ENGLER-BUNTE-INSTITUT

HANDBOOK

كُتَيِّب

Ministry of Water And Irrigation

تحلية المياه المالحة للمناطق الشحيحة بالمياه

وادي الأردن

SMART MOVE

DVGW

KIT

SPONSORED BY THE

Federal Ministry of Education and Research

SPONSORED BY THE

Federal Ministry
of Education
and Research

Funding reference 02WM1355D

تم إعتماد هذا الدليل من قبل وزارة المياه والري في المملكة الأردنية الهاشمية.

Ministry of
Water And Irrigation

الشركاء والمساهمين

تم إعداد هذا الدليل ضمن إسهامات مركز DVWG للبحوث في معهد Engler-Bunte-Institut (KIT) في مشروع سمارت-موف (SMART MOVE) والممول من قبل الوزارة الاتحادية للتعليم والبحث العلمي BMBF، الذي يسعى بدوره إلى إيجاد حلول مستدامة لإدارة الموارد المائية المتاحة في وادي الأردن مع شركاء في كل من الأردن والأراضي الفلسطينية وإسرائيل وألمانيا.

الإدارة المستدامة للموارد المائية المتاحة مع التكنولوجيا المبتكرة - إدارة الموارد المائية شديدة التغير في المناطق شبه القاحلة

مركز DVWG للبحوث في معهد Engler-Bunte-Institut (KIT)

كيمياء المياه وتكنولوجيا المياه

أوليفر يونغ و فلورنسيا سارافيا و هارالد هورن

ترجمها إلى العربية: علي صائغ

قسم الاقتصاد الزراعي وإدارة الأعمال الزراعية في الجامعة الأردنية

عماد الكرابلية و محمد شدفان

قسم علوم الأرض والبيئة بجامعة القدس في القدس، فلسطين

عامرمرعي

قائمة المحتويات

قائمة المحتويات.....1

قائمة الإختصارات.....4

قائمة المصطلحات.....5

1.مقدمة.....7

2. وادي الأردن الأدنى.....9

2.1.جودة المياه.....13

2.2.تحلية المياه الجوفية المالحة في الأردن.....19

3.تحلية المياه المالحة.....26

3.1.التصميم والاعتبارات التشغيلية - مشكلة التحشف والاستراتيجيات الأساسية.....27

3.2.المعالجة المسبقة.....29

3.2.1.الترشيح العميق.....31

3.2.2.الأكسدة (التهوية).....32

3.2.3.التخثر والترويق.....33

3.2.4.الترشيح الدقيق (Microfiltration)/الترشيح الفائق (Ultrafiltration)34

3.2.5.ترشيح كارتريدج (cartridge Filtration).....34

3.3.ملاحظات حول تكون القشور/التكلس.....36

3.4.ملاحظات حول التحشف الحيوي/البيولوجي.....39

3.5 مرحلة ما بعد المعالجة 41
3.6 إدارة المحلول الملحي 42
4 تصميم النظام 47
4.1 الإعتبارات الخاصة بالغشاء 49
4.2 التصميم التنفيذي 51
4.2.1 أنظمة المرحلة الأحادية 51
4.2.2 نظام متعدد المراحل 53
4.2 اعادة دوران المُركز 55
4.2.4 أجزاء المنظومة-أدوات التحكم 57
4.3 الفرق بين الترشيح الثانوي والتناضح العكسي 59
5 التشغيل والصيانة 61
5.1 عوامل فعالية التشغيل العامة 61
5.2 بدأ التشغيل 62
5.3 إيقاف التشغيل 63
5.4 عمل منظومات تحلية المياه قليلة الملوحة 64
5.5 المحافظة على السجلات 66
5.6 التسوية 69
6 اعتبارات التكلفة 70
6.1 دراسة التكلفة لأنظمة التناضح العكسي الموجودة حالياً في الأردن 75

7.توصيات عامة..... 78
8.الملحق..... 82
8.1.بيانات مختارة لعينات تم جمعها في الأردن 82
8.2محاكاة ROSA..... 86
8.3.تقييم الحد الأقصى من الاسترداد باستخدام برامج لمنع تكون القشور/التكلس 91
8.4.ورقة الوقائع الأولية..... 93
8.5.قائمة التدقيق لخطوات التشغيل... 96
9.المراجع..... 100

قائمة الإختصارات

الكربون العضوي المذاب	DOC
الموصلية الكهربائية	EC
وادي الأردن الأدنى	LJRV
مؤشر التشبع لانجيلير	LSI
مليون متر مكعب	MCM
الترشيح النانو	NF
(الأمين المتعدد) بولي أميد	PA
بولي إيثرسولفون	PES
التناضح العكسي	RO
مؤشر كثافة الطمي	SDI
هيكساميتافوسفات الصوديوم	SHMP
مجموع المواد الصلبة الذائبة	TDS
مجموع الكربون العضوي	TOC
مياه الصرف الصحي المعالجة	TWW

قائمة المصطلحات

المياه المائلة للملوحة	مياه ذات ملوحة تتراوح بين ملوحة المياه العذباء (TDS < 500 mg/L) و ملوحة مياه البحر (TDS > 30,000 mg/L)
المحلول الملحي	تيار مركز ناتج عن نظام الغشاء ذو التدفق العرضي لتحلية المياه، وهو منتج النفايات السائلة الذي يحتوي على مجموع المواد الصلبة الذائبة والمواد الكيميائية المضافة في العملية.
التدفق	سرعة تدفق المياه النافذة عبر متر مربع واحد من الغشاء(وحدة القياس: لتر لكل متر مربع وساعة (l/m²h).
التحشف/تكون الحشف	تراكم المواد (العضوية وغير العضوية والتحشف البيولوجي) على سطح الغشاء أو في مسام الغشاء؛ تحشف الغشاء يمكن أن يؤدي إلى انخفاض شديد في التدفق، وإلى تراجع جودة المياه.
النفاذية	عامل من عوامل الغشاء، و يعرف بالتدفق مقسوماً على ضغط التشغيل (الوحدة: لتر لكل متر مربع وساعة وبار(l/m²hbar))
المياه النافذة/ المُنتج	المياه الناتجة عن عملية تحلية المياه المالحة؛ وهي منخفضة جداً من حيث مؤشر المواد الصلبة الذائبة، لذلك فهي ذات عدوانية كيميائية مرتفعة (سريع التآكل).
الإسترداد	نسبة معدل تدفق الماء المُنتج على معدل التغذية .

مؤشر رفض الملح	مؤشر يصف قدرة الغشاء على السماح لبعض الأيونات للنفاذ من خلاله ، وهو يساوي 1 مطروحاً منه نسبة تركيز المياه النافذة على تركيز التغذية ضرب 100%. عادة أغشية RO لديها مؤشر رفض الملح أكبر من 95% وذلك لجميع الايونات.
تكون القشور/التكلس	هبوط الأملاح بسبب الإفراط في التشبع
SDI	كذلك يعرف بمؤشر التحشف يستخدم لتقييم خطرالتحشف (Fouling Index) FI والناتج عن الجسيمات والغرويات.
LSI	مؤشر لتقييم قابلية ذوبان كربونات الكالسيوم للمياه المائلة للملوحة LSI = pH – pHs PHs هي قيمة PH إذا كان المحلول في توازن مع كربونات الكالسيوم
pH	هو مقياس رقمي يستخدم لتحديد حموضة أو قلوية محلول مائي

1. مقدمة

تم وضع الدليل الحالي ضمن المساهمات المقدمة من معهد EBI للوزارة الاتحادية للتعليم والبحوث BMBF في تمويل مشروع سمارت جوينت، والذي يهدف إلى تطوير إدارة موارد مياه متكاملة لوادي الأردن الأدنى وذلك من خلال المساهمات المقدمة من الجامعات والوزارات والشركات الخاصة في الأردن والأراضي الفلسطينية وإسرائيل وألمانيا. مركز (DVWG- للبحوث) في معهد EBI هو منشأة أبحاث مختصة بكيمياء وتكنولوجيا المياه، كما أنه يتمتع بخبرة واسعة في التقنيات الخاصة لتحلية المياه باستخدام الغشاء، حيث تم إجراء العديد من المشاريع البحثية المتعلقة بالتناضح العكسي (RO) والترشيح النانو (NF) خلال العقدين المنصرمين.

تشكل خصائص وادي الأردن الأدنى تحديات فريدة من نوعها لإدارة المياه، فالظروف المناخية متفاوتة بشكل كبير ومصادر المياه الدائمة شحيحة وفي تراجع مستمر؛ ولذلك فإن إيجاد مصادر إضافية للمياه ذو أهمية عالية لتلبية متطلبات الحصول على مصادر المياه المتاحة؛ لذلك فإن طبقات المياه الجوفية المالحة في وادي الأردن الأدنى يمكن أن تكون مصدر طويل الأمد للحصول على مصدر بديل للمياه الذي يمكن استخدامه بعد المعالجة المناسبة في أغراض الري وتوفير مياه الشرب، فلقد أصبحت تقنية الغشاء لتحلية المياه تعد من أهم التكنولوجيا الحديثة والفعَالة إقتصادياً التي تلائم معالجة المياه الجوفية المالحة.

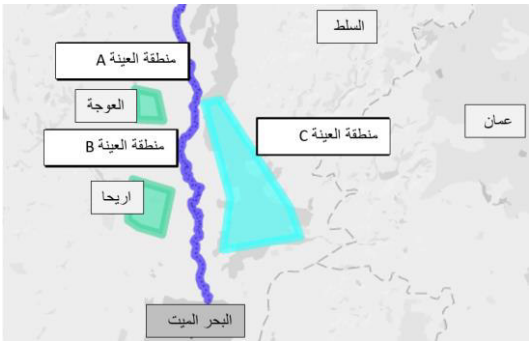
منذ عقد تقريباً بدأت في الأردن الأعمال الزراعية التي يديرها القطاع الخاص والذي يقوم باستخدام مصادر المياه الجوفية المالحة، فقد ثُبتت وحدات صغيرة من نظام التناضح العكسي(RO) في المزارع لغرض علاج المياه الجوفية المالحة لتلبي جودة المياه المطلوبة للري الزراعي وفي نفس الحين تكمل مصادر المياه المتوفرة، حيث يتم توفير نظم RO من خلال شركات وطنية أردنية، التي تقوم بدورها باستيراد بعض القطع اللازمة من شركات دولية تستخدم تقنية الغشاء لتحلية المياه، وذلك بسبب أن الأسواق

القائمة غير منظمة وتقدم نظم رأسمالية في تحديد أسعار هذه القطع. هذا الكتيب يسعى إلى توفير الحد الأدنى من المعرفة حول تصميم وتنفيذ وتشغيل نظام(RO/NF) لتحلية المياه المالحة، كما أنه يسعى إلى زيادة مستوى المعرفة المتعلقة بالخصائص العامة لوادي الأردن الأدنى بما فيها خصائصه الفريدة؛ هذا الكتيب يوفر أيضا سياق ثابت لتحلية المياه المالحة فيما يتعلق بأفضل المعايير التطبيقية والاقتصادية المستدامة، حيث ينتج عن هذه التكنولجيا (تكنولوجيا تحلية المياه باستخدام تقنية الغشاء) نفايات مركزة أو ما يعرف بالمحلول الملحي والذي من شأنه أن يسبب العديد من التغيرات البيئية التي تؤثر أساساً على نوعية التربة و المياه الموجودة في طبقات المياه الجوفية .

علماً بأن هذا الكتيب لا يحل محل الكتيبات التقنية المزودة من قبل الشركات المصنعة أو تلك المزودة من قبل الموردين ذوي الخبرة الفنية، ولكنه يهدف إلى تكملة هذه القواعد المعرفية التي تسعى إلى مساعدة المستخدم النهائي على فهم العلاقات الرئيسية والقضايا المتعلقة بنظام(RO/NF) والتي من شأنها المساعدة في استخدامات أفضل لتحلية المياه باستخدام تقنية الغشاء.

2. وادي الأردن الأدنى

نواح عديدة تجعل من وادي الأردن الأدنى منطقة فريدة من نوعها على هذا الكوكب؛ حيث أنه يقع في أخفض منطقة على سطح الأرض، كما يشكل تاريخه الثقافي والحضاري القديم أهمية كبرى خاصة بوجود الصراع السياسي الحالي. تعرف هذه المنطقة بندرة المياه، حيث تتوزع مياه هذا الوادي على الأراضي المحيطة به والتي تشمل كل من إسرائيل والأردن والأراضي الفلسطينية، لكل منها قدرات وموارد متفاوتة في إدارة هذه المياه وإمداداتها المحلية، مما أدى إلى وجود تحديات كبيرة لسكان هذه المناطق في مواجهة المناخ شبه القاحل والقاحل، إضافة إلى التفاوت الكبير في توفر وجودة هذه المياه، فنسبة مياه الأمطار السنوية تتراوح من 50 إلى 150 مم فقط وذلك في الجزء الجنوبي من الوادي، حيث تتركز معظمها في الفترة الواقعة بين تشرين الأول/أكتوبر إلى نيسان/أبريل بينما قد تتفاوت الكمية الإجمالية إلى حد كبير من سنة إلى أخرى؛ بالإضافة إلى هذا كله هناك تفاوت كبير أيضاً في الطوبوغرافيا، التي بدورها تؤدي إلى تركيز هطول الأمطار في المناطق الجبلية مما يؤدي إلى قدرة تبخر 2600 مم سنوياً. لذلك، فإن المصدر الرئيسي للمياه هو المياه السطحية والجوفية التي تتغذى من مياه الأمطار وهي كالآتي من الشرق المرتفعات الشرقية (المرتفعات الأردنية) ومن الغرب (جبال يهودا) ومن الشمال (هضبة حوران)[1].



الشكل 1 عينات المناطق في وادي الأردن الأدنى ذات المياه الجوفية المالحة

في هذا الكتيب تم التركيز على منطقتين في الجزء الجنوبي من الوادي ، وهما شرق وغرب نهر الأردن (الشكل 1). النشاط الاقتصادي الرئيس في كلا المنطقتين هو الزراعة، والذي يعتمد اعتماداً كبيراً على توافر المياه العذبة؛ ففي الأردن، يُسمح للمزارعين استخراج كمية محدودة من المياه من قناة الملك عبد الله، والتي بنيت لتوزيع المياه من الحدود الشمالية عبر الوادي إلى البحر الميت؛ بينما في المنطقة الجنوبية يتراجع توافر المياه نظراً لاستخراجه في الشمال. لذلك، بدأ المزارعون استغلال المياه الجوفية المالحة لتحسين إمدادات المياه من الآبار الموجودة في تلك المنطقة، والذي يتراوح عمق البئر الواحد بين 100 إلى 170 متر، حيث يقوم المزارعون بمزج المياه الجوفية المالحة بالمياه العذبة أو يقومون بتحلية المياه المالحة؛ فبهذه العملية استطاع المزارعون تأمين زيادة كبيرة في مخزون المياه خاصة في موسم الجفاف، مما أدى لزيادة الإنتاج الزراعي ونمو المحاصيل الزراعية على مدار العام؛ ففي الجهة الجنوبية من الوادي، تم تطوير أكثر من 50 وحدة تناضح عكسي ذات تصميم متوسط يتراوح بين 30 إلى 40 م^3/س(اعتباراً من العام 2016).

أما الخيارات الأخرى لتوفير المياه الإضافية، مثل الاستيراد من مناطق أخرى، تشكل تحديا اقتصاديا وسياسيا؛ وبالتالي فالتنمية الحالية والمستقبلية للمنطقة تعتمد اعتماداً كبيرا على إدارة مصادر المياه الحالية، التي تشمل إدارة المياه الجوفية المالحة.

على العكس من ذلك فتكنولوجيا تحلية المياه في الضفة الغربية لم تنتشر بعد، ولكن وعلى نحو مماثل، يمكن زيادة مخزون المياه للاستخدام الزراعي من خلال معالجة المياه الجوفية المالحة بهدف الري؛ فعلى وجه التقدير يمكن معالجة حوالي 22 مليون متر مكعب من المياه الجوفية المالحة سنوياً في المنطقة وفقاً لاستراتيجية المياه الخاصة بها، كما يمكن معالجة ما يصل إلى 82 مليون متر مكعب في شرق نهر الأردن سنوياً؛ فمنذ العام 2016 يقوم المزارعون في الأردن بمعالجة أكثر من 12 مليون متر مكعب سنوياً، وبالنظر للحاجة الإجمالية للمياه في البلدان المعنية، فإن تحلية المياه المالحة

تلعب دوراً ثانوياً على الصعيد الوطني بينما قد تكون عاملاً محلياً هاماً يُمكنها من خفض العجز في المياه إلى حد كبير (أنظر الجدول 2). [2]

جدول1 : توافر المياه والطلب عليها في البلدان المجاورة لوادي الأردن وفقا لاستراتيجيات المياه الخاصة بكل منها؛ مقتبس من [2]

	الأراضي الفلسطينية (الضفة الغربية)		**الأردن**		**إسرائيل**	
السنة	2022	2010	2025	2010	2020	2010
تحلية المياه المالحة الداخلية (مليون متر مكعب في السنة)	22	0.5	82	57	75[(1)]	25
إعادة استخدام المياه المبتذلة في الزراعة (مليون متر مكعب في السنة)	30.6	-	247	100	570[(1)]	400
الطلب الإجمالي للمياه (مليون متر مكعب في السنة)	712	125[(2)]	1,652	1,315	2,596	1,994
العجز في المياه (مليون متر مكعب في السنة)	>>2	2	470	361	131	129

(1) إحصاءات 2015

(2) إحصاءات 2012

ومع ذلك، فإن المفتاح نحو التنفيذ الناجح لتكنولوجيا تحلية المياه هو الوعي بالعديد من المسائل الأساسية لهذه التكنولوجيا وكيفية ادارتها والتي تشمل أولاً، الحد الأقصى لاستخراج المياه الجوفية المالحة محدود، فتجاوز الحد الأقصى عموماً يؤدي إلى إنخفاض في مستوى المياه الجوفية و/أو زيادة الملوحة؛ ثانياً، تحلية المياه تنتج نفايات

سائلة، أو ما يعرف بالمحلول الملحي، وهو تركيز الماء الخام الملوث بالمواد الكيميائية المستخدمة في العملية مثل مضادات التكلس؛ إن إعادة المحلول الملحي إلى المياه الجوفية يمكنه أن يسبب زيادة مستمرة في الملوحة، فبصرف النظر عن الآثار السلبية على البيئة، هذا سيسبب أيضاً زيادة في تكلفة المعالجة. كذلك فإن رمي المحلول الملحي على الأرض يمكن أن يؤثر تأثيراً شديداً على التربة، وقد يجعلها غير صالحة للإستخدام الزراعي. لهذا السبب فالتخلص من المحلول الملحي جزء حساس في أي عملية من عمليات تحلية المياه المالحة؛ في حال عدم التخلص منه بشكل صحيح، يمكن أن يؤدي المحلول الملحي إلى آثار سلبية دائمة في نهاية المطاف، حيث أن أي إصلاح للبيئة المتضررة بسبب المحلول الملحي عملية صعبة ومكلفة للغاية.

انطلاقاً من هذه الاعتبارات، من الواضح أولاً أنه يجب أن نعلم أن المياه الجوفية المستخرجة في الوادي قيمة جداً، ولذلك ينبغي استخدامها بكفاءة، ممايعني أن الإستخدام الأمثل لنظم تحلية المياه يتم تشغيلها بنسبة إسترداد عالية مع تقليل أي فقدان للمياه عن طريق التبخر. ثانياً، يجب إزالة المحلول الملحي من منطقة النشاط لعدم الإضرار بالبيئة المحلية على المدى البعيد؛ فبوجود البحر الميت في الجنوب يوفر إمكانية فريدة للتخلص من المحلول الملحي و إزالته من منطقة النشاط وبهذا قد يكون من الممكن تطبيق الإدارة المستدامة لتحلية المياه المالحة في الوادي بتكلفة منخفضة نسبياً وبحل بسيط وهو تصريف المحلول الملحي المُنتج من عملية التحلية إلى البحر الميت. سيتم مناقشة الاعتبارات الأخرى للتخلص من المحلول الملحي في الفصول 3.6 و 6.

في الأردن، انخفضت المياه الإجمالية المتاحة للري في الوادي على مدى السنوات الـ 15 الماضية. بالإضافة إلى ذلك، ازدادت الحصة من مياه الصرف الصحي المعالجة والمستخدمة في الري مما أثر سلباً على النوعية الإجمالية للمياه، من ناحية أخرى فلقد ازداد مجموع المساحة الزراعية في المنطقة و كذلك الإنتاجية؛ وهذا يظهر بعض التحديات الرئيسة للاقتصاد الزراعي في وادي الأردن. إن انخفاض توافر المياه يحد من نمو المساحة الزراعية الإجمالية اللازمة لزيادة الانتاج التي هي نفسها تعاني من

تراجع جودة المياه [3-5]. تحلية المياه المالحة تساهم في زيادة كمية مياه الري عالية الجودة، مما يساعد في زيادة الإنتاجية، ويزيد من كمية مياه الري الإجمالية المتاحة. في المقابل، إن ارتفاع تكاليف الري بالمياه المحلاة يقلل من العائد الاقتصادي لزيادة الإنتاجية ويؤثر سلباً على مستويات المياه الجوفية وقد يقلل من جودة المياه الجوفية عموماً التي بالطبع تعتمد إلى حد كبير على المخطط التطبيقي لإدارة النفايات (التخلص من المحلول الملحي).

2.1. جودة المياه

خلال العامين 2011 و 2016 تم جمع عينات مياه من آبار المياه الجوفية المالحة في الوادي كما تم تحليلها في معهد EBI في ألمانيا، وقد ساعدت هذه البيانات على استخراج القضايا الرئيسة والتحديات الهامة في مجال تحلية المياه المالحة في المنطقة؛ الجداول 1 و 2 تعطي لمحة عامة عن العوامل الأساسية لعينات المياه التي تم قياسها في كلا المنطقتين في الأردن وفلسطين.

جدول 2 : ملخص لتحليل عينات المياه في وادي الأردن (الأردن)

عدد العينات= 14		المياه الغير معالجة (الأردن)		
العامل		**الحد الأدنى**	**الحد الأقصى**	**المعدل**
درجة الحموضة (30°C)		6.2	7.0	6.7
التوصيل الكهربائي (25°C) (30 م)	mS/cm	3.83	11.53	6.20
باريوم	mg/L(مغم/لتر)	0.02	0.08	0.05
بورون	mg/L	0.81	2.20	1.30
كالسيوم	mg/L	110	500	293
حديد	mg/L	0.02	0.09	0.06
بوتاسيوم	mg/L	46.3	137.0	77.9
مغنيسيوم	mg/L	80	379	197
منجنيز	mg/L	0.002	0.100	0.02
صوديوم	mg/L	482	1335	744
سيليكا*	mg/L	16.6	36.5	22.9
سترونتيوم	mg/L	1.7	13.5	5.3
فلوريد	mg/L	0.5	2.4	1.2
كلوريد	mg/L	885	3363	1647
نتريت	mg/L	2.6	7.4	5.1
بروميد	mg/L	1.5	47.1	17.9
نترات	mg/L	2.9	93.0	44.9
فوسفات	mg/L	< 0.5		< 0.5
كبريتات	mg/L	263	1200	698
DOC	mg/L	1.1	7.3	2.2

تُظهر معظم العينات تركيزات عالية من الصوديوم والكلوريد، هذه العينات تصنف على أنها عينات مياه جوفية مالحة؛ كما يظهر في (الجدول 2) فإن عينات المياه التي تم تحليلها تراوحت بين ملوحة منخفضة حيث المواد الصلبة الذائبة تزيد قليلاً عن 500 mg/L (العينة ذات مستوى الملوحة الأدنى في فلسطين) وملوحة مرتفعة حيث المواد الصلبة الذائبة تزيد عن 5,000 mg/L (العينة ذات مستوى الملوحة الأعلى في الأردن، والمواد الصلبة الذائبة ~7,000 mg/L). في المجمل إن عينات المياه تعتبر ذات ملوحة متوسطة، كما أن العينات المأخوذة من المناطق الفلسطينية (المواد الصلبة الذائبة ~ 2,100 mg/L) أقل ملوحة من العينات التي تم جمعها من الأردن (متوسط المواد الصلبة الذائبة ~3750 mg/L).

