عرف الإنسان التبخير كوسيلة للحصول على الماء العذب منذ زمن بعيد، وقد لجأ لذلك أثناء سفره وتنقله خاصة على ظهر البحار والمسالك المائية الأخرى التي غالباً لم تكن مياهها صالحة للشرب بطريقة مباشرة.

تحلية المياه بالتبخير متعدد المراحل

د. إبراهيم صالح المعتاز

تعتمد عملية تحلية المياه بالتبخير متعدد المراحل على تبخير الماء بتسخينه بمصدر خارجي للحرارة، ثم تكثيف البخار الناتج بالتبريد، وقد بدأت هذه العملية بمبخرات مياه ضخمة الحجم ذات وحدات متعددة تعمل كل واحدة منها مباشرة بحرق الوقود أسفل الوعاء الحاوي للمياه، ثم شهدت بعد ذلك تطوراً كبيراً أمكن معه الاستفادة من الحرارة المستخدمة في تبخير المياه في إحدى المبخرات في تبخير مياه مبخر آخر، ودعا ذلك إلى إستخدام وحدات تبخير متعددة تعمل كل واحدة منها معتمدة على الوحدة التي تسبقها، وهذا ما عرف بمسمى التقطير أو التبخير متعدد المراحل أو متعدد الفعالية.

تبلغ سعة محطات تحلية المياه العاملة بنظام التبخير متعدد المراحل حوالي ٥٪ من السعة الكلية للمياه المحلاة في العالم ولاتزيد سعة أكبر وحدة لتحلية المياه بهذه الطريقة كثيراً عن ٢٠,٠٠٠م٣/يوم.

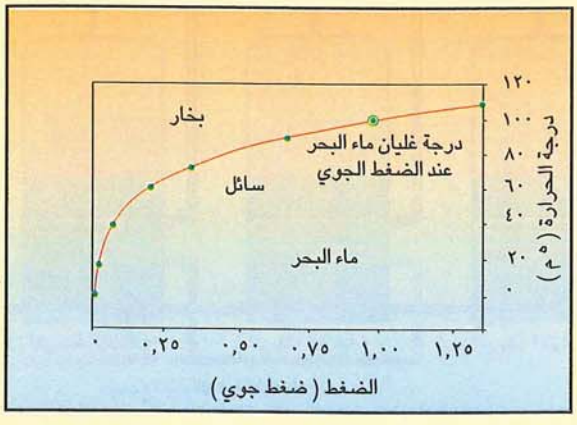
توجد وحدات التبخير متعدد المراحل في منطقة الخليج العربي في دولة الامارات العربية المتحدة، والبحرين، وقطر، والكويت ـ لا تزيد نسبة المياه المحلاه بهذه الطريقة عن ٠,١٪ من السعة الكلية للمياه المحلاه بهذه المنطقة ـ وعلى سبيل المثال فقد أنشئت ثلاث وحدات لتحلية المياه في الكويت ما بين عامي ١٩٥٤م إلى ١٩٥٦م تصل سعتها إلى ٣٦٥، و ٥٠٩٠، و ٤٧٧٠ م٣/يوم على التوالي. وتعد الكنداسة أول وحدة تبخير في المملكة العربية السعودية إذ تم إنشاؤها عام ١٩٠٧م في مدينة جدة.

آلية التبخير متعدد المراحل

شاع استخدام مصطلح التقطير (Distillation) في مجال تحلية المياه، ولذا سميت هذه الطريقة - في بداية معرفتها - بالتقطير متعدد المراحل (Multiple Effect Distillation - MED)، وهذا خطأ علمي صريح، فالتقطير هو عملية فصل السوائل المختلطة والمكونة لمحلول واحد، حيث تتبخر جزيئات هذه السوائل بنسب مختلفة عند ارتفاع درجة الحرارة، فيحتوي البخار المتكون على نفس المواد الذائبة بنسب متفاوته، في حين أنه في تحلية المياه يتم فصل الماء عن الأملاح الذائبة فيه، وذلك برفع درجة حرارة المياه إلى درجة الغليان ليتكون البخار الخالي من الأملاح وتبقى هذه الأملاح دون تبخير، وهذا ما يعرف بعملية التبخير. لذا فالصواب أن تسمى هذه الطريقة بالتبخير متعدد المراحل. (Multiple Effect Evaporation - MEE)

