

الفصل الحادي عشر

طرق التحليل الإلكتروليتية

يستخدم في هذا النوع من الطرق الخلية الإلكتروليتية، ففي هذه الخلية يمر تيار من مصدر خارجي، ومرور التيار في هذه الخلية سيؤدي إلى ظهور مفاهيم جديدة غير معروفة في الخلية الجلفانية. ومن بين المفاهيم التي تظهر عند مرور التيار في الخلية ما يلي:

1-11 الجهد الأومي:

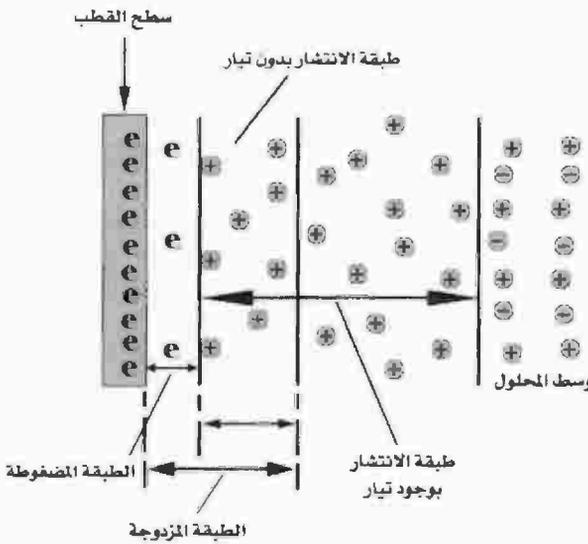
وينشأ هذا الجهد عند مرور التيار في الخلية، حيث إن مكونات الخلية تعمل على مقاومة مرور التيار بداخلها. وهذه المقاومة تؤثر في جهد الخلية الكلي، لذا لا بد من زيادة في الجهد المار في الخلية من أجل التغلب على هذه المقاومة، ويطلق على الجهد الأومي (ir drop). وهو عبارة عن حاصل ضرب مقاومة الخلية في شدة التيار المار بهذه الخلية، ويظهر تأثير هذا الجهد عند كتابة جهد الخلية الكلي، حيث يطرح الجهد الأومي من مكونات جهد الخلية كما يظهر في المعادلة التالية:

$$E_{\text{cell}} = E_c - E_a - ir \quad (1-11)$$

2-11 الاستقطاب (Polarization):

عند مرور التيار الكهربائي في القطب يقال إن هذا القطب قد استقطب، ويعني هذا الاستقطاب أن جهد هذا القطب قد تغير واكتسب قيمة مختلفة عن تلك التي يكتسبها في حالة عدم الاستقطاب. أو بمعنى آخر في حالة عدم مرور تيار في هذا القطب. ولنبدأ بالخلية الجلفانية إذ إن هناك قطباً في المحلول الإلكتروليتي، وأحد هذه الأقطاب يكون مصعداً وأما الآخر فهو المهبط، وتتكون بمحاذاة كل قطب طبقة مزدوجة تتكون من جزأين: يسمى الجزء الأول الطبقة المضغوطة (Compact layer)، وهذه سمكها بالميكروميتر، ويتم عبر هذه الطبقة تبادل

