‌طور کلی کیفیت خروجی EIS در حوزه آبزیان، به همان اندازه که به دقت سنجش و اندازه‌گیری وابسته است، به اعتبارسنجی مدل نیز وابسته خواهد بود (Z. Sun et al., 2020; Teixeira et al., 2021). همچنین، ترکیب چند ویژگی امپدانس می‌تواند عملکرد مدل را بهبود دهد به‌طور مثال در یک روش ادغام داده مبتنی بر شباهت مدل، اندازه امپدانس، زاویه فاز و پارامتر مورفولوژیک با یکدیگر ترکیب شدند و دقت طبقه‌بندی تازگی از محدوده ۷۹.۲ درصد تا ۸۵ درصد برای پارامترهای منفرد به ۹۴.۲ درصد برای مدل ادغامی افزایش یافته است (J. Sun et al., 2021). شایان ذکر است که دقت مدل‌های طبقه‌بندی و رگرسیون مبتنی بر EIS تنها به الگوریتم یادگیری وابسته نیست، بلکه مراحل پیش‌پردازش داده‌های امپدانس نیز نقشی تعیین‌کننده‌ای دارند؛ برای نمونه اعمال

¹⁷ Critical frequency

روش‌های پیش‌پردازش بر روی طیف‌های امپدانس می‌تواند صحت تشخیص را حتی تحت شرایط دمایی ناپایدار از ۵۴ درصد به ۸۴ درصد افزایش دهد (Qiu et al., 2024).

۵. کاربردهای EIS در ارزیابی کیفیت و تازگی ماهی و فرآورده‌های آبریان

۵-۱. سنجش تازگی و فساد در زنجیره سرد

کاربرد عمومی EIS در ارزیابی کیفیت آبریان، سنجش تغییرات پس از مرگ در نگهداری زنجیره سرد می‌باشد؛ که به صورت ثبت تغییرات امپدانس و فاز در طول زمان و استفاده از آن برای تعیین میزان تازگی یا تعیین مرحله فساد بدون تخریب نمونه صورت می‌گیرد (Pérez-Estève et al., 2014). در مطالعه‌ای روی چندین گونه دریایی، تغییرات K-value تا حدود ۴۰ درصد همراه با تغییرات بیوامپدانس در چند فرکانس ۲، ۵، ۲۰، ۵۰ و ۱۰۰ کیلوهرتز طی نگهداری در یخ اندازه‌گیری شده است تا رابطه‌ی امپدانس با تازگی و مدت نگهداری تعیین شود (Yuan et al., 2018). همین روند در اسکوپید اروپایی طی نگهداری سرد نیز انجام شده است، نمونه‌ها در ۴.۵ °C و رطوبت نسبی ۵۵ درصد برای ۱۱ روز نگهداری شده و تا امکان پایش روند افت کیفیت در شرایط سرد فراهم شود (Zavadlav et al., 2019). در مورد ماهیان پرمصرف، EIS برای پایش سردخانه‌ای نیز استفاده شده است؛ به عنوان مثال در سالمون اطلس، نیمی از فیله‌ها در ۴ ± ۰.۵ °C نگهداری و بخش دیگر هم در ۱۸ ± ۰.۵ °C منجمد و سپس یخ‌زدایی شد تا توان تفکیک کیفیت در زنجیره سرد و یخ‌زدایی نیز بررسی شود (Z. Sun et al., 2020). همچنین در تحقیق دیگری روی فساد فیله سالمون، امپدانس مختلط و فاز در بازه ۰.۱ Hz تا ۱۰۰ kHz اندازه‌گیری شده و بیان شده که کاهش امپدانس با افزایش زمان نگهداری می‌تواند برای تشخیص مراحل فساد استفاده شود (N. Zhang et al., 2022). در مطالعات مقدماتی نیز نشان داده شده که در بازه‌های زمانی کوتاه حتی ساعات اولیه پس از مرگ، نمونه بافت به‌طور تدریجی تغییرات امپدانس نشان می‌دهد و همین ویژگی مبنای استفاده از EIS در پایش سریع در زنجیره سرد قرار گرفته است (Teixeira et al., 2021). در نتیجه، در وضعیت کنونی، EIS را باید فناوری دارای ظرفیت بالقوه برای پایش زنجیره سرد دانست که برای کاربرد صنعتی به استانداردسازی و اعتبارسنجی میدانی بیشتری نیاز دارد.

۵-۲. پیش‌بینی شاخص‌های کیفیت و فساد با EIS

بخش مهم EIS در لاشه آبریان، عبور از مرحله پایش کیفی به سمت پیش‌بینی شاخص‌های مرجع کیفیت و فساد است. در مطالعه سالمون اطلس، TVB-N به‌عنوان شاخص تازگی در نظر گرفته شد و از مدل PLS^{۱۸} برای پیش‌بینی TVB-N از داده‌های بیوامپدانس استفاده شده است (Z. Sun et al., 2020). در پژوهشی دیگر نگهداری در یخ روی چندین گونه دریایی نیز، هم‌زمان K-value و امپدانس در فرکانس‌های مشخص ثبت شده تا پایش غیرمخرب تازگی و شاخص‌های بیوشیمیایی پس از مرگ را بتوان در کنار هم بررسی کرد (Yuan et al., 2018). در مطالعه‌ای بر روی کپور علفخوار^{۱۹}، شاخص تغییر امپدانس (Q) که از مقادیر امپدانس در دو فرکانس ۱ و ۱۶ به دست آمده، با شاخص‌های مرجع تازگی ارتباط معنی‌داری و با شمارش کل هوازی، K-value و TVB-N همبستگی منفی قوی و با امتیاز ارزیابی حسی همبستگی مثبت قوی داشته است؛ از این‌رو به‌عنوان شاخصی سریع و غیرمخرب برای پایش افت تازگی طی نگهداری سرد پیشنهاد شده است، رابطه‌ی خطی بین شاخص Q و هر یک از شاخص‌های مذکور در شکل (۲) به‌خوبی قابل مشاهده است (L. Zhang et al., 2011). در فرآورده‌های دیگر نیز، برای بررسی تغییرات نگهداری سرد علاوه بر امپدانس، pH، TVB-N و ظرفیت نگهداری آب^{۲۰} را نیز در طول نگهداری بررسی کردند و نتایج نشان داده، ارزیابی امپدانس می‌تواند در کنار شاخص‌های شیمیایی و حسی به طبقه‌بندی مراحل افت کیفیت کمک کند (Zavadlav et al., 2019). در پژوهش‌های جدیدتر، ساختن ویژگی از طیف امپدانس به سمت شاخص‌های مقاوم‌تر رفته، به طور مثال در مطالعه‌ی فساد ماهی سالمون، علاوه بر امپدانس و فاز، فرکانس بحرانی تعریف شده و به‌عنوان یکی از نشانگرهای مرحله فساد معرفی شده است (N. Zhang et al., 2022).