جدول 3 : موجز لتحليل عينات المياه التي تم جمعها في عوجة الحفير و أريحا في الضفة الغربية

عدد العينات= 55		المياه غير المعالجة (الضفة الغربية)		
العامل		الحد الأدنى	الحد الأقصى	المعدل
درجة الحموضة (25°C)		7.5	8.5	8.0
التوصيل الكهربائي (25°C)	mS/cm	0.92	8.08	3.57
باريوم	mg/L	0.03	0.35	0.10
بورون	mg/L	0.30	3.49	0.97
كالسيوم	mg/L	19	568	106
حديد	mg/L	< 0.025	< 0.025	< 0.025
بوتاسيوم	mg/L	9.8	249	64.5
مغنيسيوم	mg/L	46	218	95
صوديوم	mg/L	74	3018	451
سيليكا*	mg/L	6.8	28.5	18.6
سترونتيوم	mg/L	0.3	14.7	3.0
كلوريد	mg/L	114	5650	903
بروميد	mg/L	0.8	64.2	11.1
نترات	mg/L	0.5	86.0	24.4
كبريتات	mg/L	41	1225	205
TOC	mg/L	0	5.7	0.3

* تحسب باستخدام وحدة القياس SI.

من الملاحظ أن مستويات النترات مرتفعة في كثير من العينات، قد يكون سبب ارتفاع النترات في هذه العينات هو تسرب الأسمدة أو المياه العادمة إلى طبقات المياه الجوفية، كما يُلاحظ أيضاً أن قيمة DOC مرتفعة بالرغم من أن هذه العينات مصدرها هو المياه

الجوفية، فهو أقرب إلى المستوى الموجود في المياه السطحية؛ مع ذلك هناك بعض الشكوك حول صحة هذه القيم حيث أن معظم العينات خضعوا للنقل والتخزين. يظهر الجدول أيضاً مستويات منخفضة للحديد وللمنغنيز في العينات في حين يمكنها أن تكون أعلى منها في الواقع حيث أن هذه المعادن تتأكسد بمجرد ملامستها الهواء، ففي معظم الحالات، لم يكن من الممكن منع الاحتكاك بالهواء قبل جمع العينات .

هناك عوامل أخرى مثل العناصر والمركبات التي تؤثر على تصميم نظام الغشاء وتكون الحشف في مرحلة المعالجة الأولية. من أبرز هذه العوامل هو كمية الجسيمات العالقة، والتي يمكن قياسها عن طريق نسبة التكدر (العكورة) أو تحديد مؤشر كثافة الطمي SDI ، وهو مؤشر لتقييم الميل نحو تكون الحشف في مصادر المياه. يمكن لهذه الجسيمات أن تؤثر بشدة على تصميم مرحلة المعالجة الأولية وتشغيلها، فضلاً عن تكون الحشف في أنظمة الغشاء؛ لذلك ينبغي للمعالجة الأولية أن تكفل مستويات تكدر أقل من

مؤشر كثافة الطمي: Silt Density Index SDI (ASTM D4189)

يقاس الـ SDI عن طريق تصفية عينة المياه باستخدام فلتر ذو قطر 0.45 ميكرومتر وذلك في ضغط ثابت يساوي 2.1 بار (30 رطل/إنش مربع). حيث يتم قياس الوقت الذي يستغرقه جمع 500 مل من الماء المفلتر في البداية (t0)ومن ثم يتم قياس الكمية نفسها مرة أخرى بعد 15 دقيقة (t15) . وهكذا يمكن حساب SDI.

$$SDI_{15} = \left(1 - {}^{t_0}/_{t_{15}}\right) . {}^{100}/_{T_{15}}$$

T_{15} هو إجمالي الوقت المنقضي في ثانية والذي يساوي15 دقيقة أي 900 ثانية حيث الأخير هو الاستخدام الأكثر شيوعاً.

هذا المؤشر يعطي نسبة الانخفاض المئوية في معدل التدفق لكل دقيقة إذا حدث انسداد في الفلتر. (حيث يوصى بأن يكون مؤشر SDI <3 لتقليل تكون الحشف.

NTU 1 و SDI أقل من خمسة كحد أدنى في نظم التناضح العكسي (مصنعو الغشاء يوصون بـ SDI أدنى من 3).

ثانياً، احتواء المياه الجوفية المالحة على الغازات، مثل احتوائها على تركيز كبير من كبريتيد الهيدروجين يتعدى الـ 0.1 ملغ/لتر؛ هذا الغاز يمكن أن يؤثر سلبا على أداء منظومة التناضح العكسي(RO) إذا ما حدث تفاعل بين المعادن لتشكيل كبريتيدات معدنية أو تشكل الكبريت عند التعرض للهواء، حيث يمكن لفلتر كارتردج (cartridge filters) حجز كل الكبريتيدات المعدنية، مما يعني أنها ستتراكم في قناة التغذية وفي الأغشية. فإذا حدث وتواجد كبريتيد الهيدروجين في مياه الآبار، فمن الأفضل تشغيل النظام الكامل تحت ظروف لاهوائية، مما لا يسمح للهواء بالدخول إلى النظام مطلقاً، وفيما بعد يمكن لاحقاً تجريد الغاز من جانب المياه النافذة من هذا النظام كخطوة ما بعد المعالجة.

ثالثاً، احتواء مياه الآبار على تركيزات عالية من الحديد والمنغنيز، قد يسبب في تكون الحشف ويجعل الأغشية أكثر عرضة لأضرار الأكسدة عند التعرض للهواء، حيث تتشكل أكاسيد الحديد والمنغنيز الغير قابلة للذوبان؛ يمثل ذلك أيضا الطريقة الأسهل والأكثر شيوعاً لإزالة الحديد والمنغنيز في المعالجة الأولية (أنظر التهوئة 3.2.2) .ومع ذلك، لا يمكن تطبيق هذه الاستراتيجية إذا احتوى الماء على كبريتيد الهيدروجين لأن الكبريتيدات المعدنية لا يمكن احتواؤها عبر الفلترة المتلاحقة بل سيدخل جزء منها في النظام الغشائي.

يبين تحليل المياه أن الإحتمال الأكبر لتكوّن الحشف هو تكلس كبريتات الباريوم وفلوريد الكالسيوم وكربونات الكالسيوم، بينما يكون ذلك بدرجة أقل لكل من كبريتات الكالسيوم وكبريتات السترونشيوم والسليكا. إن استخدام مادة مضادات التكلس أمر أساسي في معالجة هذه المياه، كما أن درجات الحرارة العالية للمياه بالإضافة إلى مستويات مرتفعة

من DOC الحشف البيولوجي تدعم هذه العملية. إن إجراء فحص لعناصر الغشاء القديمة عند استبدالها مفيد لتحديد الأسباب الرئيسية لتكون الحشف في نظامRO

2.2. تحلية المياه الجوفية المالحة في الأردن

في الأردن وفي وادي الأردن الأدنى بالتحديد ، بدأ المزارعون بالفعل في استخدام وحدات تحلية المياه بالتناضح العكسي وذلك منذ حوالي 20 عاما. ومنذ ذلك الحين، تم تأسيس سوق محلية من خلال الشركات الأردنية التي تقوم بتوفير وحدات RO؛ فبدلا من استيراد أنظمة كاملة، تقوم الشركات المحلية باستراد وتصميم قطع الغيار لهذه الأنظمة ومن ثم تقوم بتجميعها وتصنيعها، حيث يتم تشغيل تقنية تحلية المياه باستخدام تكنولوجيا الغشاء من قبل القطاع الخاص و الحكومة معاً للحصول على إمدادات مياه الشرب بدءاً من نطاق صغير وصولاً إلى نطاق أوسع.

الشكل 2 نظامRO لتحلية المياه المالحة لتأمين مياه الشرب في جرش، الأردن،والتي تديرها سلطات المياه الأردنية (أخذت الصورة من قبل أوليفر يونج)

في عام 2016، تم تشغيل حوالي 50 وحدة RO في عدة مزارع في وادي الأردن، فقد تمّت زيارة عشرة مزارع خلال فصل الصيف التي تقوم بتشغّيل وحدات تحلية المياه المالحة حيث المحصول الرئيس في كل من هذه المزارع هو الموز اضافة إلى المحاصيل الأخرى التي تزرع أيضاً؛ يستثنى من هذه المزارع مزرعة واحدة فقط وهي مخصصة لزراعة الأعشاب، وقد تم جمع بيانات متكاملة حول تحليل المياه في ستة من هذه المزارع. تم تحليل عينات هذه المياه في معهد EBI في كارلسروه بألمانيا، بينما تم جمع تحليل البيانات بخصوص الجانب الاقتصادي من قبل قسم الاقتصاد الزراعي وإدارة الأعمال الزراعية في الجامعة الأردنية فيما يتعلق بقدرة الإستيعاب والتدفق والملوحة وذلك لأربعة وستين وحدة في المنطقة (تم جمع هذه البيانات باستخدام المسح).

معظم وحدات RO المثبتة حاليا متشابهة جداً من حيث قدرة الإستيعاب والتصميم، حيث تم تصميم معظم النظم لمعالجة أقل من 50 م³/س وبقدرة إنتاج أقل من 30 م³/س. الجدول 4 يعطي موجزاً للبيانات التي تم جمعها من قبل الجامعة الأردنية.

جدول 4 عوامل النظام الأساسية لوحدات RO في الأردن (اعتبارا من عام 2016)

تحلية المياه في الأردن **عدد 46**		**الحد الأدنى**	-	**الحد الأقصى**	**المعدل**
قدرة الإستيعاب	m^3/h	15	–	100	42
قدرة إستيعاب الإنتاج	m^3/h	10	–	70	27
الإسترداد	%	40	–	78	64
ملوحة التغذية (TDS)	mg/L	1300	–	7000	3150
ملوحة المحلول الملحي (TDS)	mg/L	3000	–	18000	7950
ملوحة المُنتج (TDS)	mg/L	23	–	800	195

كما يظهر في الجدول فإن ملوحة التغذية تتراوح بين المتوسطة و المرتفعة علماً أن غالبية المحطات (80%) قيد التشغيل تشغل بملوحة تغذية أدنى من 4,000 مغم/لتر، حيث يعتبر متوسط الاسترداد 64% منخفض لتحلية المياه المالحة. ووفقا للاستطلاع المسحي فإن نصف المحطات تعمل بنسبة استرداد أقل من أو تساوي 60%؛ فالاسترداد المنخفض يؤكد أن معظم المحطات هي ذات مرحلة واحدة كما تبين خلال الزيارة لهذه المحطات. نظام المرحلة الواحدة البسيط يحتوي على متطلبات التصميم الهندسي الأدنى وهكذا قد يكون ذا تكلفة أقل من حيث رأس المال الأولي، الذي قد يكون السبب الرئيسي في احتلال حصة كبيرة من السوق، فمحطات الاسترداد الأعلى معظمها بالتأكيد تعمل على أساس نظام المرحلتين، حيث يذكر أن ثلاثة عشر محطة تعمل باسترداد > 70% والتي تمثل 25 بالمائة من المحطات في الدراسة الاستقصائية.

الشكل 3 وحدة RO نموذج في مزرعة في الأردن (الصورة: أوليفر يونج)

عموما، يمكن توقع حدوث استرداد من 70% إلى 85% في تحلية المياه المالحة مع الأخذ بعين الإعتبار عملية التكلس كعامل المحدودية. الشركات المصنعة لمضادات التكلس يمكن أن توفر للعملاء تقديراً للحد الأقصى للاسترداد بعد إجراء تحليل كامل للمياه، الملحق 8.2 يبين مثال لنظام المرحلتين باسترداد يبلغ 75% وبإنتاج 30 م³/ساعة وملوحة تغذية حوالي 4,000 مغم/لتر وذلك باستخدام بيانات تغذية المياه في إحدى المزارع، إن ارتفاع درجة حرارة المياه يقلل أيضا من الحد الأقصى للاسترداد في نظام معين.

يبين الجدول 5 القيم المتوسطة للمزارع الستة التي تتوفر فيها مجموعة بيانات كاملة لتحليل المياه، حيث تظهر البيانات ملوحة عالية جدا (التوصيلية) للمنتج مما يدل على ضعف الأداء وفشل الغشاء؛ وبالفعل فقد تبين أن أحد النظم المأخوذ منه عينات أصبح تالف بشكل كبير وبذلك لم ينجح في تقليل الملوحة إلى المستويات المقبولة، وعلى حد سواء فقد كان أداء نظام آخر ضعيف جداً حيث بلغت توصيلية المُنتج من 1 mS/cm (TDS ~ 600 ملغم / لتر) في حين أن النظم الأربعة الأخرى كانت ذات أداء مقبول حيث بلغت توصيلية المُنتج حوالي 0.5 mS/cm (TDS ~ 300 ملغم / لتر).

جدول5 : تحليل المياه لكل من التغذية و المُنتج والمحلول الملحي في ست وحدات RO في مزارع في الأردن

العدد = ستة		التغذية	المُنتج	المحلول الملحي
العامل		(معدل)	(معدل)	(معدل)
درجة الحموضة (30°C)		6.8	6.1	7.1
التوصيل الكهربائي (25°C)	mS/cm	7.14	1.49	13.75
باريوم	mg/L	0.05	0.02	0.09
بورون	mg/L	1.37	1.06	1.65
كالسيوم	mg/L	292	47	562
حديد	mg/L	0.02	< 0.01	0.01
بوتاسيوم	mg/L	85	19	169
مغنيسيوم	mg/L	230	39.4	485
منجنيز	mg/L	0.007	0.003	0.008
صوديوم	mg/L	848	199	1631
سيليكا*	mg/L	24.8	4.3	61.9
سترونتيوم	mg/L	5.7	1.0	12.8
فلوريد	mg/L	1	0.3	2.4
كلوريد	mg/L	1960	439	3995
نتريت	mg/L	5.9	1.5	8.3
بروميد	mg/L	24.6	5.1	45.1
نترات	mg/L	55	16	281
فوسفات	mg/L	< 0.5	< 0.5	1
كبريتات	mg/L	731	131	1347
DOC	mg/L	2.7	-	5.9

* تحسب باستخدام وحدة القياس SI

الشكل4: المياه المُنتجة في بركة التخزين والخلط في مزرعة خاصة في الأردن (الصورة: أوليفر يونج)

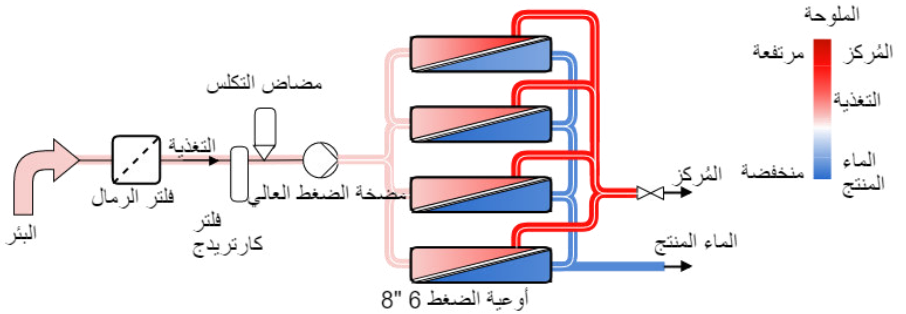
في العادة يتم خلط الماء المُنتج مع الماء الخام في بركة مفتوحة والتي بدورها يجب أن تقع على مقربة من المحطة، ثم يتم استخدام هذه المياه لأغراض الري؛ في حين أن بعض المزارعين يقومون أيضا بتخزين الفائض في خزانات لغرض البيع أو التوزيع، في هذه الحالة يتم نقل المياه بشاحنة كما يتم التخلص من المحلول الملحي بالقرب من المحطة إما على الأرض أو في قناة أو بركة صغيرة مجاورة.

الشكل 5 تصريف المحلول الملحي في بركة صغيرة (إلى اليسار) وعلى الأرض (إلى اليمين) بجوار وحدة RO في الأردن.

يظهر العدد الكبير من المزارعين الذين يطبقون تحلية المياه المالحة في الأردن الجدوى الاقتصادية الرئيسية لتطبيق نظم RO لتحلية المياه المالحة في وادي الأردن؛ الممارسات الحالية تظهر أن المزارعين يعتمدون على أنظمة بسيطة منخفضة التعقيد عموما، والتي يستطيعون تشغيلها بنجاح على الرغم من ذلك يتم قبول الأداء المنخفض في بعض الحالات. يشكل التخلص من المياه المالحة مشكلة، كما يبدو أنه لا يوجد هناك أي إمكانية لتصريف مسؤول في المكان. إن تخزين المُنتج في الأحواض المفتوحة الضحلة ليست حلاً مثاليا حيث أن الحوض معرض للتلوث الناجم عن البيئة المحيطة كما أن المُنتج قد يتعرض للفقدان بسبب التبخر أو التسرب (الخسائر عبر التبخر يمكن أن تكون مساوية لإنتاج يوم كامل للعملية).

3. تحلية المياه المالحة

يظهر العدد الكبير من المزارعين الذين يطبقون تحلية المياه المالحة في الأردن الجدوى الاقتصادية الرئيسية لتطبيق نظم RO لتحلية المياه المالحة في وادي الأردن؛ الممارسات الحالية تظهر أن المزارعين يعتمدون على أنظمة بسيطة منخفضة التعقيد عموما، والتي يستطيعون تشغيلها بنجاح على الرغم من ذلك يتم قبول الأداء المنخفض في بعض الحالات. يشكل التخلص من المياه المالحة مشكلة، كما يبدو أنه لا يوجد هناك أي إمكانية لتصريف مسؤول في المكان. إن تخزين المُنتج في الأحواض المفتوحة الضحلة ليست حلاً مثاليا حيث أن الحوض معرض للتلوث الناجم عن البيئة المحيطة كما أن المُنتج قد يتعرض للفقدان بسبب التبخر أو التسرب (الخسائر عبر التبخر يمكن أن تكون مساوية لإنتاج يوم كامل للعملية).



الشكل 6: المخطط العام لوحدة RO نموذجية في مزرعة في الأردن

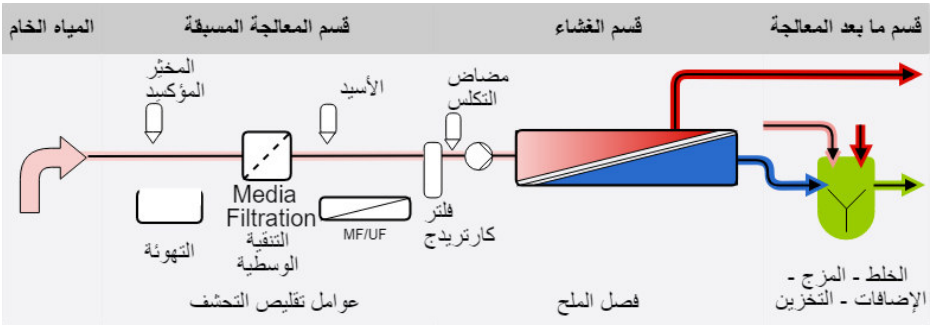
تتألف محطة المعالجة بتقنية الغشاء من ثلاثة أقسام وهي كالآتي: قسم المعالجة المسبقة (1)، وقسم الغشاء (المعالجة) (2)، وقسم ما بعد المعالجة(3) (أنظر الشكل 7).

(1) قسم المعالجة المسبقة والذي يتلقى المياه الخام ويحولها إلى نوعية مياه مناسبة لقسم الغشاء، في هذا القسم يتم إزالة المواد الصلبة العالقة وضبط الرقم الهيدروجيني PH،

وإزالة أي من المواد الكيميائية التي يمكن أن تلحق الضرر بالأغشية (مثل الكلور) بالإضافة إلى الأكسدة والتطهير.

(2) قسم الغشاء حيث يحتوي هذا القسم على أغشية RO/NF . إنه الجزء ذو الضغط العالي في النظام، حيث تتمثل مهمته الرئيسية في إزالة الأملاح والمواد العضوية المتبقية؛ ففي هذا الجزء تنتج النفايات المُركزة التي تعرف بالمحلول الملحي الذي يجب التخلص منه.

(3) قسم ما بعد المعالجة: في هذا الجزء يتم مزج الماء المُنتج من العملية إما بإضافة المواد الكيميائية (مثل الأسمدة) و/أو بخلطه مع الماء الخام من مصادر المياه الأخرى.



الشكل 7 تصميم لمحطة معالجة بنظام RO/NF

3.1. التصميم والاعتبارات التشغيلية - مشكلة التحشف والاستراتيجيات الأساسية

إن عملية الترشيح باستخدام الغشاء وعلى فترة طويلة من الزمن لابد لها أن تأدي في نهاية المطاف لفقدان كمية كبرى من الماء المُنتج و/أو زيادة في كمية استهلاك الطاقة، نتيجة لزيادة ضغط التغذية. إن تكون الحشف قد يؤدي إلى انخفاض في الكفاءة، لذلك

فإن التخفيف من تكون الحشف هو أهم جانب من جوانب تصميم محطة معالجة باستخدام الغشاء[8] ، فالهدف الرئيس من تصميم هذا النظام هو الحفاظ على مدى تشغيلي باستخدام أقصى زمن ممكن من فترة حياة الغشاء أي الحفاظ على معدل استرداد مستقر ومقاومة ثابتة للغشاء بالإضافة إلى ضغط وتغذية ثابتين مع التقليل من التكاليف التشغيلية، ولإدارك الأهداف المرجوة يجب مواجهة ظاهرة تكون الحشف بشكل مناسب.

هناك ثلاثة أسباب رئيسية لتكون الحشف في معالجة المياه المالحة، وذلك هي كالتالي: التكلس وتكون الحشف البيولوجي بالإضافة إلى وجود الجسيمات، حيث أن كل من هذه الملوثات تتكتل في الجانب المقابل للتغذية من الغشاء مما يؤثر سلباً على أداء الغشاء.

يمكن لهذه الجسيميات أن تسد الأغشية و تتلفها، لذلك ينبغي دائماً إزالة هذه الجسيمات تماما قبل تشغيل وحدة الـ RO أو NF ، حيث يمكن أن يتم ذلك بسهولة من خلال التصفية عبر الرمال أو باستخدام فلتر كارتردج.

يعتبر تكون الحشف البيولوجي مشكلة ثانوية فيما يتعلق بالمياه الجوفية، بينما قد يشكل مشكلة كبيرة فيما يخص المياه السطحية لأنها تحتوي على كثافة عالية من الكربون العضوي؛ كما أن عملية التنظيف والتخلص من الحشف البيولوجي لا يمكنها الحدوث دون الاستخدام المكثف للمواد الكيميائية. إن تقليل تركيز البكتيريا وتخفيض TOC و DOC ، على سبيل المثال استخدام تقنية التخثر-التلبد، يمكن أن يساهم في تقليل إمكانية تكون الحشف البيولوجي في مياه التغذية؛ فنسبة تكون الحشف في مستويات DOC المنخفضة (0.5 ملغم/لتر) قليلة، على العكس من ذلك فإن تكون الحشف البيولوجي مرجح في المستويات الأعلى من 2 ملغم/لتر، كما أن درجة حرارة المياه المرتفعة تلعب دورا هاما في تكون الحشف.

ينتج التكلس عن ترسب المعادن الموجودة في المياه على سطح الغشاء، نتيجة للتركيز العالي للأملاح في مياه التغذية حيث أن هذا الأمر لابد أن يحدث في عملية تحلية المياه المالحة حيث أن نسبة الاسترداد القصوى في معالجة المياه المالحة تتراوح عادة من

70% إلى 90%؛ فبإضافة مضاد التكلس إلى مياه التغذية يمكن الاحتفاظ بالملح في المحلول لمدة أطول، ما يعني أنه يمكن زيادة تركيز الأيونات قبل ترسب الملح، مما يقلل من تكون الكلس وفي نفس الوقت ويسمح باسترداد أعلى.

المعالجة المسبقة ضرورية عموما للتقليل من تكون الحشف، فالتصميم الجيد يمكن أن يقلل من تكون الحشف على الغشاء. بشكل عام إن التصميم الناجح للنظام يستند على إجراء تحليل لمياه التغذية وذلك لتقييم مخاطر حدوث كل نوع من أنواع الحشف، ومن ثم تصميم سلسلة من خطوات المعالجة المسبقة للتقليل من تكون الحشف وبهذا يتم تصميم نظام معالجة المياه باستخدام الغشاء فيما بعد، إن نتائج المعالجة المسبقة غير الناجحة تزيد من التكاليف التشغيلية وتقصر من فترة حياة الغشاء، كما أنها تقلل من فترة الاسترداد وتساهم في تراجع كفاءة النظام. الفصل التالي يتناول طرق المعالجة المسبقة الأكثر شيوعاً في تحلية المياه.

