



تشخيص انتي اكسيدانت‌هاى موجود در چاي با استفاده از ميتود ولتامترى دورانى

پوهنيار سيد روح الله پويا^۱، پوهنوال محمد ظاهر محبت^۲

^{۱،۲}دديپارتمنت كيمياى عمومى و غير عضوى، پوهنځى كيميا، پوهنتون كابل، كابل، افغانستان

ايميل: poya.rohullah2020@gmail.com

چكیده

چای به دلیل طعم، رنگ، بوی مطبوع و خواص آرام‌بخش، در بسیاری از کشورها، از جمله افغانستان، جایگاه ویژه‌ای در میان نوشیدنی‌ها دارد. افزون بر این، چای به دلیل خواص انتی‌اکسیدانتی ناشی از پولي‌فینول‌هاى موجود، از اهمیت خاصی برخوردار است و مورد توجه دانشمندان قرار گرفته است. هدف این مقاله تشخیص انتی‌اکسیدانت‌هاى موجود در چای به روش ولتامترى دورانى و مقایسه آن با میتودهاى دیگر می‌باشد. اندازه‌گیری ظرفیت و فعالیت انتی‌اکسیدانتی چای برای تعیین مقدار پولي‌فینول‌ها گامی اساسی در صنعت چای محسوب می‌شود. به این منظور، روش‌هاى مختلفی توسعه یافته اند که هرکدام مزایا و معایب خاص خود را داشته و در این تحقیق دریافت گردید که ولتامترى دورانى روشی مناسب، سریع، آسان و کم‌مصرف برای تشخیص و اندازه‌گیری انتی‌اکسیدانت‌هاى موجود در چای است.

واژه‌هاى کلیدی: چای؛ انتی‌اکسیدانت‌ها؛ ولتامترى دورانى؛ میتودهاى تحلیل چای؛ پولي‌فینول‌ها

Investigation and Detection of Antioxidants in Tea Using Cyclic Voltammetry Method

Sayed Rohullah Poya¹, Mohammad Zaher Mohabat²

^{1,2}General and Inorganic Chemistry Department, Faculty of Chemistry, Kabul University, Kabul, Afghanistan

Email: poya.rohullah2020@gmail.com

Abstract

Tea, due to its taste, color, pleasant aroma, and calming properties, holds a special place among beverages in many countries, including Afghanistan. Additionally, tea attracted the attention of scientists due to its antioxidant properties, which are derived from the polyphenols it contains. This article aims to identify the antioxidants present in tea using cyclic voltammetry (CV) and to compare CV with other methods. An important stage in the tea industry is measuring the antioxidant activity and capacity of tea to find out how much polyphenols are present. For this purpose, various methods have been developed, each with its own advantages and disadvantages. In this research, it was found that cyclic voltammetry is a suitable, rapid, simple, and cost-effective method for the identification and measurement of antioxidants in tea.

Keywords Antioxidants; Cyclic Voltammetry; Polyphenols; Tea; Tea Analysis Methods

ارجاع: پويا، س. ر. و محبت، م. ظ. (۱۴۰۴). تشخیص انتی‌اکسیدانت‌هاى موجود در چاي با استفاده از ميتود ولتامترى

دورانى. مجله علمي - تحقيقي علوم طبيعي پوهنتون کابل، ۸(۴)، ۱۷۷-۱۹۵. <https://doi.org/10.62810/jns.v8i4.110>

مقدمه

اکسیجن عنصر ضروری برای حیات است. خواص اکسیجن نقش حیاتی در پدیده‌های بیولوژیکی مختلف ایفا می‌کند؛ با وجود این که اکسیجن برای حیات ضروری است، هنوز هم می‌تواند از طریق عملیه‌های اکسیدیشنی آسیب‌هایی را در درون حجره تشدید کند. حجره‌ها از اکسیجن برای تشکیل انرژی استفاده می‌کنند و رادیکال‌های آزاد در نتیجه تولید ادینوزین تری فسفات (ATP) در مایتوکاندریا تولید می‌شوند. نوع فعال اکسیجن (ROS) و نوع فعال نایتروجن (RNS) محصولات جانبی تعاملات ریدوکس در حجره‌ها هستند. رادیکال و یا آیون‌های فعال نقش دوگانه در بدن انسان دارند و به هردو عنوان یعنی مرکبات سمی و مفید عمل می‌کنند. بدون شک، تعادل ظریف بین این دو اثر متضاد نقش کلیدی در حیات انسان بازی می‌کند. در سطوح پایین یا متوسط، گونه‌های فعال رادیکال‌ها و آیون‌ها اثرات مفیدی بر سیگنال‌دهی ریدوکس حجروی و سیستم معافیتی بدن دارند؛ اما در غلظت‌های بالا آن‌ها باعث اکسیدیشن حجرات می‌شوند. این علمیه می‌تواند به عملکرد و ساختارهای حجره آسیب برساند (Chakraborty et al, 2011). بالعکس انتی‌اکسیدانت‌ها به‌عنوان مواد طبیعی یا مصنوعی تعریف می‌شوند که می‌توانند از آسیب حجروی جلوگیری کرده یا آن را به تأخیر بیندازند. این مرکبات در بسیاری از غذاها، از جمله میوه‌ها و سبزیجات، یافت می‌شوند (Prabha et al, 2016). گروه از مرکباتی که دارای خواص انتی‌اکسیدانتی اند، عبارتند از: ویتامین‌ها (ویتامین C و ویتامین E)، کروتینوئیدها (کروتین‌ها و زانتوفیل‌ها) و پولی‌فنول‌ها (فلاونوئیدها، فینولیک اسیدها، لیگنان‌ها و استیلین‌ها) (Escrich and Oroian, 2015).

عصاره‌ی چای سبز حاوی چندین ترکیب پولی‌فنولی با خواص انتی‌اکسیدانتی است؛ اما اصلی‌ترین مرکبات فعال آن مونومیرهای فلاوانول هستند که به‌عنوان کتیکین شناخته می‌شوند. در این میان، ایپی‌گلوکتیکین-۳-گلیت و ایپی‌کتیکین-۳-گلت مؤثرترین مرکبات انتی‌اکسیدانتی به‌شمار می‌روند. بر اساس مطالعات خواص انتی‌اکسیدانتی تیوفلاون‌ها مربوط به موجودیت گروه‌های هایدروکسیل در ساختمان کیمیاوی آن‌ها می‌شود. از جانب دیگر، موجودیت گروه‌های اوکسی نیز در فلاونوئیدها می‌تواند خواص انتی‌اکسیدانتی آن‌ها را افزایش دهد.

چای را می‌توان به سه نوع اساسی نظر به درجه اکسیدیشن از قرار؛ چای سبز، چای اولانگ و چای سیاه دسته‌بندی کرد. چای عمدتاً در مناطق گرمسیری و معتدل آسیا، به ویژه در کشورهای چین، هند، سریلانکا و جاپان، همچنین در برخی کشورهای آفریقایی و آمریکای جنوبی رشد می‌کند. انواع مختلف چای بر اساس زمان تخمر که در وقت پروسس صورت می‌گیرد طبقه‌بندی می‌شوند؛ چای سبز

بدون تخمر، چای اولانگ نیمه تخمر شده و چای سیاه به طور کامل تخمر شده است. تمامی انواع چای دارای انتی‌اکسیدانت‌ها بوده؛ ولی مقدار این انتی‌اکسیدانت‌ها در چای‌های مختلف متفاوت می‌باشد (Senanayake, 2013). چای سبز شامل چهار مشتق کتیکین می‌باشد که عبارتند از (-)-ایپی کتیکین (EC)، (-)-ایپی گلوکتیکین (EGC)، (-)-ایپی کتیکین گلایت (ECG) و (-)-ایپی گلوکتیکین گلایت (EGCG). کتیکین ۶-۱۶٪ وزن خالص برگ‌های خشک چای را تشکیل می‌دهد. تیافلاوین‌ها (TF) گروه دیگری از پگمنت‌های پولی‌فینولی هستند که در چای سیاه و چای اولانگ یافت می‌شوند. تیافلاوین‌ها از طریق پولیمیرایزیشن کتیکین‌ها در مرحله تخمر یا نیمه تخمر در پروسه‌ی تولید چای سیاه یا اولانگ شکل می‌گیرند. تیافلاوین‌ها (TF) به رنگ نارنجی-سرخ روشن چای سیاه کمک می‌کنند و حدود ۲ گرم از هر ۱۰۰ گرم عصاره‌ی خشک چای سیاه را تشکیل می‌دهند. اصلی‌ترین تیافلاوین‌های موجود در چای سیاه و چای اولانگ شامل تیافلاوین (TF1)، تیافلاوین-3-گالات (TF2A)، تیافلاوین-3-گالات (TF2B) و تیافلاوین-3,3'-دای‌گالات (TF3) هستند.