¹⁸ Partial Least Squares

¹⁹ *Ctenopharyngodon idella*

²⁰ Water Holding Capacity

(Zhang et al., 2022). همچنین سیگنال‌های امیدانسی می‌توانند به‌عنوان ورودی مدل‌های یادگیری ماشینی عمیق به کار روند (X. Zhang et al., 2025; Y. Zhang et al., 2023).

۳-۵. تشخیص اصالت محصول، تقلب و تفکیک نمونه‌ها با امیدانسی همراه مدل‌سازی

چالش تشخیص اصالت محصول و تقلب در بازار آبریان، عمدتاً به شکل جایگزینی گونه، تحریف منشأ صید، یا جایگزینی محصول تازه با منجمد و یخ‌زدایی‌شده انجام می‌شود (Chai et al., 2021). به سبب این چالش‌ها یکی از مهم‌ترین دلایل توسعه روش‌های سریع سنجش، تشخیص اصالت محصول و تقلب است (Ayisi & Ayeh, 2024; Chai et al., 2021). روش EIS در تشخیص جایگزینی محصول تازه با محصول منجمد-یخ‌زدایی‌شده در سیم دریایی طلایی^{۲۱}، با اندازه‌گیری توسط آرایش دوال‌کترودی توانست نمونه‌های تازه را از نمونه‌های منجمد-یخ‌زدایی‌شده تفکیک کند؛ با این حال، این روش برای تشخیص مدت نگهداری انجمادی یا تعداد چرخه‌های انجماد عملکرد کافی نداشته و نتایج به نوع آرایش الکتروود نیز وابسته بوده (Fuentes et al., 2013). با این حال، بخش زیادی از پژوهش‌های اصالت‌سنجی آبریان تاکنون با استفاده از فناوری‌های طیف‌سنجی نوری و کمومتریک انجام گشته است (Ayisi & Ayeh, 2024; Chai et al., 2021). در سطح محصول، فرآیند تعیین تازگی با EIS معمولاً شامل تفکیک روزهای نگهداری و میزان تازگی است و این تفکیک عموماً با استخراج ویژگی‌های امیدانسی و مدل‌سازی انجام گرفته است (J. Sun et al., 2020; Zavadvlav et al., 2019). بنابراین، روش EIS در آبریان اکنون بر مسائل طبقه‌بندی کیفیت و تازگی محصول استفاده شده و تشخیص اصالت یا تقلب در محصول نهایی بیشتر با روش‌های طیف‌سنجی نوری انجام شده است (Ayisi & Ayeh, 2024; Chai et al., 2021). این موضوع یک چشم‌انداز بالقوه برای پژوهش‌های آینده در حوزه استفاده از روش EIS برای ارزیابی کیفیت و تازگی محصولات غذایی از جمله فرآورده‌های آبریان است.

برای جمع‌بندی روندهای اصلی مطالعات انجام‌شده در زمینه استفاده از EIS در ارزیابی کیفیت و تازگی آبریان، خلاصه‌ای از هدف مطالعه، شرایط اندازه‌گیری، شاخص‌های خروجی و روش‌های تحلیل داده در جدول (۱) ارائه شده است.

۶. مقایسه EIS با سایر روش‌های غیرمخرب ارزیابی کیفیت آبریان

در مرورهای حوزه تازگی و ویژگی‌های کیفی ماهیان، طیف گسترده‌ای از روش‌های غیرمخرب یا تخریب حداقلی شامل روش‌های الکترونیکی مانند امیدانسی، تصویربرداری و طیف‌سنجی مانند فلورسانس^{۲۲}، مادون قرمز^{۲۳}، رامان^{۲۴} و هایپراسپکترال^{۲۵} مطرح می‌شوند (Franceschelli et al., 2021). جایگاه EIS در این روش‌ها معمولاً با چند مزیت کلیدی مانند سادگی سخت‌افزار، هزینه پایین‌تر نسبت به سامانه‌های تصویربرداری یا طیف‌سنجی پیشرفته و امکان پیاده‌سازی ساده‌تر تعریف شده؛ به‌طوری که در مطالعه بر روی سالمون اطلس، بیوامپدانس به‌عنوان روشی سریع، کم‌هزینه، غیرمخرب و قابل حمل برای ارزیابی کیفیت معرفی گشته است (Z. Sun et al., 2020). در مقابل، محدودیت‌های EIS عمدتاً شامل وابستگی به کیفیت تماس، شرایط اندازه‌گیری، حساسیت به دما، ناهمگنی بافت و اثرات قطبش است که همگی می‌توانند روی قرائت درست اعداد اثر بگذارند (Teixeira et al., 2021; Zavadvlav et al., 2019). حتی در مرورهایی نیز اشاره شده که در روش‌های تماسی، تماس مستقیم الکتروود می‌تواند ریسک آلودگی و در نتیجه محدودیت کاربردی ایجاد کند (S. Wang et al., 2024)؛ این موضوع برای فرآورده‌های آبریان نیز در طراحی پروتکل باید مدنظر قرار گیرد.

از سوی دیگر، روش‌های طیف‌سنجی نوری و تصویری دارای مزیت ارائه اطلاعات سطحی، طیفی و ساخت تصویر هستند. برای نمونه، در یک سیستم تصویربرداری چندطیفی ۴۳۰-۱۰۱۰nm، پیش‌بینی هم‌زمان چند شاخص تازگی برای فیله ماهی گزارش شده و قابلیت بصری‌سازی نقشه توزیع کیفیت به‌عنوان مزیت تصویربرداری تاکید می‌شود (Khoshnoudi-Nia & Moosavi-).