3.2. المعالجة المسبقة

تلعب المعالجة المسبقة دوراً هاماً في معالجة المياه المالحة حيث تؤثر بشكل كبير على كفاءة وتشغيل وصيانة محطات تحلية المياه، لذلك فإن التصميم السيئ لمحطة المعالجة الأولية قد يزيد من مشاكل تكون الحشف؛ هذا يساهم في الحاجة إلى تنظيف الغشاء باستمرار أو استبداله بشكل متكرر لذلك فإن تصميم المعالجة الأولية يعتمد إلى حد كبير على مصدر المياه وتركيبها لذلك يجب إجراء تحليل كامل للمياه ، حيث يجب عدم تجاهل هذه الخطوة لأنها قد تؤثر على خطوات ما بعد المعالجة[13-7] .

المعالجة المسبقة المثالية هي دائماً حلٌ وسطٌ بين الاعتبارات الاقتصادية واعتبارات تكون الحشف، لذلك فإن المعالجة المسبقة يجب أن تصمم لكل نظام جديد على حدى. الفصول التالية توضح نظم المعالجة المختلفة مع شرح موجز لوظيفة ومجال تطبيق كل منها.

إن مصدر المياه الجوفية المالحة في وادي الأردن الأدنى هو الآبار، حيث تعتبر هذه المياه ذات درجات ملوحة متوسطة إلى مرتفعة ودرجات مواد عضوية متوسطة إلى مرتفعة. عموما، هذه المياه يمكنها أن تكون مصدر تغذية ثابت لمحطات معالجة المياه المالحة، فهي بحاجة لمعالجة مسبقة بسيطة كإزالة الجسيمات العالقة وضبط القيمة الحامضية PH وإضافة بعض من جرعات مضادات تكون الحشف. ومع ذلك، يُظهر تحليل المياه الجوفية المالحة في وادي الأردن أنها تتأثر بالمياه السطحية و/أو مياه الصرف الصحي، مما يؤدي إلى التغيرات الموسمية وارتفاع نسبة المواد الكيميائية والعضوية وبالإضافة إلى ذلك، فإن هذه المياه الجوفية في حالة اختزال (أكسدة منخفضة) في غالب الأحيان، فقد تحتوي على مستويات ضارة من الحديد والمنغنيز المذاب، الذي يتعين أن يخضع للأكسدة لإزالته. خطوات المعالجة المسبقة الإضافية قد تكون مناسبة، مثل الأكسدة/التهوية والتخثر-التلبد.

هناك اعتبارات أخرى يمكن لها أن تؤثر على مدى المعالجة المطلوبة لأي نظام؛ من بينها وجود قسم معالجة مسبق متكامل ،الذي يمكنه أن يقلل من إمكانيات تكون الحشف في مياه التغذية إلى الحد الأدنى، مثل استخدام الأكسدة و الترشيح العميق والتخثر-التلبد والترشيح الفائق (ultrafiltration)، مع العلم أن الأخير ذو تكلفة استثمار مرتفعة وأكثر صعوبة في التشغيل. بالمقابل يمكن أن يعمل نظام الغشاء بتدفق تغذية مرتفع دون الحاجة تقريبا للتنظيف، هذا يساهم في رفع أمد حياة الغشاء و يقلل من تراكم المواد على الغشاء.

3.2.1. الترشيح العميق

الترشيح العميق لإزالة الجسيمات العالقة والغروية هي إحدى تقنيات المعالجة المسبقة الشائعة، حيث تتم إزالة الجسيمات العالقة بتصفية مياه التغذية عبر طبقة من الحبيبات (مثل رمل السليكا، فحم الانثراسايت)؛ في هذه العملية يتم امتصاص الجسيمات التي تتسرب خلال الحبيبات الرملية. هناك نوعان من الترشيح، وهما ترشيح عن طريق الجاذبية وترشيح عن طريق الضغط، هذان النوعان من الترشيح يختلفان في حجم ومعدل الترشيح وضغط التشغيل. يمكن إعادة تأهيل الفلاتر عن طريق تنظيفها حيث تزال المواد العالقة والمترسبة ، ويتم هذا بصورة دورية عندما يصل الضغط إلى حد معين على سبيل المثال(0.3 - 0.6 بار). يبلغ حجم حبيبات الرمل الفعالة للتصفية (0.35 إلى 0.5 مم)، كما تبلغ سرعة الترشيح النموذجية للفلتر الرملي سريع التصفية ما بين 3 و 20 مترا/ساعة.

الشكل 8 : فلتر رملي في محطة معالجة RO في مزرعة في الأردن (الصورة: يونغ، أوليفر)

يمكن تقييم فعالية الفلتر العميق عن طريق تحديد نسبة العكورة ومؤشر كثافة الطمي SDI وقبل وبعد التصفية (SDIالعامل الأكثر أهمية)، حيث أن الترشيح العميق دون عملية التخثر-التلبد ينبغي أن يكون قادراً على خفض SDI إلى أقل من 5 وكذلك خفض نسبة العكورة إلى أقل من NTU 0.1.

3.2.2. الأكسدة (التهوية)

الكثير من المياه الجوفية المالحة في حالة اختزال، مما يعني أن ليس جميع العناصر قد تأكسدت بالكامل، هذه المياه تسمى أيضا المياه الأنوكسية أي التي لا تحتوي على الأكسجين؛ فعندما يتم ضخ هذه المياه إلى السطح، تتأكسد بعض المكونات الموجودة فيها مما يمكن أن يؤدي إلى تكون الحشف بشكل كبير داخل نظام الغشاء. من بين هذه المواد الحديد والمنغنيز ثنائي التكافؤ، هذان العنصران يشكلان أملاح غير قابلة للذوبان في حالة الأكسد مما يؤدي إلى ترسب هذه الاملاح في النظام.

أبسط طريقة للتعامل مع المياه الأنوكسية هي تمريرها من خلال وحدة تهوئة قبل خطوة الترشيح العميق. يتم استخدام الهواء لأكسدة المواد ومن ثم يتم ازالة الترسبات عن طريق التصفية المتلاحقة. يمكن أن تكون وحدة التهوئة خزاناً مفتوحاً حيث يخزن المياه لمدة تكفي لضمان عملية أكسدة كاملة؛ كما يمكن زيادة الفاعلية من خلال زيادة مساحة الاتصال بين الماء والهواء، و هذا يتم بادخال فقاعات الهواء خلال الخزان من الأسفل أو عبر تمرير الماء على لوحة الخلط، كذلك يمكن أيضا إضافة العوامل المؤكسدة مثل الكلور أو الأوزون.

3.2.3. التخثر والترويق

التخثر والترويق هي عملية راسخة في معالجة مياه الشرب بشكل عام، هذه العملية فعالة جداً في إزالة المواد العالقة ، بما في ذلك الكربون العضوي، كما أنها تساهم في زيادة فعالية خطوة الترشيح اللاحقة، من أبرز المواد التي يتم ترويقها كلوريد الحديد وكبريتات الحديد وهيدروكسيد الألومنيوم ومع ذلك، فإن الألومنيوم المتبقي يمكن أن يسبب في تكوين حشف في قسم الغشاء ولذلك لا ينصح بترويق الألومنيوم.

المواد المخثرة هي مواد ذات ذوبانية منخفضة جداً وتترسب فوراً ولكنها تزعزع أيضا استقرار الشحنة السطحية السالبة في الجسيمات والمواد الغروية الموجودة في معظم المياه الخام؛ حيث أن هذه المواد العالقة والغروية تشكل تكتلات يمكن بسهولة إزالتها عن طريق الترسيب أو الترشيح المتلاحق. النشر السريع وخلط المخثرات أمر مهم في هذه العملية، لذلك يتم اضافة هذه المواد وخلطها بسرعة باستخدام خلاط ثابت السرعة أو يمكن اضافتها أمام المضخة مباشرةً. كمية المواد المخثرة المضافة مهم أيضا، ويجب تحديد هذه الكميات بشكل صحيح وكل على حدى؛ لهذا الغرض يتم اجراء اختبارات والتي تعرف بـ (jar tests) والتي يمكن أن تجرى في الموقع؛ حيث أن الجرعات الغير صحيحة قد تؤدي إلى إزالة غير كافية أو انسداد في مسامات المرشحات والأغشية. كما أن الزيادة في كمية المخثرات يمكن أن تتفاعل أيضاً مع المواد المضادة للتكلس (antiscalants)، والتي من الممكن أن تترسب على الأغشية مما قد يؤدي إلى تكون حشف ثقيل يصعب تنظيفه.

بعض البوليمرات يمكن أن تزيد من فعالية عملية التخثر، وغالباً ما يتم اضافة بعض من هذه البوليمرات في هذه العملية. مع ذلك، فمن الممكن لهذه البوليمرات تكوين حشف عضوي كما هو الحال مع مضادات التكلس وهذا الحشف العضوي يمكن استخدامه كمصدر غذاء للكائنات الحية الدقيقة مما يزيد من خطر تكون الحشف البيولوجي.

3.2.4. الترشيح الدقيق (MICROFILTRATION)/ الترشيح الفائق (ULTRAFILTRATION)

الترشيح الدقيق (MF) والترشيح الفائق (UF) هما عمليتين يتم فيهما ازالة جميع الجسيمات العالقة بشكل كامل ، فضلا عن إزالة البكتيريا والطحالب وغيرها من الكائنات الحية الدقيقة الموجودة في مياه التغذية؛ فعندما يتم دمج هاتان العمليتين مع عملية التخثر، يمكن تخفيض الكربون العضوي المذاب والذي عموما لا يمكن احتجازه بواسطة UF/MF.

دمج نظام UF/MF في عملية المعالجة المسبقة يتتطلب رأس مال كبير نسبيا لكن في المقابل يوفر أعلى جودة مياه تغذية لقسم الغشاء. يتطلب أيضاً نظام UF/MF خبرات إضافية من الشخص القائم على تشغيله ، فضلا عن إعداد نظام مراقبة أكثر تطورا، فيما يخص بروتوكول التنظيف الذي يتألف من (backwashing) ودورات التنظيف الكيميائية، لذلك فإنه لا ينصح باستخدام نظام UF/MF في المعالجة المسبقة التي تعمل بالأنظمة غير الآلية. فبسبب جودته العالية، تزداد شعبية نظام الترشيح الفائق لشبكات معالجة المياه قليلة الملوحة.

3.2.5. ترشيح كارتريدج (CARTRIDGE FILTRATION)

فلتر كارتريدج هو غالبا ذو مسام تتراوح من 5 إلى 10 ميكرون. كما أنه يتطلب القليل من الخبرة للتشغيل. في عملية الفلترة باستخدام هذا النوع من الفلتر يتم استبدال الفلاتر (Cartridges) بشكل متكرر كل 3 أشهر تقريباً ، أو إذا حدث انسداد في الفلتر. ومع ذلك، فهذ النوع من الفلاتر مكلف نوعا ما، لذلك الاستخدام الحصري لفلتر كارتريدج للمعالجة المسبقة سيكون غير فعال في معظم الحالات. في هذه الحالة إن استخدام

الترشيح المسبق عبر فلتر الرمل يمكن له أن يزيل جزءاً كبيراً من المواد العالقة بشكل أكثر فاعلية وبتكلفة أقل.

الشكل 9 : أنبوب و فلتر كارتريدج (5 ميكرومتر) في محطة معالجة (RO) في الأردن (صور: أوليفر يونغ)

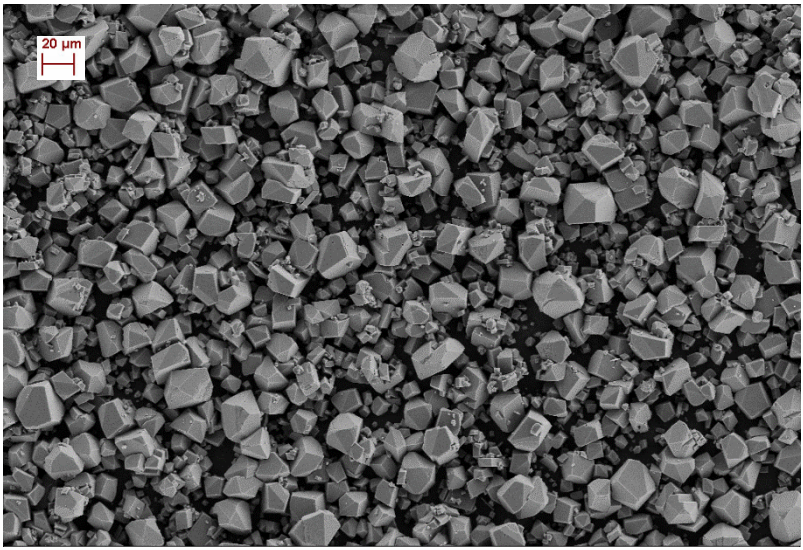
إن وضع فلتر كارتريدج (5 ميكرومتر) في نهاية خط التشغيل قبل مضخة الضغط العالي هو معيار سلامة أساسي لمنع حدوث أي ضرر للمضخة أو الأغشية الناجم عن الجسيمات. على الرغم من أن أغلب هياكل المعالجة المسبقة تحتوي بالفعل على مرحلة ترشيح، إلا أنه يمكن للجسيمات أن تنشأ أيضا بسبب تآكل الهيكل نفسه أو بسبب إضافة المواد الكيميائية لمصدر المياه (مثل: مضادات التكلس (antiscalant)) التي لا تتم إزالتها عن طريق الترشيح المسبق؛ لذلك فإن فلتر الكارتريدج يعمل كحاجز نهائي كجزء لا يتجزأ من قسم الغشاء. وفي هذه الحالة لا يجب أن يختلف مؤشر SDI اختلافاً كبيرا قبل وبعد عملية الفلترة بمعنى أخر لا يجب أن يكون الإختلاف أكثر من درجة واحدة [8] فالفرق العالي يدل على أن هناك بعض المشاكل في عملية المعالجة.

لذلك ينبغي استبدال أنابيب الفلتر مرة واحدة على الأقل كل ثلاثة أشهر وقبل انخفاض الضغط عبر الفلتر إلى الحد الأقصى الذي تم تحديده لمنع تكون الحشف. إن الزيادة السريعة في معدل أو لزوم استبدال الفلتر قبل انقضاء ثلاثة أشهر على التشغيل يشير إلى وجود خلل في قسم المعالجة المسبقة، حيث أن الانخفاض السريع في الضغط يزيد من خطر تكون طفرة الجسيمات وبالتالي فشل سابق لأوانه لنظام الغشاء.

الشكل 10 : الحشف البيولوجي في انبوبة فلتر لكارتريدج (الصور: فلورنسيا سارافيا)

3.3. ملاحظات حول تكون القشور/التكلس

تكون القشور هو عبارة عن ترسب لأملاح على سطح الغشاء، مما يؤدي إلى الحد من التدفق أو زيادة في ضغط التغذية، ظاهرة الترسب هذه تحكمها كيمياء مياه التغذية وعامل الاسترداد في المنظومة، على سبيل المثال، إذا كان عامل الاسترداد 50%، فإن تركيز الأملاح في المحلول الملحي المُنتج هو ضعف تركيز الأملاح في التغذية، وفي حالة تجاوز حد الذوبان لدى بعض الأملاح القابلة للذوبان بعد مضاعفة التركيز، يحدث هبوط في الأملاح (التكلس)؛ هناك أيضاً ظاهرة أخرى تؤدي إلى ارتفاع التركيز في مياه التغذية وهي استقطاب التركيز (concentration polarization). الاستقطاب يحدث قرب سطح الغشاء بسبب رفض الغشاء للأيونات خلال انتقال المياه عبر الغشاء ،هذا يعني أن تركيز الملح على سطح الغشاء أعلى من تركيز المحلول الملحي مما يؤدي إلى ترسب الأملاح التي بدورها تتراكم في الغالب عند نهاية خط التغذية ، كما أنه كلما زادت نسبة الإسترجاع في المحطة، كلما ازداد خطر الترسب.



الشكل 11 صورة عبر المجهر الإلكتروني (SEM) للترسب الحاصل على غشاء RO لمعالجة المياه المالحة. (أخذت في KIT)

الأملاح القابلة للذوبان الأكثر شيوعاً الموجودة في المياه الجوفية المالحة هي كربونات الكالسيوم وسلفات الكالسيوم والسليكا. كما أن هناك أيضا بعض الأملاح الأخرى الجديرة بالذكر وهي فلوريد الكالسيوم وسلفات الباريوم، وكبريتات السترونتيوم وفوسفات الكالسيوم التي يمكن لها أن تساهم في حدوث التكلس، إلى جانب أملاح الحديد والمنجنيز التي قد تؤدي أيضاً إلى زيادة كبيرة في التكلس إذا لم تخضع لعملية الأكسدة أو يتم ازالتها قبل عملية الترشيح.

ويمكن التحكم بهذه الأملاح كاكربونات والكبريتات وفلوريد الكالسيوم عن طريق إضافة مضادات التكلس ، هذه المضادات تعمل على منع تكلس هذه الأملاح . كما يمكن أيضا التحكم في تكلس الكربونات عن طريق اضافة حمض لضبط درجة الحموضة وعادة ما يتم التعبير عن خطر تكون طبقة الكربونات بـ LSI. يتم منع تكلس الحديد والمنغنيز بشكل أفضل عن طريق الأكسدة والترشيح في المعالجة المسبقة. إن تكلس فوسفات الكالسيوم غير شائع إلى حد ما في مصادر المياه الطبيعية، ومع ذلك، إذا كان مصدر المياه الخام عرضة لتسلل المياه العادمة أو الأسمدة قد يؤدي ذلك إلى حدوث تكلس لهذه الأملاح . وإذا لم يكن من الممكن التحكم في التكلس، ينبغي تخفيض استرداد المنظومة أو استخدام مصدر آخر من مصادر المياه الخام.

مضادات التكلس الشائعة هي هيكزاميتافوسفات الصوديوم (sodium hexametaphosphate) [SHMP]،اورجانوفوسفونات (organophosphonates) وبوليكريلايتس (polyacrylates) ، حيث تعتبر الأخيرة الأعلى سعرا في المقابل فهي الأكثر فعالية . هيكزامتافوسفات الصوديوم غير محبذة بشكل عام إذ أنها قد تسبب التحلل المائي في خزانات التغذية. التحلل المائي يؤدي إلى تراجع فاعلية SHMP و يشكل خطر تكلس فوسفات الكالسيوم ؛ إن التكوين الدقيق لمزيج

LSI – Langelier Saturation Index(مؤشر التشبّع لانجيلير)

يقيم قابلية تكون طبقة من كربونات الكالسيوم

$$LSI = pH - pH_s$$

pH – الحموضة الفعلية

pH_s – درجة الحموضة اذا كان المحلول مشبع بكربونات الكالسيوم. انه الجمع بين كاربونات الكالسيوم، القلوية والاحتساب الثابت للـ TDS ودرجة الحرارة

LSI إيجابي يعني أن كاربونات الكالسيوم تترسب. اضافة مضادات الترسبات قادر على التحكم حتى درجة 3 من الـ LSI

LSI سلبي يعني أن الماء قادر على تحليل كاربونات الكالسيوم

مضادات التكلسات معروف فقط لدى المصنّع.

إن خطر تكون الطبقات يمكن حسابه من خلال تحليل المياه الخام و/أو تحليل المياه بعد العلاج المسبق، هذه الحسابات يجب أن تتم من قبل المصدّر لمضادات التكلس التي يجب أن يجري تغييرها حسب توصيات المصنعين. مضادات التكلس المختلفة في مصدر التصنيع يجب أن لا يتم خلطها لتجنب التفاعلات المشتركة بينها والتي قد تؤدي إلى تكون الحشف اللاعكسي. كذلك يتم تزويد برامج رقمية لحساب الجرعات المطلوبة لمياه التغذية من قبل بعض من صناع مضادات التكلس؛ هذه البرامج يمكن استخدامها أيضاً لحساب استرداد المنظومة الأقصى، لأن تغيير نسبة مضادات الترسبات يعتمد بشكل عام على نسبة تركيز هذه المضادات في المحلول الملحي، فالكمية الإجمالية لمضادات الترسبات الضرورية تنخفض مع ارتفاع الاسترداد، حيث أن هذا الارتفاع يقترن بانخفاض انتاج المحلول الملحي. حتى مع التقليل من المضادات المضافة للتغذية، فإن نسبة التركيز في المحلول الملحي ستكون أعلى في هذه الحالة بنسبة استرداد أقل (المحلول الملحي مركز أكثر في حالة الاسترداد الأعلى، لذا تركيز أكبر لمضادات الترسبات مطلوب)، هذا يعني أن محطات المعالجة ذات الاسترداد الأعلى تتطلب مضادات تكلس أقل من المحطات المساوية في الحجم لكن مع استردادات اقل. مثال على ذلك معطى في الملحق 8.3 [16-13]

3.4. ملاحظات حول التحشف الحيوي/البيولوجي

تنتشر العديد من الكائنات المجهرية في المياه الطبيعية حيث يتم اعتبارهذه الكائنات كمواد عالقة والتي يمكن ازالتها عن طريق الترشيح الدقيق نتيجة لحجمها الصغير (الذي يبلغ حوالي 1 ميكرون)، لذلك فإن الترشيح الدقيق هو الأكثر فعالية لإزالة الكائنات المجهرية بشكل كامل. ومع ذلك، فإن القدرة الملوثة الأكبر للكائن المجهري لا تكمن في حجمه وانما في قدرته على انتاج و تكوين الاغشية البيولجية؛ فالنظام الغشائي

يفرض شروطا مناسبة للكائنات المجهرية لأسباب متنوعة: العناصر الغذائية مؤمنة بشكل مستمر خلال عملية التشغيل عبر مياه التغذية، تؤمن مساحات واسعة للأغشية البيولوجية لتنمو و الفواصل تسمح لمزيد من مساحات الترابط و الحماية من الإجهاد السطحي (shear stress). عند أول تكون للاغشية البيولوجية، ينخفض التدفق و يزيد الضغط التفاضلي. إن إزالة هذه الأغشية صعب حيث انها تنشأ بفعل الكائنات المجهرية فهي قادرة على مقاومة المواد الكيميائية التي تستطيع ابادة هذه الكائنات الحية؛ حيث أنه في حالة قتل جميع الكائنات المجهرية وعدم ازالتها بشكل كامل يؤدي عادة لإعادة نمو سريع لهذه الكائنات. لذلك يجب أن تكون عملية إزالة الأغشية الحيوية دقيقة جداً. كما أن عمليات التنظيف تكون أكثر فاعلية على الأغشية الحيوية حديثة التكوين منها على الأغشية القديمة ؛ مما يعني أن التعامل مع تحشف الأغشية البيولوجية يكون بشكل أفضل من خلال استخدام الوسائل المانعة للكائنات المجهرية من تكوين الأغشية لأطول فترة ممكنة.

احدى هذه الطرق الفعالة هي الحد من أو ازالة المواد الغذائية، مثل الكربون العضوي الجاهز للتحلل، لذلك فإن عمل المنظومة ذات المعالجة المسبقة قادر على ازالة معظم الكربون العضوي المتحلل؛ مثالاً، نظام الـUF قادر على ازالة الكائنات المجهرية و الفيروسات و لكن ليس جزيئات الكاربون العضوي المتحلل الصغيرة، أي يمكن حصول تكون للاغشية البيولوجية داخل قسم الغشاء في النظام.

الشكل 12: الأغشية الحيوية على مدخل جهاز لولبي (اليسار)،والأغشية الحيوية على غشاء النانو للترشيح (في الوسط)، وغشاء مع بعض الأغشية الحيوية المكشوطة (اليمين). (تصوير: فلورنسيا سارافيا)

طريقة أخرى يمكنها الحد من تكون الأغشية الحيوية هي تعطيل الكائنات المجهرية عن طريق الأكسدة، مثل اضافة الكلور والإشعاع الفوق بنفسجي، ولكن معظم أغشية ترشيح النانو/التناضح العكسي غير قادرة على مقاومة الكلور مما يعني أنه يجب إعادة إزالتها قبل قسم الغشاء في النظام. لقد كانت كلورة مياه التغذية معياراً، إلا أن مشاكل تكون الأغشية الحيوية ما تزال قائمة ، هذا يفسر أنه بالرغم من عملية اضافة الكلور إلا أن المواد الغذائية اللازمة لنمو الكائنات الدقيقة ما زالت متوفرة. يقوم الكلور بتكسير مركبات الكربون العضوي إلى جزيئات صغيرة أكثر قابلية للتحليل من قبل الكائنات الحية من المركبات الأصلية، لكن بالبرغم من توقف النمو الحيوي اثناء عملية اضافة الكلور إلا أنه يكون قادر على اعادة النمو و بوتيرة اسرع في قسم الغشاء؛ كما يمكن لهذه المواد الظهور أيضاً في نظام الغشاء باستخدام مضادات التكلس .