کتیکین‌ها و تیافلاوین‌ها اخیراً توجه زیادی را به عنوان عوامل معافیتی در برابر امراض قلبی عروقی و سرطان جلب کرده‌اند. همچنین مزایای طبی دیگر، از جمله فعالیت‌های ضد فشار خون، انتی‌اکسیدانتی و هایپولیپیدمیک دارند (Lai Kwok et al, 2001). سپکتروفوتومتری و کروماتوگرافی مایع با عملکرد بالا (chromatography High-performance liquid) معمولاً برای تعیین مقدار پولی‌فینول‌ها در چای استفاده می‌شوند. ولی با عمیق‌تر شدن تحقیقات علمی در مورد چای، محققان نیازهای بالاتری برای تحلیل مقدراری دقیق مرکبات مؤثر در چای مطرح کرده‌اند. در سال‌های اخیر، با توسعه سریع صنایع تحلیلی، به‌ویژه اسپکتروسکوپی کتله‌ی تاندوم و اسپکتروسکوپی کتله با وضاحت بالا (High-Resolution Mass Spectrometry) دستگاه‌های تحلیلی پیشرفت سریعی در بهتر شدن حساسیت، دقت و وضاحت داشته‌اند (Sun, et al., 2022). یکی از میتودهای مهم دیگر که با آن میتوان انتی‌اکسیدانت‌های موجود در چای را تحلیل نمود اسپکتروسکوپی بوده که در این میتود از ریجنت‌های مختلف برای تعیین مقدار کلی مرکبات فینولیک موجود در چای مورد استفاده قرار گرفته و با استفاده از اسپکترومتر می‌توان غلظت مقدار کلی انتی‌اکسیدانت‌های موجود در چای را دریافت نمود.

به طور مثال میتود مهار رادیکال DPPH که مهارکننده در آن (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl) می‌باشد، یکی از میتودهای اسپکتروسکوپی بوده که در آن مرکب تعامل‌کننده با انتی‌اکسیدانت یکی از اتوم‌های هایدروجن را از انتی‌اکسیدانت گرفته و تشکیل رنگ داده و در طول موج ۵۱۵ نانومتر توسط

اسپکترومتر قابل دید مورد تحلیل و ارزیابی قرار میگیرد. مقدار انتی اکسیدانت موجود در چای را می توان توسط جواب اسپکترومتر دریافت کرد. میتود مجموعه فینول موجود در چای (Total Phenolic Content - TPC) نیز یکی از میتودهای معمول برای تعیین انتی اکسیدانت های چای بوده و در آن از معرف فولین-سیوکالتو برای اندازه گیری مقدار کلی فینول در عصاره های چای استفاده می شود. در این میتود، جذب نور در طول موج ۶۵۰ نانومتر خوانده می شود و نتایج بر اساس منحنی کالیبرایشن به صورت معادل گرام های گلایک اسید (GAE) بیان می شوند (Sahib & Al-Obaid, 2015i).

در اکثریت مطالعات انجام شده متأسفانه وقتی بحث از انتی اکسیدانت ها می شود، بین فعالیت و ظرفیت انتی اکسیدانتی یک ماده فرق صورت نگرفته و همواره یکی بجای دیگر استفاده می گردند. ظرفیت انتی اکسیدانتی یعنی یک ماده به چه مقدر رادیکال آزاد را خنثی کرده می تواند؛ اما فعالیت انتی اکسیدانتی نشان می دهد که به کدام سرعت این ماده با رادیکال آزاد عکس العمل نشان می دهد و آن ها را جذب می کند. در حالی که در بعضی مطالعات فعالیت انتی اکسیدانتی یک ماده مورد تحلیل بوده و ظرفیت آن می تواند ارزش به سزایی نداشته باشد. برعلاوه آزمایش های مبتنی بر اسپکتروسکوپی علی رغم دریافت توجه قابل ملاحظه در ارتباط با تحلیل انتی اکسیدانت ها همچنان با مشکلاتی؛ چون حساسیت پایین نسبت به تغییرات ریدوکس، تفکیک پذیری طیف پایین و مسائل کدری و پراکندگی مربوط به نمونه روبرو هستند. علاوه بر این، بسیاری از انتی اکسیدانت ها و عصاره های غذایی حاوی واحدهای کروموفوری هستند که ممکن است در تشخیص توسط میتود اسپکتروسکوپی تداخل ایجاد کنند. در عین زمان، چون حساسیت معمولاً با طول مسیر نوری ارتباط دارد، کوچک سازی و قابلیت حمل آشکارسازهای نوری نیز محدود است. به طور کلی، برای غلبه بر این محدودیت ها، آزمایش های مبتنی بر اسپکتروسکوپی اغلب زمان نیازمند مراحل آماده سازی اضافی مانند مراحل استخراج بوده که مجبوراً زمان کلی تحلیل را افزایش می دهد. برای این منظور، تخنیک های الکتروکیمیای نسبت به روش های مبتنی بر اسپکتروفوتومتری چندین مزیت دارند. اولاً، روش های الکتروکیمیای به طور ذاتی به حالت ریدوکس گونه های انتی اکسیدانتی حساس هستند. همچنان، دستگاه های الکتروکیمیای معمولاً بسیار ساده، کم هزینه و دارای امکان کوچک سازی نامحدود هستند.

در نهایت، زمان پاسخ دهی سریع حسگرهای الکتروکیمیای آن ها را به گزینه ی مطلوب برای جایگزینی با دیگر میتودها تبدیل می کنند (Ferrent et al, 2021). ولتامتری دورانی (CV) یک تخنیک مؤثر برای تجزیه و تحلیل انتی اکسیدانت ها در نمونه های مختلف است. این روش امکان

اندازه‌گیری مرکباتی مانند؛ یوریک اسید را فراهم می‌کند که با یک پیک انودی مشخص شناسایی می‌شوند و اندازه‌گیری قابل اعتمادی را تسهیل می‌کند. نتایج ولتامتری دورانی با نتایج حاصل از کروماتوگرافی مایع با عملکرد بالا (HPLC) مقایسه شده و تنها تفاوت‌های اندکی دیده شده است. این روش همچنان قادر به شناسایی سایر ارجاع‌کننده‌ها است و توانایی تجزیه و تحلیل چندین ماده را در یک تجربه نشان می‌دهد. ولتامتری دورانی سریع‌تر، ساده‌تر و از نظر هزینه ارزان‌تر از روش‌های سنتی؛ مانند HPLC بوده و آن را برای تجزیه و تحلیل‌های معمولی انتی‌اکسیدانت‌ها مطلوب می‌سازد (Kilmartin, 2019 & Motshakeri, Philips).

