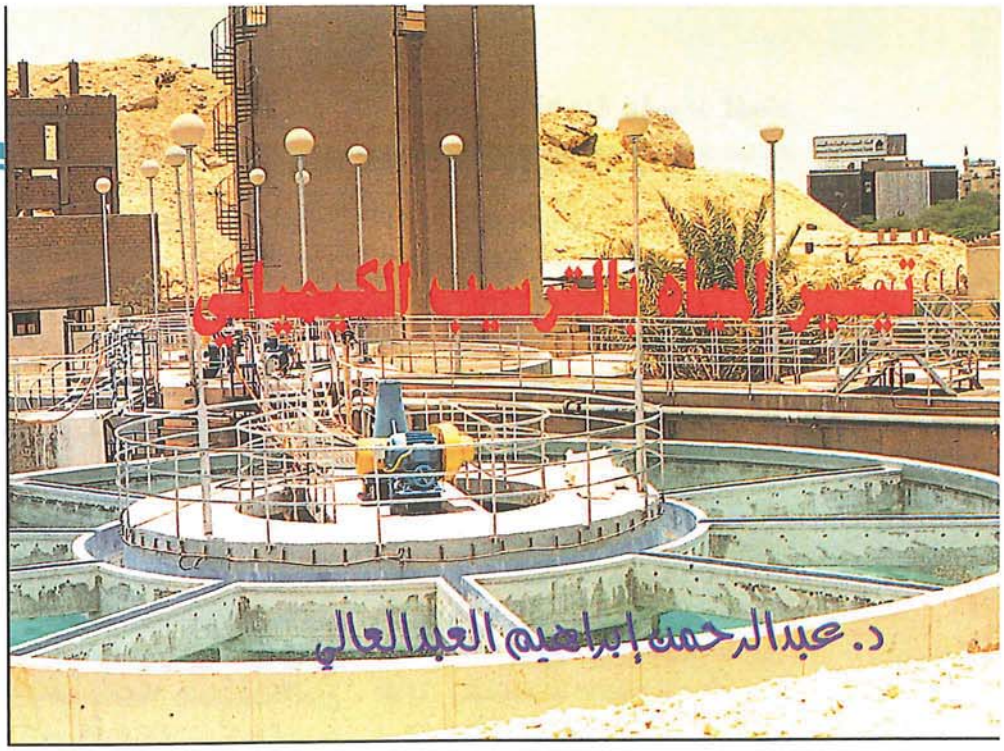


تيسير المياه بالترسيب الكيميائي

د. عبدالرحمن إبراهيم العبدالعالي

تحتوي المياه وخاصة الجوفية منها على أملاح مختلفة تتكون من أيونات موجبة (مثل الصوديوم ، الكالسيوم ، والمغنيسيوم ، والبوتاسيوم ، والحديد ، والمنجنيز) وأيونات سالبة (مثل الكلوريدات ، والكبريتات ، والبيكربونات ، والكربونات ، والنترات ، والفلوريدات) . وعند تواجد هذه الأملاح بتراكيز عالية في المياه فإنها تحد من إستخدامها مباشرة خاصة للشرب ، ولذا يجب إزالتها للوصول إلى الحد المسموح به وفقاً للمواصفات العالمية أو المحلية .

تعرف المياه التي يزيد فيها تركيز ملحي بيكربونات الكالسيوم $Ca[(HCO_3)_2]$ ، والمغنيسيوم $Mg(HCO)_3$ عن الحد المسموح به عالمياً بالمياه العسرة ، ويعرف العسر في هذه الحالة بالعسر الكربوناتي ، كما يحدث عسر المياه أيضاً بدرجة أقل عند احتوائها على أملاح كبريتات وكلوريدات وسيليكات الكالسيوم والمغنيسيوم ، ويسمى بالعسر غير الكربوناتي . ويعرف مجموع تركيزي عنصري الكالسيوم والمغنيسيوم بالعسر الكلي للمياه .

يقاس عسر المياه عادة بمكافىء كربونات الكالسيوم ، ويعبر عنه بالمليجرام (ملجم) من كربونات الكالسيوم المكافئة لكل لتر ماء ، وتحدد درجة عسر المياه طبقاً لتراكيز كربونات الكالسيوم ، جدول (١) .