من المستحيل إزالة أو إلغاء نشاط كافة الكائنات الحية الدقيقة في نظام غشاء نموذجي بالكامل. ومع ذلك، القيام بخطوات عادية مثل استبدال فلاتر الكارتريدج أو التنظيف المنتظم لنظام الترشيح ومنع التسرب تعتبر الخطوات الأساسية للتقليل من تكون الحشف الحيوي. نوع وكمية الجرعات لأي من المواد الكيميائية التي يتم اضافتها خلال المعالجة المسبقة ينبغي أن تؤخذ بعين الإعتبار حيث يمكن أن تضر هذه المواد بالغشاء أو يمكن أن تكون بمثابة مواد غذائية للكائنات الحية الدقيقة نفسها، على سبيل المثال وكما ورد سابقاً مضادات الترسبات [17].

3.5. مرحلة ما بعد المعالجة

إن احتواء المياه المحلاة على مواد متآكلة يجعلها بحاجة إلى الاستقرار قبل إدخالها نظام التوزيع، لذلك يتم اضافة مواد كيميائية للماء الذي تم تحليته لمنع حدوث التآكل وجعله أكثر مناسبة مع مصادر المياه الأخرى. إضافة الاسمدة لرفع نسبة المواد الغذائية أو اضافة هيبوكلورايت الصوديوم للتطهير يجعل المياه المُنتجة تتمتع بخصائص مناسبة

للتوزيع ففي حال وجود غاز كبريتيد الهيدروجين في المياه الخام، يتم إزالته من الماء المُنتج كمرحلة من مراحل ما بعد المعالجة.

3.6. إدارة المحلول الملحي

ان ادارة الملح المُنتج من عملية ترشيح النانو/التناضح العكسي هو أحد أهم الأمور البيئية في عملية تحلية المياه المالحة. معياران أساسيان يجب أن يؤخذا بالاعتبار عند تقييم ادارة المحلول الملحي وهما الملوحة و الكمية. كلاهما يعتمدان على الاسترداد، والملوحة تتأثر أيضا بشكل كبير بكيمياء مياه التغذية؛ عادة تتم عملية تحلية المياه المالحة بنسبة استرداد تتراوح ما بين 60% و 85%، وبالتالي فإن ما بين 15 و 40% من النسبة الكلية للمياه المالحة المعالجة تصنف كنفايات مركزة. هذا يعني أن المياه المالحة هي أكثر تركيزاً من مياه التغذية بعامل يتراوح بين 2,5 و 6,7 ؛ فعند الاستردادات الأعلى، يمكن للملوحة أن تصل لمستوى من الملوحة تقارب ملوحة مياه البحر. وبالاضافة إلى الأملاح الموجودة في المياه الخام، فإن المحلول الملحي يحتوي أيضا على المواد الكيميائية المضافة خلال عملية المعالجة، أي مضادات الترسبات، ومواد التنظيف الكيميائية، الخ...

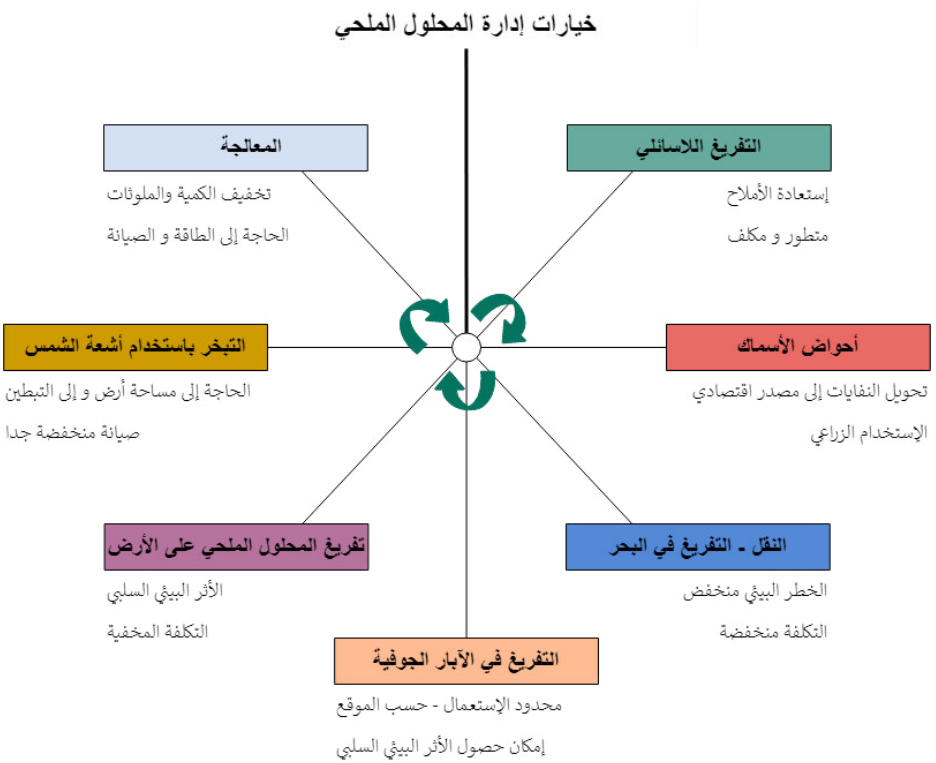
إدارة المحلول الملحي يعتبر ذا عامل عالي الكلفة لتحلية المياه المالحة الداخلية للدول التي تفرض القوانين على تصريف النفايات (مثل الاتحاد الأوروبي) في حال عدم توفر أماكن جاهزة للتفريغ (مثل البحار). هناك العديد من العوامل المهمة في تحديد الاستراتيجيات الافضل في ادارة المحلول الملحي و التي تكون في أغلب الأحيان الأعلى فاعلية من حيث الكلفة، نذكر منها جودة المحلول الملحي، وتركيزه، والاطار التنظيمي والجيولوجي. كما أن هناك أيضا بعض الخيارات التي يمكن أخذها بالاعتبار في عملية إدارة المحلول الملحي، سيتم مناقشتها في الشكل رقم 13 [7,13,18,19]

أسهل طريقة للتخلص من المحلول الملحي بتكاليف مالية منخفضة هي بسكبه على الأرض دون معالجة، ولكنها أقل الطرق المستدامة. العديد من الآثار البيئية السلبية تظهر نتيجة تفريغ المحلول الملحي [20]. تلوث التربة و المياه الجوفية، زيادة ملوحة المياه الجوفية وانخفاض قيمة التربة و انتاجيتها هي نتائج محتملة من تفريغ المحلول الملحي على الأرض لذلك تسمى هذه الأثار بـ"التكاليف المخفية" لما ينجم عنها من تراكم للآثار السلبية. زيادة ملوحة المياه الجوفية يجعل عملية التحلية المستقبلية أكثر تكلفة وانخفاض في معدل انتاجية المحصول. من الممكن تصور ان هذه "التكاليف المخفية" تتراكم لجعل عملية تفريخ المحلول الملحي على الأرض الأعلى كلفة في عملية إدارة للمحلول الملحي. الاثر البيئي الفعلي للتفريغ على الأرض صعب التحديد كما أنه يعتمد بشكل كبير على الكمية، والتركيز و الشروط الجيولوجية.

إن نقل المحلول الملحي من مناطق تحلية المياه إلى مناطق التصريف المناسبة (مثل المناطق الساحلية) يمكن أن يكون حلاً ذا تكلفة بسيطة إن لم تكن المسافة كبيرة جداً كما أنه لا يجب ضخ المحلول الملحي إلى المرتفعات. هكذا يمكن تفريغ المحلول الملحي في البحر أو تخفيفه مع مصادر مياه ملوثة أخرى. في هذه الحالة سيكون الإستثمار الوحيد هو مد خط أنابيب يمنع التسرب مزود بمضخة للتوزيع؛ وهكذا فإن الآثار السلبية تختصر في منطقة أخرى ذات أهمية أقل. هذا يجعل خيار تفريغ المحلول الملحي في مجرى البحر الميت ذا الملوحة العالية في المناطق القريبة من وادي الأردن الأدنى الأكثر فاعلية من حيث التكلفة لمعالجة المحلول الملحي في الأردن و في فلسطين على حد سواء.

التبخر باستخدام أشعة الشمس هو احتمال محصور غالباً في المناطق القاحلة و شبه القاحلة، التي تتطلب انشاء بركة مسطحة للتبخر ذات مساحة كبيرة و سعة تبخر عالية، ومن ثم يتم ازالة الملح المترسب على أنه نفايات صلبة. فبرك التبخير تتطلب مساحات أراض كبيرة و يجب تجهيزها ببطانيات عازلة للمياه لتجنب حصول أي تسرب للمياه

الجوفية و التربة الواقعة تحت البرك. هذه البطانيات تشكل التكلفة الأعلى لعملية التبخير الشمسي بينما تحتاج هذه البرك لصيانة قليلة بعد الانشاء.



الشكل 13 خيارات لمعالجة المحلول الملحي و التفريغ

بئر التفريغ للمياه الجوفية يتمثل بادخال المحلول الملحي إلى المياه الجوفية. في هذه الحالة يجب أن تكون المياه الجوفية المراد الادخال عليها ذات ملوحة مساوية أو أعلى من ملوحة المحلول الملحي؛ كما يجب التأكد ايضاً أن عملية الادخال لا تؤثر على آبار المياه الأخرى، خاصة إذا كانت هذه الآبار تستخدم كمصادر لمياه الشرب.

برك السمك هي مثال على محاولة تحويل النفايات إلى مصدر اقتصادي وذلك بدمج هذه النفايات مع كمية كافية من المحلول الملحي ذا جودة مناسبة و مستقرة من أجل تربية الأسماك لاستخدامها في الصناعات البحرية أو حتى للتربيتها من أجل التصدير.

الهدف العام لمعالجة المحلول الملحي هو التخفيف من الأثر السلبي على البيئة عن طريق تخفيف الكمية أو الحد من التلوث. المعالجة الكهربية(Electrodialysis)، والتناضح أو أغشية التقطير هي أمثلة على التقنيات المستخدمة لهذا الهدف؛ هذه التقنيات تتطلب طاقة و خبراء للتشغيل[23-21].

التفريغ اللاسائلي (Zero Liquid Discharge) يهدف إلى تقليل كمية المحلول الملحي حتى الحد الأدنى و تحويل النفايات الصلبة إلى منتجات يمكن تسويقها فيما بعد ، على سبيل المثال استعادة الأملاح؛ هذه التقنيات المبتكرة يتم دراستها لتحقيق هذا الهدف، معظمها يتم تطبيقها على صعيد المختبر كنماذج واعدة مثل التبخير المدعوم بالرياح و أغشية التقطير إلى جانب البلورة [24].

جدول6 متوسط تحليل المياه لعينات المزارع الستة في الأردن في العام 2006

العدد ستة العامل		المحلول الملحي (معدل)
درجة الحموضة (30°C)		7.1
التوصيل الكهربائي (25°C)	mS/cm	13.75
باريوم	mg/L	0.09
بورون	mg/L	1.65
كالسيوم	mg/L	562
حديد	mg/L	0.01
بوتاسيوم	mg/L	169
مغنيسيوم	mg/L	485
منجنيز	mg/L	0.008
صوديوم	mg/L	1631
سيليكا*	mg/L	61.9
سترونتيوم	mg/L	12.8
فلوريد	mg/L	2.4
كلوريد	mg/L	3995
نتريت	mg/L	8.3
بروميد	mg/L	45.1
نترات	mg/L	281
فوسفات	mg/L	1
كبريتات	mg/L	1347
DOC	mg/L	5.9

4. تصميم النظام

تتألف محطة معالجة المياه قليلة الملوحة بالعادة من ثلاثة أقسام وهي: قسم ما قبل المعالجة، وقسم الغشاء و قسم ما بعد المعالجة (انظر أيضاً الفصل الثالث). يهدف قسم ما قبل المعالجة (الفصل 3.2) إلى تقليل كمية النفايات (الحشف) الموجودة في المياه الخام قبل دخولها إلى قسم الغشاء الذي يقوم بفصل الملح، بينما يهدف قسم ما بعد المعالجة إلى تنقية المياه الناتجة من عملية فصل الملح في قسم الغشاء بغية استعمالها في اغراض الزراعة. هذا الفصل يحتوي على وصف تصميم قسم الغشاء.

يتحوي قسم الغشاء على كل الأجزاء ذات الضغط العالي؛ حيث أن هناك عدد من الأجزاء (الأغشية) مغلفة بأوعية لتحمل الضغط ومنظمة بطريقة معينة تسهل عملية التدفق كما أن تصميم نظام التناضح العكسي/الترشيح الثناوي النموذجي يقلل من ضغط مياه التغذية وتكاليف الغشاء، وفي المقابل يرفع من الجودة، ونسبة الاسترداد، والثبات التطبيقي. النظام النموذجي أيضا يعتمد على التطبيق والمكان وعلى جودة المعالجة المسبقة لذلك يجب أن تأخذ بالحسبان الأهمية النسبية لكل من هذه العوامل، حيث يمكن أن يكون الحل الأفضل حالة خاصة جداً.

جودة المادة تعتمد بشكل أساسي على نوع الغشاء، ومدى مقاومته لنفاذية الملح؛ فالغشاء الأفضل يملك نسبة تدفق عالية في نفس الوقت يمتلك نفاذية أقل لعبور الملح، بالرغم من أن هذا يعني تدفق أقل؛ ولكن هذا يعتمد على نوع الغشاء حيث أن هناك أنواع عديدة ومختلفة للأغشية التي تختلف في مصدر الصنع. هذا يظهر بشكل واضح في أغشية الترشيح الدقيق لأن تغطية نطاق واسع من الوزن الجزيئي المقطوع يمكن أن يملك خصائص رفض (عدم نفاذية الملح) مختلفة جداً؛ أغشية المياه القليلة الملوحة العادية مثلاً تملك 95% إلى 99% رفض لجميع الأيونات، بينما التدفق العادي يكون بين 20 و 40 لتر/ م2/ الساعة اعتمادا على مدى التلوث الحاصل في مياه التغذية.

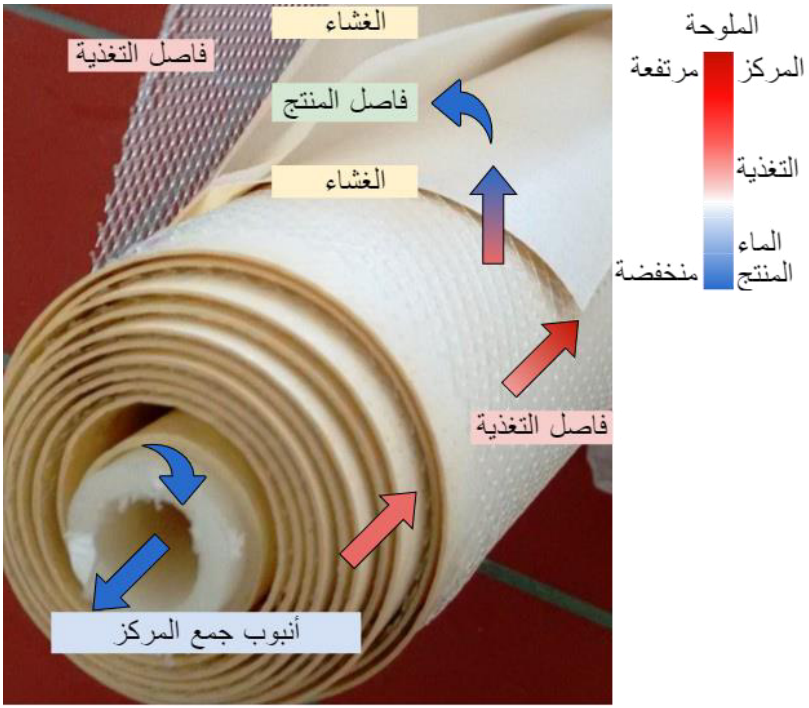
تدفق المياه المرجو وخصائص التدفق عبر الغشاء (النفاذية) تحقق الضغط المطلوب للنظام. ضغط التغذية يزداد مع ازدياد التدفق لكل وحدة من المساحة الفعالة للأغشية، في نفس الوقت، فإن زيادة التدفق بهذه الطريقة أيضا يزيد فرصة تكون الحشف، حيث أن الكثير من المواد يتم حجزها من قبل الغشاء. هذا يظهر جلياً أثناء تحلية المياه القليلة الملوحة حيث أن تكون الحشف يحد عادة من كمية التدفق، على العكس من تحلية مياه البحر حيث التدفق يكون محدود لاعتماده على الضغط المسموح للنظام (عادة حوالي 40 بار). إن التدفق الأمثل لنظام الترشيح الثناوي/التناضح العكسي للمياه قليلة الملوحة هو ليس رقم متوفر حيث يعتمد على القابلية الفردية لتكون الحشف في مياه التغذية، انما يكون التدفق الأمثل من خلال الخبرة مع المواد الموجودة في المياه. لذلك فإن التوصيات الموجودة في المنشورات التقنية المقدمة من قبل مصنعي الغشاء تنم عن خبرة عالية في التعامل مع الأجسام الموجودة في المياه. هذا يسلط الضوء مجدداً على الحاجة إلى تحليل مائي منفصل للمياه الخام قبل تصميم أي نظام. الفصل 8.4 يظهر مثالاً للمعلومات التي يجب جمعها قبل البدء في عملية التصميم كما هو محدد في المنشورات التقنية [8].

4.1. الإعتبارات الخاصة بالغشاء

تعتبر الأغشية صلب محطات (الترشيح الثناوي/التناضح العكسي) المعالجة والوحيدة المسؤولة عن تخفيض المواد الصلبة الذائبة عن طريق رفض الأيونات في المحلول. إذ أن اختيار الأغشية الأفضل للنظام المرجو هو أمر حساس و يعتمد على المعايير التالية: خصائص الرفض (النفاذية)، وجودة مياه التغذية، والتدفق الوسطي للمنظومة والأهمية النسبية للتكاليف. أغشية الترشيح الثناوي/التناضح العكسي هي الأكثر شيوعاً حيث أنها مركب مصنوع من طبقة سطحية من الأميد المتعدد (PA) ودعامة البولي ايثير سولفون (PES). هذه الأغشية غير مقاومة للكلور أو أي من المواد المؤكسدة الأخرى لكنها مقاومة للبكتيريا المتحللة. أغشية الترشيح الثناوي/التناضح العكسي الأكثر شيوعاً هي التي تأتي على شكل حلزوني فهي تسمح لمساحة سطحية أكبر في نفس الوقت تملك مساحة فعلية أقل. إن العناصر بقطر 4 و 8 انش (10.2 و 20.3 سم) و طول 40 انش (101.6 سم) هي النموذجية في محطات التحلية الصغيرة مما يسمح ذلك بوجود مساحة اجمالية فعالة للغشاء بمقدار 8 متر مربع و 40 متر مربع على التوالي.

أغشية التناضح العكسي للمياه قليلة الملوحة تملك نسبة رفض بنسبة 95% لجميع الأيونات، لذا فإن نسبة الأجسام الصلبة المتحللة المتبقية في المياه تكون منخفضة. أغشية التصفية الدقيقة تقلل من نسبة النفايات الصلبة المتحللة وتمنع كذلك الأيونات ثنائية التكافؤ بشكل أفضل من الأيونات أحادية التكافؤ؛ مما يعني أن الأيونات مثل Na^+/Ca^{2+} يمكن لها أن تتغير بشكل ملحوظ، حيث أن نفاذية الغشاء تعتمد على حجم وشحنة الأيون مما يعني أن نفاذية الأيونات الأصغر أعلى منها للأيونات الكبيرة ولكن نفاذية أغشية الترشيح الثانوية(NF) يمكن أن تكون حالة خاصة جداً، لذلك فإن رفض بعض الأيونات يمكن تقليله أو تحسينه في نظام معين اعتمادا على كيمياء مياه التغذية. فالأيون المشحون غير قادر على التنقل عبر الغشاء بمفرده إنما هو بحاجة لأيون ذا شحنة معاكسة وذلك لمعادلة الشحنة الكهربائية في المحلول (ما يعرف بتأثير جيبز دونان)؛ لذلك فإن أغشية

التصفية الدقيقة قادرة على تحقيق تدفق أعلى في ضغط أقل لمياه التغذية ،فهي بحاجة للطاقة أقل من أغشية التناضح العكسي.



الشكل 14 التصميم العام لنظام التناضح العكسي الحلزوني (تصوير هارلد هورن)

جودة مياه التغذية تملك التأثير الأعلى الذي يجب أن يأخذ بعين الاعتبارفي تصميم نظام الغشاء. المعالجة المسبقة تهدف إلى تقليل قابلية تلوث المياه الداخلة إلى قسم الغشاء. قابلية تلوث المياه والتي خضعت مسبقاً للمعالجة قادرة على التأثير بشكل كبير على التدفق في قسم الغشاء و الذي يمكن تقييمه باستخدام الـ SDI. إن تصميم نظام الغشاء يحقق فرضية تقليل نسبة التلوث و منع حدوث ضرر ميكانيكي في الغشاء؛ هذا يحدد اطار العمل لشروط التشغيل المطلوبة، والتي تحدد بعامل الاسترداد الأقصى، ونسبة

التدفق الأقصى، والتدفق الأدنى للمركَز و تدفق التغذية الأقصى للوحدة. مصنعو الأغشية يضعون هذه القيود كعناوين مطلوبة لأنظمة التشغيل مستمدة من خبرتهم المسبقة.

معدل تدفق النظام يوفر عدد العناصر التي هي مطلوبة للتدفق المرجو. المياه ذات الجودة المنخفضة عائدة إلى تصميم منخفض، بينما في حالة المياه ذات الجودة الجيدة يمكن للتصميم أن يصل لنسبة تدفق أعلى. لكن نسب التدفق الأقل يمكن أن تكون أكثر تفضيلا اذا كان التركيز يقع على تقليل تكاليف التشغيل طويلة الأمد بدلا من تقليل تكلفة رأس المال.

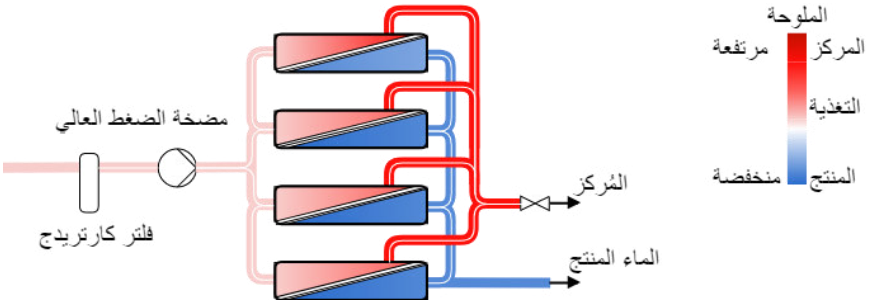
4.2. التصميم التنفيذي

يمكن تشغيل أنظمة التناضح العكسي بطرق مختلفة؛ مثل نظام ذا تغذية مستمرة مع نظام تغذية ذا دفعة واحدة ، ونظام تدفق المكونات مع نظام يسمح باعادة دوران المكونات ، ونظام ذا مرحلة واحدة مع نظام متعدد المراحل. عادة، مياه التغذية تمر دفعة واحدة عبر النظام (تدفق المكونات)، هذا ويتم تشغيل النظام بصورة متواصلة حيث أن شروط التشغيل لكل عنصر كالتدفق والاسترداد تبقى ثابتة مع مرور الوقت. التغيرات في درجة حرارة مياه التغذية و تأثيرات تكون الحشف تعوض عبر تعديل ضغط التغذية؛ يمكن النظر للفصل 5.1 حول العلاقات الأساسية بين الحرارة، والضغط والتدفق. وإعادة دوران الماركز والتصميم متعدد المراحل يهدفان إلى زيادة الاسترداد.

4.2.1. أنظمة المرحلة الأحادية

نظام المرحلة الأحادية هو التصميم الأكثر بساطة في نظام الغشاء، حيث يوجد وحدة أو أكثر مرتبة بشكل متوازي وموصولة مع كل من خط التغذية الأحادي ، وخط المُنتج وخط المُركز. كل من هذه الوحدات لديها نفس ضغط الدخول و الخروج. النموذج

المعياري هو عبارة عن أنبوب ضغط يحتوي على 6 عناصر من الغشاء أو يمكن أن يحتوي على عدد ما بين 2 و 8.