همچنان از ولتامتری دورانی به عنوان یک روش مؤثر برای شناسایی و اندازه‌گیری انتی‌اکسیدانت‌ها با وزن مالیکولی کوچک (LMWAs) در نمونه‌های مختلف از جمله پلازما خون، هیموجنات حجرات و عصاره‌های گیاهی استفاده بعمل می‌آید. این روش به ویژه برای شناسایی مرکباتی؛ مانند اسکوربیک اسید و یوریک اسید کاربرد دارد (Chevion et al, 2000). افزون بر این از ولتامتری دورانی می‌توان فعالیت مهار رادیکالی انتی‌اکسیدانت‌ها را مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. در یک مطالعه انجام شده با استفاده از ولتامتری دورانی روی چند ماده فعال موجود در غذا (کتیکین، الفاتوکو فیرو ل، هایدروکسی تیروزول، اولی یوروپین، ریتینایل استات و کافیک اسید) تحقیق صورت گرفته و رادیکال‌های آزاد شده از تجزیه حرارتی مرکب از ویس (ایزوبوتیرونیتیل) با انتی‌اکسیدانت‌های فوق‌الذکر داخل تعامل شده و فعالیت انتی‌اکسیدانتی مرکبات با استفاده از مطالعه کینتیک این تعاملات توسط میتود ولتامتری دورانی اندازه‌گیری و تعیین گردیده است (Ferrent et al, 2021). از سوی دیگر از ولتامتری دورانی می‌توان در تحلیل و تجزیه انتی‌اکسیدانت‌های موجود در انواع توت‌ها استفاده کرد که در آن تجزیه و تحلیل مشابه به عملی فیزیکی بوده و هیچ نوع ضرورت به خرید مواد دیگری، مانند؛ مواد مرجع یا مواد استاندارد ندارد که در دیگر میتودها همیشه ضرورت به یک محلول مرجع بوده تا بتوانیم مرکبات فینولیدها و انتوسیانین‌ها را در انواع مختلف توت (شاه توت سیاه، شاه توت سرخ، توت زمینی و زغالک) تحلیل و بررسی کنیم (Kilmartin et al, 2019).

با توجه به تشریحات فوق در مورد اهمیت انتی‌اکسیدانت‌ها برای سلامتی صحت انسان و پیشگیری از بیماری‌های مرتبط با اکسیدانت‌های تولید شده در وجود، روش‌های دقیق و قابل اعتمادی برای اندازه‌گیری فعالیت و ظرفیت انتی‌اکسیدانتی مواد غذایی، به ویژه در منابع غنی از انتی‌اکسیدانت مانند چای، ضروری به نظر می‌رسد. متأسفانه در مطالعاتی که قبلاً انجام شده است تفاوت میان ظرفیت و فعالیت انتی‌اکسیدانت‌ها به خوبی تشخیص داده نشده و روش‌های مبتنی بر سپکتروسکوپی به دلیل حساسیت

پایین نسبت به تغییرات ریدوکس و تحلیل محدودیت‌هایی دارند که مانع از اندازه‌گیری دقیق می‌شوند. از سوی دیگر، روش‌های الکتروشیمیکی مانند سایکلو ولتامتری به دلیل حساسیت به خواص ریدوکس نمونه‌های حاوی انتی‌اکسیدانت، سهولت استفاده، هزینه کم و پاسخ‌دهی سریع، گزینه‌ای مطلوب و کارآمد برای تحلیل انتی‌اکسیدانت‌ها محسوب می‌شوند که می‌توانند بسیاری از مشکلات روش‌های سنتی را برطرف نمایند. هدف اصلی این مطالعه، رفع خلأ موجود در تشخیص و تفکیک ظرفیت و فعالیت انتی‌اکسیدانتی در نمونه‌های چای با استفاده از ولتامتر دورانی است و این تحقیق می‌تواند منجر به بهبود کیفیت تحلیل انتی‌اکسیدانت‌های چای شده و کمک به استندردسازی و طبقه‌بندی علمی محصولات چای گردد. بنابراین، این تحقیق به عنوان یک ابزار علمی و کاربردی، در جهت ارتقای روش‌های اندازه‌گیری و تضمین کیفیت در صنعت چای، به ویژه در کشورهایی که دسترسی به فناوری‌های پیشرفته محدود است، بسیار حائز اهمیت است.

روش تحقیق

در انجام این تحقیق از مقالات در پایگاه‌های اطلاعاتی علمی؛ مانند Google Scholar، ScienceDirect و Web of Science، مقالات مرتبط با موضوع انتی‌اکسیدانت‌ها، ترکیبات پولی‌فینولی چای و تخنیک‌های تحلیلی؛ مانند ولتامتری دورانی انتخاب شدند. سپس، معیارهایی همچون تاریخ انتشار، رتبه ژورنال، و ارتباط دقیق مقالات با موضوع برای انتخاب مقالات نهایی مد نظر قرار گرفتند. در نتیجه یافته‌ها و نتایج مقالات بررسی شده به صورت مقایسه‌ی تحلیل و ارزیابی گردیده‌اند.

یافته‌ها

با توجه به تشریحات فوق، از آنجایی که میتودهای الکتروکیمیای -بالخصوص میتود ولتامتری دورانی (ولتامتری تناوبی)- برای تشخیص انتی‌اکسیدانت‌های موجود در مواد غذایی یک گزینه مناسب می‌باشد؛ بنابراین، قبل از این که تشخیص انتی‌اکسیدانت‌های موجود در چای را توسط این میتود مورد بررسی قرار دهیم بهتر خواهد بود تا یک معرفی مختصر در مورد ولتامتری دورانی داشته باشیم.

ولتامتری دورانی

از میان چندین تخنیک الکتروکیمیای که وجود دارد، رایج‌ترین آن‌ها ولتامتری دورانی، ولتامتری موج مربعی، ولتامتری ضربه‌ی دیفرانسیلی و کروماتوپیرومتری هستند. باید توجه داشت که مبانی نظری که در ادامه توضیح داده شده‌اند، به تعاملات الکتروکیمیای دوطرفه (رجعی) مربوط می‌شوند. این تعاملات با رجعی‌کیمیای متفاوت‌اند؛ چون در این حالت تغییرات روی سطح الکتروود اتفاق می‌افتند.

همچنین باید گفت که فورمول‌های ریاضیکی ارائه شده در متن زیر به پروسه اکسیدیشن اشاره می‌کند. این پروسه نشان می‌دهد که ماده‌ی اکسیدی شونده، از داخل محلول به سطح الکتروود منتقل می‌شود و این انتقال توسط انتشار ماده در محلول انجام می‌شود.

ولتامتری دورانی (CV) یکی از تخنیک‌های بسیار رایج برای به دست آوردن معلومات کیفی در مورد خصوصیات و ویژگی‌های پروسه‌های الکتروکیمیای است. این تخنیک معلومات زیادی را در مورد ترمودینامیک تعاملات ریدوکس و کینتیک انتقال الکترون‌های غیرمتجانس، همچنان در مورد تعاملات کیمیای که همراه با عملیه‌های جذب یا آزاد شدن الکترون صورت می‌گیرد، فراهم می‌سازد. ولتامتری دورانی روشی است که در آن پوتانشیل الکتروود را به صورت خطی (یک‌نواخت) تغییر می‌دهند. این کار با استفاده از یک موج مثلثی انجام می‌شود. در این روش، الکتروود انتقال‌دهنده الکترون (WE) در محلولی قرار دارد که ثابت است و حل نمی‌شود. وابسته به نوع اطلاعاتی که می‌خواهیم به دست بیاوریم، ممکن است یک بار یا چندین بار این تغییرات پوتانشیل را تکرار کنیم (شکل ۲، A). پوتنشیوستات/گلوانوستات جریان تولید شده توسط پروسه ریدوکس (اکسیدیشن-ریدکشن) را اندازه‌گیری می‌کند. در نتیجه یک گراف می‌دهد که محور افقی آن جریان بوده و محور عمودی آن تفاوت پوتانشیل می‌باشد.