تهدف طريقة التبخير متعدد المراحل إلى زيادة الاستفادة من حرارة التسخين الداخلة إلى وحدات التبخير، وذلك بالاستفادة من البخار المتكون من الوحدة الأولى في رفع حرارة المياه في الوحدة الثانية، وكذلك الاستفادة من البخار المتكون من الوحدة الثانية في رفع حرارة المياه في الوحدة الثالثة، وهكذا في باقي الوحدات، ويمكن للبخار المتكون من الوحدة الأولى أن يعمل على تبخير مياه الوحدة الثانية إذا ما انخفضت درجة غليان المياه فيها عن درجة غليان المياه في الوحدة الأولى، ويتم ذلك بخفض الضغط في الوحدة الثانية عنه في الوحدة الأولى، إذ أن درجة الغليان تنخفض بانخفاض الضغط. ويعد هذا المبدأ هو الأساس النظري لعمل وحدات التبخير المتتابعة (المبخرات)، ويبين الشكل (١) التغير في درجة غليان الماء مع الضغط.

وهكذا يستمر التبخير في الوحدات المتتالية بخفض الضغط بشكل متتابع في وحدات التبخير. وبذا يعمل البخار المتكون في الوحدة الأولى على تبخير المياه في الوحدة الثانية عند تكثفه داخل هذه الوحدة، ثم يستفاد من البخار المتكون في هذه الوحدة بتبخير مياه الوحدة الثالثة، وهكذا تتكرر فعالية البخار وتزيد نسبة إنتاج المياه العذبة (المتبخرة) بالنسبة لمصدر الحرارة الخارجي المستخدم في تبخير الوحدة الأولى، وتعرف هذه النسبة بنسبة العائد (Gain Output Ratio - GOR) أو اقتصاد البخار (Steam Economy) أو نسبة الأداء (Performance Ratio)، وتتراوح هذه النسبة بين ٤٪ إلى ١٠٪ في



● شكل (١) التغير في درجة غليان مياه البحر عند الضغوط المختلفة.

معظم وحدات التبخير متعدد المراحل، وتدل على كفاءة وحدات التبخير، فالمبخرات ذات الكفاءة العالية لها نسبة أداء عالية. ويمكن حساب هذه النسبة تقريباً بضرب ٠,٨ في عدد مراحل التبخير (عدد وحدات التبخير أو المبخرات) للوحدات التي تزيد عن ثلاثة.

يستخدم البخار غالباً كمصدر خارجي للحرارة لتبخير مياه الوحدة الأولى، ويوضح شكل (٢) مخططاً لآلية تحلية المياه بالتبخير متعدد المراحل حيث تدفع المياه المالحة إلى داخل وحدة التبخير الأولى وعند مرور البخار الخارجي في الأنابيب الداخلية لهذه الوحدة ترتفع درجة حرارتها إلى درجة الغليان، ثم يتوجه البخار المتكون في الوحدة الأولى إلى الأنابيب الداخلية للوحدة الثانية، مما يؤدي إلى رفع درجة حرارة الماء المالح في هذه الوحدة إلى درجة الغليان، بينما يتكثف البخار داخل الأنابيب مكوناً مياهاً عذبة، تتكرر هذه العملية بتوجيه البخار المتكون في الوحدة الثانية للتكثف داخل أنابيب الوحدة الثالثة ـ مكوناً مياهاً عذبة ـ وعاملاً على تبخير المياه المالحة فيها، وهكذا يتكثف بخار الماء المالح داخل الأنابيب الداخلية للوحدات – إبتداء من الوحدة الثانية – ، شكل (٢)، مكوناً مياهاً عذبة يتم تجميعها للاستفادة منها في الأغراض المختلفة.