²¹ Sparus aurata

²² Fluorescence

²³ IR Spectroscopy

²⁴ Raman Spectroscopy

²⁵ Hyperspectral

(Nasab, 2019). با این حال، این روش‌ها معمولاً با چالش‌هایی مثل هزینه بالا، تجهیزات و نیاز به بهینه‌سازی صنعتی مواجه‌اند (Franceschelli et al., 2021; Pan et al., 2024). باین حال، حجم زیاد داده، نیاز به پردازش پیچیده، کنترل نور و هزینه تجهیزات می‌تواند استقرار این سامانه‌ها را در خطوط تولید محدود کنند؛ توسعه ابزارهای تصویربرداری کم‌هزینه و قابل حمل همچنان یکی از نیازهای این حوزه است (Pan et al., 2024). در همین راستا، طیف‌سنجی مادون قرمز نزدیک^{۲۶} نیز در کارهای پیش‌بینی ماندگاری فیله گربه‌ماهی^{۲۷} با مدل‌های شبکه عصبی به کار رفته است (Mao et al., 2023). همچنین رویکردهای مبتنی بر بینایی و یادگیری عمیق در آخرین مطالعات برای پیش‌بینی شاخص‌های تازگی به عنوان روش غیرتماسی مطرح شده‌اند (Hamidy et al., 2026). علاوه بر روش‌های ذکرشده، در سال‌های اخیر، شاخص‌های هوشمند بسته‌بندی و بسته بندی‌های نوین نیز به عنوان روش‌های مکمل برای تشخیص فساد ماهی توسعه یافته‌اند (Nahvi et al., 2025; Hosseini et al., 2020; Shahhosseini et al., 2020).

بنابراین انتخاب تکنیک در صنعت معمولاً تابع اهداف و شرایط انجام فرآیند است، به نظر می‌رسد در پایش سریع و کم‌هزینه، روش EIS کاربردی‌تر از پایش غنی از اطلاعات و غیرتماسی مانند تصویربرداری و طیف‌سنجی باشد.

۷. نتیجه‌گیری

طیف‌سنجی امپدانس الکتریکی در سال‌های اخیر به عنوان یک روش غیرمخرب، سریع و نسبتاً کم‌هزینه، مورد توجه مطالعات ارزیابی کیفیت و تازگی ماهی فرآورده‌های آبزیان قرار گرفته است (Franceschelli et al., 2021). مرور مطالعات نشان می‌دهد که مبنای عملکرد این تکنیک، وابستگی پاسخ امپدانس به ساختار بافت، وضعیت غشای سلولی، توزیع آب و یون‌ها و در نهایت تغییرات بیوشیمیایی پس از مرگ می‌باشد؛ به طوری که این تغییرات در قالب پارامترهایی مانند امپدانس، فاز و شاخص‌های استخراج‌شده از طیف قابل توجیه هستند (J. Sun et al., 2020; N. Zhang et al., 2022). در صنعت، EIS توانسته است به طور مؤثر برای پایش تازگی در زنجیره سرد به کار گرفته شود و تغییرات کیفیت در طول نگهداری در یخ یا یخچال را با دقت مناسبی منعکس کند. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که کاهش یا تغییر الگوهای امپدانس در طول زمان نگهداری، با شاخص‌های تازگی مانند TVB-N و K-value همخوانی دارد و امکان استفاده از این روش به عنوان ابزار پایش سریع را فراهم می‌سازد (Yuan et al., 2019; Zavadvlav et al., 2018). وجود مزیت‌های روش EIS، مقایسه با سایر روش‌های غیرمخرب نشان می‌دهد که EIS در کنار سادگی فرآیند انجام کار و قابلیت پرتابل بودن، با چالش‌هایی نظیر حساسیت به شرایط اندازه‌گیری، وابستگی به تماس الکترود، اثر دما و ناهمگنی بافت نیز مواجه است (Teixeira et al., 2021; Zavadvlav et al., 2019). در مقابل، روش‌های مبتنی بر تصویربرداری و طیف‌سنجی نوری اگرچه اطلاعات گسترده‌تر و غیرتماسی ارائه می‌دهند، اما معمولاً هزینه بالاتر و محدودیت‌های عملیاتی دارند (Franceschelli et al., 2021; Pan et al., 2024). این مقایسه نشان می‌دهد که EIS به عنوان جایگزین کامل روش‌های غیرمخرب نیست، بلکه به عنوان یک ابزار مکمل کارآمد در کنار سایر تکنیک‌ها قابل تعریف می‌باشد و از منظر پژوهشی، مهم‌ترین شکاف‌ها شامل عدم استانداردسازی پروتکل‌های اندازه‌گیری، مشکل تفاوت فردی نمونه‌ها و محدودیت در تعمیم‌پذیری مدل‌ها است. مطالعات نشان داده‌اند که عواملی مانند دما، نوع و آرایش الکترود، و شرایط آماده‌سازی نمونه می‌توانند به طور قابل توجهی بر نتایج تأثیر بگذارند و بدون کنترل آن‌ها، داده‌ها برای مقایسه مطلوب نیستند (Dipa et al., 2024; Teixeira et al., 2021). در همین راستا، استفاده از شاخص‌های نرمال‌شده و مدل‌های داده‌محور پیشرفته به عنوان راهکارهایی برای کاهش اثر ناهمگنی پیشنهاد شده است (Yuan et al., 2018; N. Zhang et al., 2022). مرور کاربردهای EIS در محصولات کشاورزی و غذایی نیز توسعه آینده این فناوری به ادغام آن با روش‌های فراطیفی و تهرتز، به کارگیری الگوریتم‌های پیشرفته استخراج ویژگی و یادگیری ماشین، و طراحی تجهیزات قابل حمل وابسته می‌بیند (Cheng et al., 2022). به طور کلی روش EIS در صورت تدوین پروتکل‌های ایمن و استانداردسازی داده‌ها در تولیدات آبزیان دارای ظرفیت بالایی برای توسعه به عنوان یک ابزار کاربردی در صنایع شیلاتی به‌ویژه در

²⁶ NIR (Near Infrared Spectroscopy)

²⁷ Channe Catfish

فرآیندهای پایش سریع است. تمرکز مطالعات و پژوهش‌های آینده بر این محورها می‌تواند مسیر تجاری‌سازی و به‌کارگیری گسترده این فناوری را در زنجیره تأمین آبزیان هموار سازد (Pan et al., 2024; X. Zhang et al., 2025).

