الفرز الغشائي الكهربي

د. فرج عبدالسلام عبدالعليم

يتم فصل الماء العذب عن الماء المالح في جميع طرق التحلية باستخدام الفرق في الخواص الفيزيائية بين الماء والملح ، فمثلاً تعتمد طرق التحلية الحرارية كلها على الفرق بين درجة غليان الماء ودرجة غليان الملح بينما تعتمد الطرق الأخرى مثل التناضح العكسي على الفرق في الحجم لكل من جزيء الماء وجزيء الملح ، حيث يمكن لجزيء الماء الصغير النفاذ من خلال الأغشية الخاصة المستخدمة لهذا الغرض ، أما جزيء الملح فإنه لاينفذ خلال تلك الأغشية نظراً لكبر حجمه ليتم بذلك فصل الماء عن الملح تحت تأثير فرق الضغط الكبير المستخدم في هذه العملية .

من جانب آخر تعتمد طريقة الفرز الغشائي الكهربي " الديلزة الكهربية " أساساً على استخدام الطاقة الكهربائية لفصل أيونات الملح عن الماء ، وذلك من خلال أغشية خاصة تستخدم لهذا الغرض، وهي تشبه في ذلك عملية التناضح العكسي إلا أنها لاتحتاج إلى فرق الضغط العالي المستخدم فيها .

ونظراً لأن طرق التحلية الحرارية هي أسهل وأقدم طرق التحلية على الإطلاق فإنها لاتزال هي الأكثر استخداماً من الناحية التطبيقية على المستوى العالمي وفي المملكة ، يليها في ذلك طريقة التناضح العكسي خاصة بعد التقدم الكبير في صناعة الأغشية وتقنياتها المختلفة ، أما طريقة الفرز الكهربائي فإن مستقبلها الواعد بالنسبة للمملكة يتركز في مجال معالجة المياه الجوفية لاستخدامها في الشرب والزراعة ، وكذلك معالجة المخلفات المائية للمصانع أو مياه الصرف لإعادة إستخدامها في الصناعة أو في الري .

تتميز هذه الطريقة باعتمادها على الطاقة الكهربائية النظيفة والخالية من التلوث الناشيء عن المحطات الحرارية ، بالإضافة إلى إمكانية استخدام الطاقة الكهروضوئية المنتجة من الطاقة الشمسية المتوفرة في المملكة ، التي ترتبط جدواها الأقتصادية بتطوير الخلايا الكهروضوئية وجعل أسعارها تنافس أسعار الطاقة الكهربائية المتوفرة حالياً .

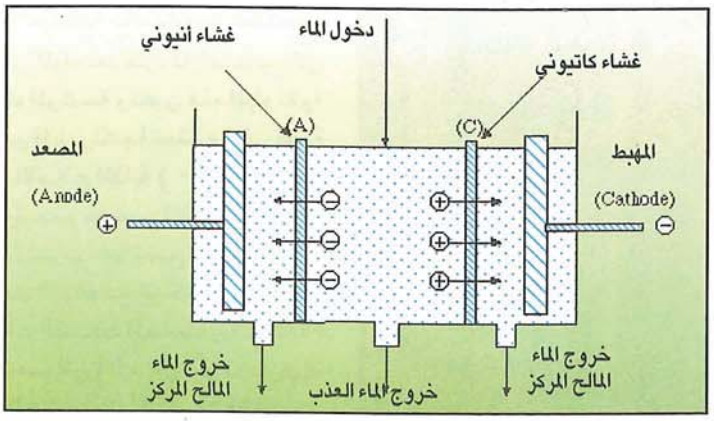
ومن الناحية التاريخية فقد كانت طريقة الفرز الكهربي أقدم من طريقة التناضح العكسي ، حيث تم إستخدامها فعلاً في معالجة مياه الصرف في بعض الدول مثل الولايات المتحدة الأمريكية ، كما أمكن إستخدامها أيضا في معالجة مياه الغلايات بدلاً من طرق التبادل الأيوني المعروفة والتي تحتاج لكميات كبيرة من المواد الكيميائية ، مما يشكل مصدراً آخر من مصادر التلوث سواء أثناء التشغيل أو التنشيط .