الإلكترونات بين الأيونات التي في المحلول وبين سطح القطب، وتلي هذه الطبقة طبقة أخرى أكثر سمكاً، وتسمى طبقة الانتشار (diffuse layer) وفي هذه الطبقة تترتب الأيونات متجهة نحو القطب، حتى إذا ما وصلت إلى سطح الطبقة المضغوطة فسيتم تبادل الإلكترونات بين هذه الأيونات وبين سطح القطب عبر الطبقة المضغوطة. وعند الوصول لحالة الاتزان أي عندما يكون معدل الأيونات المتجهة نحو القطب مساوياً لمعدل النواتج المغادرة لسطح القطب يتكون هنا تيار يسمى تيار الانتشار i_d . وجهد القطب عند حالة الاتزان هذه يسمى جهد الاتزان E_{eq} . وفي حالة الخلية الإلكتروليتية حيث يمر التيار من المصدر الخارجي، فإن كل قطب في هذه الخلية يُعدُّ مستقطباً. وعلى هذا الأساس يمكن تعريف الاستقطاب بأنه مرور تيار في القطب. ونتيجة لمرور التيار فإن سمك طبقة الانتشار المذكورة أعلاه يزداد بشكل ملحوظ، ومن ثمَّ يزداد عدد الأيونات التي توجد في هذه الطبقة التي تسمى طبقة الانتشار المستفيض (Diffusion layer) كما هو موضح في الشكل (1-11). وكنتيجة لذلك تتكون ظاهرة فوق الجهد (Over voltage)، وفوق الجهد هذا يؤدي إلى تغيير في جهد القطب عن قيمته في حالة الاتزان E_{eq} .



شكل (1-11) الطبقة المزدوجة في حالة الاستقطاب وعدم الاستقطاب

وعلى هذا الأساس فإن فوق الجهد يمثل الفرق بين جهد القطب عند مرور تيار فيه عن جهد هذا القطب في حالة عدم مرور تيار.

فوق الجهد = جهد القطب المستقطب - جهد القطب العادي

$$\eta = E' - E_{eq} \quad (2-11)$$

وإذا كان القطب المستقطب مصعداً فإن جهده سيكون أعلى من قيمة جهده في حالة الاتزان، وعلى العكس فإن كان القطب المستقطب مهبطاً فإن جهده يكون أقل منه في حالة الاتزان. ويمكن التعبير عن نوعين من الاستقطاب هما:

1-2-11 الاستقطاب التركيزي (Concentration polarization):

ويحدث هذا عند نقصان معدل انتشار الأيونات في طبقة الانتشار المستفيضة، فيقل بذلك معدل وصولها إلى سطح القطب، كما أن معدل انتشار المواد المتفاعلة من سطح القطب إلى وسط المحلول سيتغير، وهذا الاختلاف في تراكيز كل من المواد المتفاعلة والمواد الناتجة سيؤدي إلى تغير في جهد القطب حسب معادلة نيرنست.

2-2-11 الاستقطاب التنشيطي (Activation Polarization):

وينشأ هذا الاستقطاب من ببطء انتقال الإلكترونات عبر الطبقة المضغوطة، وتجدر الإشارة هنا إلى أنه في حالة سرعة تبادل الإلكترونات بين الأيونات في المحلول وسط القطب، فإن التفاعل يُعدُّ عكسياً (Reversible) ويكون فوق الجهد التنشيطي في هذه الحالة قريباً من الصفر، أما في حالة بطء تبادل الإلكترونات عبر الطبقة المضغوطة فيزداد فوق الجهد، ويصبح التفاعل غير عكسي (Irreversible). وقد يكون مصدر هذا النوع من الاستقطاب من طبيعة التفاعل نفسه أو من ادمصاص بعض المواد على سطح القطب، وهذا بدوره يؤدي إلى بطء تبادل الإلكترونات بين الأيونات وسط القطب، وفي مثل هذه الحالة يجب تنظيف سطح القطب كاملاً لتقليل فوق الجهد التنشيطي.

3-11 قياس التيار:

تتطلب بعض الطرق الإلكترونية قياس التيار المصاحب للتفاعل الكهروكيميائي. ومن بين الأجهزة المستخدمة في قياس التيار يُعدُّ الجلفانوميتر أكثرها استعمالاً. كما أنه يمكن استخدام مقياس الجهد في تعيين التيارات الصغيرة. وفي هذا الجهاز يمرر التيار الناتج عبر مقاومة قياسية ومن قراءة مقياس الجهد وقيمة المقاومة المستخدمة نستطيع تعيين كمية التيار من قانون أوم حيث:

$$i = \frac{E}{R} \quad (3-11)$$

4-11 قياس كمية الكهرباء:

إن مرور التيار ذي الشدة i ولمدة زمن t ثانية تنتج عنه كمية من الكهرباء تقاس عادة بالكولم Q ومن العلاقة التالية:

$$Q = i \times t \quad (4-11)$$

يمكن حساب كمية الكهرباء المطلوبة لأكسدة أو اختزال مقدار معين من المادة التي تتأكسد أو تختزل على سطح القطب.