با در نظر داشت یک سیستم رجعی $O + ne \rightleftharpoons R$ طوری که O یک ذره اکسیدی شده است، R شکل ارجاع شده همان ذره است، و ne تعداد الکترون‌هایی است که برای وقوع این تعامل ضروری می‌باشد، وقتی پوتنشیل زمانی بالای این سیستم تطبیق می‌شود، تغییراتی رخ می‌دهد. که این تغییرات پیش بینی شده در شکل ii) یک دوارن پوتنشیل نشان داده شده است. فرض می‌شود که در ابتدا تنها حالت ارجاع شده (R) موجود است. شروع اسکن از یک پوتنشیلی آغاز می‌شود که در آن هیچ‌گونه تعامل صورت نمی‌گیرد. تفاوت پوتنشیل به سمت نیمه اول چرخه ازدیاد پیداد می‌کند. زمانی که پوتنشیل اعمال شده به پوتنشیل استاندارد ارجاعی (E°) برای عملیه ریدوکس نزدیک می‌شود، در این صورت یک جریان انودی تا زمانی که به یک قله یا پیک برسد، شروع به افزایش می‌کند. پس از عبور از ناحیه‌ی پوتنشیلی که در آن عملیه اکسیدیشن صورت می‌گیرد، جهت اسکن پوتنشیل معکوس می‌شود. در جریان اسکن معکوس، مالیکول‌های اکسیدی شده O (مالیکول‌هایی که در جریان اسکن رفت یا اسکن زیاد شدن ولتاژ تولید شده و در نزدیکی سطح الکتروود تجمع یافته اند)، دوباره به R ارجاع می‌شوند و یک پیک کتودی مشاهده می‌شود.

مطابق با معادله رندل-سویک، برای سیستم‌های رجعی جریان پیک، I_p ، متناسب با غلظت ماده تحلیلی در حجم محلول است.

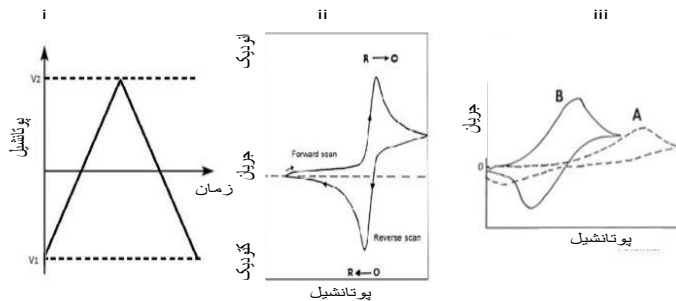
$$I_p = (2.69 \times 10^5) n^{3/2} A C D^{1/2} \nu^{1/2} \quad I$$

که در این فورمول n تعداد الکترون انتقال‌های داده شده، A مساحت فعال الکتروود (به سانتی متر مربع)، C غلظت حجمی ماده مورد تحلیل (به مول فی لیتر)، D ضریب انتشار ماده مورد تحلیل (به سانتی متر مربع فی ثانیه)، و ν نرخ اسکن (به ولت فی ثانیه) است.

اختلاف بین پتانسیل‌های پیک که به ولت بیان می‌شود، برای سیستم‌های رجعی، به صورت زیر داده می‌شود:

$$\Delta E_p = E_{p,a} - E_{p,c} = \frac{0.059}{n}$$

که در این فورمول $E_{p,c}$ پوتانشیل پیک کتودی، $E_{p,a}$ پوتانشیل پیک آنودی و n تعداد الکترون‌ها می‌باشد. بنابراین، فاصله بین پیک‌ها می‌تواند برای تعیین تعداد الکترون‌هایی که انتقال می‌کنند، استفاده شود. همچنین به‌حیث یک معیار برای رفتار نرنستی به کار می‌رود؛ یعنی شرایطی که در آن پوتانشیل به شکل خطی با لوگاریتم فعالیت مواد تغییر می‌کند.



شکل ۱: (i) گراف تغییرات پوتانشیل نظر به زمان در ولتاژمتری دورانی. (ii) ولتاگرام معمولی برای یک پروسه ریدوکس رجعی. (iii) ولتاگرام برای سیستم نیمه‌رجعی (منحنی B) و سیستم غیر رجعی (منحنی A) (Arbelaz et al, 2017)

برای سیستم‌های نیمه رجعی، جریان هم توسط انتقال چارج و هم توسط انتقال کتله ماده‌ی مورد تحلیل از حجم محلول به سمت سطح الکتروود کنترل می‌شود. ولتاگرام‌های سیستم‌های نیمه‌رجعی بارز و پیوسته بوده و نسبت به سیستم‌های رجعی، جدایی بیشتری بین پوتانشیل‌های پیک نشان می‌دهند (شکل ۱-iii منحنی B). برای سیستم‌های غیر رجعی (آن‌هایی که انتقال الکترون در آن‌ها کند است)،

پیک‌های مجزا به طور گسترده از هم جدا شده و اندازه‌ی آن‌ها کاهش می‌یابد، طوری‌که در شکل iii) منحنی A نشان داده شده است.

از کاربردهای اصلی ولتامتری دورانی می‌توان به مطالعه میکانیزم‌های تعامل، بررسی پروسه‌های جذب، کاربردهای مقداری، پایداری محصولات تعامل، تعیین موجودیت کتلاست در تعاملات ریدوکس، کینتیک تعامل، رجعت تعامل و کینتیک انتقال الکترون اشاره کرد (Arbelaz et al, 2017).

به این اساس معلوم گردید که میتود ولتامتری دورانی یک میتود آسان، کم مصرف و مناسب برای تشخیص انتی‌اکسیدانت‌ها بوده که هیچ ضرورتی به مواد اضافی و ریجنت دیگر نداشته و در زیر به بررسی استفاده از این میتود برای اندازه‌گیری انتی‌اکسیدانت‌های موجود در چای می‌پردازیم.

استخراج عصاره‌ی چای از نمونه‌ی آن

برای استخراج عصاره‌ی چای از نمونه چای میتودهای مختلفی وجود دارد که چند میتود آن‌را در زیر بیان می‌داریم.

طبق میتود پیشنهاد شده توسط آگروال و همکارانش ۱۰ گرم نمونه خشک شده سه بار با ۱۵۰ میلی لیتر آب مقطر داغ (۸۰ درجه سانتی‌گراد، ۳۰ دقیقه) استخراج می‌شود. بعد از سرد شدن عصاره حاصله الی رسیدن به حرارت اتاق، آن را فیلتر کرده و سپس با حجم مساوی کلوروفورم برای حذف کافئین و پیگمنت‌ها شیره کشی می‌شود. برای این‌که تمامی عصاره‌ی موجود در نمونه چای از نمونه استخراج گردد؛ لایه آبی باقی مانده دو بار با حجم مساوی ایتایل استات اکسترکت شده و فاز ایتایل استات با تبخیرکننده روتری تحت فشار پایین و در حرارت زیر ۴۰ درجه سانتی‌گراد غلیظ می‌شود. عصاره‌های غلیظ شده در خلا و حرارت منفی ۴۰ درجه سانتی‌گراد خشک شده و برای تعیین محصول وزن می‌شود (Mukhtar et al, 1992).

در میتود دیگری که توسط مایی و همکارانش پیشنهاد گردیده است ابتدا ۴ گرم نمونه خشک شده با ۴۰ میلی لیتر آب مقطر در درجه حرارت ۸۰ تا ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۰ دقیقه در اتوکلاف استخراج می‌شود تا عصاره اولیه به دست آید. سپس باقی مانده‌ها با ۶۰ میلی لیتر آب مقطر در درجه حرارت ۱۰۰ تا ۱۳۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه استخراج می‌شود تا بخش دوم حاصل شود. پس از سرد شدن به درجه حرارت اتاق و فیلتر کردن، دو بخش ترکیب شده و در درجه حرارت کم‌تر از ۴۰ درجه سانتی‌گراد تحت خلا خشک می‌شوند. سپس وزن شده تا مقدار محصول عصاره به دست آید (Mai & Chambers, 1992).