آلية الفرز الغشائي الكهربي

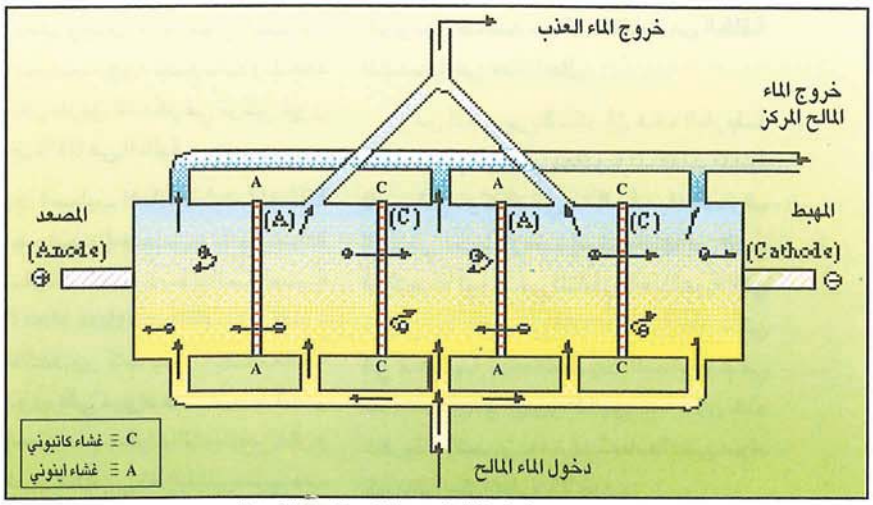
عند إمرار تيار كهربائي على محلول ملحي فإن الأملاح تتفكك إلى أيونات موجبة مثل الصوديوم (Na^+) والبوتاسيوم (K^+) والكالسيوم (Ca^{++}) والمغنيسيوم (Mg^{++}) وأيونات سالبة تتمثل في الكلور (Cl^-) والكبريتات ($SO4^{--}$) والكربونات ($CO3^{--}$) والنترات ($NO3^-$) .

ويتم تبعاً لذلك ، وتحت فرق الجهد الكهربائي المستخدم ، جذب الأيونات الموجبة (Positive ions) نحو المهبط (Cathode) والأيونات السالبة (Negative ions) نحو المصعد (Anode)، وبذلك يتم فصل شوائب الأملاح عن الماء الذي يصبح نقياً كما هو موضح في شكل (١)

ونظراً لأن خلية الفرز الكهربائي الواحدة ذات إنتاجية محدودة فإنه يتم إستخدام أكثر من خلية للوصول إلى مستوى الإنتاج المطلوب من الناحية العملية ، ومن ثم فإن وحدات الفرز الكهربائي تتركب من عدد من هذه الخلايا كما هو موضح في شكل (٢) . تتركب هذه الوحدات من عدد من الحجيرات الضيقة



● شكل (١) خلية الفرز الكهربائي « الديلزة الكهربية »



● شكل (٢) الوحدة الصناعية للفرز الكهربي

التي يضخ الماء المالح من خلالها ، بينما تنفصل هذه الحجيرات عن بعضها بواسطة الأغشية شبه المنفذة التي تنفذ نوع واحد فقط من الأيونات ، حيث أن بعضها ينفذ الأيونات الموجبة فقط ، وتسمى بالأغشية الكاتيونية (Cationic membranes) ، أما البعض الآخر فينفذ الأيونات السالبة فقط ، وتسمى بالأغشية الأنيونية (Anionic membranes) ، وعندما يمر التيار الكهربائي في هذه الخلايا فإن الأغشية شبه المنفذة تقوم بحجز الأيونات على هيئة شوائب في الحجيرات الصغيرة المخصصة لذلك في الخلية ، وينتج عن ذلك – في آخر العملية – وجود ماء عذب داخل الحجيرات الخاصة به في الخلايا ، بينما توجد الأملاح والكاتيونات أو الأنيونات في الحجيرات المجاورة كما هو موضح في شكل (٢)