تتفاوت درجة العسر المقبولة في المياه المنتجة حسب متطلبات الاستخدام سواء كانت صناعية أم منزلية . وتعد المياه التي تحتوي على عسر كلي (٧٥-١٥٠ملجم مكافىء كربونات كالسيوم/لتر ، وبما لايزيد عن ٤٠ملجم مكافىء كربونات مغنيسيوم/لتر) من أنسب المياه للاستخدام البشري حسب ما أقترحته جمعية أعمال المياه الأمريكية (AWWA) .

تأثيرات المياه العسرة

ينتج عن استخدام المياه العسرة (Hard Water) عدة تأثيرات منها مايلي :-

١- ترسب الأملاح المعدنية في المراجل (الغلايات) البخارية وسخانات المياه ، مؤدية إلى تآكل جدرانها ، وإنسداد أنابيبها ، واستهلاك طاقة عالية .

٢- تكوين رواسب غير ذائبة مع صابون الغسيل ينتج عنها إضعاف قوة تنظيف الصابون .

٣- تأثير سلبي على أنسجة الملابس وتكوين بقع عليها .

درجة العسر	تركيز كربونات الكالسيوم (ملجم مكافيء/لتر)
يسر	صفر ـ ٧٥
متوسط	٧٥ ـ ١٥٠
عسر	١٥٠ ـ ٣٠٠
عسر جداً	أعلى من ٣٠٠

جدول (١) العلاقة بين درجة العسر وتركيز كربونات الكالسيوم

وبالرغم من تلك التأثيرات السلبية للماء العسر - المذكورة أعلاه - إلا أن له تأثيرات إيجابية صحية تتمثل في العلاقة العكسية بين كمية العسر الموجودة في المياه ، وبين أمراض أوعية القلب الدموية ، حيث أن الزيادة المعقولة من الكالسيوم في الغذاء تقلل من مستويات الكوليسترول في الأوعية الدموية ، كما أن وجود عنصر المغنيسيوم يحمي الأوعية الدموية من ترسبات الغرويات (الليبيدات) في الشرايين لأنه يعمل كمضاد للتخثر ، وبذا يحمي الجسم - بإذن الله - من أمراض أوعية القلب الدموية ومن الجلطات ، كما أفادت البحوث والدراسات التي أجريت في هذا المجال أن المكونات الفرعية - عناصر الفناديوم ، والليثيوم ، والمنجنيز ، والكروم - المرتبطة غالباً بعناصر العسر لها تأثيرات إيجابية على أوعية القلب الدموية ، إلا أنه من ناحية أخرى أشارت بعض البحوث أن هناك عناصر معينة مثل الكادميوم ، والرصاص ، والنحاس ، والخارصين توجد بمستويات عالية نسبياً في الماء العسر قد تساعد على الإصابة بأمراض أوعية القلب الدموية .

إزالة عسر الماء

يتم إزالة عسر المياه (عملية التيسير) باستخدام ثلاث طرق هي الترسيب الكيميائي ، والتبادل الأيوني ، والتناضح العكسي . ويعتمد إستخدام أي من هذه الطرق الثلاث على تركيز العسر في المياه الخام ، وكمية المياه المعالجة ونوعية المياه المطلوبة ، وكذلك على النواحي الاقتصادية . وسيتناول هذا المقال عملية تيسير المياه بطريقة الترسيب الكيميائي ، كما سيتم مناقشة الطريقتين الأخريين في

منفصلين داخل هذا العدد .

الترسيب الكيميائي

يتم في عملية التيسير بالترسيب الكيميائي تحويل العسر الناتج من أملاح الكالسيوم (بيكربونات وكبريتات وكلوريد الكالسيوم) إلى كربونات الكالسيوم ، وتحويل العسر الناتج من أملاح المغنيسيوم إلى هيدروكسيد المغنيسيوم .

تعتمد هذه العملية على الرقم الهيدروجيني (pH) للوسط المائي ، وتمتاز بأنها تُعطي قيماً عالية لإزالة العسر إلى جانب إزالة بعض الملوثات الأخرى ، إلا أنه يعاب على هذه العملية بأنها معقدة نسبياً ، وصعب التحكم فيها ، إضافة إلى أنها تنتج مخلفات شبه سائلة يلزم التخلص منها بصورة سليمة .

تتم عملية تيسير المياه في محطات التنقية بالترسيب الكيميائي وفق أسلوبين رئيسيين هما :

• إضافة الجير ورماد الصودا

ينشأ عن إضافة الجير $Ca(OH)_2$ للمياه العسرة عدة عمليات كيميائية هي كالتالي :-

١- معادلة الأحماض الموجودة ، معادلة ١ ، ٢ ، شكل (١) .