دو روشی که در فوق بیان گردید، از جمله روش‌های کلاسیک بوده و در یک مطالعه دیگر که توسط روزاس و همکارانش انجام شده است از روش شیره‌کشی به کمک اولتراسونیک با استفاده از محلول‌های طبیعی عمیق اثوتکتیک (NADES) برای شیره‌کشی مرکبات فینولی از نمونه‌های چای استفاده شده است. محلل مورد استفاده در این تجربه عبارت از: لکتیک اسید، گلیسرین و آب به نسبت مولی ۱:۱:۳ می‌باشد. در این روش استخراج ۵۰ میلی‌گرام از نمونه چای خشک با ۱ میلی‌لیتر از NADES مخلوط می‌شود. این مخلوط به مدت ۱۰ ثانیه شور داده می‌شود و سپس در یک حمام اولتراسونیک در درجه حرارت ۳۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه قرار داده می‌شود. پس از آن نمونه سنترفیوژ گردیده، شیره استخراج شده مورد تحلیل بدست می‌آید. این روش استخراج به عنوان یک روش سریع، آسان و مقاوم در مقایسه با روش‌های سنتی معرفی شده است (Rozas et al, 2024).

در تحقیق دیگری که توسط سالم و همکاران او انجام شده است برای شیره‌کشی کتیکین‌ها و دیگر مرکبات موجود در چای از میتود شیره‌کشی به کمک مایکروویف استفاده بعمل آمده است. در این میتود ۱۰۰ میلی‌لیتر از محلل انتخاب شده به یک لوله اکسترکشن که حاوی ۵ گرم نمونه چای است اضافه می‌شود. سپس لوله اکسترکشن داخل واحد مایکروویف قرار داده شده و در توان ۲۵۰، ۵۰۰ و ۸۰۰ وات در درجه حرارت ۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ تا ۸ دقیقه تحت تشعشع قرار می‌گیرد. به تعقیب آن عصاره بعد از زمان تعیین شده از مایکروویف بیرون کشیده شده و فیلتر می‌گردد (Saleem, et al., 2024).

مشخصات ولتامتری دورانی مورد استفاده برای تشخیص انتی‌اکسیدانت‌های چای

برای تشخیص نمونه‌های چای توسط ولتامتری دورانی تحقیقات فراوانی صورت گرفته و نتایج قناعت بخشی از این میتود حاصل گردیده است. در مطالعاتی که توسط کیلمارتین و همکاران آن انجام شده، مقدار انتی‌اکسیدانت‌های موجود در نمونه‌های چای سیاه، چای سبز و چای اولانگ هدف تحقیق بوده و ولتامتری دورانی با مشخصات ذیل مورد استفاده قرار گرفته است:

پوتانسیواستات: این تحقیق با استفاده از پوتانسیواستات BAS 100A (BioAnalytical Systems) انجام شده است که پوتانشیل الکتروود را کنترل کرده و جریان را اندازه‌گیری می‌کند.

انواع الکتروود

الکتروود کاری. یک الکتروود شیشه‌یی کاربنی با قطر ۳ میلی‌متر که به تازگی صیقل داده شده است.

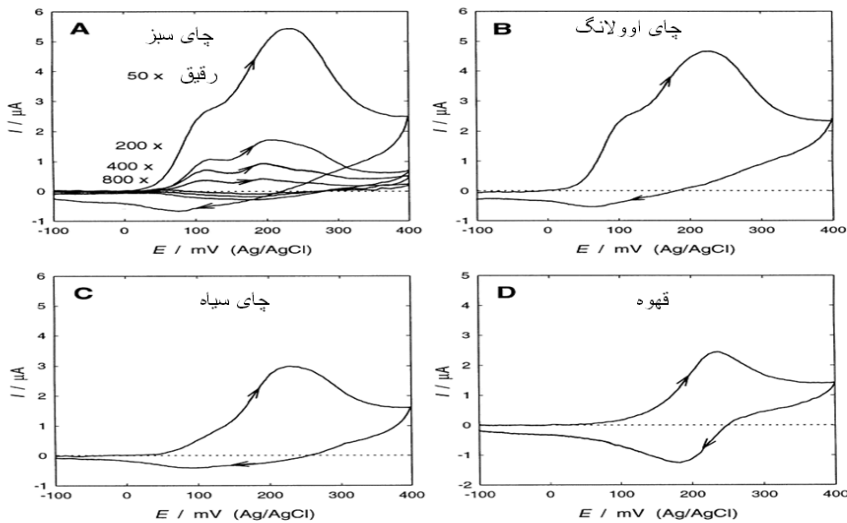
الکتروود مرجع. الکتروود مرجع Ag/AgCl با پوتانشیل +۲۰۷ میلی ولت نسبت به الکتروود استاندارد هیدروجن (SHE).

الکتروود مقابل. هرچند در تحقیق فوق به صراحت ذکر نشده است، ولی در تنظیمات معمول ولتامتری دورانی یک الکتروود مقابل نیز برای تکمیل مدار وجود دارد.

پارامترهای تجربی

پوتانشیل از ۱۰۰ تا ۴۰۰ میلی ولت با نرخ اسکن پوتانشیل ۱۰۰ میلی ولت بر ثانیه اسکن شده است. نارمل سازی: شرایط ولتامتری برای اندازه‌گیری مقدار کتیکین‌ها در ۲ گرم چای آماده‌سازی شده است. در این تنظیمات، ولتامتری دورانی معلوماتی را در مورد رفتار الکتروکیمیای نمونه چای یا قهوه ارایه کرده و نشان می‌دهد که چگونه جریان با پوتانشیل اعمال شده تغییر می‌کند. این کار اجازه می‌دهد تا عملیه‌های اکسیدیشن-ریدکشن موجود در نمونه شناسایی شوند.

گراف‌های ولتاموگرام بدست آمده توسط تحقیق فوق قرار ذیل است:



شکل ۲: ولتاموگرام‌های دورانی در نمونه چای سبز، اولانگ، و سیاه و همچنان قهوه در pH=7 محلول بفر فسفاتی در یک الکتروود شیشه‌یی یا کاربنی ۳ میلی متری با سرعت برداشت ۱۰۰ میلی ولت در ثانیه ثبت شده‌اند (Hsu & Kilmartin, 2003) ولتاموگرام‌های گرفته شده از نمونه‌های مورد تحلیل با ولتاموگرام‌های گرفته شده از نمونه‌های استندر مقایسه شده در طی اسکن مثبت، ما به پوتانشیل پیک انودی (Ep,a) و جریان پیک انودی (Ip,a) دست می‌یابیم که از آن‌ها برای محاسبه پوتانشیل در نیمه ارتفاع پیک (Ep/2) استفاده می‌شود. این‌ها

به حیث مشخصه‌های تعیین قدرت ارجاعی انتی‌اکسیدانت‌های فینولی به کار می‌روند. با بررسی پارامترهای متذکره در این تحقیق معلوم گردیده است که تمامی نمونه‌ها (چای سیاه، چای سبز، چای اولانگ و قهوه) دارای مقدار انتی‌اکسیدانت شامل گروپ کتیکول و گلایت هستند که در 230mV یک پیک انودی مانند نمونه‌های استاندارد را نشان دادند. علاوه بر این گروپ‌های پایروگلول در چای سبز و چای اولانگ مشاهده شده که در چای سیاه به مقدار خیلی کم مشاهده شده و در قهوه مشاهده نشده است (Hsu & Kilmartin, 2003).