الشكل 15 تصميم نظام المرحلة الأحادية

أنظمة المرحلة الاحادية تعمل باسترداد منخفض يتراوح ما بين 40 إلى 60% لعدم تخطي حدود استرداد العنصر الواحد المؤمن من قبل المصنع؛ هذه الأنظمة شائعة في تحلية مياه البحر حيث محدودية الاسترداد بحوالي 50% بضغط النظام الأعلى. أما بالنسبة لتحلية المياه قليلة الملوحة، فيمكن الوصول إلى استرداد أعلى وهوعادة مطلوب لأسباب الكفاءة واعتبارات الكلفة. استرداد قليل يعني خسارة مياه ذات قيمة عندما تكون مياه التغذية شحيحة. في حال كانت مياه التغذية من بئر عميق، فإن صرف الطاقة لتأمين المياه الخام لمحطة الغشاء هي أيضا كبيرة. المزيد من المياه الخام يجب أن تؤمن للأنظمة ذات الاسترداد المتدني. بالاضافة إلى ذلك، قسم المعالجة المسبقة يجب أن يتم تصميمه أيضاً لكمية تغذية أكبر. تتلخص حسنات الأنظمة الأحادية في بساطتها وتدني احتمالية تكون الحشف حيث أن المحلول الملحي أقل تركيزاً (أي أقل تكلس) مما يزيد من كمية الاسترداد، كما يمكن إعادة دوران داخلية للمركز أو يمكن توسيع النظام لنظام متعدد المراحل.

جدول7 استرداد المنظومة و عدد المراحل في تحلية المياه قليلة الملوحة (ماخوذة من منشور DOW الفني [8])

عدد المراحل (6 أنابيب)	عدد العناصر المتتالية	(%) استرداد المنظومة
1	6	40 – 60
2	12	70 – 80
3	18	85 – 90

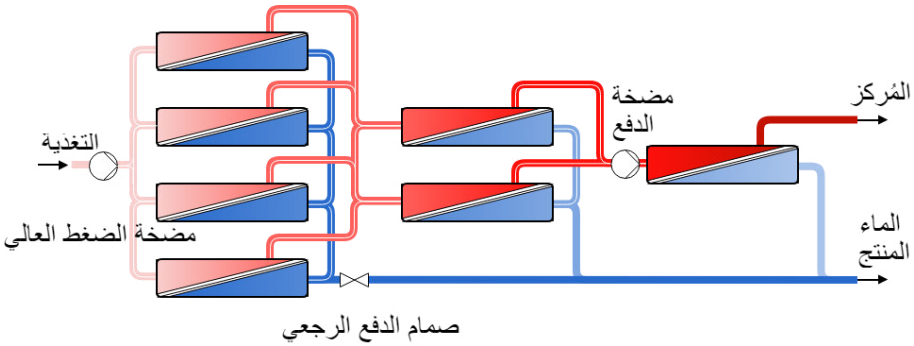
4.2.2. نظام متعدد المراحل

في النظام المتعدد المراحل، عدد العناصر الموصلة بشكل متسلسل تكون أكثر، مثلاً أنبوب الضغط الذي يحتوي على 6 عناصر هو الأكثر شيوعاً. حيث أن نظام المرحلة الأحادية يوصل 6 عناصر بشكل متسلسل في النظام ثنائي المراحل بنفس أنابيب الضغط، بحيث يكون 12 عنصرا موصولة بشكل متسلسل وهكذا دواليك. لذلك يتم استخدام أنابيب ضغط أقصر، مثال أنابيب تتحوي 4 عناصر، ولذلك فإن نظام ثلاثي المراحل يصل أيضا 12 عنصراً بشكل متسلسل.

تمرير التغذية عبر عناصر أكثر موصولة بشكل متسلسل يعني أن الكمية الخارجة هي أقل والمحلول الملحي أكثر تركيزاً، وبذلك يزيد الاسترداد. في تحلية المياه قليلة الملوحة، نظام ثنائي المراحل يمكن أن يزيد الاسترداد الأقصى لنظام أحادي المراحل من 60% إلى 80%. مع نظام ثلاثي المراحل يمكن أن يزيد من 90% و حتى 95%.

الأنظمة متعددة المراحل يتم ترتيبها بشكل هرمي نموذجي حيث كل مرحلة سابقة تحتوي وحدات غشاء أكثر من تلك التي تليها. نسبة عدد الوحدات لمرحلة على المرحلة التالية تسمى النسبة المرحلية. النسبة المرحلية الفضلى هي أن تكون كل مرحلة تعمل بنفس الجزء من استرداد المنظومة. ففي أنظمة المياه قليلة الملوحة حيث استعمال أنابيب العناصر الستة، النسبة المرحلية الفضلى هي 2:1، أي أن المرحلة الأولى تحتوي ضعف

كمية أنابيب الضغط في المرحلة الثانية و التي تملك أقل عناصر، وبذلك النسبة المرحلية الفضلى هي أقل.



الشكل 16 التصميم الأساسي ثلاثي المراحل مع ضغط المحلول الرجعي أو مسرع ضغط التغذية لتوحيد نسب تدفق المحلول

إن هدف تصميم نظام الغشاء هو الوصول إلى التدفق المرجو مع الاسترداد المطلوب أيضاً؛ مع تثبيت هذين المعيارين، يتم تحديد تدفق التغذية. لذلك فإن هناك جانب آخر مهم من تحديد عدد الوحدات لكل مرحلة هو الوصول إلى شروط التدفق الأمثل والتوافق مع قيود التدفق الموضوعة من قبل المصنعين. التصميم الهرمي يوحد تدفق التغذية من خلال تعويض المحلول المزال في كل مرحلة. عدد الوحدات في المرحلة الأولى يجب اختيارها بحيث يمكن الوصول إلى نسبة تدفق التغذية الأفضل. مثلاً لعنصر ذو 8 بوصات للمرحلة الأولى، معدل تدفق التغذية العادي يصل لحوالي 11متر مكعب في الساعة. عدد الوحدات في المرحلة الأخيرة يجب اختيارها بحيث تصل للحدود الأدنى لمعدل تدفق المُركز للعناصر الأخيرة .

جانب آخر من الأنظمة المتعددة المراحل تهتم بمعدل التدفق. عادة معدل التدفق للعناصر الأولى هو أعلى من تلك للعناصر الأخيرة. هذا نتيجة الضغط التناضحي المتزايد للتغذية خلال عبورها في المنظومة حيث تتركز بشكل محلول قليل الملوحة بالإضافة إلى هبوط

الضغط في قناة التغذية. إن معدل التدفق بين أول وآخر العناصر قد يصبح عالٍ جداً لعدد من الأسباب مثال الاسترداد العالي للمنظومة، درجة حرارة عالية للمياه، الأغشية الجديدة. إن هدف التصميم الجيد للمنظومة هو التعادل بين معدل التدفق للعناصر في المواقع المختلفة لتكون فعالة بالنسبة للطاقة. يمكن حصول هذا من خلال زيادة ضغط التغذية بين المراحل أو عبر تطبيق الضغط الرجعي للمرحلة الأولى وذلك لأنظمة المرحلتين. إن تعادل معدل الضغط قد لا يكون أساسياً لجميع الأنظمة المتعددة المراحل.

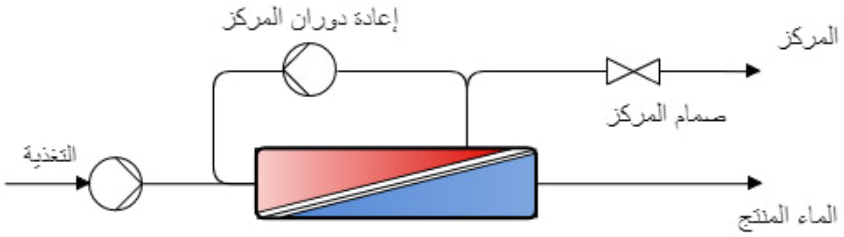
عند العمل مع الضغط الرجعي، من الضروري جداً وجود صمام الأمان، والذي يعمل في حالة توقف مضخات الضغط العالي. الضغط الرجعي الأقصى المسموح هو 300mbar أعلى من ضغط التغذية. فإذا كان ضغط التغذية صفر، يجب أن لا يتعدى الضغط العكسي بمقدار أعلى بـ 300mbars من الضغط الجوي وإلا قد تتعرض الأغشية لضرر دائم.

حسنة نظام المراحل المتعددة تكمن في الاسترداد العالي المصحوب بمرور أقل للملح، مثل التخفيض العالي لمجموع المواد الصلبة الذائبة. أنظمة المراحل المتعددة هي مصممة للاسترداد الثابت وتكوين ثابت لمياه التغذية. تكلفة الإستثمار ومصروف الطاقة منخفضة بغض النظر عن أن عملية التصميم هي أكثر صعوبة من نموذج المرحلة الواحدة. أنظمة المراحل المتعددة هي النماذج الأكثر انتشاراً في معالجة المياه قليلة الملوحة.

4.2.3. اعادة دوران المُركز

إن تصميم المنظومة المعتمد عادة هو نظام تدفق المكونات حيث تمر التغذية في النظام مرة واحدة وتركز لتحصل على المحلول الملحي. مع إعادة في دوران المُركز، حيث أن جزء من المحلول الملحي يتم تحويله من مخرج الوحدة نحو المدخل (قبل مضخات الضغط العالي إذا لم يتم إضافة مضخات إعادة الدوران) حيث تختلط مع التغذية وتعود

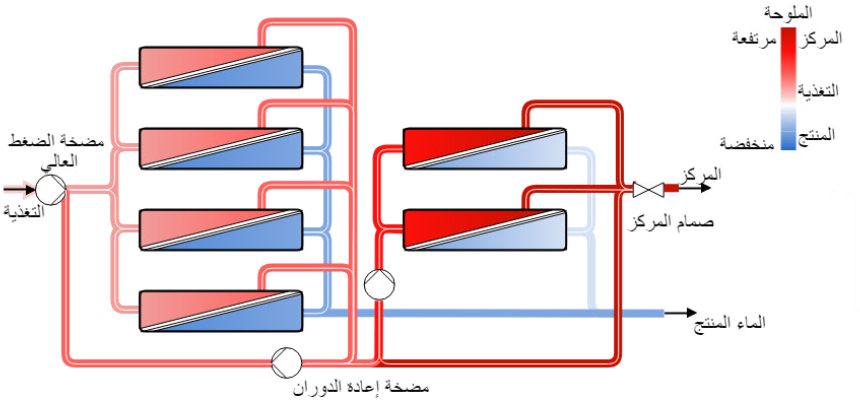
لتدخل الوحدة مرة أخرى. هذا يحصل لهدف زيادة الاسترداد للمنظومة، ويؤمن أيضاً معدل تدفق للتغذية بشكل ثابت نحو الوحدة رغم تكون الحشف (بعكس التصميم المتعدد المراحل). بالإضافة إلى ذلك، التغير في مكون التغذية يمكن تعديله لأجل الحفاظ على مكون ثابت لمياه التغذية للوحدة. اعادة دوران المُركز يمكن دمجه في نماذج المرحلة الواحدة كما المتعددة.



الشكل 17 مبدأ إعادة دوران المُركز

يتطلب نظام إعادة الدوران مساحة حيوية أكبر للغشاء ويزيد مصروف الطاقة (الذي يمكن أن يصل إلى 20%). بالإضافة إلى ذلك فإن تكاليف الاستثمار أعلى بحيث يتم إضافة مضخات إضافية؛ بينما في حال عدم إضافة مضخات أخرى، يجب أن تكون مضخة الضغط العالي أكبر. جودة المحلول تقل ويرتد أكثر مع ازدياد جزء المُركز الذي يتم اعادة دورانه. هذا يعني أن تقليل المواد الصلبة الذائبة في المنظومة التي تقوم بعملية إعادة دوران المُركز هي أقل من المنظومة التي لا تقوم بهذه الخاصية. ولكن، الإنخفاض في جودة المياه المُنتجة يتم التعويض عنه بزيادة في الكمية؛ يعتمد ذلك على الموقع المحدد والتطبيق المستعمل والذي يعتبر عامل مؤثر.

تعتبر عملية إعادة دوران المُركز مفيدة في الحالات التي تعتبر فيها جودة المياه والتدفق متغيرة باستمرار بدل أن تكون ثابتة. الأنظمة التي لا تتمتع بخاصية إعادة الدوران يمكن تطبيقها ضمن قيود ضيقة للتصميم حيث أن قيود التدفق للغشاء وقيود الاسترداد يتم تخطيها بشكل سريع.



الشكل 18 تصميم ذا مرحلتين مع إعادة دوران المُركز في كلتيهما

4.2.4. أجزاء المنظومة-أدوات التحكم

إن عدد الأجزاء ضروري في أي نظام تناضح عكسي، والتي تشمل على سبيل المثال عدد الخزانات، والخزانات المحددة للجرعات ، وخط الأنابيب، والصمامات وأدوات التحكم؛ حيث أن الخزانات يجب أن تكون مصممة بشكل جيد بحيث تمنع حدوث أي تلوث للمياه. بالإضافة إلى أنه يمكن للمناطق الراكدة في هذه الخزانات أن تؤدي إلى تكون الملوثات التي قد تتدفق فجأة و تؤدي إلى حدوث إنسداد في الأنابيب أو الفلاتر، ولهذا يجب تصميم المداخل والمخارج في هذه الخزانات بحيث تكون في وضع بعيد عن هذه المناطق . يمكن اختيار نوع المادة المكونة للأنابيب والخزانات والمعدات الأخرى بحيث تكون مقاومة للصدأ ومقاومة للضغط، وضد التأكسد، وضد الكيميائيات المنظفة، ومقاومة للحرارة والاهتزاز. التجهيزات يمكن أن تكون من مواد مختلفة مثل البلاستيك، الألياف الزجاجية أو الفولاذ. إن المياه شديدة الملوحة هي عالية التأكسد مثلها مثل سوائل التناضح العكسي إن لم يتم معالجتها؛ لذلك فإن المواد ذات الجودة العالية تؤمن سلامة

المنظومة وتقلل من متطلبات الصيانة، وبالتالي فإن الفولاذ المقاوم للصدأ قليل الكربون هو المادة المفضلة للاستخدام في أجزاء النظام ذات الضغط العالي.

معدات التحكم الدقيقة والمعيرة جيداً مهمة جداً للتطبيقات الفعالة؛ حيث أن عدم الدقة في المعدات تعطي معلومات خاطئة أثناء التشغيل مما يؤدي إلى الاستخدام الخاطئ من قبل الشخص الذي يعمل على تشغيل النظام الذي بدوره يقلل من عمل وعمر النظام . لذا فإن أدوات التحكم التالية تعتبر جوهرية:

صمامات الضغط يجب أن تكون قبل و بعد أنابيب الفلاتر وعناصر الغشاء لكل مرحلة وذلك للتحكم في انخفاض الضغط.

عدادات التدفق تقيس معدل التدفق الكلي للمحلول المُركز ، كما تقيس معدل تدفق المحلول في كل مرحلة.

مقياس التوصيل **معامل** يتم قياسه في خط التغذية و خط المحلول لتحديد جودة المياه ومعدل نفاذية الملح

كما أن معدات التحكم التالية ينصح بها بشدة:

عدادات المياه توضع في أنابيب التغذية والمحلول لتسجيل كمية المياه الكلية المعالجة و المُنتجة.

عداد الساعة تستخدم لتسجيل الوقت الكلي لتشغيل النظام .

عداد الـpH يتم قياس الـ pH في مياه التغذية و ذلك لمعرفة احتمالية تكلس الكربون.

إن مراقبة منافذ عينات التغذية والمُركز و خطوط المحلول، وكذلك أيضاً المنافذ الخارجية للأنابيب تسمح بتقييم نشاط المنظومة و تسهل اكتشاف المشاكل وحلولها.

4.3. الفرق بين الترشيح الثانوي والتناضح العكسي

الترشيح الثانوي والتناضح العكسي هما عمليتان متشابهتان. معظم تطبيقات التحلية هي من نوع التناضح العكسي. و لكن، عندما لا يكون إزالة الصوديوم و الكلورايد ذا أولوية، يمكن للترشيح الثناوي أن يكون بديلاً فعالاً ذا كلفة أقل [25]. الفرق الأساسي بين الترشيح الثناوي و التناضح العكسي هو كمية فصل الملح (النفاذية) مما يسمح بتدفق أعلى عبر الغشاء بمقدار ضغط أقل، هذا يعني أن الحاجة إلى الطاقة تصبح أقل. وبما أن تكاليف الطاقة هي العنصر الأهم في مصاريف التشغيل، فإن الكلفة الإجمالية للمعالجة هي أقل لكل متر مكعب.

من الضروري الإشارة إلى أن رفض الأملاح (عدم نفاذيتها) في الترشيح الثانوي هو أمر انتقائي. وبشكل عام، فإن الأيونات متعددة التكافؤ ذات نفاذية أقل بكثير، بينما الأيونات أحادية التكافؤ مثل الصوديوم ذات نفاذية أكبر. أغشية الفلترة الدقيقة يمكن أن تختلف بشكل جوهري في خصائص رفض الأملاح من واحدة لأخرى. يمكن لأغشية الترشيح الدقيق أن تقلل تركيز الصوديوم بنسبة 50% بينما غيرها قد لا تقلل هذه النسبة بشكل كبير. في المقابل فإن نسبة رفض الأملاح الأخرى أكبر مثل الكبريتيد، والكالسيوم، والمغنيسيوم وغيرها من الأيونات متعددة التكافؤ.

لذا فإن قابلية تطبيق الترشيح الدقيق تعتمد بشكل كبير على كيمياء مياه التغذية ومواصفات المياه المُنتجة المرجوة؛ حيث أن تطبيق هذا النظام لمعالجة مياه عالية الملوحة أمر مشكوك فيه وذلك لأن ازالة الصوديوم والكلورايد هي أولوية خاصةً عندما يتعلق الأمر في استخدام المياه المعالجة للأغراض الري. بينما يكون الترشيح الثانوي بديلا فيما يتعلق في المياه قليلة الملوحة، فمن حسنات الترشيح الثانوي أيضاً أنه لا يتطلب أي معالجة لاحقة، في حين أن التناضح العكسي يقلل من كمية الملح في المياه لدرجة تصبح غير مفيدة للري، لذا فإن الترشيح الثانوي قد يكون مناسباً أكثر في هذه الحالة، فبوجود مصدر آخر للمياه كالمياه النقية يمكن خلطها مع المياه المُنتجة باستخدام

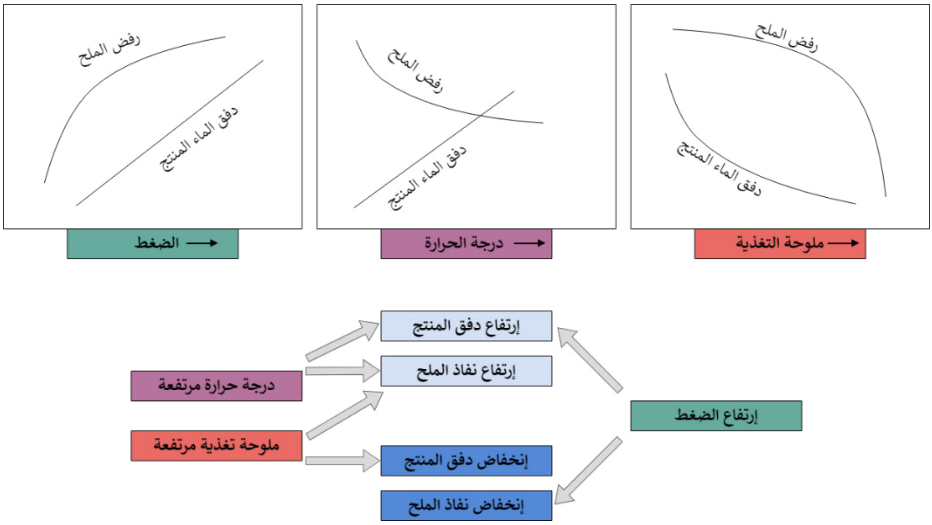
الترشيح الثانوي وبذلك يمكن الاستغناء عن نظام التناضح العكسي كبديل قليل الكلفة حتى لمياه تغذية ذات ملوحة أعلى.

5. التشغيل والصيانة

الهدف من أي عملية تشغيل هو العمل الثابت طويل الأمد بأقل تكلفة، لذلك فإن التصميم الجيد واختيار الأدوات الأساسية للنظام من أهم هذه الشروط. كذلك فإن التشغيل الجيد والصيانة هما أيضاً من الشروط الأساسية؛ حيث أن التشغيل يشمل أوقات التشغيل والمراقبة وتنظيف النظام ، والصيانة الدورية بما فيها التحديد المبكر للأعطال وصيانتها. ومن أجل مقارنة البيانات المأخوذة من المحطة يجب جعل هذه البيانات طبيعية وذلك من خلال ضبط تاثير الحرارة، والتغير في تكوين مياه التغذية، وضغط التغذية الخ. هذه العوامل مهمة في التحديد المسبق للمشاكل المؤثرة على تشغيل المحطة.

5.1. عوامل فعالية التشغيل العامة

هناك ثلاث معايير أساسية، أثناء عملية التشغيل والتي تؤثر على عمل المحطة، وهي درجة الحرارة، وملوحة مياه التغذية والضغط؛ حيث أن الحرارة والملوحة هما حالتان طبيعيتان، بينما ضغط التشغيل يمكن ضبطه لتثبيت عملية التشغيل. هذه العوامل الثلاثة تؤثر على الملوحة كما على الكمية. الزيادة في درجة الحرارة أيضا يزيد من تدفق المُنتج وبالتالي يزيد من كمية الاسترداد. في نفس الوقت، مرور الملح يرتفع مما يعني رفض أقل للملح عبر الغشاء. إذا زادت ملوحة مياه التغذية، فإن تدفق المُنتج ينخفض مما يزيد من نفاذية الملح ولكن مع الزيادة في الضغط، يمكن أن يزداد تدفق المُنتج (الاسترداد) وبذلك يزداد رفض الملح . الشكل 20 يظهر العلاقات الأساسية لعوامل التشغيل.



الشكل 19 العلاقات الأساسية لمعايير التشغيل المهمة (من منشور DOW التقني)

5.2. بدأ التشغيل

من المفترض لبدأ التشغيل الجيد أن يتجنب أي ضرر بالأغشية الناتج عن الضغط/التدفق المفرط أو الصدمة الهيدرولوكية بالإضافة إلى تجنب تكون الحشف المبكر أو الانسداد نتيجة الجودة الغير ثابتة للمياه. الخطوة الأولى الدائمة هي التأكد من مناسبة جودة المياه عند تشغيل مضخة الماء الخام والتي تغذي محطة المعالجة (التناضح العكسي/الترشيح الثناوي). فإذا كانت الجودة ثابتة، فإن الخطوة الثانية هي غسل قسم المعالجة المسبقة والتأكد من الفعالية الجيدة قبل فتح الصمامات لدخول مياه التغذية إلى قسم الغشاء، لذلك يجب أن يكون تدفق المياه ثابت، كذلك الحرارة والتوصيل الكهربائي. يجب أن لا يكون هناك عكورة في المياه أو أن يتم اضافة الكلور أو أي عامل كيميائي آخر قد يضر العملية. فقط حينها، يمكن غسل قسم الغشاء وتشغيل مضخة الضغط العالي. هذا يتطلب عناية خاصة في حال وجود الهواء في أنابيب الضغط لذلك يجب إزالة الهواء بوجود

معدل تدفق وضغط منخفضين، حيث أن زيادة الضغط بشكل سريع قد يؤدي إلى قوة مفرطة داخل الأنابيب مما قد يسبب انفجارها . الملحق 8.5 يظهر نموذج لقائمة التشغيل وكذلك مراحل ما قبل التشغيل والتي تم أخذها من منشور DOW التقني.

المجال الزمني النموذجي لعملية البدأ هو ما بين 30 دقيقة إلى ساعتين اعتماداً على جودة المياه الخام. يمكن مساعدة عملية البدأ العادية عبر أدوات التحكم المبرمجة والصمامات المشغلة عن بعد. محطات معالجة التناضح العكسي/الترشيح الثناوي غير مصممة بشكل عام على العمل بفترات متقطعة. تواتر بدء التشغيل وإيقافه ينهك العناصر والغشاء. بناء على ذلك فإن الكلفة للمتر المكعب المُنتج للمياه قد ترتفع بشكل كبير.