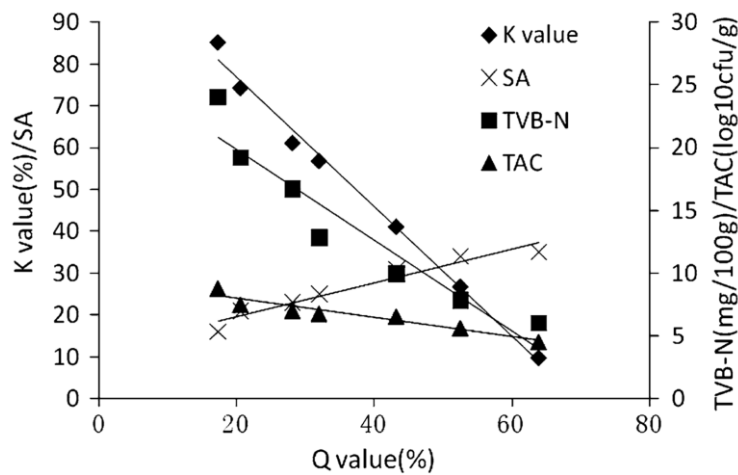
۸. تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

۹. بیانیه استفاده از هوش مصنوعی

متن اصلی این دست‌نویس به‌طور کامل توسط نویسندگان تهیه و نگارش شده است و از ابزار Claude شرکت Anthropic صرفاً برای بهبود نگارش و ویرایش زبانی استفاده شده است و هیچ‌گونه تولید محتوای علمی توسط این ابزار انجام نشده است.

۱۰. ضمائم



شکل (۲). منحنی‌های رگرسیون بین شاخص تغییرات امپدانس (Q value) و شاخص‌های تازگی شامل شمارش کل هوازی (TAC)، مقدار K

نیترोजن فرار کل ($TVB-N$) و امتیاز ارزیابی حسی (SA) در ماهی کپور علفخوار طی نگهداری در سرما (L. Zhang et al., 2011).

Figure 2. Regression curves between the impedance change index (Q value) and freshness indices including total aerobic count (TAC), K value, total volatile nitrogen ($TVB-N$), and sensory assessment score (SA) in grass carp during cold storage (L. Zhang et al., 2011).

Table 1. Selected studies on the application of electrical impedance spectroscopy in the quality and freshness assessment of fish and aquatic products

Study	Research focus	Key indicators	Main finding	Key Limitations
Yuan et al., 2018	Freshness assessment of eight marine fish species during ice storage	K-value, impedance, C-value	The impedance ratio of C-value was associated with storage time and K-value.	Weak correlation in two species; inter-species variability; measurement through scales/skin may be affected by surface condition; limited to K<40% and >24 h storage..
Zavadlav et al, 2019	Quality assessment of chilled European squid (<i>Loligo vulgaris</i>)	Phase angle, TVB-N, pH, WHC	Phase angle was reported as a suitable indicator for estimating storage time and quality loss.	Nonlinear phase in first 3 days; Z sensitive to external factors; sample size dependence; anisotropy/electrode orientation; absolute values depend on sample size and setup, limiting cross-study comparison.
Z. Sun et al, 2020	Multi-quality detection of Atlantic salmon	Impedance, TVB-N, chemometric features	The combination of EIS and chemometrics was effective for quality discrimination and TVB-N prediction.	Need preprocessing/normalization; RMSEP $\approx$ 2.94 mg/100g; electrode configuration dependence; limited to one species; no explicit discussion of electrode polarization/contact impedance effects.
J. Sun et al, 2020	Reduction of inter-sample variability in fish freshness assessment	TVB-N, RODDS	RODDS improved the prediction accuracy of TVB-N.	Non-monotonic bulge requires two-frequency RODDS; moderate prediction error ($R^2=0.71$, RMSE=3.81); limited to common carp; room temperature (26°C); precise electrode placement needed; no other reference indices..
Teixeira et al, 2021	Preliminary quality assessment of Nile tilapia (<i>Oreochromis niloticus</i>)	Resistance, reactance, impedance	Time-dependent impedance changes indicated the potential of EIS for fish shelf-life quality monitoring.	Preliminary, one sample, four measurements; data <100 Hz discarded; linearity uncertain; multiple error sources; no reference indices; no standardized protocol.
N. Zhang et al, 2022	Salmon spoilage monitoring using EIS and THz-TDS	Z, phase angle, critical frequency	Four spoilage stages were identified using EIS and THz-TDS data.	Invasive needle electrode; THz-TDS limitations (surface/thin sample); number of replicates not clearly reported; no reference indices; only 24 h; temperature conditions not systematically controlled; new technique.
X. Zhang et al, 2025	Non-invasive health assessment of live fish	Impedance, stress indices, deep learning	Impedance sensing combined with data-driven models was used for fish health classification.	Requires blood sampling for model training/calibration, limiting fully non-invasive implementation; complex deep learning (CNN-LSTM, KNN); wearable sensor stability; only two sizes; overfitting risk.

Limitations are summarized based on the authors' statements and methodological constraints observed in each study.