در یک تحقیق دیگر بررسی و ارزیابی فعالیت انتی‌اکسیدانتی محصولات چای سبز در مدت زمان نگهداری با استفاده از ولتامتری دورانی انجام گردیده است. در این تحقیق برای شناسایی عکس العمل‌های الکتروکیمیای ۱۵ نمونه چای سبز که در زمان‌های مختلف (۰، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماه) نگهداری شده بودند، استفاده شده است. در این تحقیق معلوم گردید که فعالیت انتی‌اکسیدانتی نمونه‌های چای سبز در ابتدا قوی بود؛ اما با افزایش زمان نگهداری، فعالیت آن به طور قابل توجهی کاهش یافته است. این کاهش فعالیت انتی‌اکسیدانتی به دلیل اکسیدیشن، آلودگی و جذب رطوبت در طول زمان نگهداری چای سبز اتفاق می‌افتد، که نشان می‌دهد چای سبز برای نگهداری طولانی مدت مناسب نیست (Zheng & Jiang, 2023).

تحقیق دیگری که توسط زگاراک انجام شد است، از ولتامتری دورانی برای بررسی ظرفیت انتی‌اکسیدانتی چای‌های میوه‌یی با استفاده از تخنیک ولتامتری دورانی و دریافت ارتباط آن با دیگر روش‌های اندازه‌گیری ظرفیت انتی‌اکسیدانتی استفاده شده است. این مطالعه به ویژه غرض شناسایی مرکبات مؤثر بالای ظرفیت انتی‌اکسیدانتی این چای‌ها تمرکز داشته است. در این تحقیق مرکبات اورتو دای‌هایدروکسی فینول و مشتقات گلایت تأیید و عملی گردیده است. در این تحقیق نشان داده شده که از جمله چای‌های آلو و کینو، انگور بنفش، سیب و دارچین، مالته، توت، گل سرخ، زردآلو، گیلاس و توت زمینی، چای حاوی گل سرخ دارای بیشترین ظرفیت انتی‌اکسیدانتی بوده و مقدار زیاد مشتقات گلایت را دارا می‌باشد. در ضمن در این تحقیق ولتامتری نسبت به دیگر طریقه‌های تحلیل یک طریقه مناسب برای تشخیص انتی‌اکسیدانت‌های موجود در چای‌های میوه‌یی پیشنهاد گردیده است (Martinez et al, 2010).

میتود جدیدی برای تعیین انتی‌اکسیدانت‌های موجود در چای توسط لیو انکشاف داده شده و هدف آن تحقیق توسعه یک روش تحلیلی سریع و مقرون به صرفه با استفاده از ولتامتری دورانی و یادگیری ماشین می‌باشد. این تحقیق به استخراج و تحلیل اثرات انتی‌اکسیدانتی چای‌ها پرداخته و به دنبال ایجاد

یک پلتفرم تحلیلی خودکار و با توان بالا برای تست‌های غذایی می‌باشد. همچنان، این تحقیق به شناسایی ویژگی‌های کلیدی که بر دقت پیش‌بینی فعالیت انتی‌اکسیدانتی تأثیر می‌گذارند، می‌پردازد و به کاربردهای عملی؛ مانند تشخیص تقلب، نظارت بر عمر مفید و غربالگری محصولات جدید اشاره گردیده است. نتایج بدست آمده توسط این تحقیق قناعت‌بخش بوده است و ضریب تعیین ۰,۹۶ را دارا بوده و نزدیکی قوی با مقادیر پیش‌بینی شده را نشان داده است. همچنان توسط این میتود انواع چای را نظر به مقادیر انتی‌اکسیدانتی میتوان اندازه‌گیری کرد. علاوه براین این میتود می‌تواند برای تشخیص خواص انتی‌اکسیدانتی در سایر محصولات غذایی و نوشیدنی‌ها نیز به کار رود که این امر نشان‌دهنده‌ی قابلیت تطبیق‌پذیری بالای این روش است (Liu, 2024).

نتایج بررسی‌های انجام شده توسط پیکال با استفاده از سیستم ولتامتری دورانی نشان می‌دهد که چای سبز دارای بالاترین قدرت انتی‌اکسیدانتی بوده، با مقدار ۵۱۳,۴ میلی‌گرم معادل گالیک اسید در هر گرم (۵۱۳,۴mg GA/g) برای یکی از نمونه‌های چای سبز، چای سیاه ممتاز در قدم بعدی قرار داشته و دارای خواص انتی‌اکسیدانتی بالاتری نسبت به چای‌های میوه‌یی بوده است. چای‌های میوه‌یی، دارای پایین‌ترین سطح انتی‌اکسیدانتی بودند و مقدار آن‌ها به ۱۲۲,۹ mg GA/g رسیده است (Pyrzynska et al, 2012).

تجارب عملی دیگری که توسط هوکر انجام شده و در آن تعیین مقدار انتی‌اکسیدانت‌های موجود در چای‌های شیره‌کشی شده از برگ‌های چای و چای‌های از قبل آماده شده‌ی بوتلی توسط میتودهای کروماتوگرافی مایع با کارکرد بالا و ولتامتری دورانی محور تحقیق را تشکیل می‌داد، نشان داد که یک پیاله چای دم شده حداقل پنج برابر بیشتر از همان مقدار چای بوتلی پولی‌فینول و فعالیت انتی‌اکسیدانتی دارد. نتایج این تحقیق به طور کیفی فرضیه‌ی ضعیف‌تر بودن خاصیت انتی‌اکسیدانتی چای‌های تخمیرشده در مقایسه با چای سفید و سبز را تأیید می‌کند. اما نکته جالب‌تر این است که اکثر چای‌های دم شده از نظر غلظت پولی‌فینول و فعالیت کیمیاوی آن‌ها، تنها تا حدود دو برابر با هم تفاوت دارند. این نتایج از نظریه‌یی حمایت می‌کند که برخی چای‌های سیاه با قیمت مناسب‌تر خاصیت انتی‌اکسیدانتی مشابه چای سبز و سفید را دارند. به‌طور مجموعی، نتایج این تحقیق برای دانستن درجه تفاوت میان انواع چای از لحاظ خاصیت انتی‌اکسیدانتی کمک می‌کند. این تحقیق همچنان توانست تا مؤثریت و قابل تطبیق بودن روش‌های مروجه که برای تعیین خواص انتی‌اکسیدانتی چای استفاده می‌شود را ارزیابی کند. در نتایج این تحقیق از جمله روش‌هایی که به طور مستقیم فعالیت کیمیاوی پولی‌فینول‌ها را اندازه‌گیری می‌کنند، روش ولتامتری را توصیه کرده است (Hocker et al, 2017).

یافته‌های تحقیق انجام شده توسط بوراسا نشان‌دهنده‌ی تأثیرات پروتیین‌های شیر، به ویژه الف‌ا-کازئین، بر فعالیت انتی‌اکسیدانتی پولی‌فینول‌های چای بوده است. در این تحقیق از روش ظرفیت خنثی‌سازی رادیکال‌ها، پروسه اکسیدیشن لیپیدها و ولتامتری دورانی برای تعیین فعالیت انتی‌اکسیدانتی پولی‌فینول‌های موجود در چای مورد استفاده قرار گرفته است. در نتیجه این تحقیق معلوم گردیده که در حضور الف‌ا-کازئین، فعالیت انتی‌اکسیدانتی تمام پولی‌فینول‌ها به مقدار ۱۱ تا ۲۷ درصد کاهش یافته است. این کاهش در میتود ولتامتری دورانی به مقدار ۲۱ تا ۶۱ درصد مشاهده شده است. همچنان معلوم گردید که پولی‌فینول‌های بزرگ‌تر؛ مانند ایپی‌گلوکتیکین گلیت (EGCG) و ایپی‌کتیکین گلیت (ECG) کمتر تحت تأثیر قرار گرفتند. در حالی که پولی‌فینول‌های کوچک‌تر؛ مانند کتیکین و ایپی‌کتیکین بیشتر تحت تأثیر قرار گرفتند (Ali et al, 2013).