والأجهزة الحديثة مزودة بجهاز تكامل (Integrator) يعطي مباشرة كمية الكهرباء التي استخدمت في الأكسدة أو الاختزال وفق العلاقة التالية:

$$Q = \int_0^t i dt \quad (5-11)$$

5-11 مثبت الجهد (Potentiostat):

إن معظم أجهزة التحليل الإلكتروني مزودة بجهاز مثبت الجهد Potentiostat، وتقوم هذه بتنظيم وقياس الجهد في أثناء استخدامها في الخلية الإلكترونية، حيث إنها تحتفظ بالجهد بين القطب العامل والقطب المرجع عند مستوى معين، ثم تقوم بتنظيم هذا الجهد عبر الخلية وذلك بالاستجابة لأي تغير في مقاومة الخلية، وتقوم

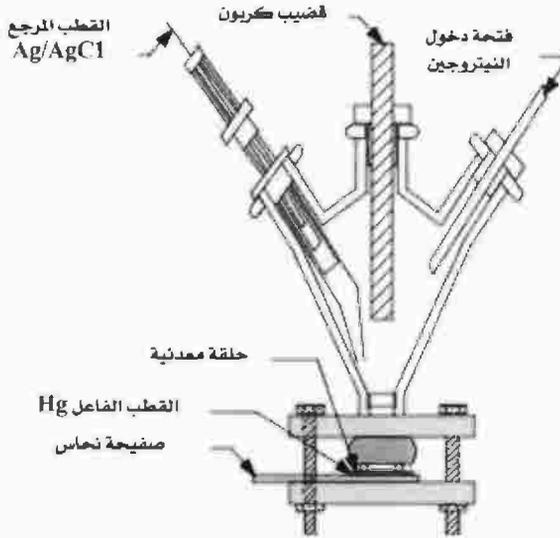
تبعاً لذلك بتغيير التيار المار في الخلية من المصدر الخارجي. وحسب قانون أوم فإن المقاومة العالية ستؤدي إلى انخفاض التيار، كما أن المقاومة المنخفضة تعمل على ازدياد التيار، وبهذا الجهاز يمكن التحكم في الجهد بين القطب العامل والقطب المرجع، وقياس التيار المار بين القطب العامل والقطب المساعد، حيث إن الخلية الإلكتروليتية يمكن فيها استخدام القطب المساعد للعمل على مرور التيار بين هذا القطب والقطب العامل وعدم مروره في القطب المرجع حتى لا يصبح مستقطباً.

6-11 الفولتامترية:

تستخدم الفولتامترية للتحليل الوصفي والكمي للعديد من المركبات الجزيئية والأيونات التي تشارك في تفاعل كهروكيميائي يحدث على سطح القطب العامل. وفي هذه الطريقة، يتم غمر قطبين أو ثلاثة أقطاب في المحلول المراد تحليله، ويتم تغيير جهد القطب العامل بانتظام بالنسبة إلى جهد القطب المرجع. إن المادة المراد تحليلها تتفاعل كهروكيميائياً على سطح القطب العامل (Working electrode)، وعادة يستخدم قطب ثالث ويسمى القطب المساعد (Auxiliary electrode) لحمل التيار داخل المحلول، حيث يتم انتقال التيار بين القطب العامل والقطب المساعد لكي لا يمر التيار في القطب المرجع، ويتم التحكم في الجهد بين القطب العامل والقطب المرجع.