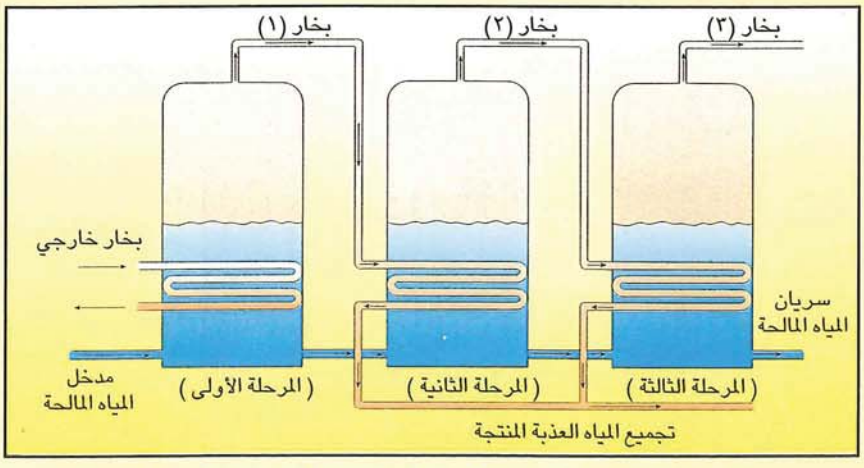
يستخدم ـ في الغالب ـ في تحلية المياه بطريقة التبخير متعدد المراحل من ستة إلى عشرة مبخرات، وتصنع فيها أنابيب التسخين عادة من سبائك مختلفة ـ من النحاس والنيكل أو غيرهما ـ جيدة التوصيل للحرارة ومقاومة للتآكل، وتضاف كميات من حامض الكبريت إلى المياه المراد تحليتها لخفض الرقم الهدروجيني، ومنع ترسب الأملاح على أسطح المبخرات خاصة أملاح كربونات الكالسيوم وهيدروكسيد المغنيسيوم. ويمكن إضافة عديد الفوسفات (Polyphosphates) للحد من ترسبات كبريتات الكالسيوم. وتعتمد درجة الحرارة التشغيلية القصوى للمبخرات على نوع المواد الكيميائية المضافة، إذ يمكن أن تصل هذه الدرجة إلى نحو ٩٠°م كحد أقصى في حالة إضافة عديد الفوسفات، وتصل إلى حوالي ١٢٠°م عند استعمال حامض الكبريتيك دون التعرض لمشاكل ترسب الأملاح.

عدد مراحل التبخير

تزيد كمية المياه المحلاة عملياً بزيادة عدد مراحل التبخير (عدد وحدات التبخير المتتابعة)، مما يؤثر إيجابياً على تكاليف إنتاج المياه المحلاة لتوفر كميات أكبر من المياه المنتجة، غير أن الزيادة في عدد المراحل هي في الحقيقة زيادة في رأس المال، ينتج عنها زيادة في تكاليف إنتاج المياه المحلاة. ويمكن حساب العدد الأمثل لمراحل التبخير ـ بالتقريب ـ حسب المعادلة التالية: العدد الأمثل = $\sqrt{\frac{ت}{م}}$ حيث:

(ت) تكاليف بخار التسخين لكل وحدة ماء منتج في مبخر أحادي المرحلة.

(م) التكاليف الثابتة لمرحلة كل وحدة ماء منتج.



● شكل (٢) مخطط توضيحي لطريقة تحلية المياه بالتبخير متعدد المراحل

أنواع وحدات التبخير

يمكن تصنيف وحدات التبخير متعدد المراحل إلى عدة أنواع طبقاً لعاملين أساسيين هما :-

● إتجاه سريان الماء والبخار

تصنف وحدات التبخير حسب إتجاه سريان الماء المالح والبخار المتكون في وحدات التبخير المختلفة (المبخرات) إلى نوعين رئسيين هما :-

*** وحدات التغذية الأمامية (Forward Feed) :** ويكثر استعمالها في مجال تحلية المياه، وتتم بدخول المياه المالحة إلى الوحدة الأولى، ثم تنساب إلى الوحدة الثانية فالثالثة حتى آخر وحدة، كذلك يتجه البخار من الوحدة الأولى إلى الوحدة الثانية فالثالثة وهكذا حتى آخر وحدة. وبذا فإن البخار والمياه المالحة يسيران في إتجاه واحد، ويبين الشكل (٢)، ترتيب وحدات التبخير متعدد المراحل باستخدام التغذية الأمامية.