٢- ترسيب أملاح الحديد والألمنيوم ، معادلات التفاعل (٣ ، ٤ ، ٥) .

٣- إزالة غاز ثاني أكسيد الكربون ، معادلة (٦) .

٤- ترسيب بيكربونات الكالسيوم والمغنيسيوم ، معادلات التفاعل (٧ ، ٨) .

٥- ترسيب كلوريد وكبريتات المغنيسيوم ، معادلات التفاعل (٩ ، ١٠) .

٦- تحويل البيكربونات الأخرى (بيكربونات الصوديوم والبوتاسيوم وغيرها) إلى كربونات ، معادلة التفاعل (١١) .

كما يقوم رماد الصودا (Na_2CO_3) بتحويل كلوريد الكالسيوم وكبريتات الكالسيوم إلى كربونات الكالسيوم المترسبة ، معادلات التفاعل (١٢ ، ١٣) .

• إضافة الصودا الكاوية

يمكن إزالة جميع أنواع العسر عند إضافة الصودا الكاوية (NaOH) ، وذلك على مرحلتين هما :-

١- إزالة العسر الناتج عن بيكربونات الكالسيوم والمغنيسيوم وكبريتات المغنيسيوم وفقاً للتفاعلات التالية :-

$CO_2+2NaOH \longrightarrow Na_2CO_3+H_2O$

$Ca(HCO_3)_2+2NaOH \longrightarrow CaCO_3(S) + Na_2CO_3+2H_2O$

$Mg(HCO_3)_2+4NaOH \longrightarrow Mg(OH)_2(S) +2Na_2CO_3+2H_2O$

$MgSO_4+2NaOH \longrightarrow Mg(OH)_2(S) +Na_2SO_4$

٢- يتفاعل رماد الصودا (Na_2CO_3) الناتج من هذه التفاعلات مع العسر المتكون من أملاح كبريتات وكلوريدات الكالسيوم حسب التفاعلات السابقة (معادلة التفاعل ١٢ ، ١٣ ، شكل ١) .

وبالرغم من أن أغلب عمليات إزالة العسر تعتمد على إضافة الجير ورماد الصودا ، إلا أنه في بعض الأحوال تحل الصودا الكاوية محل هاتين المادتين ، وهذا يرجع إلى عدة عوامل - تحدد إتخاذ قرار إستعمال مادة كيميائية معينة لتطبيق معين - هي :

- التكلفة الكلية للمواد الكيميائية : وهي أقل عند إستخدام الجير ورماد الصودا . وتعد الصودا أكثر المواد منافسة لهما خاصة في حالة المياه العسرة ذات القلوية المنخفضة أو المرتفعة جداً .

- مجموع الأملاح الذائبة في الماء : حيث يؤدي إستخدام الصودا الكاوية إلى زيادة مجموع الأملاح الذائبة في الماء - عكس ما يحدث عند إضافة الجير - كما أنها يمكن أن تزيد من تركيز عنصر الصوديوم إلى مستوى عال ، وكاف لإحداث تأثيرات صحية سلبية لبعض مستخدمي المياه .

- إنتاج مخلفات مترسبة (حمأة) : حيث ينتج عادة عند استخدام الجير ورماد

الرقم	المعادلة
١	$2HCl + Ca(OH)_2 \longrightarrow CaCl_2(S) + 2H_2O$
٢	$H_2SO_4 + Ca(OH)_2 \longrightarrow CaSO_4(S) + 2H_2O$
٣	$Al_2(SO_4)_3 + 3Ca(OH)_2 \longrightarrow 2Al(OH)_3(S) + 3CaSO_4(S)$
٤	$FeSO_4 + Ca(OH)_2 \longrightarrow Fe(OH)_2 + CaSO_4(S)$
٥	$2Fe(OH)_2 + H_2 + O_2 \longrightarrow 2Fe(OH)_3(S)$
٦	$CO_2 + Ca(OH)_2 \longrightarrow CaCO_3(S) + H_2O$
٧	$Ca(HCO_3)_2 + Ca(OH)_2 \longrightarrow 2CaCO_3(S) + 2H_2O$
٨	$Mg(HCO_3)_2 + Ca(OH)_2 \longrightarrow 2CaCO_3(S) + Mg(OH)_2(S) + 2H_2O$
٩	$MgCl_2 + Ca(OH)_2 \longrightarrow Mg(OH)_2(S) + CaCl_2(S)$
١٠	$MgSO_4 + Ca(OH)_2 \longrightarrow Mg(OH)_2(S) + CaSO_4(S)$
١١	$2NaHCO_3 + Ca(OH)_2 \longrightarrow CaCO_3(S) + H_2O + Na_2CO_3$
١٢	$CaCl_2 + Na_2CO_3 \longrightarrow CaCO_3(S) + 2NaCl$
١٣	$CaSO_4 + Na_2CO_3 \longrightarrow CaCO_3(S) + Na_2SO_4$