وهناك أنواع من الفولتامترية تختلف في الطريقة التي يتم بها تغيير جهد القطب العامل، فالبولاروغرافيا مثلاً يكون القطب العامل من الزئبق، حيث يتم تساقط قطرات من الزئبق وفق برنامج يتحكم في زمن تكون وسقوط كل قطرة. ويُعدُّ سطح قطرة الزئبق هو القطب العامل، ويتم تغيير الجهد على هذا السطح، وفي حالة استخدام جهد ثابت (dc potential) تتم زيادة هذا الجهد بانتظام مع مرور الزمن، وتسمى هذه الطريقة البولاروغرافيا ذات الجهد الخطي (Linear Sweep voltammeter). وتبدأ هذه الطريقة باستعمال جهد قليل القيمة ثم

يتم تغيير هذا الجهد في الجهة التي يتوقع أن يحدث فيها تفاعل كهروكيميائي. ففي حالة الاختزال يتم تغيير الجهد إلى الجهة السالبة، أما في حالة الأكسدة فيزداد جهد القطب العامل تدريجياً. وعند وصول جهد القطب إلى قيمة معينة يتم اختزال أو تأكسد المادة المراد تحليلها ومن ثم يحدث انتقال الإلكترونات، أو بمعنى آخر يسري تيار فرداي (Faradaic current). وتعتمد قيمة هذا التيار على تركيز المادة الموجودة في المحلول. ففي حالة الاختزال تنتقل الإلكترونات من القطب العامل إلى المادة المراد تحليلها، أما في حالة الأكسدة فإن الإلكترونات تنتقل من المادة إلى القطب العامل. ويرسم التيار الناتج مع الجهد المستخدم نحصل على منحنى يسمى بالفولتاموغرام. والشكل الآتي يبين الخلية المستخدمة في الطرق الفولتاميتريّة، حيث يضاف للخلية الإلكتروليت المساعد والمادة المراد تحليلها ثم تدخل الأقطاب الثلاثة وتوصل بمثبت الجهد. وتصلح هذه الخلية لإجراء البولاروغراف في إذا ما استخدم قطب الزئبق المتساقط، ويكون هو القطب العامل في الخلية، كما أنه يمكن استبدال هذا القطب بأي قطب عامل آخر لإجراء العديد من الطرق الفولتاميتريّة.



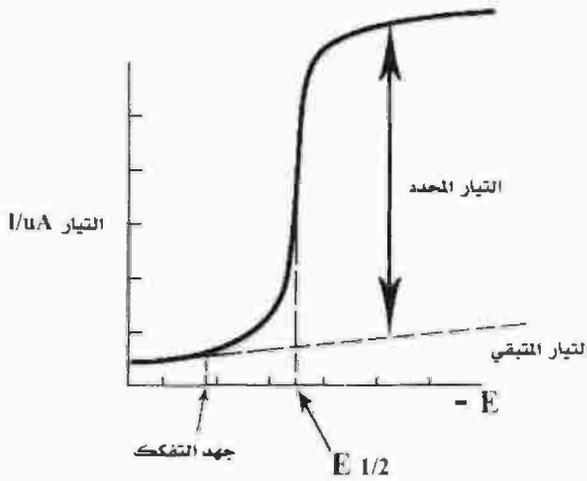
شكل (2-11) الخلية المستخدمة في الطرق الفولتاميتريّة

1-6-11 البولاروغرافي:

تُعدُّ هذه الطريقة من أول طرق التحليل الإلكتروليتية، حيث قام الباحث التشيكوسلوفاكي هيروفسكي باكتشاف هذه الطريقة، ويستخدم في هذه الطريقة قطب الزئبق المتساقط على هيئة نقط تتساقط من طرف أنبوبة زجاجية شعرية طولها نحو 15 سم وقطرها الداخلي 0.05 ملم. وميزة هذا القطب أن سطحه دائماً يكون نشطاً، وأن الزئبق يكون مملغماً مع كثير من المعادن. يضاف إلى الخلية التي تحتوي على قطب الزئبق القطب المرجع والقطب المساعد، ثم يضاف المحلول الإلكتروليتي المساعد والحجم من المحلول المراد تحليله. ثم يمرر غاز النيتروجين بداخل المحلول لطرد الأكسجين الذائب، إذ إن الأكسجين لو بقي في المحلول سيؤدي إلى تداخلات في عملية التحليل، ثم بعد ذلك يمرر الجهد بين قطب الزئبق الذي يُعدُّ القطب العامل (working) والقطب المرجع. ويتم تغيير هذا الجهد بالاتجاه السالب مبتدئاً من القيمة صفر إلى 1.0 - فولت. وسيسري التيار بين قطب الزئبق والقطب المساعد وبقياس التيار ورسمه كمحور صادي مع قيمة الجهد المتغير لقطب الزئبق كمحور سيني يتم الحصول على البولاروجرام (Polarogram). ومن هذا المنحنى يمكن تعيين $E_{1/2}$ الذي يستخدم في عملية التحليل الكيفي، حيث إن قيمة $E_{1/2}$ تُعدُّ مميزة لأيون معين إذا ما استخدمت الظروف نفسها والمحلول الإلكتروليتي المساند نفسه، كما أن التحليل الكمي يتم بتعيين تركيز الأيون المطلوب باستخدام معادلة الكوفك (Ilkovic equation) :

$$i_d = 607nD^{1/2}m^{2/3}t^{1/6}C \quad (6-11)$$

حيث i_d تعتبر عن تيار الانتشار، n عدد الإلكترونات المشتركة في التأكسد أو الاختزال، D هي معامل الانتشار، m عبارة عن معدل سريان الزئبق بالملغم/ثانية، t هي زمن سقوط القطرة في الثانية، C هي تركيز الأيون المراد تحليله. والشكل (3-11) يبين البولاروجرام الناتج من اختزال أيون الخارصين في محلول حمض الهيدروكلوريك.



شكل (3-11) البولاروجرام

يلاحظ من البولاروجرام وجود التيار المتبقي الذي يسري عادة حتى في غياب المادة المراد تحليلها. وينشأ هذا التيار من الشحنات التي على سطح القطب التي تقابلها في المحلول. وعند الوصول إلى الجهد الذي تبدأ عنده المادة بالتفاعل يبدأ التيار بالازدياد إلى أن يصل إلى أعلى قيمة، ثم يثبت بعدها. وهذا التيار يسمى تيار الانتشار، وتعتمد قيمته على تركيز المادة المراد تحليلها.

المنحنى القياسي:

تتم عملية التحليل بتحضير محاليل قياسية من الأيون المراد تحليله، ثم يعين تيار الانتشار لكل من هذه المحاليل ويتم رسم التيار كمحور صادي وتركيز المحاليل كمحور سيني فينشأ بذلك المنحنى القياسي، ثم يوضع المحلول المجهول في الخلية، ويتم تعيين تيار الانتشار لهذا المحلول، ومن المنحنى القياسي يتم تعيين تركيز الأيون في المحلول المجهول.

تستخدم تقنية البولاروغرافيا في تعيين العديد من كل من المواد غير العضوية والمواد العضوية التي قد تختزل أو تتأكسد على سطح قطب الزئبق. فأيونات المعادن الموجبة مثل Zn^{2+} ، Cu^{2+} ، Cd^{2+} يتم اختزالها على سطح قطب الزئبق ومن ثم

يمكن تعيينها بواسطة هذه الطريقة، وهناك العديد من المجاميع العضوية مثل $N=N$ ، $C=O$ ، $C=C$ يمكن اختزالها على سطح قطب الزئبق، ومن ثمَّ يمكن تعيين المركبات المحتوية على هذه المجاميع بواسطة البولاروغراف.