از جانب دیگر در برخی موارد با تغییر الکتروود و یا هم تغییر کردن سطح الکتروود می‌توان محتویات پولی‌فینولی چای را به طور سریع تعیین و تشخیص کرد. به‌طور مثال: الکتروود گرافیتی پنسلی یکی از انواع ساده الکتروودهای بوده که می‌توان توسط آن به سرعت مرکبات پولی‌فینولی را در چای تعیین کرد (Moldovan et al, 2015). از انواع دیگر الکتروودهای معمول می‌توان از الکتروود کاربنی شیشه‌بی نام برد که برای تحلیل و تعیین انتی‌اکسیدانت‌های موجود در چای مورد استفاده قرار می‌گیرد. علاوه بر آن، الکتروودهای تغییر یافته؛ مانند الکتروودهای تعریف شده با کاربن نانو تیوب‌ها نیز مورد استفاده قرار گرفته اند که با داشتن سطح مؤثر بیشتر نسبت به الکتروود گلسی کاربن می‌تواند سبب افزایش جریان در سیستم شده و حساسیت اندازه‌گیری را بهبود بخشد (Budnikov et al, 2013).

نتیجه‌گیری

چنانچه مشخص گردید، میتودها و راه‌های مختلف برای اندازه‌گیری انتی‌اکسیدانت‌های موجود در چای وجود دارد و در بین این میتودها ولتامتری دورانی می‌تواند جواب‌گوی پاسخ به پرسشی که آیا می‌توانیم ظرفیت انتی‌اکسیدانتی یک ماده را تعیین کنیم یا خیر؟ باشد؛ اما با این حال بعضی از دانشمندان و علما کروماتوگرافی مایع و کروماتوگرافی گازی-سپکتروسکوپی کتله و دیگر میتودها را بنابر آسانی کارکرد و عدم لزوم به تخصص کافی ممکن برتری دهند. این برتری‌ها همانا نظر به زمان و مکان و امکانات موجود و و نظر به دسترس به آن متغیر می‌باشد. از جانب دیگر در ولتامتری دورانی بیشتر برای تعیین فعالیت انتی‌اکسیدانت‌ها استفاده می‌شود، نه ظرفیت آن. این امر باعث می‌شود بعضی از مرکبات جانبی بالای نتایج آن تأثیر خود را دارا باشد. از جانب دیگر در صورت موجودیت بعضی از دستگاه‌های تحقیق؛ مانند HPLC و Gs-Ms در لابراتوارهای مجهز بعضی دانشمندان شاید لازم

ندانند که مصارف بیشتر برای خرید دستگاه ولتامتری دورانی به خرچ دهند، این دلایل می‌تواند یکی از علت‌هایی باشد که محقق به دستگاه‌ها و میتودهای دیگر برای تشخیص انتی‌اکسیدانت‌های مواد غذایی به خصوص چای رجوع کنند.

ولتامتری دورانی به حیث میتود قابل تطبیق، دقیق، و ارزان برای تشخیص مرکبات فینولی انتی‌اکسیدانت موجود در چای مطرح شده است. این روش، در مقایسه با سایر تخنیک‌های تحلیل کیمیاوی، از مزایای مهمی چون سرعت بالا، دقت مطلوب و هزینه کم برخوردار است که آن را به گزینه‌ی مناسب برای تحلیل فعالیت انتی‌اکسیدانتی و تعیین کیفیت چای‌های متنوع تبدیل می‌کند. این روش قادر است تا به دقت فعالیت انتی‌اکسیدانتی نمونه‌های مختلف چای را اندازه‌گیری کند و در نتیجه، امکان درجه‌بندی علمی و استانداردسازی کیفیت انواع چای را نیز فراهم آورد. مزیت کلیدی ولتامتری دورانی در این است که برخلاف برخی تخنیک‌های پیشرفته‌تر مانند HPLC و GC-MS، برای اجرای آن نیاز به تجهیزات بسیار پیشرفته یا پرهزینه نیست. این ویژه‌گی، ولتامتری دورانی را به گزینه‌ی مطلوب برای کشورهای نظیر افغانستان تبدیل می‌کند؛ جایی که چای به حیث یکی از نوشیدنی‌های اصلی جامعه به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد و نیاز به تحلیل کارآمد و کم‌هزینه برای ارزیابی کیفیت آن وجود دارد. با در نظر گرفتن چالش‌های موجود در تهیه تجهیزات لابراتواری پیشرفته در بسیاری از کشورها، ولتامتری دورانی این پوتانشیل را دارد که با فراهم آوردن امکان اندازه‌گیری سریع و دقیق، در لابراتوارهای کوچک‌تر و با امکانات کمتر نیز پیاده می‌شود. این قابلیت، در ارتقای کیفیت نظارت بر سلامت مصرف‌کننده‌گان و حفظ استانداردهای مربوط به چای، گامی مؤثر محسوب می‌شود. در نهایت، این روش با قابلیت انعطاف‌پذیری بالا، توانایی مقایسه‌ی نمونه‌های مختلف چای و تعیین سطح انتی‌اکسیدانتی آن‌ها را به شکلی مقرون به صرفه جویی و مؤثر دارد و می‌تواند به حیث ابزاری علمی و کاربردی در بهبود استانداردهای این صنعت به‌کار گرفته شود.

پیشنهادات

با توجه به توضیحات فوق برای دانشمندان و محققان ارجمند که می‌خواهند در زمینه تشخیص انتی‌اکسیدانت‌های موجود در چای تحقیق انجام دهند، موارد ذیل پیشنهاد می‌گردد:

- تحقیقات بیشتری در زمینه‌ی بهبود و ارتقاء این روش انجام دهند تا به عنوان یک روش استاندارد در صنعت چای در لابراتوارها مورد استفاده قرار گیرد.

- با وجود اینکه روش ولتامتری دورانی مزایایی مثل سرعت و سهولت دارد، نیاز است مطالعات مقایسه‌ی گسترده‌تری بین این روش و روش‌های دیگر؛ مانند HPLC و اسپکتروسکوپی انجام دهند تا مزایا و محدودیت‌های هر کدام بهتر شناسایی گردد.
- کاربرد روش‌های نوین مثل ادغام ولتامتری با یادگیری ماشین برای هوشمندسازی ارزیابی فعالیت انتی‌اکسیدانتی چای پیشنهاد شده است که می‌تواند دقت و سرعت اندازه‌گیری را افزایش دهد.
- پیشنهاد می‌شود تحقیقاتی بالای انواع مختلف چای و ترکیبات خاص پولی‌فینولی صورت گیرد تا نقش هر جزء در فعالیت انتی‌اکسیدانتی به طور دقیق‌تر مشخص شود.

سیاسگزاری

بدین وسیله از تمامی محققان و همکارانی که در تهیه و نگارش این مقاله ما را یاری کردند، صمیمانه قدردانی می‌کنیم. از حمایت‌های ارزشمند پوهنتون کابل و پوهنځی کیمیا در زمینه فراهم آوردن امکانات لازم برای انجام این تحقیق کمال تشکر داریم. همچنین از دست‌اندرکاران مجله‌ی علمی-تحقیقی علوم طبیعی پوهنتون کابل و مرورگران محترم که وقت گران‌بهای خود را جهت بهبود محتوا و ادبیات این مقاله صرف کرده اند، اظهار امتنان و قدردانی می‌کنیم.

سهم نویسندگان

در این مقاله، پوهنیار سید روح الله پویا مسئول تدوین مطالب، تحلیل داده‌ها و تنظیم نهایی مقاله بوده است و پوهنوال محمد ظاهر محبت نقش مهمی در تحلیل مقالات مرتبط ایفا کردند و با دقت زیاد، مطالب علمی را بررسی و دسته‌بندی کردند تا یک فرمت مناسب برای انجام این تحقیق فراهم شود. همکاری نزدیک این اساتید باعث شد که مقاله نظم خوبی داشته باشد و یافته‌ها به شکل روان و قابل فهم ارائه گردد.