شكل (١) معادلات تفاعل الجير ورماد الصودا في تيسير المياه بالترسيب الكيميائي .

الصودا كميات من المخلفات المترسبة أكثر مما ينتج في حالة استخدام الصودا الكاوية ، كما تزيد – في الحالة الأولى – كمية المخلفات المترسبة بزيادة قلوية العسر ، بينما لايعتمد نتاج هذه المخلفات – في الحالة الثانية – على قلوية الماء عند عسر معين .

– الثبات الكيميائي للمواد الكيميائية : يعد تخزين واستعمال الصودا الكاوية أكثر سهولة مقارنة بالجير ، حيث أنها لا تتأثر خلال فترة التخزين ، بينما الجير المطفأ له قابلية عالية لامتصاص الماء وثاني اكسيد الكربون من الهواء وتكوين كربونات الكالسيوم ، كما أن الجير الحي يكون عرضة لامتصاص الماء أثناء التخزين

وطبقاً للعوامل السابقة فإن إستخدام الصودا الكاوية في عمليات إزالة عسر الماء لا يلقى ترحيباً ، وذلك لسببين ، هما : زيادة تكلفة المواد الكيميائية المستخدمة ، وزيادة حدود تركيز الصوديوم بالماء المعالج .

عمليات تيسير المياه

تم تقسيم عمليات تيسير المياه إلى أربعة أنواع – تبعاً لقيمة الجرعة الكيميائية التي تعتمد أساساً على خواص المصدر المائي – تنسب إلى نوع وكمية المواد الكيميائية المضافة ، هي كما يلي :-

● اضافة منفردة للجير

يضاف الجير فقط لتيسير الماء الخام المحتوي على تركيز عال من الكالسيوم ، وعسر منخفض من كربونات الماغنيسيوم (أقل من ٤٠ ملجم/لتر) ، ولايحتوي على عسر لمركبات أخرى غير كربوناتية .

● إضافة زائدة للجير

تضاف كمية زائدة من الجير لتيسير الماء الخام الذي يحتوي على تركيز عال من الكالسيوم ، وعسر عال من كربونات المغنيسيوم . ولايحتوي على عسر غير كربوناتي ، ويمكن معالجته من خلال مرحلة واحدة أو إثنتين .

● إضافة جير وصودا

تتم إضافة الجير والصودا لتيسير الماء الخام الذي يحتوي على تركيز عال من الكالسيوم ، وعسر منخفض من كربونات المغنيسيوم (أقل من ٤٠ ملجم/لتر) ، كما أنه يحتوي على بعض العسر من مركبات الكالسيوم غير الكربوناتية .

● إضافة زائدة من الجير والصودا

تستخدم الاضافة الزائدة من الجير والصودا لتيسير الماء الخام الذي يحتوي على تركيز عال من الكالسيوم ، وعسر عال من كربونات المغنيسيوم ، وعسر غير كربوناتي . ويمكن معالجة الماء العسر بهذه العملية من خلال مرحلة أو إثنتين .

مفاعلات التيسير

تجري عملية تيسير الماء في خزانات كبيرة تعرف بالمفاعلات ، يتم فيها عمليات الخلط والترويق إنسيابياً مما يصعب معه التحكم في مجرى العملية ، على عكس ما يجري في محطات تنقية المياه ذات السعة الصغيرة .