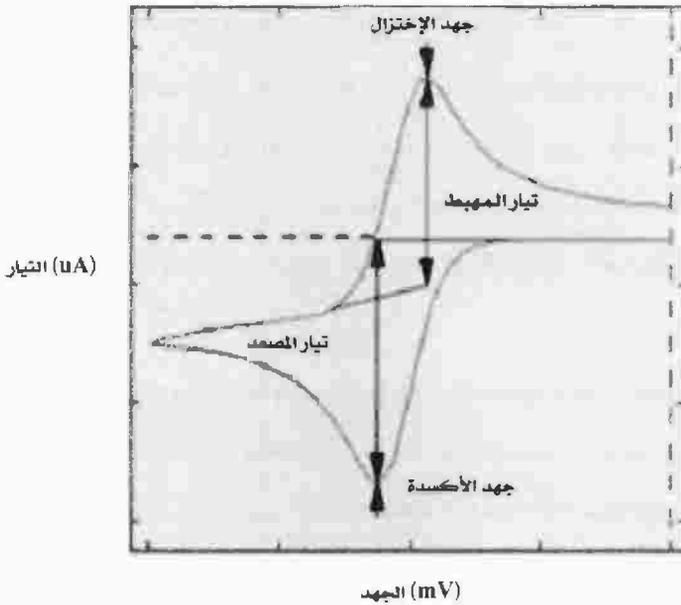
وفي الفولتاميتري ذات التيار المتردد (ac) يتم استقطاب القطب الفاعل بجهد متردد ويتم قياس التيار المتعلق بالجهد المتردد ويرسم هذا التيار مع الجهد الثابت، وحيث إن سريان التيار المتردد يقتضي أن يحدث التفاعل الكهروكيميائي في الاتجاه الأمامي وفي الاتجاه العاكس، وعادة تستخدم فولتاميتري التيار المتردد في دراسة مدى انعكاسية التفاعل الكيميائي.

وهناك طريقة الفولتاميتري النبضي التفاضلي (Differential pulse voltammetry)، حيث يتغير الجهد الثابت الواقع على قطرة الزئبق باستمرار، وفي الربع الأخير من تكون القطرة يتم تعريض القطب الفاعل لنبضات جهدية مترددة لكنها متساوية في مقدار الجهد، ويتم قياس التيار مرتين مع كل قطرة مرة قبل إرسال النبضة ومرة بعد انتهاء النبضة، وبذلك تنقص قيمة التيار المتبقي مما يساعد على تعيين تراكيز قليلة جداً.

11-6-2 الفولتاميتري الحلقية (Cyclic Voltammetry) :

يتم في هذا النوع من الفولتاميتري تعريض القطب العامل إلى جهد باتجاه معين، ثم عند الوصول إلى أعلى قيمة له، يتم بعدها عكس اتجاه الجهد. فمثلاً إذا كان اتجاه الجهد بالسالب يعكس اتجاهه نحو الموجب. ولهذه التقنية فائدة، حيث يتم اختزال المادة في أثناء تغير الجهد المستخدم للتفاعل الأمامي forward، وعند تغيير اتجاه الجهد ليعمل في الاتجاه العاكس، فإن المادة التي تم اختزالها في المرحلة الأولى ستتم أكسدتها في المرحلة الثانية عند عكس اتجاه الجهد. وللفالتميتري الحلقية أهمية في التعرف على مدى انعكاسية التفاعل الكهروكيميائي، فمن

الفولتاموجرام نستطيع معرفة انعكاسية التفاعل. والشكل الآتي يبين فولتاموجرام حلقي لتفاعل تام الانعكاسية.