5.3. إيقاف التشغيل

عند ايقاف نظام الغشاء، لا يجب أن يبقى أي مياه مالحة داخل الأنابيب وذلك لتجنب الضرر أو تكون الحشف. لذلك يجب غسل المنظومة بمياه تغذية ذات جودة عالية لتصل ملوحة المُركز لملوحة التغذية، كما يجب أن يتم الغسل على ضغط منخفض (3 بارات) ولكن معدل تدفق عال قد يكون مفيدا للتنظيف. يجب الانتباه أيضاً إلى الضغط في الأنبوب بحيث لا يتعدى الحد المسموح، ولكن إذا كانت المنظومة ذات مراحل متعددة يجب فحص معدلات الضغط في الأنابيب باستمرار. عند الانتهاء من الغسل، لا يجب أن تكون المياه المالحة قادرة على الدخول إلى نظام الغشاء.

في حال عدم غسل الجهة المقابلة لمياه التغذية مباشرة بعد اطفاء مضخة الضغط العالي، هذا سيؤدي إلى تدفق رجعي في الغشاء من جهة المحلول نحو جهة مياه التغذية، والذي بدوره يؤدي إلى شفط الهواء نحو نظام الغشاء من جهة المحلول إذا كان خزان المحلول لا يحوي كمية كافية من المياه. التدفق العكسي قد يكون له تأثير بسيط وقد يتوقف عند

الوصول إلى التوازن؛ ولكن، المياه المالحة يجب أن لا تبقى في المنظومة. إذا كان نظام الغشاء قد صمم مع ضغط عكسي للمحلول، فإن عناصر الغشاء قد تتضرر بعد اطفاء مضخة الضغط المرتفع (انظر الفصل 4.2.2). يجب الانتباه باستمرار لصمامات الحماية بحيث تكون موضوعة بشكل جيد.

في الوقت الذي لا تعمل فيه المنظومة، يجب أن لا تتعرض الأغشية لدرجات حرارة عالية (45c°<) أو أن تتعرض للجفاف. خسارة المياه خلال فترة الايقاف قد يحصل بسبب التسرب خلال خطوط المحلول؛ ولتجنب النمو الميكروبي ، يجب غسل المنظومة يومياً أو حمايتها باضافة بعض المواد الكيميائية مثل ثنائي كبريتيد الصوديوم(sodium bisulfite (SMBS)). إذا كان النظام سيشغل لفترة لا تتعدى 48 ساعة، يجب الحفاظ على عناصر الغشاء حسب توصيات المصنعين مثل محلول SMBS % 1.5 للحماية من تكون الحشف الحيوي والخسارة اللاعكسية للنفاذية.

5.4. عمل منظومات تحلية المياه قليلة الملوحة

الطريقة الأفضل لتشغيل منظومة التناضح العكسي/ الترشيح الثانوي لتحلية المياه قليلة الملوحة هو التشغيل المستمر مع بقاء جميع المعايير قريبة من معدلات التصميم، مثل استرداد التدفق. التغير في التدفق نتيجة الحرارة وتكون الحشف يتم معالجته عبر تعيير ضغط التغذية. تشغيل المحطة أكثر من الطاقة الاستيعابية، مثل معدل تدفق أعلى من التصميم، لا ينصح به بشكل عام. في حال يجب تقليل القدرة الاستيعابية، ايقاف المحطة لفترة محدودة هو الحل الأبسط؛ بينما، العمل المتقطع مع التوقيف المستمر يقلل من عمر المحطة ويزيد من كلفة الإنتاج. ويمكن تقليل القدرة الاستيعابية أيضا عن طريق تقليل ضغط التغذية وبالتالي تقليل التدفق. ولتوفير الطاقة، يجب استعمال المضخات ذات السرعات التي يمكن التحكم بها. عند تقليل ضغط التغذية، عادة ما يبقى استرداد المنظومة ثابتاً بالنسبة لمعدل التصميم. ولكن، استرداد عنصر المنظومة يمكن له أن يتغير وبالتالي

لا يجب أن يتعدى الحدود الموضوعة من قبل المصنعين لتجنب تكون الحشف. كذلك يمكن حساب استرداد العنصر عن طريق برامج رقمية عادة ما تعطى من قبل المصنع.

التغيرات في تكوين مياه التغذية قد يتطلب تعديلاً في معايير التصميم. في حال انخفاض جودة المياه وإرتفاع احتمالية التكلس، قد يكون من الأفضل تقليل استرداد المنظومة؛ بينما إذا كان التغيير في تكون مياه التغذية دائماً، فإن تعديل تصميم المنظومة قد يكون مناسباً أكثر، (أنظر الفصل 3). قد تتطلب أيضا التغييرات في تكوين المياه اختياراً آخراً للمواد المستعملة في صناعة الأنابيب والخزانات.

5.5. المحافظة على السجلات

وضع سجل مفيد للبيانات سيكون أمرا مفيداً جداً لفهم نظام التناضح العكسي/الترشيح الثناوي، والتي بدورها ستؤدي إلى قرارات أفضل من قبل الشخص الذي يعمل على تشغيل المحطة. حيث أن تغيير متطلبات المُنتج أو جودة مياه التغذية، والمعدات المعطلة، والتحشف والعوامل الخارجية يمكن التعامل معها بمقاربة أكثر وقائية. هذا سيساعد في الحفاظ على عمل ثابت وعالٍ وإبقاء التكاليف التشغيلية منخفضة.

عند تفويض محطة المعالجة بالتناضح العكسي/الترشيح الثناوي، يجب تسجيل كل النتائج لكل النقاط المنفذة. يجب أن تتطابق منحنيات التغيير لجميع الأدوات (الصمامات والعدادات) مع توصيات المصنع ويجب تسجيل جميع نقاط الإرتكاز والتسجيلات لجميع الآلات عند التشغيل الأولي لنظام الغشاء بالإضافة إلى نظام المعالجة المسبقة. هذه البيانات تمثل مرجعاً لعمل المنظومة كما توفر أيضاً بيانات ارتكاز للمقارنة مع التشغيلات المستقبلية.

يجب أن يتم وضع السجل اليومي حسب البيانات التالية:

التوصيل الكهربائي و درجة الحرارة

يعتمد التوصيل الكهربائي على درجة حرارة المياه. من المعتمد استعمال EC25، أي التوصيل الكهربائي على حرارة 25 سلسيوس. معظم المعدات تحتوي على مستشعر حرارة داخلي وعلى احتمالية تصحيح الحرارة لتظهر EC25. إذا لم يتم استعمال الEC25 ، يجب تسجيل درجة حرارة المياه بشكل دائم إلى جانب نسبة التوصيل الكهربائي للتمكن من مقارنة القياسات

التوصيل الكهربائي ومجموع المواد الصلبة الذائبة (المؤشر k)

يمكن حساب مجموع المواد الصلبة من EC25 عبر ضربها بمؤشر k مناسب. ولكن، k يعتمد على تكوين المياه وهو بالتالي فريد. عادة يكون k بين 0.5 و 0.7 حيث العدد الأقل يمثل المحلول والأعلى المُركز. يمكن حساب أيضا مجموع المواد الصلبة الذائبة من التحليل الكلي للمياه.

عام	خاص لكل مرحلة
التاريخ والوقت و ساعات العمل	انخفاض الضغط لكل أنبوب فلترة ولكل مرحلة
حموضة التغذية والمحلول والمُركز	ضغط التغذية والمحلول ومياه المُركز
مؤشر كثافة الطمي (SDI) و/أو العكورة وتيار التناضح العكسي للتغذية	تدفقات المحلول والمُركز
درجة حرارة المياه في تيار التغذية	التوصيل الكهربائي لمياه التغذية والمحلول ومياه المُركز
أي حدث استثنائي مثلاً اضطراب مؤشر كثافة الطمي ودرجة الحموضة والضغط والتوقف عن العمل	التوصيل الكهربائي الأسبوعي للمحلول لكل أنبوب ضغط
	التوصيل الكهربائي/مجموع المواد الصلبة الذائبة لتيارات التغذية، المحلول ولمياه المُركز

يجب تغيير الأدوات حسب المواصفات في النظام والتردد، أي كل 6 أشهر، كما يمكن اضافة منحنيات التغيير أيضاً إلى السجل.

يجب عمل تحليل كامل للمياه الخام عند تصميم المحطة، حيث يوصى بتحليل مياه التغذية في بداية التشغيل ومن ثم بعد ذلك كل فترة زمنية معينية (شهرياً)، يجب أن يشمل التحليل المائي أيضاً كل من نسبة الأيونات الأساسية بالإضافة إلى مجموع الكربون العضوي، ودرجة الحموضة و التوصيل الكهربائي.

جدول8 معايير أساسية في التحليل المائي

الأيونات السالبة	**الأيونات الموجبة**
البيكربونات	الكالسيوم
الكبريتيد	المغنيسيوم
الكلور	الصوديوم
النايترات	البوتاسيوم
الفلور	السترونتيوم
الفوسفات (الكلي)	الباريوم
	الحديد (الكلي، الذائب والحديدوز)
السيليكا (الذائبة)	الألومنيوم (الكلي و الذائب)

المعايير

التوصيل الكهربائي

الحموضة

مجموع الكاربون العضوي

أمثلة على التحليل الكيميائي للمياه الجوفية لوادي الأردن الأدنى معطى في الفصل 2.1

التوصيات هي فقط ارشادات عامة، فبعض الوحدات قد لا تحتوي على جميع المعدات والتي يجب أن توضع في الأماكن المطلوبة لإكمال سجل الأداء. هناك عوامل أخرى والتي تعتمد على الموقع قد يكون من الضروري ادخال بيانات إضافية على السجل.

5.6. التسوية

تهدف التسوية إلى أن تصبح قادراً على تمييز التغيرات في إداء المحطة نتيجة الظواهر الطبيعية و المتغيرات الناتجة عن تكون الحشف أو مشاكل أخرى. إن إرتفاع درجة حرارة مياه التغذية هو مثال على الظواهر الطبيعية، حيث أن الزيادة في درجة الحرارة بما يقارب الـ 4 درجات سلسيوس يزيد من مقدار تدفق المحلول بما يقارب الـ 10% . التسوية تلغي تأثير المعايير التشغيلية عبر مقارنة الأداء الفعلي بأداء المرجع. يمكن للأداء المرجع أن يكون أداء النظام المصمم لمقارنة إذا كان النظام يعمل كما يجب أو يمكن أن يكون أيضا الأداء الأولي للمنظومة لإظهار التغيرات في الأداء مع الوقت. يتوفر نظام رقمي مجاني لحساب بيانات التشغيل الرقمية للتسوية باستعمال excel ، FTNORM عبر DOW على filmtech.com.

يسمح التسجيل اليومي بتعقب اداء المحطة مع بيانات التسوية بالتحديد المسبق للمشاكل المحتملة التي قد تكون التكلس والحشف . القياسات المصححة تكون أكثر فعالية إذا سجلت مبكراً.

6. اعتبارات التكلفة

غشاء تحلية التناضح العكسي/ الترشيح الثانوي هي تكنولوجيا معتمدة وتعتبر بشكل عام الحل الأنجع من حيث تكلفة تحلية المياه قليلة الملوحة. مع ذلك، فإن أي تكنولوجيا تحلية هي بشكل عام أكثر تكلفة من خيارات معالجة المياه التقليدية والتي تعتمد على المياه السطحية والجوفية الجديدة التخزين. وبما أن هذه المصادر التقليدية للمياه تستنزف بشكل متزايد أو غير متوفرة، فإن التحلية الحديثة بالغشاء قد أصبحت الخيار الأكثر واقعية الذي يؤمن مصدراً إضافياً للمياه. التطورات الحاصلة في تكنولوجيا التحلية في العقود السابقة قد حسنت من إداء الغشاء وقللت الحاجة للطاقة، حيث أن هؤلاء هما العاملين الأكثر تأثيرا على الأداء من الناحية الإقتصادية. بالإضافة إلى ذلك، فإن تكاليف الغشاء وتكلفة رأس المال الاستثماري قد انخفضت بشكل عام. يمكن للمياه ذات الجودة الجيدة المُنتجة من عملية التحلية بالتناضح العكسي/ الترشيح الثناوي أن تزيد من فعالية المُنتج عند استعمالها لأغراض الري. تصبح الرؤية الإقتصادية أكثر تفضيلية عند جمعها مع محاصيل ذات قيمة مائية عالية أو تطبيقات أخرى مع قيمة عوائد أعلى لكل متر مكعب من المياه المحلاة [4،3]. مثلاً، وجدت دراسة أجريت في جامعة الأردن أن الخيار والفراولة هم الأكثر استهلكاً للمياه بالمقارنة مع المحاصيل الأخرى المدروسة، حيث بلغت القيمة حوالي 4.3 دينار أردني لكل متر مكعب من كمية مياه الري. كذلك وتقدر التكلفة الاجمالية لكل متر مكعب من المياه المحلاة بمعدل 0.226 دينار أردني.

يمكن تقسيم تكاليف التحلية إلى مجموعتين أساسيتين، وهما رأس المال الاستثماري و تكاليف التشغيل (OPEX) حيث أنهما مرتبطتين ببعضهما نوعاً ما. يتألف رأس المال الاستثماري من تكاليف المواد، والتصميم والإنشاء. تكاليف التشغيل تتألف من تكاليف الطاقة، والصيانة، والعمالة، وعناصر الإستعمال اليومي كالكيميائيات والأدوات التي يمكن استبدالها كالأغشية. بشكل عام، رأس المال الاستثماري الأعلى يقلل من تكاليف التشغيل لعدة أسباب. أولاً، المحطة المصممة بالشكل الأفضل تصدر نفس جودة المُنتج

بضغط تغذية أقل و/أو معدل تدفق تغذية أقل والتالي تخفيف تكاليف الطاقة التي تشكل الحصة الأكبر من تكاليف التشغيل. المحطة المصممة بشكل جيد أيضاً تملك نظام معالجة مسبق أفضل والذي يقلل من إحتمالية تكون الحشف وبالتالي زيادة في عمر الغشاء والمنظومة ككل. بالاضافة إلى ذلك، تزيد المواد الجيدة ذات المقاومة المناسبة للبيئة القاسية المجودة داخل محطات المعالجة بالتناضح العكسي من العمر الإجمالي وتقلل من احتمالية فشل المنظومة. ولكن، مع زيادة جودة التصميم، يزداد التعقيد العام للمحطة والذي بدوره يفرض تحدياً أكبر للمشغلين. يجب أن تتلاقى مؤهلات المشغلين مع متطلبات المحطة وإلا فهناك إحتمالية أن يخفف التشغيل الخاطئ من آثار حلول التصميم الجيد مع زيادة في تكاليف التشغيل.

عامل آخر مهم هو الإطار الزمني التشغيلي. محطات المعالجة بالتناضح العكسي/ الترشيح الثناوي تكون أكثر فعالية عند تشغيلها لفترة متواصلة بمدة 24 ساعة في اليوم خلال السنة. من الواضح أنه يجب أن يكون استيعاب التصميم لمنظومة التحلية التي تضاف على المصادر التقليدية للمياه أن يتلاقى مع الطلب الأدنى في الفترات التي تكون فيها هذه المصادر التقليدية غير كافية، هذا يعني أنه في حالة وادي الأردن الأدنى، تصمم محطات التحلية لحاجة إلى المياه في فصل الصيف. خلال فصل الشتاء، قد يؤدي التشغيل المستمر لمحطات التحلية إلى إنتاج فائض للمياه التي لن تكون مستعملة بشكل اقتصادي، وبما أنه يمكن تغطية الطلب بمصادر تقليدية أرخص. إذا، فإن محطات التناضح العكسي الموجودة حالياً في الأردن يتم اطفاؤها لبعض الوقت المستقطع في الشتاء (حوالي ثلاث أشهر في وقت كلي متراكم). ولكن، هذا السيناريو يزيد من التكلفة الإجمالية لكل متر مكعب من المياه المحلاة والتشغيل المستقطع يقلل من عمر نظام التناضح العكسي. بالمقابل، وفي السيناريو الأفضل، الماء المُنتج الفائض يمكن استخدامه في تطبيقات بديلة ، والتي تظل أكثر تفضيلاً من الناحية الإقتصادية مثل البيع/ التبادل

أو زراعة المحاصيل ذات القيمة العالية مع احتمالية أقل للملوحة أوالمعالجة البيئية مثل إعادة تخزين المياه.

جدول9 عملية حسابية لاظهار تأثير استثمار رأس المال و تكاليف التشغيل على الفعالية و تكلفة المُنتج

	نظام المرحلة الأحادية البسيط المعالجة المسبقة البسيطة	نظام المرحلتين المطور المعالجة المسبقة المطورة	نظام المرحلتين المطور المعالجة المسبقة المطورة أجزاء ذات قيمة عالية
رأس المال الاستثماري	50,000	100,000	150,000
سعة المُنتج [متر مكعب/السنة]	150,000	150,000	150,000
مجموع المواد الصلبة الذائبة للمنتج	150 ppm	150 ppm	150 ppm
الإسترداد	60%	75%	75%
تدفق التغذية [متر مكعب/السنة] المياه الجوفية المستخرجة	250,000	200,000	200,000
ضغط التغذية	17بار	14بار	14بار
العمر	10سنة	20سنة	20سنة
دورة استبدال الغشاء	3سنة	6سنة	6سنة
OPEX [%]	80%	70%	60%
OPEX [سنة]	27,000	20,000	20,000
السعر لكل متر مكعب	0.224	0.191	0.219

تستثمر تكاليف الإستثمارات الأولية عادة على فترة زمنية وتحدد كتكاليف ثابتة. التكاليف الشهرية الإجمالية هي مجموع هذه التكاليف الثابتة وتكاليف التشغيل. يجب إذا الأخذ بالإعتبار الإطار الزمني التشغيلي المتوقع عند حساب التكاليف لأنظمة التحلية. تعتبر

عشرين سنة الوقت المعيار لمحطات التناضح العكسي/ الترشيح الثناوي لسداد الكلفة. هذا يعني أنه من المتوقع أن يكون الحد الأدنى لعمر محطات التناضح العكسي/ الترشيح الثناوي عشرون سنة. يؤثر عمر محطة التحلية على التكلفة لكل متر مكعب من المياه المحلاة بحيث أن المحطات ذات العمر الأقل هي ذات تكلفة تشغيلية أعلى بسبب التصميم الأرخص والذي يؤدي إلى ميل أكبر للتحشف. الجدول 9 يوضح علاقة تكلفة الإستثمار الأولي وجودة المحطة على تكاليف الإنتاج ومعايير أخرى. في هذا السيناريو النموذجي، لا ترتفع تكاليف الإنتاج لكل متر مكعب برغم الزيادة في استثمار رأس المال الأولي بمعدل ثلاث مرات. يعود سبب ذلك إلى أن النموذج يصور عمراً أطول وتحشف أقل بسبب التصميم الأفضل. تكاليف التشغيل تنخفض بتقليل حاجات الطاقة من ضغط تغذية أقل واسترداد أعلى. إذا، يتطلب أن تستخرج من الآبار المائية العميقة مياه خام أقل، وبنسبة كبيرة(20%)، والذي بدوره يحفظ مصادر المياه وينتج أوساخاً أقل.

حتى الآن، لم يؤخذ بالحسبان أي تكلفة من تكاليف صرف المحلول الملحي. حيث أن عملية التنفيذ المستدام لتحلية المياه قليلة الملوحة هي محط سؤال بالنسبة لترسب المحلول الملحي قرب المحطة، والتفريغ في واد أو نهر أو أي تطبيق أخر، كل هذه التطبيقات قد يرفع من القلق البيئي الذي بدوره لا يبطل أو يزيل المحلول الملحي من منطقة التصريف لهذه المحطات. لذلك على الأشخاص الذين يعملون على تشغيل تلك المحطات أن يقوموا بتحديد بعض التكاليف نحو حل مستدام لصرف المحلول الملحي. في الأردن، الخيار المرجح والأكثر سهولة والأرخص هو أن يتم صرف المحلول الملحي عبر البحر الميت، وذلك بسبب مواصفاته المميزة الذي يجعل الأثر البيئي لهذا التصريف صغيراً. في هذا السيناريو، يتم جمع المحلول الملحي من المحطات عبر الأنابيب أو القنوات المفتوحة ومن ثم ينقل بشكل آمن إلى البحر الميت بدون احتمالية تسربه في التربة أو نحو آبار المياه الجوفية في مناطق التحلية. يجب أن تكون البنية التحتية لهذا السناريو تحت اشراف السلطات المحلية. هناك أيضا خيارات أخرى تتضمن حلول ذات

منفعة اقتصادية كزراعة الأسماك واستخراج الملح أو خيارات تصريف أخرى كالتبخر الشمسي (انظر الفصل 3.6).

تقابل تكاليف الصرف المستدام للمحلول الملحي تكاليف أخرى وهمية، والتي تظهر بالآثار السلبية لبقاء المحلول الملحي في مناطق التطبيق. هذا يعني التكاليف الناجمة عن تأثير المحلول الملحي على التربة والمياه الجوفية، أي إرتفاع معدلات الملوحة في الآبار المتصلة والذي بدوره يقلل من قيمة التربة وخصوبتها الخ... يمكن لهذه التكاليف أن لا تكون وشيكة الحدوث ولكن قد تظهر مع مرور الزمن أو بعد عدة سنوات ، كما أن هذه التكالبف أيضا تعتمد على مدى عملية التحلية. في 2016، انتجت محطات التحلية باستخدام تقنية التناضح العكسي في وادي الأردن الأدنى ما تقديره 4 إلى 5 مليون متر مكعب من المحلول الملحي. هذه الكمية قد تزيد بمعدل مرتين إلى ثلاث مرات في المستقبل القريب مع 15 مليون متر مكعب كل سنة والذي لديه تأثير أكبر بكثير على البيئة في حال عدم تطبيق خيار للتصريف المستدام.

يصعب تكهن كمية كلفة التصريف الجيد للمحلول الملحي والتكاليف الخفية حيث أنها تعتمد على عدة عوامل وظروف لذلك لا يوجد أي تقديرات حالية لهذه التكاليف. كما تلعب السلطات المحلية دوراً كبيراً عبر تحديد أطر التطبيق لعملية التحلية وخصوصاً صرف المحلول الملحي، على سبيل المثال التطبيق المنظم والغير منظم، والمصادقة على التشغيل الجيد.... الخ. إن الإفتراض العام (والأكثر أماناً) هو أن التكاليف العامة لتحلية المياه القليلة الملوحة تنخفض بإنخفاض التأثير البيئي السلبي في مساحة التطبيق.

6.1. دراسة التكلفة لأنظمة التناضح العكسي الموجودة حالياً في الأردن

يعرض هذا الفصل بعض البيانات المجموعة من وحدات التناضح العكسي المشغلة حالياً في وادي الأردن الأدنى والذي يخدم احتمالات السوق المحلية.