- Abasi, S., Aggas, J. R., Garayar-Leyva, G. G., Walther, B. K., & Guiseppi-Elie, A. (2022). Bioelectrical impedance spectroscopy for monitoring mammalian cells and tissues under different frequency domains: A review. *ACS Meas. Sci. Au*, 2(6), 495–516. <https://doi.org/10.1021/acsmeasuresciau.2c00033>
- Arumugam, D., Li, S., Rao, M., Peng, R., Liu, H., Huo, B., Wei, S., & Wang, J. (2026). Nonthermal technologies for seafood preservation and shelf-life extension: A detailed review. *Food Qual. Saf.*, 10, fyaf046. <https://doi.org/10.1093/fqsafe/fyaf046>
- Ayisi, C. L., & Ayeh, S. O. (2024). Application of spectroscopic-based techniques in seafood authentication. *Aquat. Food Stud.*, 4, AFS264. <https://doi.org/10.4194/AFS264>
- Buscaglia, L. A., Oliveira, O. N., & Carmo, J. P. (2021). Roadmap for electrical impedance spectroscopy for sensing: A tutorial. *IEEE Sens. J.*, 21(20), 22246–22257. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3085237>
- Caicedo-Eraso, J. C., Díaz-Arango, F. O., & Osorio-Alturo, A. (2020). Electrical impedance spectroscopy applied to quality control in the food industry. *Cienc. Tecnol. Agropecu.*, 21(1), 100–119. https://doi.org/10.21930/rcta.vol21_num1_art:951
- Chai, Z., Wang, C., & Bi, H. (2021). Rapid identification between two fish species using UV-Vis spectroscopy for substitution detection. *Molecules*, 26(21), 6529. <https://doi.org/10.3390/molecules26216529>
- Cheng, J., Yu, P., Huang, Y., Zhang, G., Lu, C., & Jiang, X. (2022). Application status and prospect of impedance spectroscopy in agricultural product quality detection. *Agriculture*, 12, 1525. <https://doi.org/10.3390/agriculture12101525>
- Cheng, J. H., Sun, D. W., Zeng, X. A., & Liu, D. (2015). Recent advances in methods and techniques for freshness quality determination and evaluation of fish and fish fillets: A review. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, 55(7), 1012–1225. <https://doi.org/10.1080/10408398.2013.769934>
- Clemente, F., Amato, F., Adamo, S., Russo, M., Angelone, F., Ponsiglione, A. M., & Romano, M. (2024). Circuitual modelling in muscle tissue impedance measurements. *Heliyon*, 10, e28723. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28723>
- Damez, J.-L., Clerjon, S., Abouelkaram, S., & Lepetit, J. (2008). Beef meat electrical impedance spectroscopy and anisotropy sensing for non-invasive early assessment of meat ageing. *J. Food Eng.*, 85(1), 116–122. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.07.026>
- Dipa, S. A., Pramanik, M. M., Rabbani, M., & Kadir, M. A. (2024). Effects of temperature on electrical impedance of biological tissues: Ex-vivo measurements. *J. Electr. Bioimpedance*, 15, 116–124. <https://doi.org/10.2478/joeb-2024-0013>
- Don, S., Lekshmi, M., & Kumar, S. H. (2025). Microbiological quality and safety of processed and packaged fish and fishery products. In A. K. Shukla & C. N. Ravishankar (Eds.), *Quality analysis and packaging of seafood products* (pp. 305–333). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-22082-1.00009-2>
- El-Azazy, M., Min, M., & Annus, P. (Eds.). (2020). *Electrochemical impedance spectroscopy*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.87884>
- El-Mesery, H. S., Mao, H., & Abomohra, A. E.-F. (2019). Applications of non-destructive technologies for agricultural and food products quality inspection. *Sensors*, 19(4), 846. <https://doi.org/10.3390/s19040846>
- Franceschelli, L., Berardinelli, A., Dabbou, S., Ragni, L., & Tartagni, M. (2021). Sensing technology for fish freshness and safety: A review. *Sensors*, 21(4), 1373. <https://doi.org/10.3390/s21041373>
- Fuentes, A., Masot, R., Fernández-Segovia, I., Ruiz-Rico, M., Alcañiz, M., & Barat, J. M. (2013). Differentiation between fresh and frozen-thawed sea bream (*Sparus aurata*) using impedance spectroscopy techniques. *Innov. Food Sci. Emerg. Technol.*, 19, 210–217. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2013.05.001>
- Grossi, M., & Riccò, B. (2017). Electrical impedance spectroscopy (EIS) for biological analysis and food characterization: A review. *J. Sens. Sens. Syst.*, 6, 303–325. <https://doi.org/10.5194/jsss-6-303-2017>
- Hamidy, S. M., Kuvvetli, Y., Sakarya, Y., Özkütük, S. T., & Özogul, Y. (2026). Deep learning-based prediction of fish freshness and purchasability using multi-angle image data. *Foods*, 15(1), 68. <https://doi.org/10.3390/foods15010068>
- Hosseini, S. V., Shahhosseini, G., Jamali, A., & Ziaei, K. (2020). Assessment of oil-in-water nanoemulsion based on sunflower oil on the quality of rainbow trout during refrigerated storage. *J. Fish.*, 73(3), 483–496. [In Persian]. <https://doi.org/10.22059/jfisheries.2020.312056.1205>
- Huh, S., Kim, H.-J., Lee, S., Cho, J., Jang, A., & Bae, J. (2021). Utilization of electrical impedance spectroscopy and image classification for non-invasive early assessment of meat freshness. *Sensors*, 21(3), 1001. <https://doi.org/10.3390/s21031001>