شكل (4-11) الفولتاموجرام الحلقي

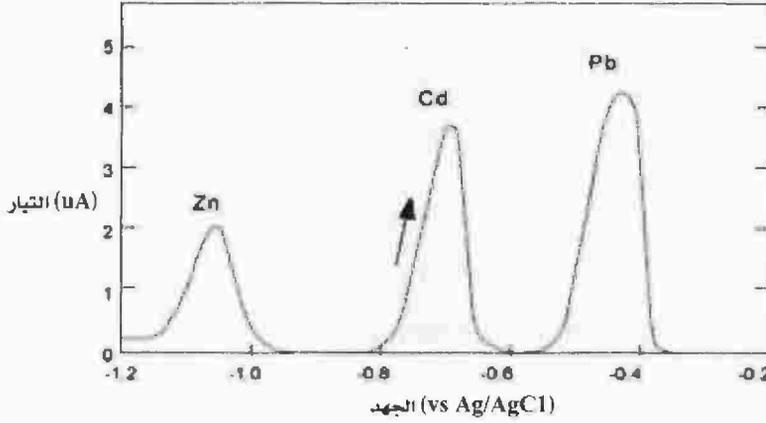
يمثل هذا الشكل ناتج الفولتاميتري الحلقية، عند بدء التجربة يحتوي المحلول الذي في الخلية على الشكل المؤكسد من المادة (O) ولا يوجد تحول إلى (R). ومع تغيير جهد القطب العامل والاقتراب من جهد الاختزال للمادة المراد تحليلها فإن التيار المهبطي يزداد أسياً مع الجهد المستخدم. وعند تحول $R \leftarrow O$ يحدث تدرج في التراكيز لكل من O، R في أثناء عملية القياس. ونتيجة للتدرج في التراكيز تظهر عملية انتشار الأيونات نحو الأقطاب الملائمة، ويبدأ تفاعل فرادي، حيث تختزل الأيونات الموجودة، ويزيد التيار المهبطي ليصل إلى القيمة القصوى، ثم يعكس اتجاه الجهد وتبدأ عملية التأكسد ويزيد التيار المصعدي ليصل إلى أقصى قيمة له، ثم يبدأ بالتناقص. وتكمن الاستفادة من قيم التيارات في عملية التحليل الكمي، حيث يمكن عمل منحنى قياسي من محاليل قياسية، ثم يقاس تيار العينة

إن كان تياراً مهبطياً أو مصعدياً، ومن المنحني القياسي يمكن تعيين تركيز الماد المطلوبة في العينة المراد تحليلها.

11-6-3 طرق الفولتامترية النزعي (Stripping Analysis):

تتكون عملية الفولتامترية النزعي من خطوتين، يتم في الخطوة الأولى ترسيب المادة من المحلول المتحرك على سطح القطب العامل مثل قطب الزئبق، بعد تثبيت جهد القطب عند قيمة مميزة لهذه المادة. وبعد مدة معينة من الزمن حيث تنتهي عملية الترسيب وتقف عملية التحريك، تبدأ الخطوة الثانية وهي عملية النزاع. وهناك نوعان من الفولتامترية النزعي هما النزعي المصعدي (Anodic stripping)، والنزعي المهبطي (Cathodic Stripping). ففي النزعي المصعدي يتم اختزال الأيونات على سطح المهبط، ويثبت جهده مثلاً عند -1.0 فولت. وبعد اكتمال عملية الاختزال وترسب الأيونات كذرات مكونة مملغماً مع الزئبق يترك المحلول ليصل إلى حالة الاتزان، ثم تبدأ عملية الأكسدة حيث يتم تغيير الجهد من -1.0 فولت إلى 0.0 فولت، وعند وصول الجهد إلى القيمة التي عندها يتأكسد المعدن تتم عملية الأكسدة، وتزداد قيمة التيار لتصل إلى أعلى قيمة لها. ويسمى هذا التيار المصعدي. والنزعي المصعدي يستخدم عادة في تحليل أيونات المعادن مثل Pb^{2+} ، Cd^{2+} ، Cu^{2+} ، Zn^{2+} . وفي حالة النزاع المهبطي، تتم أولاً أكسدة الأيونات السالبة مثل Cl^- على سطح القطب عند جهد معين، ثم يتم عكس هذا الجهد ليتغير في الاتجاه السالب، حيث يعمل القطب في هذه الحالة كمهبط يتم عليه اختزال الأيونات التي كانت قد تأكسدت على سطحه. وفي أثناء تغيير الجهد يلاحظ أن تيار الاختزال قد وصل إلى أعلى قيمة له عند جهد يُعدُّ مميزاً للأيون قيد الدراسة، ويستخدم هذا الجهد في عملية التحليل الكيفي، إذ إن قيمته تُعدُّ مميزة للأيون، عند الظروف نفسها كنوع المحلول الإلكتروليتي ونوع القطب المرجع وغيرهما. أما قيمة التيار فتستخدم في التحليل الكمي، إذ يتم تحضير محاليل قياسية، ويقاس التيار لكل من هذه المحاليل، ثم ترسم قيمة التيار كمحور صادي والتركيز كمحور سيني. ثم توضع