الفلاحون في الأردن وبالتحديد في وادي الأردن الأدنى بدءو بالفعل بتنفيذ وحدات التناضح العكسي منذ عشرين سنة. في 2016، تم تشغيل أكثر من خمسين وحدة تحلية خاصة، السوق المحلية غير منظمة لذلك فإن البيانات التي يمكن الإعتماد عليها نادرة. البيانات المبينة في هذا الكتيب تظهر معلومات تم جمعها اثناء الزيارات التي قام بها الكُتاب بالإضافة إلى بيانات تم جمعها من خلال مسوح قام بها فريق من الجامعة الأردنية. الجدول 10 يظهر أهم النقاط الأساسية. من بينهما نقطين يجب التوقف عندهما وهما معدل الاسترداد ومعدل تكلفة الإستثمار، حيث أن معدل الاسترداد يعتبر ضئيلاً بنسبة 65%، حيث من المتوقع أن تكون هذه النسبة بين 75% و 85% لتحلية المياه قليلة الملوحة. علاوة على ذلك، معدل تكلفة الاستثمار الأولي بمقدار 65 ألف دينار أردني (92 ألف دولار) لقدرة المحطة الاستيعابية والتي تقدر بـ 42 متر مكعب لكل ساعة هي أيضا قليلة جداً.هذا الرقم ثابت بافادة من المورد المحلي لمحطات المعالجة بالتناضح العكسي في عمان والذي حدد بتكاليف مقدارها2000$ لكل متر مكعب في الساعة (60 ألف دينار أردني لـ42 متر مكعب في الساعة). كما أن تكلفة الاستثمار تحسب بمقدار 100 دينار أردني ($141) لكل متر مكعب في اليوم من المياه المحلاة وبإسترداد بقيمة 65%، حيث هذا المعدل يقدر بثلاث إلى خمس مرات أقل من القيمة المتوقعة للأسواق الغربية [7،13،]28-26

جدول10 تحليل الكلفة لمحطات المعالجة بالتناضح العكسي للمزارع في الأردن

التحلية في الأردن

العدد =46 **المعدل الوسطي**

السعة	م3/ساعة	42
سعة المُنتج	م3/ساعة	27
الاسترجاع	%	64
رأس المال الاستثماري	دولار$	92,000
رأس المال الاستثماري	دينار أردنيJD	65,000
OPEX	%	76
OPEX	US $/a	39,500
OPEX	JD/a	28,000
السعر للمتر المكعب	US $/m³	0.32
السعر للمتر المكعب	JD/m³	0.226

يمكن تفسير تكاليف رأس المال الإستثماري المنخفض في الأردن جزئياً وذلك للجودة الأقل للأنظمة نسبياً. تكاليف رأس المال لا تتضمن أيضا تكاليف التوصيل مع البئر، وتكاليف التوصيل مع الشبكة وتكاليف اسكان المحطة. في العديد من الحالات، يوجد بئر مناسب في المزرعة كما يمكن أن يتوفر الاسكان بواصفات أساسية وبدون أجهزة تكييف. إن وجود مستنقع مفتوح قريب من المحطة يمكن أن يعمل بدوره كخزان للمنتج أو كخزان خلط مع مصادر المياه الاخرى. العديد من الأنظمة هي أنظمة أحادية المراحل، هذا يفسر وجود استرداد ضئيل. معدات التحكم محدودة لبعض مستشعرات الضغط، حيث يوجد عداد واحد للتدفق وعداد واحد للتوصيل الحراري لتقييم ملوحة المحلول. المعالجة المسبقة محصورة بشكل عام لكل من فلتر الرمل فلتر كارتيج ومانع لتشكل قشور الفوسفات والفوسفونات. ففي بعض الحالات تم تسجيل إرتفاع في الملوحة والذي

يدل على فشل جزئي في أداء الغشاء. نتائج المسوح التي تم القيام بها تظهر أن المصاريف التشغيلية تمثل حوالي 80% من التكلفة الكلية للتحلية. لذلك وبصورة شاملة، يمكن مقارنة التشغيل الحالي في الأردن بالسيناريو الأول من الجدول 9. تلخص هذه الحسابات بأن التكلفة لعملية التحلية تقدر بـ 0.226 دينار أردني ($0.319) لكل متر مكعب من المحلول بينما يمكن للتكاليف الجوهرية المحددة لكل متر مكعب من المحلول أن تكون أقل أو أكثر، بسبب التغير في جودة مياه التغذية، وجودة المنظومة وبالإضافة إلى جودة الصيانة.

7. توصيات عامة

تعتبر تحلية مياه وادي الأردن الأدنى حلاً جاذباً جداً. الإيجابية الأساسية الموجودة في تحلية المياه هي استعمال مصدر مياه لم يكن جاذباً في السابق مما يدعم الاحتياط المائي بإنتاج مياه جديدة. الاستثمار للمقاولين كالفلاحين في انظمة جيدة للتحلية قد يكون مفيداً جداً. التقييم الاقتصادي يزيد جودة مياه الري مما يزيد الإنتاجية. بالاضافة االى ذلك، قد يجبر الشح الحالي للمياه في وادي الأردن الأدنى المنظمين في المستقبل لزيادة أسعار مصادر المياه التقليدية لزيادة الحوافز للاستعمال الفعال للمياه. الفلاحون الذين يستخدمون تحلية المياه بشكل فعال قد يستفيدون من هذا السيناريو.

إن الجانب السلبي لأي تكنولوجيا تحلية المياه على اليابسة هو الحاجة للإدارة مستدامة للمنتج الثانوي شديد الملوحة. علاوة على ملوحته العالية، يحتوي هذا المحلول على جميع الكيميائيات المضافة خلال العملية مثل كيميائيات التنظيف ومضادات تكون القشور. إن عدم إزالة هذه المياه يؤدي إلى زيادة ملوحة المياه الجوفية وانخفاض قيمة التربة. هذا المحلول الملحي هو أيضاً واسع الإنتشار مما يعني أنه قد يؤثر على مساحة كبيرة من الأراضي حتى لو صرف في نقاط محددة. في الأراضي المستخدمة للزراعة، أي تصرف للمحلول الملحي نحو التربة يؤثر بالتحديد على عاملين مهمين وهما التربة وجودة المياه الخام. لذلك يجب صرف المحلول في البحر أو أن يتم صرفه بطرق مبتكرة (انظر الفصل 3.6).

تلعب قدرات السوق المحلية بالإضافة إلى مؤهلات الأشخاص العاملين على تشغيل المحطة دوراً مهماً لإختيار نوع المنظومة التي يمكن تنفيذها. تشهد السوق المحلية الأردنية تنوعاً كبيراً للأنظمة، والتي توفر حلول بسيطة ذات أسعارمنخفضة كما توفر في المقابل أيضاً أنظمة معقدة وذات أسعارٍ مرتفعة. وبسبب ندرة المياه في المنطقة، يجب أن يكون الهدف العام هو تحقيق أقصى قدر ممكن من الاسترداد والذي يعني

الأستثمار باستخدام حلول أكثر تعقيداً. هذا يتطلب أيضاً التخطيط للإنتقال لاطار زمني أكبر على اعتبار أن التحلية باستخدام تقنية التناضح العكسي ستكون دائمة الانشاء.

التشغيل والصيانة أساسيان للحفاظ على تكاليف منخفضة للإنتاج وتحقيق أقصى قدر ممكن من عمر المحطة. على سبيل المثال يجب صيانة وعدم اهمال كل من التسربات، والأغشية المعطلة، والفلاتر المسدودة، والجودة الغير مناسبة للمياه الخام الخ. كما يجب وضع الكيميائيات بعناية وبشكل مناسب. البخار الحمضي الناتج عن المكثفات الغير محكمة الإغلاق قد يؤدي إلى تآكل المحطة أو أجزاء أساسية منها كمضخات الضغط العالي. بالإضافة إلى ذلك، الأبخرة الحمضية يمكن لها التأثير على صحة الأشخاص العاملين على تشغيل المحطة لهذا فإن سلامة هؤلاء الأشخاص يجب أن تكون من الأولويات.

الحفاظ على السجلات من أهم الأمور التي لا يجب إهمالها، حيث تؤمن السجلات الجيدة القاعدة الأساسية لبناء المعرفة والخبرة، والتي بدورها تجعل الأنظمة تعمل بشكل أمثل وأكثر فعالية. حيث أن السجلات الجيدة في تحديد المشاكل وحلها تسهل عملية التشغيل بفاعلية قصوى لذلك فإن عملية تحليل عناصر الغشاء القديمة يمكن أن توضح الأسباب الرئيسية لتكون الحشف التي من خلالها يمكن وضع معايير وقائية.

جدول11 توصيات عامة (تصويرأوليفير يونغ)

تأمين اسكان مناسب لحماية أنظمة التحلية من أشعة الشمس المباشرة ودرجات الحرارة العالية.
إمتلاك معالجة مسبقة مناسبة.
الأخذ بالإعتبار زيادة استرداد المنظومة لزيادة الفعالية وتقليل استخراج المياه الجوفية.
أجزاء المحطة والمواد المستخدمة الجيدة تزيد من عمر المحطة وتقلل الصيانة.
يجب تجنب التشغيل والإطفاء المستمر.

برك تخزين المياه المفتوحة والسطحية تظهر الملوثات وتخسر المياه المُنتجة نتيجة التبخر (تصل كمية التبخر إلى 2600 mm/a).
لذلك استخدام الخزانات المغلقة تحمي المحلول الباهظ الثمن من الفقدان.

اعتبار المعالجة والصرف المناسب للمحلول الشديد الملوحة لمنع تآكل التربة والمياه الجوفية.

الصيانة وأعمال التشغيل المناسبة تحافظ على سعر الإنتاج منخفضاً وتؤمن سلامة المشغلين. يجب عدم إهمال حدوث تسرب وكذلك خزانات الكيميائيات المفتوحة والأجزاء الرخوة والمعطلة حيث قد تؤدي إلى التقليل من سلامة المنظومة وعمرها بالإضافة إلى اضعاف جودة المُنتج.

الحفاظ على سجلات أداء المنظومة لتسوية البيانات لتسهيل تحديد المشاكل وحلها.

8. الملحق

8.1. بيانات مختارة لعينات تم جمعها في الأردن

المزرعة 1		التغذية	المُنتج	المحلول الملحي
pH (30°C)		6.9	5.7	7.3
التوصيل الكهربائي (25°C)	mS/cm سمنز	5.35	0.37	16.62
DOC	mg/Lملغم/لتر	2.3	غير مدروس	4.8
الكالسيوم	mg/L	241	3.6	600
البوتاسيوم	mg/L	46	4.5	165
المغنيسيوم	mg/L	184	2.2	570
الصوديوم	mg/L	632	63.1	2004
الكلورا	mg/L	1608	77.5	4900
الكبريتيد	mg/L	795	6.8	1829

المزرعة 2		التغذية	المُنتج	المحلول الملحي
pH (30°C)		7.0	6.5	غير مدروس
التوصيل الكهربائي (25°C)	mS/cm سمنز	3.83	0.50	8.8
DOC	mg/Lملغم/لتر	1.1	غير مدروس	9.3
الكالسيوم	mg/L	110	4.3	161
البوتاسيوم	mg/L	67	8.6	172
المغنيسيوم	mg/L	110	4.6	276
الصوديوم	mg/L	514	88.2	1155
الكلور	mg/L	1073	124.2	2400

الكبريتيد	mg/L	532	10.5	500
المزرعة 3		**التغذية**	**المُنتج**	**المحلول الملحي**
pH (30°C)		6.7	6.9	7.0
التوصيل الكهربائي (25°C)	سمنز mS/cm	11.53	5.88	13.21
DOC	ملغم/لتر	7.34	2.9	5.8
الكالسيوم	mg/Lملغم/لتر	482	236	600
البوتاسيوم	mg/Lملغم/لتر	137	64.9	147
المغنيسيوم	mg/Lملغم/لتر	379	195	470
الصوديوم	mg/Lملغم/لتر	1334	714	1501
الكلورايد	mg/Lملغم/لتر	3363	1636	3900
الصالفايت	mg/Lملغم/لتر	700	684	1200

المزرعة 4		**التغذية**	**المُنتج**	**المحلول الملحي**
pH درجة الحموضة (30°C)		غير مدروس	غير مدروس	غير متوفرة
التوصيل الكهربائي (25°C)	mS/cm سمنز	4.39	0.54	غير متوفرة
DOC	mg/Lمغم/لتر	1.6	غير مدروس	غير متوفرة
الكالسيوم	mg/L	212	10.6	غير متوفرة
البوتاسيوم	mg/L	49	7.8	غير متوفرة
المغنيسيوم	mg/L	162	8.8	غير متوفرة
الصوديوم	mg/L	520	77.0	غير متوفرة
الكلورا	mg/L	1161	124.1	غير متوفرة
الكبريتيد	mg/L	660	19.5	غير متوفرة

المزرعة 5		التغذية	المُنتج	المحلول الملحي
pH درجة الحموضة (30°C)		6.8	5.8	7.1
التوصيل الكهربائي (25°C)	mS/cm سمنز	7.89	0.52	12.78
DOC	ملغم / لتر mg/L	1.9	غير مدروس	4.0
الكالسيوم	mg/L	321	8.2	549
البوتاسيوم	mg/L	87	7.0	147
المغنيسيوم	mg/L	240	7.5	399
الصوديوم	mg/L	994	75.0	1614
الكلور	mg/L	2124	125.9	3502
الكبريتيد	mg/L	724	14.6	963

المزرعة 6		التغذية	المُنتج	المحلول الملحي
pH درجة الحموضة (30°C)		6.8	6.0	7.1
التوصيل الكهربائي (25°C)	mS/cm سمنز	5.8	0.95	12.3
DOC	mg/L ملغم/لتر	2.2	غير مدروس	4.0
الكالسيوم	mg/L	296	22.9	710
البوتاسيوم	mg/L	57	14.6	128
المغنيسيوم	mg/L	244	22.6	580
الصوديوم	mg/L	605	125.4	1291
الكلور	mg/L	1401	499	3391
الكبريتيد	mg/L	906	61.7	1889

المزرعة 7		التغذية	المُنتج	المحلول الملحي
pH درجة الحموضة (30°C)		6.8	5.9	6.8
التوصيل الكهربائي (25°C)	mS/cm سمنز	6.54	0.72	18.81
DOC	mg/L ملغم/لتر	2.0	غير مدروس	7.7
الكالسيوم	mg/L	300	5.1	750
البوتاسيوم	mg/L	116	12.4	253
المغنيسيوم	mg/L	220	4.0	615
الصوديوم	mg/L	790	125.1	2220
الكلور	mg/L	1690	171.3	5874
الكبريتيد	mg/L	600	10.6	1700

8.2. محاكاة ROSA

برامج المحاكاة الرقمية لغشاء التناضح العكسي مثل ROSA (DOW), Toray DS, WinFlows (GE) وغيرها قادرة على حساب عوامل الأداء المتوقعة لمحطة معالجة معينة بالتناضح العكسي. هذا يسمح بالوصول إلى تصميم مثالي للنظام العوامل المدخلة الأساسية هي التحليل المائي، والاسترداد المرجو ومعدل تدفق المحلول المطلوب. بعد ذلك يسمح البرنامج بالنظر إلى النماذج المختلفة ورؤية كيفية تغير نتائج الأداء لتحديد التصميم الأمثل. الجداول التالية تظهر أمثلة على هذه الحسابات لأنظمة المرحلتين. تم اخذ البيانات من مزرعة في الأردن بمعدل ملوحة عال.

تم الحصول على النتائج حسب الخطوات المقترحة في منشور DOW التقني [8] و باستخدام الجداول المعطاة. معاييرالتصميم التالية قد تم اختيارها:

نوع المياه الداخلة= مياه بئر، SDI<3

التدفق المحدد=22 l/m²h

عدد العناصر=36

عدد العناصر لكل أنبوب=6

العدد الكلي لأنابيب الضغط=6

مرحلتين

النسبة المرحلية= 2:1

لاحظ تغير ضغط التغذية، والاسترداد وتدفق المحلول لكل عنصر مع التغير في درجة حرارة المياه (الشكل 20 مقابل الشكل 21). لاحظ أيضاً أن مؤشر التشبع لانجير أكبر من صفر وأن درجة تشبع كبرتيد الباريوم ووكلوريد الكالسيوم أكبر من 100%، هذا

يعني توقع حصول تكون لقشور كاربونات الكالسيوم، وكبريتيد الباريوم وكلوريد الكالسيوم إذا لم يتم اضافة مضادات تكون القشور.

System Details

Feed Flow to Stage 1	40.00 m³/h	Pass 1 Permeate Flow	30.00 m³/h	Osmotic Pressure:	
Raw Water Flow to System	40.00 m³/h	Pass 1 Recovery	75.00 %	Feed	2.56 bar
Feed Pressure	18.93 bar	Feed Temperature	20.0 C	Concentrate	9.68 bar
Flow Factor	0.85	Feed TDS	4245.34 mg/l	Average	6.12 bar
Chem. Dose (100% H2SO4)	0.00 mg/l	Number of Elements	36	Average NDP	12.73 bar
Total Active Area	1337.76 M²	Average Pass 1 Flux	22.43 lmh	Power	26.30 kW
Water Classification: Well Water SDI < 3				Specific Energy	0.88 kWh/m³

Stage	Element	#PV	#Ele	Feed Flow (m³/h)	Feed Press (bar)	Recirc Flow (m³/h)	Conc Flow (m³/h)	Conc Press (bar)	Perm Flow (m³/h)	Avg Flux (lmh)	Perm Press (bar)	Boost Press (bar)	Perm TDS (mg/l)
1	BW30-400/34i	4	6	40.00	18.58	0.00	18.71	17.78	21.29	23.88	3.50	0.00	46.81
2	BW30-400/34i	2	6	18.71	17.44	0.00	10.00	16.67	8.71	19.52	0.00	0.00	102.70

Pass Streams (mg/l as Ion)							
Name	Feed	Adjusted Feed	Concentrate		Permeate		
			Stage 1	Stage 2	Stage 1	Stage 2	Total
NH4+ + NH3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K	115.70	115.70	244.08	451.04	2.93	6.37	3.93
Na	790.00	790.00	1678.94	3122.40	9.12	21.02	12.57
Mg	220.00	220.00	469.00	874.81	1.27	2.89	1.74
Ca	300.00	300.00	639.60	1193.10	1.68	3.85	2.31
Sr	4.60	4.60	9.81	18.29	0.03	0.06	0.04
Ba	0.04	0.04	0.09	0.18	0.00	0.00	0.00
CO3	0.33	0.33	2.04	9.54	0.00	0.00	0.00
HCO3	300.00	300.00	634.39	1167.58	4.18	8.78	5.49
NO3	20.90	20.90	40.14	67.90	4.00	8.26	5.23
Cl	1866.91	1867.00	3972.84	7397.22	17.14	39.68	23.68
F	1.30	1.30	2.76	5.13	0.02	0.04	0.02
SO4	600.00	600.00	1280.29	2390.23	2.40	5.45	3.29
SiO2	18.60	18.60	39.64	73.92	0.11	0.27	0.16
Boron	1.20	1.20	1.79	2.42	0.69	1.05	0.79
CO2	47.28	47.28	48.11	51.59	47.18	48.83	47.68
TDS	4245.25	4245.34	9023.83	16785.18	46.81	102.70	63.00
pH	6.80	6.80	7.04	7.19	5.17	5.46	5.27

Stage Details

Stage 1 Element	Recovery	Perm Flow (m³/h)	Perm TDS (mg/l)	Feed Flow (m³/h)	Feed TDS (mg/l)	Feed Press (bar)
1	0.10	1.02	30.54	10.00	4245.34	18.58
2	0.11	0.97	35.44	8.98	4723.78	18.38
3	0.12	0.92	41.60	8.01	5293.19	18.21
4	0.12	0.87	49.48	7.09	5976.82	18.07
5	0.13	0.81	59.81	6.22	6803.45	17.95
6	0.14	0.74	73.69	5.41	7807.00	17.86

Stage 2 Element	Recovery	Perm Flow (m³/h)	Perm TDS (mg/l)	Feed Flow (m³/h)	Feed TDS (mg/l)	Feed Press (bar)
1	0.10	0.92	66.17	9.35	9023.83	17.44
2	0.10	0.84	77.92	8.44	9995.70	17.25
3	0.10	0.77	92.81	7.59	11098.82	17.10
4	0.10	0.69	111.94	6.82	12339.46	16.96
5	0.10	0.61	136.80	6.13	13714.62	16.85
6	0.10	0.53	169.32	5.52	15207.43	16.75

الشكل:20 تقرير محاكاة ROSA لمياه تغذية على درجة حرارة 20 °C

System Details

Feed Flow to Stage 1	40.00 m³/h	Pass 1 Permeate Flow	30.00 m³/h	Osmotic Pressure:	
Raw Water Flow to System	40.00 m³/h	Pass 1 Recovery	75.01 %	Feed	2.65 bar
Feed Pressure	15.75 bar	Feed Temperature	30.0 C	Concentrate	9.94 bar
Flow Factor	0.85	Feed TDS	4245.34 mg/l	Average	6.29 bar
Chem. Dose (100% H2SO4)	0.00 mg/l	Number of Elements	36	Average NDP	9.46 bar
Total Active Area	1337.76 M²	Average Pass 1 Flux	22.43 lmh	Power	21.88 kW
Water Classification: Well Water SDI < 3				Specific Energy	0.73 kWh/m³

Stage	Element	#PV	#Ele	Feed Flow (m³/h)	Feed Press (bar)	Recirc Flow (m³/h)	Conc Flow (m³/h)	Conc Press (bar)	Perm Flow (m³/h)	Avg Flux (lmh)	Perm Press (bar)	Boost Press (bar)	Perm TDS (mg/l)
1	BW30-400/34i	4	6	40.00	15.40	0.00	18.17	14.71	21.83	24.47	3.50	0.00	81.33
2	BW30-400/34i	2	6	18.17	14.37	0.00	10.00	13.72	8.18	18.34	0.00	0.00	190.77

Pass Streams (mg/l as Ion)							
Name	Feed	Adjusted Feed	Concentrate		Permeate		
			Stage 1	Stage 2	Stage 1	Stage 2	Total
NH4+ + NH3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K	115.70	115.70	248.67	443.01	4.99	11.13	6.66
Na	790.00	790.01	1719.00	3091.91	16.53	40.83	23.16
Mg	220.00	220.00	481.46	870.74	2.31	5.62	3.21
Ca	300.00	300.00	656.64	1187.69	3.07	7.51	4.28
Sr	4.60	4.60	10.07	18.21	0.05	0.12	0.07
Ba	0.04	0.04	0.10	0.17	0.00	0.00	0.00
CO3	0.42	0.42	2.77	12.03	0.00	0.00	0.00
HCO3	300.00	300.00	648.21	1150.71	7.09	16.69	9.68
NO3	20.90	20.90	38.13	58.48	6.55	13.26	8.38
Cl	1866.91	1866.91	4071.73	7339.30	31.21	77.60	43.85
F	1.30	1.30	2.82	5.07	0.03	0.08	0.04
SO4	600.00	600.00	1315.39	2382.80	4.38	10.63	6.08
SiO2	18.60	18.60	40.69	73.54	0.21	0.54	0.30
Boron	1.20	1.20	1.61	1.96	0.86	1.18	0.95
CO2	41.62	41.62	42.76	47.01	41.70	43.76	42.28
TDS	4245.33	4245.34	9244.88	16644.85	81.33	190.77	111.13
pH	6.80	6.80	7.04	7.17	5.38	5.71	5.50

Design Warnings

-None-

Solubility Warnings

Langelier Saturation Index > 0
Stiff & Davis Stability Index > 0
BaSO4 (% Saturation) > 100%
CaF2 (% Saturation) > 100%
Antiscalants may be required. Consult your antiscalant manufacturer for dosing and maximum allowable system recovery.

Stage Details

Stage 1 Element	Recovery	Perm Flow (m³/h)	Perm TDS (mg/l)	Feed Flow (m³/h)	Feed TDS (mg/l)	Feed Press (bar)
1	0.11	1.12	49.81	10.00	4245.34	15.40
2	0.12	1.04	59.41	8.88	4772.16	15.23
3	0.12	0.96	71.77	7.84	5397.33	15.08
4	0.13	0.87	87.95	6.88	6140.42	14.96
5	0.13	0.78	109.57	6.01	7021.25	14.86
6	0.13	0.68	139.06	5.23	8055.05	14.78

Stage 2 Element	Recovery	Perm Flow (m³/h)	Perm TDS (mg/l)	Feed Flow (m³/h)	Feed TDS (mg/l)	Feed Press (bar)
1	0.10	0.95	115.04	9.09	9244.88	14.37
2	0.10	0.84	140.34	8.14	10308.67	14.21
3	0.10	0.73	173.30	7.30	11478.99	14.08
4	0.09	0.62	216.70	6.57	12736.65	13.97
5	0.09	0.52	273.97	5.94	14047.61	13.87
6	0.08	0.43	349.59	5.42	15366.91	13.79

Scaling Calculations

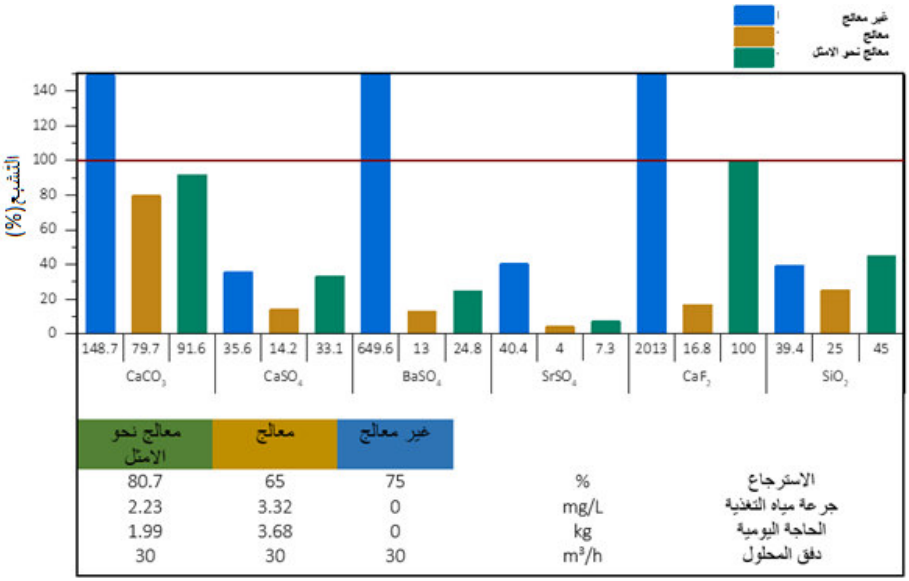
	Raw Water	Adjusted Feed	Concentrate
pH	6.80	6.80	7.17
Langelier Saturation Index	0.21	0.21	1.73
Stiff & Davis Stability Index	-0.01	-0.01	0.98
Ionic Strength (Molal)	0.09	0.09	0.37
TDS (mg/l)	4245.33	4245.34	16644.85
HCO3	300.00	300.00	1150.71
CO2	41.62	41.62	47.00
CO3	0.42	0.42	12.03
CaSO4 (% Saturation)	16.55	16.55	86.84
BaSO4 (% Saturation)	225.03	225.03	917.69
SrSO4 (% Saturation)	11.58	11.58	51.26
CaF2 (% Saturation)	67.40	67.40	4054.49
SiO2 (% Saturation)	13.43	13.43	54.47
Mg(OH)2 (% Saturation)	0.00	0.00	0.01

الشكل 21: تقرير محاكاة ROSA لمياه تغذية على درجة حرارة 30 °C

8.3. تقييم الحد الأقصى من الاسترداد باستخدام برامج لمنع تكون القشور/التكلس

في تحلية المياه قليلة الملوحة، عادة ما يتم وضع الاسترداد الأقصى بقابلية مياه التغذية لتكوين الحشف أو التكلس. التكلس هو أحد أهم العوامل التي تساهم في تكون الحشف. موانع أو ما يعرف بمضادات تكون الحشف قادرة على ابقاء الأملاح كمحلول وزيادة حدود الاسترداد الأقصى. يظهر مستند 22 تأثير موانع التكلس المحسوبة بواسطة برنامج رقمي لتعيير مضادات التكلس.