ومن الجدير بالذكر أن الأغشية الأيونية هي أكثر الأجزاء حساسية في وحدة الفرز الكهربائي ، وهي تماثل من حيث الأهمية كل من أغشية التناضح العكسي وأسطح التبادل الحراري في الطرق الحرارية للتحلية ، كما أنها تحدد تكلفة الوحدة من الناحية الإقتصادية ، وهي أيضاً عرضة للإتساخ بسبب تكون القشور الملحية وترسبها عليها ، مما يستدعي تنظيفها ميكانيكياً أو كيميائياً بشكل دوري ، ومهما كانت هذه الأغشية متينة فإنه يلزم إستبدالها بعد فترة ، وقد تضافرت الجهود الهندسية والأبحاث العلمية لإنتاج أغشية مناسبة ، تم إنتاج أنواع متطوره من الأغشية تتوافر حالياً بسمك يتراوح بين ٠,١ مم و ١ مم وبأشكال مختلفة ، وأما من الناحية العلمية فقد تم تطبيق طريقة الديلزة الكهربائية في محطات تحلية تقدر طاقتها الإنتاجية اليومية بآلاف المترات المكعبة من المياه العذبة ، كما تم إستخدام الطريقة في وحدات منزلية صغيرة تصل إنتاجيتها إلى مائة لتر في اليوم بالإضافة إلى وحدات عديدة ذات إنتاجية متوسطة .

وقد تم كثير من التطوير والتحسين لتقنية الانتقال بالتبادل الأيوني في الأغشية ، حيث أمكن تطبيقها في الأغشية الحيوية مثل أجهزة الكلية الصناعية وغيرها .

طاقة الفرز الكهربي

عند استخدام طريقة الفرز الغشائي الكهربي لفصل الماء من الملح لابد من وجود حد أدنى من فرق الجهد الكهربائي ، يسمى **فرق جهد الفصل** ، ويعتمد فرق الجهد الكهربي المذكور على تركيز الأملاح في الخلية ونوع الأيونات الموجودة في الماء المستخدم ، حيث يتساوى في المقدار ويتعاكس في الإتجاه مع فرق الجهد الناشيء بين أقطاب الوحدة في حالة التوقف . وفي هذه الحالة يمكن إعتبار الوحدة بطارية صغيرة ، ويجب من الناحية العملية زيادة فرق الجهد الكهربائي الفعلي المستخدم عن هذا الحد الأدنى ليتم تحريك الأنيونات والكاتيونات وفصلها عن الماء ، ويمثل الفرق بين الجهد الفعلي ـ الصادر من الخلية – والحد الأدنى لفرق جهد الفصل مايعرف بجهد الإستقطاب ، ويمكن القول من الناحية العملية أنه يلزم لكل زوج من الأغشية الموجودة بوحدة الفصل الكلية وجود فرق جهد في حدود ٠,١ إلى ٠,٢ فولت ، وبذلك تحتاج الوحدة التي بها مائة زوج من الأغشية إلى فرق جهد كهربائي يتراوح بين ١٠ إلى ٢٠ فولت ، أما بالنسبة للتيار الكهربائي اللازم لعملية الفرز فإنه يتم حسابه بإستخدام قانون فاراداي Faraday كالآتي :

حيث :

$$I = \frac{FQNEr}{E_c}$$

I : التيار الكهربي اللازم للعملية " الأمبير "

F : ثابت فاراداي وقيمته ٩٦٥٠٠ كولوم

Q : معدل سريان الماء في الوحدة (لتر/ثانية)

N : تركيز الأملاح في الماء المستخدم " جرام مكافىء/لتر "