يوجد نظامان لتصميم مفاعلات تيسير المياه يعتمد الأول منهما على ترسيب المواد المتكونة في قاع المفاعل ، بينما يعتمد الآخر على الإلتحام بأجسام صلبة عالقة ، ويمكن توضيحها على النحو التالي :-

● المعالجة بالترسيب

تتميز مفاعلات تيسير المياه بالترسيب بكبر حجمها حيث يصل قطرها العلوي إلى ١٥ متراً ، وعمقها إلى ٨ أمتار ، ويمكث الماء فيها إلى ما لايقل عن ساعتين . ويتم إستخدام هذا النوع من المفاعلات على نطاق واسع في محطات تنقية المياه بمدينة الرياض ، كما يوجد العديد من تصاميم مفاعلات تيسير المياه باستخدام المعالجة بالترسيب ، إلا أن أكثرها شيوعاً هو التصميم الموضح في الشكل (٢) ، الذي تتم فيه عملية التيسير على عدة خطوات هي :-

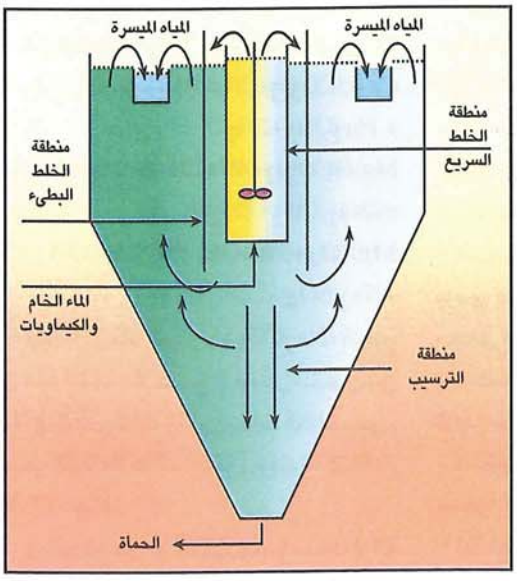
١- ضخ المياه الخام والمواد الكيميائية من أسفل منطقة الخلط السريع حيث يتم خلطها – باستخدام خلاطات – لإحداث التفاعل المطلوب .

٢- رفع الخليط إلى أعلى فينساب إلى الجزء العلوي من منطقة الخلط البطيء ، حيث يتكون الندف ويترسب بفعل الجاذبية في منطقة الترسيب مكوناً حمأة .

٣- رفع الماء الصافي نسبياً إلى أعلى ، حيث يتم تجميعه ، وإمراره على عمليات التنقية التالية .

٤- التخلص من الحمأة من أسفل المُرَسب عن طريق ضخها خارج المفاعل بنسَب محدودة .

٥- إعادة جزء من الحمأة – في بعض أنواع المرسبات – إلى منطقة الخلط السريع لزيادة كفاءة الترسيب .



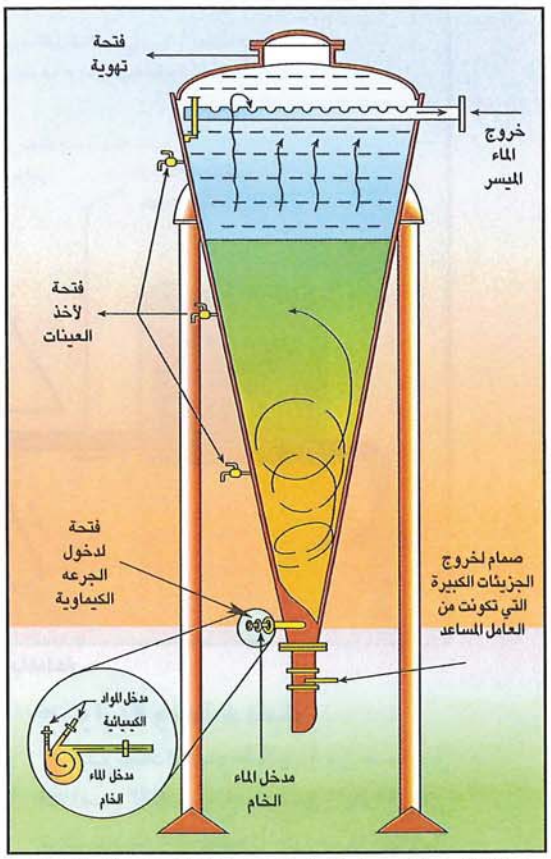
● شكل (٢) مفاعل التيسير المستخدم للمعالجة بواسطة الترسيب .

● المعالجة بالالتحام

تتميز عملية تيسير المياه بالمعالجة بالالتحام ، بصغر حجم مفاعلها ، وانخفاض تكلفة منشآتها ، وسرعة معالجتها للماء العسر ، ولقد تم إستخدام هذه التقنية منذ عدة سنوات في هولندا والولايات المتحدة الأمريكية ، ويتم استخدامها حالياً بمحطة تنقية مياه الشرب بمدينة عنيزة بمنطقة القصيم .