***وحدات التغذية الخلفية (Backward Feed):** ويقل إستخدامها في مجال تحلية المياه إلا إنها تستخدم بشكل واسع في عمليات فصل المحاليل قليلة التركيز أو المحاليل التي تتأثر بارتفاع درجة الحرارة.

تتم التغذية الخلفية بدخول المياه المالحة إلى الوحدة الأخيرة، ثم تنساب إلى الوحدة التي قبلها وهكذا حتى تصل إلى الوحدة الأولى في حين أن البخار يتجه من الوحدة الأولى إلى الوحدة الثانية فالثالثة حتى آخر وحدة. وبذا فإن البخار والمياه المالحة يسيران في اتجاهين مختلفين.

● طرق نقل الحرارة

يمكن تصنيف وحدات التبخير متعدد المراحل حسب الطرق المختلفة لنقل الحرارة داخل المبخر ـ طبقاً للتصاميم المختلفة للأنابيب الداخلية ـ إلى مجموعات أهمها :

١ – الأنابيب المغمورة (Submerged Tubes).

٢- الأنابيب العمودية (Vertical Tubes) .

٣- الأنابيب الأفقية (Horizontal Tubes) .

وتختلف هذه التصاميم في مقدرتها على التغلب على ظاهرة ترسب الأملاح على أسطح المبخرات و الأنابيب الداخلية ، وتسمى هذه الظاهرة بتكون القشور (Scale Formation)والتي تحد من إنتقال الحرارة بين البخار والمياه المالحة ، كما وأن هذه التصاميم تعمل على زيادة المساحة السطحية المتاحة لإنتقال الحرارة بين البخار والمياه المالحة . وتهدف هذه الأنواع المختلفة من المبخرات إلى خفض تكاليف إنتاج المياه المحلاة .

مزايا التبخير متعدد المراحل

تتم في وحدات التبخير متعدد المراحل الاستفادة من البخار الخارجي المستخدم في تبخير المياه المالحة لإنتاج كمية أكبر من المياه العذبة تفوق كمية المياه المنتجة في حالة استخدام وحدة واحدة فقط للتبخير ، وقد قدرت كمية الماء العذب المنتجة بالطن لكل طن من بخار التسخين بحوالي ٠,٩ في حالة استخدام مبخر واحد ، و ١,٧٥ في حالة استخدام مبخرين ، وحوالي ٢,٥ عند استخدام ثلاثة مبخرات ، وحوالي ٣,٢ عند استخدام أربعة مبخرات .

تمتاز طريقة التبخير متعدد المراحل بإمكانية خفض تكاليف إنتاج المياه المحلاة ، فقد قدرت نسبة إنخفاض تكاليف إنتاج محطة تحلية مياه البحر ذات سعة نحو ٢٢,٧٠٠ متر مكعب يومياً - تعمل بطريقة التبخير متعدد المراحل ذات الأنابيب العمودية - بحوالي ٢٠٪ مقارنة بمحطة أخرى تعمل بطريقة التبخير الومضي (Multi-Stage Flash-MSF) لنفس كمية المياه المنتجة .

وبالإضافة إلى ذلك هناك عدة مزايا لطريقة التبخير متعدد المراحل مقارنة بطريقة التبخير الومضي يمكن تلخيصها في النقاط التالية :

* **توفير الطاقة :** حيث أن البخار المتكون في وحدات التبخير متعدد المراحل يستفاد منه عند نفس درجة الحرارة المتكون عندها ، ولايحتاج إلى رفع درجة حرارة المياه المالحة إلى درجة حرارة أعلى من درجة غليانها .

* **قلة تكوين الأملاح :** إذ أن المياه الداخلة لمحطة التبخير متعدد المراحل ذات التغذية الأمامية تكون عند أقل تركيز للأملاح وعند أعلى درجة حرارة ، وبذا تقل احتمالية تكوين الأملاح وترسبها على أسطح المبخرات .