Er : معدل إنتاج الماء العذب = نسبة فصل الماء العذب من الماء المالح المستخدم

Ec : كفاءة استخدام التيار الكهربي بواسطة الوحدة وتتراوح قيمتها بين ٠,٨٥ إلى ٠,٩٥

أما بخصوص القدرة الكهربائية اللازمة لوحدة الفرز الكهربي فإنها تحسب عادة باستخدام القانون

$$P = IV = I^2R$$

حيث :

P : القدرة الكهربائية بالوات

I : التيار الكهربي بالأمبير

R : مقاومة الوحدة بالأوم

V : الجهد بالفولت

مشاكل تقنية الفرز الغشائي

تتعرض تقنية الفرز الغشائي الكهربائي إلى عدة مشاكل عملية من أهمها مايلي :-

● ظاهرة الأستقطاب

وجد عملياً أن هناك حد أقصى لكثافة التيار الذي يمكن استخدامه في وحدات الفرز الكهربائي ، يعرف بالتيار الحدى

(Limiting Current) ،وتتوقف قيمة هذا الحد على التركيب الكيميائي للماء المستخدم في الوحدة ، وسرعة سريان الماء في الخلية ، وعوامل أخرى تتعلق بسرعة إنتقال الأيونات داخل الخلية ، وعند بدء عملية الفرز الغشائي الكهربائي ينشأ تغير في تركيز الأنيونات والكاتيونات عند سطح الأغشية المستخدمة مصحوباً بزيادة كبيرة في مقاومة الخلية الكهربائية ، وهو مايعرف **بظاهرة الاستقطاب (Polarization)** والذي يسبب حدوثها ازدياد في جهد الاستقطاب المعاكس بدرجة كبيرة يصعب معها أي زيادة في تيار الخلية مهما زادت قيمة الجهد الكهربائي الخارجي المستخدم في الوحدة . وينشأ عن ذلك فقد كبير في الطاقة الكهربائية بدون أي زيادة في معدل إنتاج الماء العذب .

وللتغلب على هذه المشكلة يلزم إختيار تيار الخلية ، بحيث يكون أقل من هذا التيار الحدى (التيار المستخدم عادة في حدود ٧٠ – ٩٠٪ من التيار الحدى) .

● الترسبات

تنشأ مشكلة الترسبات بسبب زيادة تركيز الملح بالقرب من سطح الغشاء المواجه للماء المالح ، فيحدث الترسيب مباشرة إذا تعدى تركيز الملح حدود الذوبانية الخاصة به ، ومن المعتاد عملياً أن تترسب كربونات الكالسيوم وهيدروكسيد المغنيسيوم وكبريتات الكالسيوم على غشاء التبادل الأيوني من جهة الماء المالح .

ومن الجدير بالذكر أن التصاق هذه القشور الملحية بالأغشية يؤدي إلى إنخفاض كبير في إنتاجية الوحدة من الماء العذب ، كما أنه يتسبب في إرتفاع المقاومة الكهربائية للخلية ، مما يؤدي إلى فقد كبير في الطاقة الكهربائية المستخدمة ، وبذلك تتدنى كفاءة هذه الوحدات كثيراً مع استمرار تشغيلها ، مما يحتم تنظيفها بين آن وآخر مع استمرار معالجة الماء المستخدم للتخلص من الأملاح المسببة للعسر مثل أملاح الكالسيوم والمغنيسيوم قبل دخولها إلى وحدات الفرز الكهربائي ، ومن أمثلة هذه المعالجة حقن الماء بحامض كلوريد الهيدروجين أو حامض الكبريت بجرعة محسوبة تمنع حدوث هذه الترسبات عن طريق التحكم في تركيز أيون الهيدروجين (H^+) في الخلية .

ومن بين أساليب المعالجة أيضاً إضافة كميات صغيرة محسوبة من مادة ميتافوسفات الصوديوم السداسية (Sodium Hexa Meta Phosphate) ، التي تقاوم تكوين هذه القشور كما يجب أيضاً معالجة الماء المحتوي على مواد صلبة معلقة أو غروية ، باستخدام عمليات الترشيح خارج وحدات الفرز الكهربي تلافياً لترسيب هذه المواد العالقة على سطح الأغشية التي قد تؤدي إلى إنسدادها أو تلفها .