يتم تنقية المعالجة بالالتحام بالأجسام الصلبة المعلقة بإستخدام وسط متحرك من الحبيبات الخاملة كيميائياً ، مثل حبيبات الرمل التي تترسب عليها بلورات كربونات الكالسيوم .

يتركب مفاعل التيسير المستخدم



● شكل (٣) مفاعل التيسير المستخدم للمعالجة بواسطة الالتحام بالأجسام الصلبة المعلقة.

لمعالجة الماء العسر بالتقنية المذكورة، من خزان مخروطي الشكل قاعدته الصغرى إلى أسفل تتم فيه تفاعلات التيسير في وجود وسط عالق من حبيبات الرمل الناعمة – محفز – يتراوح قطرها بين ٠,١–٠,٢ ملم، شكل (٣).

يدخل الماء الخام والمواد الكيميائية من قاع المخروط حيث يتم خلطهما فوراً، ويرتفع الماء المعالج داخل الخزان بحركة حلزونية، وتكفي السرعة الرأسية للماء لحفظ واستمرار الرمال في حركة دائمة. يتراوح زمن الالتحام بين الماء المعالج وذرات الرمل ما بين ٨ إلى ١٠ دقائق، حيث تلتصق خلالها جزيئات مواد العسر المترسبة على سطح ذرات الرمل، فيكبر حجمها. ونتيجة للحقيقة العلمية التي مفادها أن الذرات الكبيرة لها سطح نشط صغير، فإن بعضاً من هذه الرمال يتم إزالتها بانتظام من أسفل المخروط ويحل محلها ذرات رمل نشطة صغيرة الحجم.

يتم خفض قيمة الرقم الهيدروجيني – خلال المعالجة – بدرجة كافية لمنع ترسيب هيدروكسيد المغنيسيوم، حيث أنه لا يلتصق جيداً بسطح حبيبات الرمال فيترسب أسفل الخزان مسبباً حملاً كبيراً من المواد الصلبة على سطح المرشح، ولذا يفضل عدم إستخدام هذه الطريقة في حالة احتواء الماء الخام على نسبة عالية من المغنيسيوم.

مخلفات عملية التيسير

تنتج عن عملية إزالة العسر باستخدام الجير، ورماد الصودا والصودا الكاوية (المعالجة بالترسيب) حمأة تحتوي على مخلفات مترسبة، مثل: كربونات الكالسيوم، وكبريتات الكالسيوم، وهيدروكسيد المغنيسيوم، وسيليكا، وأكاسيد الحديد، وأكاسيد الألمنيوم ومواد كيميائية لم تتفاعل. وتتراوح نسبة المواد الصلبة – في المتوسط – بين ٢٪ إلى ١٥٪ من الحمأة المتكونة في مفاعلات الترسيب. أما مخلفات مفاعلات المعالجة بإستخدام الالتحام بالأجسام الصلبة العالقة فهي مخلفات صلبة يسهل التخلص منها.

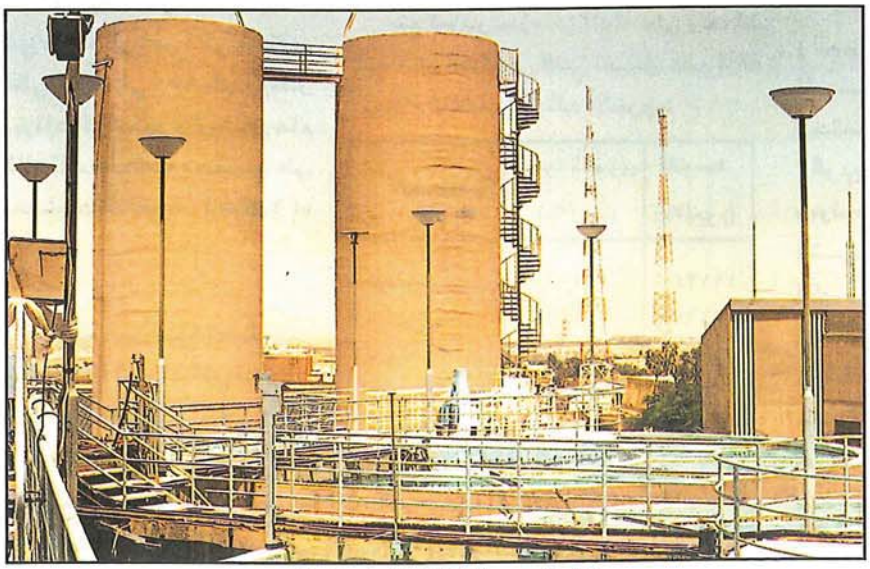
تعد عملية التخلص من الحمأة مكلفة سواء في مرحلة الإنشاء أو الصيانة والتشغيل. لذلك فقد تم الاهتمام بتقليل حجم الحمأة الناتجة – عن عمليات المعالجة – باستخدام مواد كيميائية خاصة لهذا الغرض، أو إعادة تدويرها للاستفادة منها. وهناك العديد من الطرق المستخدمة للتخلص من الحمأة المنتجة يمكن تلخيصها كالتالي:

١– تركيز الحمأة في برك، وتعد من أفضل طرق التخلص منها إلا أنها طريقة مكلفة، وتتطلب مساحات كبيرة من الأراضي.

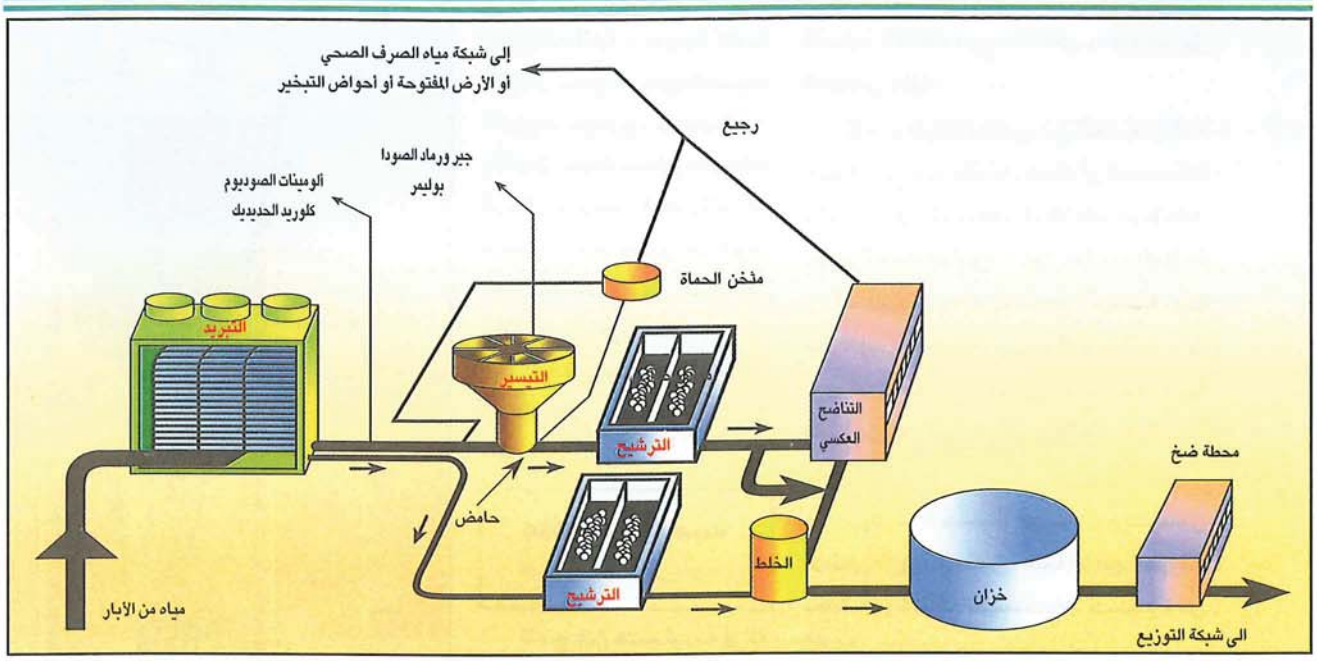
٢– إلقاء الحمأة في مواقع مخلفات البلدية، ويتطلب ذلك تقليل حجمها – تركيز المواد الصلبة فيها – عن طريق إزالة الماء منها.

٣– إلقاء الحمأة في الأرض المفتوحة، إلا أن هذه الطريقة لها تأثيرات بيئية سواء على التربة أو النبات أو المياه.