تضاد منافع

بدین وسیله تصدیق می‌گردد که در انجام مطالعه و نگارش این مقاله، هیچگونه تضاد منافع مادی یا معنوی از سوی نویسندگان و یا با کدام نویسنده‌ی دیگر وجود نداشته و تمام نتایج و مباحث مطرح شده کاملاً مستقل و بی‌طرفانه بیان گردیده است.

- Agarwal, R., Katiyar, S., Zaidi, S. I., & Mukhtar, H. (1992). Inhibition of Skin Tumor Promoter-caused Induction of Epidermal Ornithine Decarboxylase in SENCAR Mice by Polyphenolic Fraction Isolated from Green Tea and Its Individual Epicatechin Derivatives. *CANCER RESEARCH*, 52, 1582-3588. Retrieved from. [link](#)
- Al-Obaidi, R. S., & Sahib, D. H. (2015). Determination of Antioxidants Activity in Tea Extract. *American Journal of Biochemistry*, 5(3), 49-52. DOI: <https://doi.org/10.5923/j.ajb.20150503.01>
- Arbeláez, J. H., Vazquez, M., & Calderón, J. C. (2017). Electrochemical methods as a tool for determining the antioxidant capacity of food and beverages: A review. *Food Chemistry*, 221, 1371-1381. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.11.017>
- Bourassa, P., Côté, R., Hutchandani, S., Samson, G., & Ali, H. (2013). The effect of milk alpha-casein on the antioxidant activity of tea polyphenols. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 128, 43-49. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2013.07.021>
- Chambers & Mai. (1990). Process for inhibiting lipid oxidation in food and composition thereby. *United States Patent*, 4,925,681. <https://patents.google.com/patent/US4925681A/en>
- Chevion, S., A. Roberts, M., & Chevion, M. (2000). The use of cyclic voltammetry for the evaluation of antioxidant capacity. *Free Radical Biology and Medicine*, 28(6), 860-870. [https://doi.org/10.1016/S0891-5849\(00\)00178-7](https://doi.org/10.1016/S0891-5849(00)00178-7)
- David, I. G., Bizgan, A.-M. C., Popa, D. E., Buleandra, M., & Moldovan, Z. (2015). Rapid determination of total polyphenolic content in tea samples based on caffeic acid voltammetric behaviour on a disposable graphite electrode. *Food Chemistry*, 173, 1059-1065. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.10.139>
- Chakraborty. (2011). The Role of Antioxidants in Human Health. *American Chemical Society*, 1083, 1-37. [https://DOI: 10.1021/bk-2011-1083.ch001](https://doi.org/10.1021/bk-2011-1083.ch001)
- Haque, A., Morozova, K., Lawrence, N., Ferrentino, G., & Scampicchio, M. (2020). Radical Scavenging Activity of Antioxidants by Cyclic Voltammetry. *Electroanalysis*, 33, 23-28. [https://DOI: 10.1002/elan.202060245](https://doi.org/10.1002/elan.202060245)
- Haque, M. A., Morozova, K., & Ferrent, G. (2021). Electrochemical Methods to Evaluate the Antioxidant Activity and Capacity of Foods: A Review. *Electroanalysis*, 33(6), 1419-1435. [https://DOI: 10.1002/elan.202060600](https://doi.org/10.1002/elan.202060600)
- Hocker, N., Wang, C., Prochotsky, J., Eppurath, A., Rudd, L., & Perera, M. (2017). Quantification of Antioxidant Properties in Popular Leaf and Bottled Tea by High-performance Liquid Chromatography (HPLC), Spectrophotometry, and

- Voltammetry. *ANALYTICAL LETTERS*, 50(10), 1640-1656. <https://doi.org/10.1080/00032719.2016.1242008>
- Jiang, L., & Zheng, K. (2023). Towards the intelligent antioxidant activity evaluation of green tea products during storage: A joint cyclic voltammetry and machine learning study. *Food Control*, 148, 109660. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2023.109660>
- Kilmartin, P. A., & Hsu, C. F. (2003). Characterisation of polyphenols in green, oolong, and black teas, and in coffee, using cyclic voltammetry. *Food Chemistry*, 82(4), 501-512. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(03\)00066-9](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(03)00066-9)
- Lai Kwok, L., Yalun, S., Zesheng, Z., & Zhen-Yu, C. (2001). Theaflavins in Black Tea and Catechins in Green Tea Are Equally Effective Antioxidants. *The Journal of Nutrition*, 131(9), 2248-2251. https://academic.oup.com/jn/article/131/9/2248/4687692?crsi=662497082&ccid_a_org_src=healthwebmagazine.com&ccid_a_org_mdm=direct
- Liu, Y. (2024). Intelligent evaluation of antioxidant activity in tea products based on machine learning and cyclic voltammetry. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 18, 6451–6458. <https://doi.org/10.1007/s11694-024-02661-0>
- Motshakeri, M., R.J.Philips, A., & Kilmartin, P. (2019). Application of cyclic voltammetry to analyse uric acid and reducing agents in commercial milks. *Food Chemistry*, 293, 23-31. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.04.071>
- Nikoli, M., Pavlović, A., Mitić, S., Tošić, S., & Mitić, M. (2019). Use of cyclic voltammetry to determine the antioxidant capacity of berry fruits. *Hortic. Sci*, 84(3), 152–160. <https://doi.org/10.17660/eJHS.2019/84.3.5>
- Oroian, M., & Escriche, I. (2015). Antioxidants: Characterization, natural sources, extraction and analysis. *Food Research International*, 74, 10-36. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.04.018>
- Pekal, A., Drozd, P., & Pyrzynska, K. (2012). Comparison of the Antioxidant Properties of Commonly Consumed Commercial Teas. *International Journal of Food Properties*, 15(5), 1101-1109. <https://doi.org/10.1080/10942912.2010.514642>
- Rozas, L. C., González, R. R., & Frenich, A. G. (2024). Green and miniaturized ultrasonic-assisted extraction using natural deep eutectic solvents to extract phenolic compounds from tea samples. *Advances in Sample Preparation*, 12, 100128. <https://doi.org/10.1016/j.sampre.2024.100128>
- Saleem, M., Ullah, M., Kamreen, H., Hajri, A. K., Alanazi, A. N., & Alraih, A. A. (2024). Microwave-assisted extraction of green tea catechins and antioxidant activity of tea extracts: The role of solvents, microwave power, and contact time.

- Microchemical Journal*, 203, 110906.
<https://doi.org/10.1016/j.microc.2024.110906>
- Senanayake, S. N. (2013). Green tea extract: Chemistry, antioxidant properties and food applications – A review. *Journal of Functional Foods*, 5(4), 1529-1541.
<https://doi.org/10.1016/j.jff.2013.08.011>
- Sun, M.-F., Jiang, C.-L., Kong, Y.-S., Luo, J.-L., Yin, P., & Guo, G.-Y. (2022). Recent Advances in Analytical Methods for Determination of Polyphenols in Tea: A Comprehensive Review. *Foods*, 11, 1425-1440.
<https://doi.org/10.3390/foods11101425>
- Yadav, A., Kumari, R., Yadav, A., Srivatva, S., & Prabha, S. (2016). Antioxidants and its functions in human body. *Res. Environ. Life Sci*, 9(11), 1328-1331.
<https://www.researchgate.net/publication/311674771>
- Žegarac, J. P., Valek, L., Stipčević, T., & Martinez, S. (2010). Electrochemical determination of antioxidant capacity of fruit tea infusions. *Food Chemistry*, 121(3), 820-825.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.12.090>
- Ziyatdinova, G. K., Nizamova, A. M., Aytuganova, I. I., & Budnikov, H. C. (2013). Voltammetric evaluation of the antioxidant capacity of tea on electrodes modified with multi-walled carbon nanotubes. *Journal of Analytical Chemistry*, 68, 132-139. <https://DOI: 10.1134/S1061934813020172>