- Khalili Tilami, S., & Sampels, S. (2018). Nutritional value of fish: Lipids, proteins, vitamins, and minerals. *Rev. Fish. Sci. Aquac.*, 26(2), 243–253. <https://doi.org/10.1080/23308249.2017.1399104>
- Khoshnoudi-Nia, S., & Moosavi-Nasab, M. (2019). Prediction of various freshness indicators in fish fillets by one multispectral imaging system. *Sci. Rep.*, 9, 14704. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-51264-z>
- Kumaravel, B., Amutha, A. L., Mary, T. P. M., Agrawal, A., Singh, A., Saran, S., & Govindarajan, N. (2025). Automated seafood freshness detection and preservation analysis using machine learning and paper-based pH sensors. *Sci. Rep.*, 15, 26051. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-08177-x>
- Kundu, M., Vashisth, A., & Krishnan, P. (2026). Instrumental detection of fish freshness in research and food industry: A review. *J. Food Sci. Technol.*, 63(1), 22–50. <https://doi.org/10.1007/s13197-025-06497-4>
- Lazanas, A. C., & Prodromidis, M. I. (2023). Electrochemical impedance spectroscopy-A tutorial. *ACS Meas. Sci. Au*, 3(3), 237–272. <https://doi.org/10.1021/acsmeasuresciau.2c00070>
- Magar, H. S., Hassan, R. Y. A., & Mulchandani, A. (2021). Electrochemical impedance spectroscopy (EIS): Principles, construction, and biosensing applications. *Sensors*, 21(19), 6578. <https://doi.org/10.3390/s21196578>
- Mao, S., Zhou, J., Hao, M., Ding, A., Li, X., Wu, W., Qiao, Y., Wang, L., Xiong, G., & Shi, L. (2023). BP neural network to predict shelf life of channel catfish fillets based on near infrared transmittance spectroscopy. *Food Packag. Shelf Life*, 35, 101025. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2023.101025>
- Moini, S., Tahergorabi, R., Hosseini, S. V., Rabbani, M., Tahergorabi, R., Feás, X., & Aflaki, F. (2009). Effect of gamma radiation on the quality and shelf life of refrigerated rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fillets. *J. Food Prot.*, 72(7), 1419–1426. <https://doi.org/10.4315/0362-028X-72.7.1419>
- Nahvi, Z., Hosseini, S. V., Mirvaghefi, A., Azadfallah, M., & Yousefi, H. (2025). Performance evaluation of coated paper-based pH-sensitive nanosensors containing sugar beet pulp nanofibers for detecting spoilage of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fillets during refrigerated storage. *J. Util. Cultiv. Aquat.*, 14(2), 121–140. [In Persian]. <https://doi.org/10.22069/japu.2024.22659.1893>
- Niu, J., & Lee, J. Y. (2000). A new approach for the determination of fish freshness by electrochemical impedance spectroscopy. *J. Food Sci.*, 65(5), 780–785. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2000.tb13586.x>
- Nowak, Ł. J., & Lankheet, M. (2022). Fish detection using electrical impedance spectroscopy. *IEEE Sens. J.*, 22(21), 20855–20865. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3207921>
- Ocaño-Higuera, V. M., Maeda-Martínez, A. N., Marquez-Ríos, E., Canizales-Rodríguez, D. F., Castillo-Yáñez, F. J., Ruíz-Bustos, E., Graciano-Verdugo, A. Z., & Plascencia-Jatomea, M. (2011). Freshness assessment of ray fish stored in ice by biochemical, chemical and physical methods. *Food Chem.*, 125(1), 49–54. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.08.034>
- Pan, Z., Huang, M., Zhu, Q., & Zhao, X. (2024). Developing a portable fluorescence imaging device for fish freshness detection. *Sensors*, 24(5), 1401. <https://doi.org/10.3390/s24051401>
- Pérez-Esteve, E., Fuentes, A., Grau, R., Fernández-Segovia, I., Masot, R., Alcañiz, M., & Barat, J. M. (2014). Use of impedance spectroscopy for predicting freshness of sea bream (*Sparus aurata*). *Food Control*, 35(1), 360–365. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2013.07.025>
- Qiu, J., Lin, Y., Wu, J., Xiao, Y., Cai, H., & Ni, H. (2024). Rapid beef quality detection using spectra pre-processing methods in electrical impedance spectroscopy and machine learning. *Int. J. Food Sci. Technol.*, 59(3), 1624–1634. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16915>
- Rezaeian, H., Hosseini, S. V., Mirvaghefi, A., Motalebi Moghanjoghi, A. A., & Ziaei, K. (2018). Effect of sea cucumber extract (*Holothuria leucospilota*) on the microbial quality of Otolithes rubber fillets in refrigerated storage. *J. Aquac. Sci.*, 6(1), 23–31. [In Persian]. DOI/DOR not available on the journal page.
- Salazar, J. M. N., Saragcon, W. K. A., Hortinela, C. C., & Fausto, J. C. (2025). Tilapia fish freshness identification using bioelectrical impedance spectroscopy and support vector machine. In *Proceedings of the 2025 International Conference on Mobile, Military, Maritime IT Convergence* (pp. 237–240). <https://doi.org/10.1109/ICMIC66299.2025.11257764>
- Shahhosseini, G., Hosseini, S. V., & Ziaei, K. (2018). The integrated effect of gamma irradiation and plant edible coating on the microbial properties of Fringebarbel sturgeon fillet (*Acipenser nudiiventris*) during refrigerated storage. *J. Aquac. Sci.*, 5(2), 12–21. [In Persian]. DOI/DOR not available on the journal page.
- Shinohara, Y., Yoshioka, T., & Tsubouchi, N. (2026). Predictive model for estimating fish freshness based on adenosine triphosphate degradation in marine fish: Application to Atka mackerel (*Pleurogrammus azonus*). *J. Food Eng.*, 412, 112987. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2026.112987>
- Skendrović, H., Krešić, G., Zrnčić, S., & Pleadin, J. (2026). Nutritional composition, health benefits and claim conditions of fish from aquaculture: A narrative review. *Nutrients*, 18(8), 1270. <https://doi.org/10.3390/nu18081270>