العينة في الخلية ويقاس التيار الناتج، ومن قيمة هذا التيار يتم تعيين تركيز الأيون المطلوب من المنحنى العياري. والشكل (11-5) يبين المنحنى الناتج، حيث يمكن تمييز جهد الاختزال والتيار المصعدي.



شكل (5-11) منحنى النزح المصعدي لعينة تحتوي أيونات الخارصين والكاديوم والرصاص

4-6-11 الكولوميترى (Coulometry):

هي عبارة عن طريقة للتحليل الكهروكيميائي تستخدم لمعرفة تركيز مادة موجودة في المحلول عن طريق تحويل هذه المادة بالكامل من حالة أكسدة إلى حالة أكسدة أخرى؛ أي أن عدد التأكسد لهذه المادة سيتغير، فمثلاً Fe^{2+} يمكن عن طريق أكسدته أن يتحول إلى Fe^{3+} .

والكولوميترى مثل عملية الترسيب الوزني لا تحتاج إلى محاليل قياسية، ولا إلى عمل منحنى عياري، ويستخدم في هذه الطريقة مصدر للتيار الثابت يعطي كمية معينة من الشحنات. ومعلوم أن 1 مول من الإلكترونات = 96485 كولوم، ويدعى بالفرداي، لذا تستخدم هذه الطريقة في تفاعلات الأكسدة والاختزال. ويتم التفاعل على سطح القطب العامل بتثبيت جهد القطب العامل، وباستخدام جهاز معين تقاس الكهرباء المارة. وبتطبيق العلاقة:

$$Q = It \quad (7-11)$$

حيث Q كمية الكهرباء بالكولوم، I شدة التيار، t هو الوزن بالثانية ويمثل زمن مرور التيار.

وعادة ما تتم عملية المعايرة بالكولوميتري عن طريق توليد المادة المتفاعلة كهربائياً مثل استخدام تركيز عال من محلول الأيوديد I^- وبأكسدة هذا الأيون ينتج جزيء اليود I_2 ، وهذا يستخدم في أكسدة حمض الأسكوربيك، ويتم معرفة عدد مولات اليود المتكونة من قانون فراداي الثاني:

$$m = \frac{M}{nFQ} \quad (8-11)$$

حيث m هو وزن المادة التي تم تأكسدها بالكهرباء، M هو الوزن الجزيئي للمادة، n عدد الإلكترونات المارة في الخلية الإلكتروليتية. وباستخدام معادلة التفاعل الموزونة نستطيع معرفة عدد مولات حمض الأسكوربيك التي تفاعلت مع العدد المحسوب من مولات اليود، ومن ثم نحسب تركيز حمض الأسكوربيك في المحلول.

7-11 تمارين على الطرق الإلكتروليتية

1. ما المقصود بالقطب العامل والقطب المساعد وما دور كل منهما في الخلية الإلكتروليتية؟
2. لماذا يجب ألا يمر التيار في القطب المرجع؟
3. ما فائدة تمرير النيتروجين في محلول الخلية قبل بدء التفاعل الكهروكيميائي؟
4. ارسم البولاروجرام واكتب المعلومات المهمة عليه؟
5. لماذا تُعدُّ طرق الفولتامترية النزعي أدق من طرق الفولتامترية الأخرى؟

6. اكتب معادلة الكوفك وعرف كل مصطلح فيها.

7. ما المقصود بالفولتامetri الحلقي وما الفائدة من هذه الطريقة؟