ومن بين الأفكار العملية الجيدة المستخدمة للتغلب على مشكلة القشور والترسبات ، هي الفكرة التي يتم فيها العكس الدوري لقطبية الأقطاب المستخدمة في العملية ، بحيث يصبح المصعد مهبطاً والمهبط مصعداً بعد فترة تشغيل معينه، وبذلك يتم إذابة الاملاح كهربائياً وبدون إستخدام مواد كيميائية خارجية ، وهناك شركات تقوم بتصميم وحداتها بحث يتم عكس هذه الأقطاب بطريقة آلية ، وقد ثبتت جدوى هذه الطريقة عملياً .

تطبيقات تقنية الفرز الغشائي

على الرغم من تشغيل الكثير من وحدات تنقية مياه البحر بالفرز الكهربائي ، إلا أن هذه الطريقة لم تثبت جدواها الإقتصادية لإنتاج الماء العذب من مياه مرتفعة الملوحة إلا في بعض الحالات الخاصة التي يتوفر فيها مصدر رخيص للطاقة الكهربائية ، أو باستخدام الخلايا الشمسية على مستوى صغير أو متوسط من ناحية الإنتاجية .

وعلى الجانب الآخر فقد تم تطوير وحدات صغيرة منها تنتج ما بين ٥٠ – ١٠٠ لتر من الماء العذب يومياً ، ويمكن تعليقها فوق حوض المطبخ بالمنزل بعد توصيلها بشبكة المياه المنزلية مباشرة ، كما تم تطوير وحدات صغيرة وبسيطة نسبياً للاستخدام في المزارع النائية التي تعتمد على المياه الجوفية خاصة مع الاستفادة من الطاقة الشمسية في هذا المجال .

ومن الجدير بالذكر أن هذه الطريقة تستخدم بكثرة في معالجة المخلفات المائية للمصانع ، وكذلك في معالجة مياه الصرف الصحي سواء لإعادة إستخدامها في الري أو كمياه تبريد في المناطق الصناعية التي تعاني من نقص في الموارد المائية ، أو حتى في معالجة مياه الغلايات المستخدم في محطات توليد القوى الكهربائية ، لأن هذه الطريقة تتميز بعدم إعتمادها على مواد كيميائية مثل الطرق الأخرى .

تقنية الفرز الغشائي بالمملكة

على ضوء ما تقدم فإن المستقبل الحقيقي لتقنية الفرز الغشائي الكهربي يعتمد على مدى الاستفادة من الطاقة الرخيصة كمصدر أساسي للطاقة اللازمة لتشغيل هذه الوحدات .

وبذلك تصبح هذه الطريقة مناسبة للحصول على الماء العذب من مياه الآبار ، خاصة في مجال الزراعة ، والري ، وفي الأماكن النائية ، التي لايتوفر فيها مصادر الكهرباء العادية ، وهي في هذا المجال تتميز عن طريقة التناضح العكسي بعدم حاجتها إلى مضخات الضغط العالي ، كما أن الكهرباء المتولدة بواسطة الخلايا الشمسية تستخدم مباشرة في خلايا الفرز الكهربائي التي تعمل مباشرة بواسطة التيار المستمر .

ومما يجدر ذكره أن هذه التقنية تستخدم في بعض محطات المياه بالمملكة مثل محطتي القويعية ولبخة تصل طاقتها الإنتاجية على التوالي إلى ٦٧٠٠م٣/يوم و ١٠٠٠م٣/يوم من المياه العذبة .

أما بالنسبة لمعالجة المخلفات المائية لبعض المصانع فإنه يمكن إقتراح هذه الطريقة – مثلاً – لمصانع الطلاء الكهربائي سواء في المنطقة الصناعية بالرياض أو في منطقتي الجبيل وينبع ، خاصة في ظل الإهتمام الحالي الكبير بالمحافظة على البيئة في هذه المناطق الإستراتيجية بالنسبة للنهضة الصناعية في المملكة .