- Sofos, J. N., Flick, G., Nychas, G.-J., O'Bryan, C. A., Ricke, S. C., & Crandall, P. G. (2012). Meat, poultry, and seafood. In M. P. Doyle & R. L. Buchanan (Eds.), *Food microbiology*. ASM Press. <https://doi.org/10.1128/9781555818463.ch6>
- Sun, J., Zhang, R., Zhang, Y., Li, G., & Liang, Q. (2016). Estimating freshness of carp based on EIS morphological characteristic. *J. Food Eng.*, 193, 58–67. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.08.007>
- Sun, J., Zhang, R., Zhang, Y., Liang, Q., Li, G., Yang, N., Xu, P., & Guo, J. (2017). Classifying fish freshness according to the relationship between EIS parameters and spoilage stages. *J. Food Eng.*, 219, 101–110. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.09.011>
- Sun, J., Zhang, R., Zhang, Y., Liang, Q., Zhang, F., Xu, P., & Li, G. (2020). Evaluation of fish freshness using impedance spectroscopy based on the characteristic parameter of orthogonal direction difference. *J. Sci. Food Agric.*, 100(11), 4124–4131. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10435>
- Sun, J., Liu, Y., Wu, G., Zhang, Y., Zhang, R., & Li, X. J. (2021). A fusion parameter method for classifying freshness of fish based on electrochemical impedance spectroscopy. *J. Food Qual.*, 2021, 6664291. <https://doi.org/10.1155/2021/6664291>
- Sun, Z., Liang, L., Li, J., Liu, X., Sun, J., Zou, X., Zuo, M., & Guo, Z. (2020). Rapid detection of Atlantic salmon multi-quality based on impedance properties. *Food Sci. Nutr.*, 8(2), 862–869. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1362>
- Teixeira, L. G., Bertemes-Filho, P., & Cox, M. K. (2021). Fish quality investigations using electrical impedance spectroscopy: Preliminary results. *J. Phys. Conf. Ser.*, 2008, 012008. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2008/1/012008>
- Wang, S., Zhang, Z., Zhao, X., & Xiao, X. (2024). Electrical impedance spectroscopy for non-destructive meat freshness assessment. *Discov. Food*, 4, 177. <https://doi.org/10.1007/s44187-024-00259-5>
- Wang, X., Feng, Y., Wang, Y., Zhu, H., Song, D., Shen, C., & Luo, Y. (2025). Enhancing optical non-destructive methods for food quality and safety assessments with machine learning techniques: A survey. *J. Agric. Food Res.*, 19, 101734. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.101734>
- Wu, D., Zhang, M., Chen, H., & Bhandari, B. (2021). Freshness monitoring technology of fish products in intelligent packaging. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, 61(8), 1279–1292. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1757615>
- Yuan, P., Wang, Y., Miyazaki, R., Liang, J., Hirasaka, K., Tachibana, K., & Taniyama, S. (2018). A convenient and nondestructive method using bio-impedance analysis to determine fish freshness during ice storage. *Fish. Sci.*, 84, 1099–1108. <https://doi.org/10.1007/s12562-018-1256-8>
- Zavadlav, S., Lacković, I., Bursać Kovačević, D., Greiner, R., Putnik, P., & Vidaček Filipec, S. (2019). Utilizing impedance for quality assessment of European squid (*Loligo vulgaris*) during chilled storage. *Foods*, 8(12), 624. <https://doi.org/10.3390/foods8120624>
- Zhang, L., Shen, H., & Luo, Y. (2011). A nondestructive method for estimating freshness of freshwater fish. *Eur. Food Res. Technol.*, 232, 979–984. <https://doi.org/10.1007/s00217-011-1467-z>
- Zhang, N., Lim, S. J., Toh, J. M., Wei, Y. F., Rusli, & Ke, L. (2022). Investigation of spoilage in salmon by electrochemical impedance spectroscopy and time-domain terahertz spectroscopy. *ChemPhysMater*, 1(2), 148–154. <https://doi.org/10.1016/j.chphma.2021.12.003>
- Zhang, X., Zhang, W., Zhang, C., Zhang, L., & Zhang, Y. (2025). A multi-indexes and non-invasive fish health assessment system with deep learning and impedance sensing. *Aquaculture*, 598, 742025. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2024.742025>
- Zhang, Y., Chen, L., Feng, H., Xiao, X., Nikitina, M. A., & Zhang, X. (2023). Wearable bioimpedance-based deep learning techniques for live fish health assessment under waterless and low-temperature conditions. *Sensors*, 23(19), 8210. <https://doi.org/10.3390/s23198210>
- Zhao, X., Zhuang, H., Yoon, S.-C., Dong, Y., Wang, W., & Zhao, W. (2017). Electrical impedance spectroscopy for quality assessment of meat and fish: A review on basic principles, measurement methods, and recent advances. *J. Food Qual.*, 2017, 6370739. <https://doi.org/10.1155/2017/6370739>

Abstract Extended

A Review on the Application of Electrical Impedance Spectroscopy in Quality and Freshness Assessment of Seafood Products

Marzieh Monirifar²⁸, Seyed Vali Hosseini^{29*}, Gholamreza Shah Hosseini³

¹M.Sc. in Seafood Processing, Department of Fisheries, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

²Associate Professor, Department of Fisheries, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

³Associate Professor, Nuclear Agriculture Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Karaj, Iran

Introduction

Seafood products are highly nutritious, rich in proteins and omega-3 fatty acids, and play a vital role in a balanced diet. However, they are extremely perishable and undergo rapid biochemical and microbial deterioration post-mortem, leading to undesirable changes in odor, flavor, and texture. Therefore, accurate and timely assessment of quality and freshness is a critical need throughout the supply chain and quality control systems. Traditional chemical and microbiological methods, such as K-value and total volatile basic nitrogen (TVB-N) measurements, are often time-consuming, destructive, and unsuitable for online industrial applications. These limitations have driven the search for rapid, nondestructive, and cost-effective alternatives. Electrical impedance spectroscopy (EIS) has emerged as a promising technique that measures the electrical response of biological tissues over a range of frequencies, providing valuable information about cellular membrane integrity, water and ion distribution, and structural degradation. EIS offers advantages including speed, non-destructiveness, low cost, and portability. Numerous studies have demonstrated its capability to differentiate fresh from spoiled samples and to predict reference quality indices using chemometric models. Despite these potentials, challenges such as temperature sensitivity, electrode contact quality, tissue heterogeneity, and lack of standardized protocols hinder its widespread industrial adoption. This review aims to systematically examine recent advances in EIS applications for fish and seafood freshness evaluation, discuss the underlying principles, measurement techniques, data processing strategies, and compare EIS with other non-destructive methods, while identifying current gaps and future research directions.

Materials and Methods

A comprehensive literature search was conducted using the ScienceDirect and Google Scholar databases. The search strategy employed the keywords *electrical impedance spectroscopy*, *fish freshness*, *fish spoilage*, and *seafood quality*. The initial search using combinations of these keywords yielded 165 English-language scientific articles. After applying thematic filters and limiting the search to studies directly addressing the application of EIS in assessing spoilage and freshness of aquatic products and seafood, 39 articles were identified; following detailed content review, 38 articles fully met the inclusion criteria. To cover the theoretical foundations, including biological impedance principles, cell membrane behavior, mechanistic models, and comparative non-destructive methods the search scope was expanded, resulting in a total of 89 relevant articles entering the screening process. Finally, after applying relevance criteria and alignment with the review objectives, 57 articles were selected as the final references for this review. Recent comprehensive reviews in the field emphasize that the integration of novel sensing technologies including EIS, artificial intelligence, and real-time data analysis will shape the future of aquatic product quality assessment. Accordingly, this study examines EIS applications in the quality and freshness evaluation of fish and aquatic products and reviews recent advances in this method.