٤– التخلص من الحمأة في مرافق الصرف الصحي، مع الأخذ في الاعتبار التأثيرات الكيميائية على عمليات معالجة مياه الصرف الصحي، وكذلك زيادة المواد الصلبة وماقد يتطلب من تعديلات على



● إحدى محطات تنقية المياه بالرياض.



● شكل (٤) عمليات المعالجة في محطات تنقية مياه الشرب بالمملكة .

عمليات المعالجة وظروف التشغيل والصيانة .

عمليات تيسير المياه في المملكة

هناك إعتماداً كبيراً على المياه الجوفية لسد احتياجات المدن والقرى من مياه الشرب . ويوجد العديد من محطات تنقية المياه المصممة لإزالة العسر وماتحتوية المياه من عناصر تحد من إمكانية إستخدامها للأغراض المنزلية وبالذات الأملاح المسببة للعسر . فعلى سبيل المثال تحتوي المياه الجوفية المغذية لأحد محطات تنقية المياه في مدينة الرياض أعلى مستوى للعسر الكلي يصل إلى ٨٥٠ملجم/لتر مكافيء كربونات الكالسيوم. وبشكل عام فإن أغلب المحطات القائمة تحتوي على العديد من عمليات التنقية ، (شكل٤) ، التالية :

● التبريد

يتم إمرار المياه الجوفية الخام على أبراج ، لتبريدها وإزالة الغازات التي قد تكون موجودة بها ، وأكسدة الحديد والمنجنيز .

● التيسير

يتم تيسير المياه عن طريق معالجتها باستخدام مفاعلات التيسير بالترسيب في جميع المحطات ماعدا محطة تنقية المياه بمدينة عنيزه التي يستخدم فيها مفاعلات التيسير بالالتحام بالأجسام الصلبة المعلقة . ويتم إستخدام مواد كيميائية لإزالة العسر (جير ، رماد الصودا ، صودا كاوية) ، وكذلك مساعدات ترسيب (ألومينات الصوديوم ، وكلوريد الحديديك ، والبوليمرات) .

● الترشيح

يتم ترشيح المياه لإزالة العوالق ، والرواسب الدقيقة التي تكونت خلال عملية التيسير وذلك بإمرار المياه على مرشحات تحتوي على سيليكا .

● التناضح العكسي

يتم تمرير جزء من المياه على وحدات التناضح العكسي التي تعمل على إزالة الأملاح الذائبة والملوثات الأخرى .

المحطة	السعة القصوى (م٣/يوم)	المتوسط (م٣/يوم)
الوسيع	٢٢١٠٠٠	١٩١٢٤٠
صلبوخ	٦٦٧٢٠	٣٦٦٧٦
بويب	٦٦٠٠٠	٢٧٤٥٢
منفوحة ـ ١	٤٣٢٠٠	٢٥٣٤٢
منفوحة ـ ٢	٤٣٢٠٠	٢٨٣٦٢
الشميسي	٥٧٦٠٠	١٩٠٠٦
الملز	٢٨٨٠٠	١٤٤٢٧

جدول (٢) إنتاجية محطات تنقية المياه بمدينة الرياض (١٤١٣هـ)

● موازنة وتعقيم المياه

يتم خلط المياه الناتجة من عملية التناضح العكسي مع جزء من المياه التي تم ترشيحها ، للحصول على مياه مطابقة للمواصفات المطلوبة . ثم تعقم المياه باستخدام مادة الكلور ، ويعّدل الرقم الهيدروجيني للمياه باستخدام رماد الصودا أو الصودا الكاوية ليتم تخزينها وضخها لشبكة التوزيع .

كيميائيات تيسير المياه

بجانب المواد الكيميائية الأساسية (الجير ورماد الصودا والصودا الكاوية) المستخدمة لإزالة عسر المياه فإنه يتم استخدام مواد أخرى (كبريتات الألمنيوم وألومينات الصوديوم ، وكبريتات الحديد ، وبوليمرات عضوية) تساعد في عملية الترسيب . ويأتي إستخدام هذه الكيميائيات في محاولة لزيادة كفاءة ترسيب مواد العسر باستخدام الجير ورماد الصودا ، بحيث يمكن إزالة نسبة معينة من مركبات أخرى مثل السيليكا خاصة في محطات التنقية التي تشمل عمليات التناضح العكسي ، وذلك لمنع ترسيب السيليكا داخل أغشية التناضح العكسي المستخدمة في تلك المحطات .