* **إنخفاض الطاقة الكهربائية المستهلكة :** حيث تستهلك طريقة التبخير الومضي طاقة كهربائية لتحريك مضخات تدوير المياه ، في حين أن طريقة التبخير متعدد المراحل لاتحتاج إلى هذه المضخات .

* **عدم الاعتماد على ظاهرة الاتزان (Equilbrium) :** حيث يؤثر الاتزان بين البخار والسائل على أداء محطات التبخير الومضي ، إذ تعمل وحدات التبخير في هذه المحطات بكفاءة عالية عند الاتزان التام بين البخار والسائل ، في حين أن محطات التبخير متعدد المراحل لاتتأثر بظاهرة الاتزان بين البخار والسائل ، إذ أن البخار المتكون يستفاد منه عند نفس درجة الحرارة المتكون عندها ولايحتاج إلى وصوله إلى مرحلة الاتزان مع السائل .

* **قلة عدد الوحدات المطلوبة :** فللحصول على نسبة عائد (نسبة الأداء أو اقتصاد البخار) تعادل ١٠ فإنه يحتاج إلى ١٣ مبخراً تقريباً في محطة تحلية المياه بطريقة التبخير متعدد المراحل ، في حين أنه يلزم من ٣٠ إلى ٣٦ مبخراً تقريباً في محطة تحلية المياه بطريقة التبخير الومضي للحصول على نفس نسبة العائد المذكورة أعلاه .

ويبين الجدول (١) دراسة اقتصادية مقارنة بين طريقة تحلية المياه بالتبخير متعدد المراحل مقارنة بطريقة التبخير الومضي ، ويظهر من هذا الجدول تميز طريقة تحلية المياه بالتبخير متعدد المراحل اقتصادياً عن التبخير الومضي .

مستقبل التبخير متعدد المراحل

على الرغم من انحسار سوق محطات تحلية المياه بالتبخير متعدد المراحل عند بدء الإنتاج التجاري - على نطاق واسع - لكل من محطات التبخير الومضي في أواخر الستينيات الميلادية ، والتناضح العكسي في منتصف السبعينيات الميلادية ، إلا أن هذه الطريقة قد تشهد رواجاً في الفترة الراهنة ، وذلك لعدة عوامل هي مايلي :

١- إنخفاض إستهلاك الطاقة مقارنة بطرق التحلية الحرارية الأخرى ، مما يزيد من الإقبال عليها - في الفترة الأخيرة - خصوصاً في المناطق الريفية حيث ترتفع تكاليف الطاقة كثيراً .

٢- العمل عند درجات حرارة معتدلة في حدود ٦٥°م إلى ٧٠°م ، كما وأن المبخر الأخير يعمل عند درجة حرارة نحو ٣٨°م ، وهذه الدرجات من الحرارة تحد من إمكانية ترسب الأملاح أو تآكل أسطح المبخرات .

٣- سهولة ربط هذه الطريقة بطرق التحلية الأخرى (مثل طريقة التناضح العكسي) ، وسهولة تشغيلها بالمصادر المختلفة من الطاقة مثل الطاقة الشمسية أو الطاقة النووية ، كما هو موجود في محطة كازاخستان في الاتحاد السوفيتي سابقاً التي بدأت العمل في ١٦ يوليو ١٩٧٣م ، وتغذى حرارياً عن طريق البخار المولد من المفاعل الولود السريع ذي التبريد الفلزي السائل (LMFBR) من نوع (BN-350) وتعمل محطات التحلية الثلاث عشرة بطريقة التبخير متعدد المراحل .

العامل	متعدد المراحل	الومضي
رأس المال (دولار/م٣ يومياً)	١,٨٥	٢,٣
صيانة وتشغيل (دولار/م٣ يومياً)	٠,٨٨	١,١١
تكلفة إنتاج المياه (دولار/م٣)	١,٤٩	١,٨

المصدر: OJ Martin etal, Design and Operating Comparison MSF & MED Systems, Desalination 93, 69,1993.

● جدول (١) مقارنة بين طريقة تحلية المياه بالتبخير متعدد المراحل وطريقة التبخير الومضي