Results and Discussion

The reviewed studies consistently demonstrate that EIS is sensitive to post-mortem structural and biochemical changes in fish muscle. The impedance response is governed by the frequency-dependent current pathways through extracellular and intracellular fluids, with cell membranes acting as capacitive barriers at low frequencies. As freshness declines, membrane integrity deteriorates, leading to decreased impedance magnitude and altered phase angle. Several mechanistic models, including the Fricke model, three-component equivalent circuit, and Cole-Cole model, have been employed to translate impedance spectra into interpretable parameters reflecting tissue state. Measurement systems typically employ either full frequency sweep (e.g., 0.1 Hz to 100 kHz) or selected multi-frequency approaches to reduce measurement time. Electrode configurations range from two-electrode (simple but prone to polarization artifacts) to four-electrode (tetrapolar) setups that minimize contact impedance. Temperature

*Corresponding Author: hosseinisv@ut.ac.ir

control during measurement is crucial, as impedance is highly temperature-dependent. Studies on various species, including Atlantic salmon, Nile tilapia, European squid, grass carp, and seabream have shown that impedance parameters correlate well with storage time and quality indices. For instance, the ratio of impedance at different frequencies (C-value or Q-index) has been used to predict K-value and TVB-N with good accuracy using partial least squares (PLS) regression.

Advanced data processing strategies have been developed to address inter-sample variability, a major challenge. Morphological features extracted from impedance spectra (e.g., peak characteristics) have shown greater stability across samples of different origins compared to raw impedance or phase angle values, with relative standard deviations as low as 4.6% versus 7.8 - 20.1%. Classification models based on morphological parameters achieved up to 78% accuracy, whereas raw parameters yielded 52 - 55%. Fusion approaches combining impedance magnitude, phase angle, and morphological features improved classification accuracy to 94.2%. Preprocessing techniques have also been shown to enhance prediction robustness under varying temperature conditions, increasing accuracy from 54% to 84%.

In cold chain monitoring, EIS has effectively tracked freshness deterioration during ice or refrigerated storage. Studies on Atlantic salmon demonstrated that EIS combined with chemometrics could discriminate quality levels and predict TVB-N. In European squid, phase angle changes during 11 days of chilled storage correlated with TVB-N, pH, and water holding capacity. For authentication applications, EIS has successfully distinguished fresh from frozen-thawed seabream, though it showed limitations in detecting freeze-thaw cycle numbers.

Compared to other non-destructive techniques such as near-infrared spectroscopy, Raman, fluorescence, hyperspectral imaging, and multispectral imaging EIS offers simpler hardware, lower cost, and easier portability, making it more suitable for rapid on-site screening. However, optical and imaging methods provide richer spatial and spectral information and are non-contact, albeit at higher costs and with greater operational complexity. Thus, EIS is best positioned as a complementary tool rather than a complete replacement for other methods.

Key challenges identified include a lack of standardized measurement protocols (electrode type, contact pressure, measurement site, temperature control), high sensitivity to experimental conditions, inter-sample biological variability, limited generalizability of models across species and storage conditions, and (5) electrode polarization effects. Addressing these requires the development of normalized indices, robust preprocessing methods, and advanced machine learning models.

Conclusions

Electrical impedance spectroscopy is a promising non-destructive, rapid, and cost-effective technique for assessing fish and seafood freshness, with demonstrated capability to track quality changes during cold storage and predict reference biochemical indices. Its sensitivity to cellular membrane integrity and tissue structure provides meaningful insights into spoilage progression. However, widespread industrial adoption is currently hindered by the absence of standardized protocols, susceptibility to measurement conditions, and inter-sample variability. Future research should focus on developing robust measurement standards, integrating EIS with advanced feature extraction and machine learning algorithms, designing portable and user-friendly devices, and validating models across diverse species and supply chain scenarios. With these advancements, EIS holds substantial potential to become a practical and reliable tool for rapid quality monitoring in the seafood industry.

Keywords: Cold chain monitoring; Electrical impedance spectroscopy; Spoilage indices; Quality assessment of Seafood.



A Review on the Application of Electrical Impedance Spectroscopy in Quality and Freshness Assessment of Seafood Products

Marzieh Monirifar³⁰, Seyed Vali Hosseini^{31*}, Gholamreza Shah Hosseini³

¹M.Sc. in Seafood Processing, Department of Fisheries, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

²Associate Professor, Department of Fisheries, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

³Associate Professor, Nuclear Agriculture Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Karaj, Iran

Abstract

Seafood products, despite their high nutritional value, are highly perishable, and rapid, non-destructive assessment of quality and freshness has become a critical requirement throughout the supply chain. Conventional chemical and microbiological methods are often time-consuming, destructive, and difficult to implement in industrial production lines. Electrical impedance spectroscopy (EIS), as a rapid, lowcost, and non-destructive technique, enables the evaluation of structural and biochemical changes in fish tissues by measuring their electrical response over a range of frequencies. This review aims to investigate and analyze the applications of EIS in the assessment of freshness, spoilage, and quality of aquatic products, while also examining the factors affecting its potential for industrial implementation. In this context, previous studies focusing on measurement principles, frequency effects, electrode configurations, mechanistic models, feature extraction approaches, and impedance data modeling were reviewed and analyzed.

The findings indicate that impedance parameters, including impedance magnitude, phase angle, spectral features, and their integration with chemometric approaches and machine learning algorithms, demonstrate considerable potential for establishing relationships with reference quality indicators such as TVB-N, K-value, microbial counts, and sensory evaluation. Furthermore, EIS has shown promising performance in monitoring quality changes during cold storage and differentiating various stages of spoilage. However, despite these advantages, several challenges, including strong dependence on measurement conditions, electrode type and contact configuration, temperature variations, tissue heterogeneity, and the lack of standardized protocols, remain major barriers to the widespread industrial application of this technology. Based on the reviewed studies, the future development of EIS in the seafood industry will largely depend on the advancement of portable sensing systems and the standardization of measurement procedures. Therefore, EIS can be considered a promising complementary technology for rapid and non-destructive quality monitoring of seafood products alongside existing assessment methods.

Keywords: Cold chain monitoring; Electrical impedance spectroscopy; Spoilage indices; Quality assessment of Seafood.

*Corresponding Author: hosseinisv@ut.ac.ir