أيضاً لاحظ المتطلبات اليومية لمضادات التكلس. لأن المعيار الأساس في المحلول الملحي هو كثافة مضادات التكلس، تقل المتطلبات اليومية لاسترداد الأعلى بما أن محلول ملحي أقل قد تم انتاجه. تم أخذ البيانات من مزرعة في الأردن، وهي نفسها المستعملة في محاكاة ROSA. تظهر البيانات أن الاسترداد قد زاد حتى وصل التشبع لأحد المكونات 100%(CaF2). كما يظهر البرنامج استرداد أقصى بحوالي 80% بحيث يمكن السيطرة على تكون القشور.



الشكل22 التشبع لأملاح منخفضة الذوبان في المحلول الملحي على نسب استرجاع وجرعات مضادات مختلفة تكون الحشف

8.4. ورقة الوقائع الأولية

التالي هو مثال على ورقة الوقائع الأولية للشروع في تصميم المنظومة كما هو مطلوب في كتيب DOW التقني

رقم الاقتباس.....تاريخ الطلب..... تاريخ الاصدار.....صاحب الطلب.....		
الزبون..... العنوان..... الموقع المقترح..... وصف موجز.....		
معدل التدفق المطلوب للمنتج (gpd أو m3/h)..... الإسترداد المتوقع		
نطاق درجة حرارة المياه السنوية	مرتفع °C..... منخفض°C ..... التصميم °C.....	
محطة NF/RO:	❒ داخلية	❒ خارجية
مصممة للاستعمال المتواصل	❒ نعم	❒ كلا
إذا كانت الإجابة كلا، أذكر السعة القصوة المطلوبة في الساعة.....		

سيتم تشغيل المحطة عبر	المستخدم النهائي شخص مختص مصنع المعدات غيرذلك	❒ نعم ❒ نعم ❒ نعم ❒ نعم	❒ كلا ❒ كلا ❒ كلا ❒ كلا
مصدر المياه	❒ مياه بئر ❒ مياه صرف معالجة	❒ مياه مخففة ❒ مياه البحر	❒ مياه سطحية ❒ غير ذلك
معالجة مسبقة موجودة	❒ نعم SDI..... لائحة خطوات المعالجة المسبقة		❒ كلا معالجة مسبقة مخطط لها ....

التحكم الميكروبي	❒ نعم	❒ كلا	Dechlorination: ❒Ac-Filter
استخدام الكلور	❒ نعم	❒ كلا	❒Na-Bisulfite
استخدام الكلورامينز	❒ نعم	❒ كلا	❒Other
استخدام مضادات تكون الحشف	❒ نعم	❒ كلا	
التأكسد المرجو، أي واحدة؟	❒ HCl		
.....			
❒ ولا واحدة			

وصف مقتضب لخطوات أخرى من المعالجة المسبقة (مثال، التنقية، والتلبد، الفلترة بالرمل /بتعدد الوسائط ،إلخ).....

التطبيق

❒ مياه الشرب			
❒ مصدر صناعي للـ	❒ الأدوية	❒ تغذية السخان	❒ الألكترونيات ❒ غير ذلك

حدد جودة المياه المطلوبة بعد المعالجة بالتناضح العكسي .....

حدد مواصفات أخرى مرجوة للتصميم .....

تحليل المياه		
التحديد البسيط.....		
مصدر التغذية.....		
التوصيل.....	pH: .....درجة الحموضة	درجة الحرارة(°C).....
تحليل مياه التغذية: الرجاء تحديد وحدة القياس *mg/L للأيون أو meq/L* *او ppm لل $CaCO_3$*	NH_4^+	..... CO_2
	K^+	..... CO_3^{2-}
	Na^+	..... HCO_3^-
	Mg^{2+}	.... NO_3^-
	Ca^{2+}	..... Cl^-
	Ba^{2+}	... . F^-
	Sr^{2+}	..... SO_4^{2-}
	Fe^{2+}	.... PO_4^{3-}
	Fe (tot)	..... S^{2-}
	Mn^{2+}	..... SiO_2 (غرواني)
	Boron	..... SiO_2 (قابل للذوبان)
	Al^{3+}	
أيونات أخرى		
.....		
TDS (بالقاعدة)		
TOC		
BOD		
COD		
AOC		
BDOC		
القلوية الكلية (m-value)		
قلوية الكربونايت (p-value)		
الصلابة الكلية.....		

العكر (NTU) .....
مؤشر كثافة الطمي (SDI) .....
البكتيريا (العدد/ملتر).....
الكلور الحر.....
ملاحظات.....
(الرائحة، واللون، والنشاط البيولوجي الخ) .....
تم التحليل من قبل .....
التاريخ..... .....

8.5. قائمة التدقيق لخطوات التشغيل

التالي هو نموذج من قائمة التدقيق لخطوات التشغيل كما موصى بها من قبل كتيب DOW التقني

التشغيل الجيد أساسي لعدم إضرار المحطة ومنع دخول مياه التغذية الغير مناسبة والتي قد تُفاقم مشكلة تكون الحشف أو حتى تؤدي إلى الإنسداد

(1) غسل قسم المعالجة المسبقة لشطف الحصى والملوثات الأخرى

(2) تفقد كل الصمامات للتأكد من أن الإعدادات صحيحة. افتح أداة التحكم بضغط التغذية وركز صمامات التحكم

(3) استعمل مياه بضغط منخفض وعلى معدل تدفق منخفض لإزالة الهواء خارج عناصر المحطة وخارج أنابيب الضغط. اغسل على مقياس ضغط 2-4 بار(الهواء داخل أنابيب الضغط قد يلحق الضرر بها في حالة زيادة الضغط بسرعة كبيرة) يجب تحويل كل تدفقات المحلول و المُركز نحو مصرف مناسب لجمع الأوساخ أثناء عملية الغسل

(4) افحص جميع توصيلات الأنابيب والصمامات من التسربات أثناء عملية الغسل

(5) بعد غسل المنظومة لمدة أقل من 30 دقيقة، أغلق صمام التحكم بضغط مياه التغذية

(6) تأكد من أن صمام التحكم بالمُركز مفتوح

(7) البدأ بصمام مغلق أو شبه مغلق قد يؤدي إلى استرداد فائض وبالتالي يؤدي إلى تكون القشور

(8) افتح ببطء و بدرجة صغيرة صمام التحكم بضغط التغذية (يجب أن يكون ضغط التغذية أقل من 4 بار)

(9) شغل مضخة الضغط المرتفع

(10) افتح ببطء صمام التحكم بضغط التغذية لتزيد ضغط التغذية ومعدل دفق التغذية نحو عناصر الغشاء حتى بلوغ تدفق المُركز حسب التصميم. يجب أن تكون الزيادة في ضغط التغذية أقل من 700 مليبار في الثانية لتحقيق التشغيل السلس. أكمل في تحويل كل تدفقات المحلول والمُركز نحو مصرف أوساخ ملائم للجمع.

(11) أغلق ببطء صمام التحكم بالمُركز لدرجة بلوغ نسبة تدفق المحلول على تدفق المُركز، النسبة يجب أن تكون حسب التصميم وألا تتعداها. راقب بإستمرار ضغط المنظومة للتأكد من عدم تخطيها الحد الأقصى للتصميم

(12) أعد الخطوات (9) و (10) لبلوغ تدفق المحلول والمُركز حسب التصميم

(13) احسب استرداد المنظومة وقارنها بتلك حسب التصميم

(14) تحقق من زيادة الكيميائيات أثناء عملية المعالجة المسبقة (الحمض، ومانع تكون الحشف وكبريت الصوديوم المتعدد في حال الاستخدام) احسب حموضة مياه التغذية

(15) تحقق من مؤشر لانجلير للتشبع (LSI) للمركز عبر حساب درجة الحموضة، والتوصيل، وتصلب الكالسيوم و المستويات القلوية وبعدها قم بالعمليات الحسابية الضرورية

(16) شغل المنظومة لمدة ساعة واحدة

(17) سجل القراءة الأولية لكل العناصرالفاعلة

(18) تحقق من توصيل المحلول من كل أنبوب ضغط للتأكد من أن كل الأنابيب تتوافق مع توقعات التشغيل (مثال، تحديد الأنابيب التي تشهد تسرب عند حلقات O أو التي تشهد أدلة أخرى على عدم العمل بطريقة صحيحة لإتخاذ الإجراءات التصحيحية المناسبة)

(19) بعد 24-48 ساعة من التشغيل، دقق في جميع المعطيات المسجلة في المحطة كضغط التغذية، والضغط التفاضلي، ودرجة الحرارة، والتدفق، والاسترداد والتوصيل. في نفس الوقت ارسم عينات من مياه التغذية، المُركز و المحلول لتحليل المحتوى.

(20) قارن عمل المنظومة بأرقام التصميم

(21) تأكد من العمل الصحيح لأدوات السلامة الميكانكية والتشغيلية

(22) حول تدفق المحلول من المصرف لموقع التشغيل الطبيعي

(23) اقفل المنظومة نحو الوضع الآلي

(24) استعمل معلومات التشغيل الأولية للمنظومة من الخطوة (16) حتى (18) كمراجع لتقييم العمل المستقبلي للمنظومة. احسب باستمرار عمل المنظومة خلال الأسبوع الأول من التشغيل للتأكد من العمل الجيد للمنظومة خلال هذه المرحلة الأولية الحرجة.

9. المراجع

1. Klinger, J., N. Goldscheider, and H. Hötzl, *SMART - IWRM*

Final Report Phase II. 2015, KIT: Scientific Reports.

2. Klinger, J., D. Riepl, H.-P. Wolff, I. Heinz, T. Rödiger, J. Guttman, S. Samhan, A. Tamimi, A. Subah, M. Sauter, R. Müller, S. Geyer, W. Ali, M. van Afferden, M.-Y. Lee, T. Liesch, H. Hötzl, and N. Goldscheider, *Challenges of Implementing IWRM in the Lower Jordan Valley*, in *Integrated Water Resources Management: Concept, Research and Implementation*, D. Borchardt, J.J. Bogardi, and R.B. Ibisch, Editors. 2016, Springer International Publishing: Cham. p. 749-777.

3. Tabieh, M., E. Al-Karablieh, A. Salman, H. Al-Qudah, A. Al-Rimawi, and T. Qtaishat, *Farmers' Ability to Pay for Irrigation Water in the Jordan Valley.* Journal of Water Resource and Protection, 2015. **07**(15): p. 1157-1173.

4. Qtaishat, T., E. Al-Karablieh, A. Salman, M. Tabieh, H. Al-Qudah, and N. Sader, *Economic Analysis of Brackish-Water Desalination Used for Irrigation in the Jordan Valley.* Desalination and Water Treatment, 2017. **72**: p. 13-21.

5. MWI, *National Water Strategy 2016 - 2025: Water Demand Management Policy*. 2016: Ministry of Water and Irrigation, Amman, Jordan.

6. Wenten, I.G. and Khoiruddin, *Reverse osmosis applications: Prospect and challenges.* Desalination, 2016. **391**: p. 112-125.

7. BoR, *Desalting Handbook for Planners*. 2003: United States Department of the Interior: Bureau of Reclamation

8. DOW, *Filmetech Reverse Osmosis Membranes: Technical Manual*. 2005: DOW Liquid Separations.

9. Voutchkov, N., *Pretreatment Technologies for Membrane Seawater Desalination*. 2008: Australian Water Association.

10. Shenvi, S.S., A.M. Isloor, and A.F. Ismail, *A review on RO membrane technology: Developments and challenges.* Desalination, 2015. **368**: p. 10-26.

11. Edzwald, J.K. and J. Haarhoff, *Seawater pretreatment for reverse osmosis: Chemistry, contaminants, and coagulation.* Water Research, 2011. **45**(17): p. 5428-5440.

12. Jamaly, S., N.N. Darwish, I. Ahmed, and S.W. Hasan, *A short review on reverse osmosis pretreatment technologies.* Desalination, 2014. **354**: p. 30-38.

13. Fritzmann, C., J. Löwenberg, T. Wintgens, and T. Melin, *State-of-the-art of reverse osmosis desalination.* Desalination, 2007. **216**(1–3): p. 1-76.

14. Shirazi, S., C.-J. Lin, and D. Chen, *Inorganic fouling of pressure-driven membrane processes — A critical review.* Desalination, 2010. **250**(1): p. 236-248.

15. Al-Amoudi, A.S., *Factors affecting natural organic matter (NOM) and scaling fouling in NF membranes: A review.* Desalination, 2010. **259**(1–3): p. 1-10.

16. Antony, A., J.H. Low, S. Gray, A.E. Childress, P. Le-Clech, and G. Leslie, *Scale formation and control in high pressure membrane water treatment systems: A review.* Journal of Membrane Science, 2011. **383**(1–2): p. 1-16.

17. Sweity, A., T.R. Zere, I. David, S. Bason, Y. Oren, Z. Ronen, and M. Herzberg, *Side effects of antiscalants on biofouling of reverse osmosis membranes in brackish water desalination.* Journal of Membrane Science, 2015. **481**: p. 172-187.

18. Voutchkov, N., *Overview of seawater concentrate disposal alternatives.* Desalination, 2011. **273**(1): p. 205-219.

19. Pérez-González, A., A.M. Urtiaga, R. Ibáñez, and I. Ortiz, *State of the art and review on the treatment technologies of water reverse osmosis concentrates.* Water Research, 2012. **46**(2): p. 267-283.

20. Mohamed, A.M.O., M. Maraqa, and J. Al Handhaly, *Impact of land disposal of reject brine from desalination plants on soil and groundwater.* Desalination, 2005. **182**(1): p. 411-433.

21. Shaffer, D.L., J.R. Werber, H. Jaramillo, S. Lin, and M. Elimelech, *Forward osmosis: Where are we now?* Desalination, 2015. **356**(0): p. 271-284.

22. Reig, M., S. Casas, O. Gibert, C. Valderrama, and J.L. Cortina, *Integration of nanofiltration and bipolar electrodialysis for valorization of seawater desalination brines: Production of drinking and waste water treatment chemicals.* Desalination, 2016. **382**: p. 13-20.

23. Liu, J., J. Yuan, Z. Ji, B. Wang, Y. Hao, and X. Guo, *Concentrating brine from seawater desalination process by nanofiltration–electrodialysis integrated membrane technology.* Desalination, 2016. **390**: p. 53-61.

24. Macedonio, F., L. Katzir, N. Geisma, S. Simone, E. Drioli, and J. Gilron, *Wind-Aided Intensified eVaporation (WAIV) and Membrane Crystallizer (MCr) integrated brackish water desalination process: Advantages and drawbacks.* Desalination, 2011. **273**(1): p. 127-135.

25. Zhou, D., L. Zhu, Y. Fu, M. Zhu, and L. Xue, *Development of lower cost seawater desalination processes using nanofiltration technologies — A review.* Desalination, 2015. **376**: p. 109-116.

26. Karagiannis, I.C. and P.G. Soldatos, *Water desalination cost literature: review and assessment.* Desalination, 2008. **223**(1–3): p. 448-456.

27. Valladares Linares, R., Z. Li, V. Yangali-Quintanilla, N. Ghaffour, G. Amy, T. Leiknes, and J.S. Vrouwenvelder, *Life cycle cost of a hybrid forward osmosis – low pressure reverse osmosis system for seawater desalination and wastewater recovery.* Water Research, 2016. **88**: p. 225-234.

28. Ruiz-García, A. and E. Ruiz-Saavedra, *80,000 h operational experience and performance analysis of a brackish water reverse osmosis desalination plant. Assessment of membrane replacement cost.* Desalination, 2015. **375**: p. 81-88.

Schriftenreihe des Lehrstuhls für Wasserchemie und Wassertechnologie und der DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

Band 35: Symposium on Refractory Organic Substances in the Environment – ROSE, 1997, 248 S., 12,80 €.

Band 36: Symposium on Refractory Organic Substances in the Environment – ROSE II, 2000, 265 S., 12,80 €.

Band 37: Thomas Brinkmann: Alkalischer und solarinduzierter Abbau von natürlicher organischer Materie, 2003, 212 S., 15,00 €.

Band 38: Andreas Gorenflo: Rückhalt und Fouling von natürlichen organischen Substanzen bei der Nano- und Ultrafiltration, 2003, 219 S., 18,00 €.

Band 39: Philip Hörsch: Einfluss der chemischen Oxidation auf das toxische Potenzial und das biologische Abbauverhalten von Industrieabwässern, 2004, 210 S., 20,00 €.

Band 40: Margit B. Müller: Bewertung von Anreicherungs- und Fraktionierungsverfahren für die strukturelle Charakterisierung der gelösten organischen Substanz in Gewässern, 2004, 185 S., 18,00 €.

Band 41: Fritz H. Frimmel, Gudrun Abbt-Braun: Praktikum Allgemeine Chemie und Chemie in wässrigen Lösungen – Qualitative und quantitative Bestimmungen, 2004, 158 S., 18,00 €.

Band 42: Tusnelda E. Doll: Photochemischer und photokatalytischer Abbau von Carbamazepin, Clofibrinsäure, Iomeprol und Iopromid, 2004, 158 S., 18,00 €.

Band 43: Ayşe B. Değer: Entfernung von organischen Schadstoffen aus Wasser mit Hilfe von Poly(ε-caprolacton), 2005, 205 S., 18,00 €.

Band 44: Fritz H. Frimmel, Gudrun Abbt-Braun: Wassertechnologisches und wasserchemisches Praktikum, 2005, 201 S., 20,00 €.

Band 45-I, 45-II: Fritz H. Frimmel, Gudrun Abbt-Braun (Eds.): Humic Substances – Linking Structure to Functions. Proceedings of the 13th Meeting of the International Humic Substances Society, July 30 to August 4, 2006, Universität Karlsruhe, 2006, 492 S. (45-I), 623 S. (45-II), 50,00 €.

Band 46: Fritz H. Frimmel, Gudrun Abbt-Braun: Praktikum Allgemeine Chemie und Chemie in wässrigen Lösungen – Qualitative und quantitative Bestimmungen II, 2. verbesserte und ergänzte Neuauflage 2007, 139 S., 20,00 €.

Band 47: Thomas Glauner: Aufbereitung von Schwimmbeckenwasser – Bildung und Nachweis von Desinfektionsnebenprodukten und ihre Minimierung mit Membran- und Oxidationsverfahren, 2007, 233 S., 20,00 €.

Band 48: George Metreveli: Kolloidale Wechselwirkungen und kolloidgetragener Transport von Metall(oid)en in porösen Medien, 2008, 215 S., 20,00 €.

Band 49: Florencia Saravia: Entfernung von organischen Spurenstoffen und Untersuchung von Foulingprozessen in getauchten Membranen und Hybridverfahren, 2009, 213 S., 20,00 €.

Band 50: Markus Delay: Dynamische versus statische Elutionsversuche – Ein Beitrag zur Beurteilung der Wiederverwertbarkeit von Abfallmaterialien, 2010, 206 S., 20,00 €.

Band 51: Luis A. Tercero Espinoza: Heterogeneous photocatalysis with titanium dioxide suspensions containing bromide and dissolved organic matter, 2010, 172 S., 20,00 €.

Band 52: Ulrich-M. Metzger: Extrazelluläre polymere Substanzen aus Biofilmen – Aufklärung von Strukturen und ihr Einfluss auf die Foulingbildung in Membranbioreaktoren, 2011, 211 S., 20,00 €.

Band 53: Fritz H. Frimmel, Gudrun Abbt-Braun: Praktikum Allgemeine Chemie und Chemie in wässrigen Lösungen – Qualitative und quantitative Bestimmungen, 3. überarbeitete Neuauflage 2011, 139 S., 20,00 €.

Band 54: Markus Ziegmann: Beurteilung von Cyanobakterienblüten und Untersuchung geeigneter Verfahrenskombinationen zur Elimination cyanobakterieller Zellen und Toxine, 2011, 191 S., 20,00 €.

Band 55: Fritz H. Frimmel, Gudrun Abbt-Braun: Praktikum Allgemeine Chemie und Chemie in wässrigen Lösungen – Qualitative und quantitative Bestimmungen, 4. ergänzte Neuauflage 2012, 137 S., 20,00 €.

Band 56: Angela Klüpfel: Nanofiltration bei der Aufbereitung von Trink- und Schwimmbeckenwasser – Foulingmechanismen und Rückhalt anthropogener Kontaminanten, 2012, 259 S., 20,00 €.

Band 57: Christina Schmalz: Bildung, Phasentransfer und Toxizität halogenierter Desinfektionsnebenprodukte im Aufbereitungszyklus von Schwimmbeckenwasser – Schwerpunkt stickstoffhaltige Verbindungen, 2012, 195 S., 20,00 €.

Band 58: Fritz H. Frimmel, Gudrun Abbt-Braun, Harald Horn: Praktikum Allgemeine Chemie und Chemie in wässrigen Lösungen – Qualitative und quantitative Bestimmungen, 5. ergänzte Neuauflage 2013, 120 S., 20,00 €.

Band 59: Heiko Schwegmann: Wechselwirkungen zwischen anorganischen Nanopartikeln und Mikroorganismen – Nutzungs- und Gefährdungspotentiale, 2013, 149 S., 20,00 €.

Band 60: Fritz H. Frimmel, Gudrun Abbt-Braun, Harald Horn: Praktikum Allgemeine Chemie und Chemie in wässrigen Lösungen – Qualitative und quantitative Bestimmungen, 6. Überarbeitete Neuauflage 2014, 129 S., 20,00 €.

Band 61: Carsten Jobelius: Anaerobe Metabolite organischer Schadstoffe im Grundwasser - Analytik, Bildung und Nutzung als Indikatoren, 2014, 247 S., 20,00 €.

Band 62: Eva M. Gilbert: Partielle Nitritation / Anammox bei niedrigen Temperaturen, 2014, 115 S., 20,00 €.

Band 63: Aleksandr O. Kondrakov: Heterogeneous photocatalysis and sensitized photolysis for enhanced degradation of bisphenol A and its analogues, 2015, 155 S., 20,00 €.

Band 64: Meijie Ren: TiO2: application in photocatalysis for the degradation of organic pollutants and aggregation behavior in aquatic systems, 2015, 121 S., 20,00 €.

Band 65: Fritz H. Frimmel, Gudrun Abbt-Braun, Harald Horn: Praktikum Allgemeine Chemie und Chemie in wässrigen Lösungen – Qualitative und quantitative Bestimmungen, 7. überarbeitete Neuauflage 2016, 126 S., 20,00 €.

Band 66: Chunyan Li: Using optical coherence tomography to quantify biofilm structure and mass transfer in combination with mathematical modeling, 2016, 121 S., 20,00 €.

Band 67: Maria Pia Herrling: Nanoparticles in biofilm systems – assessment of their interactions by magnetic susceptibility balance and magnetic resonance imaging, 2016, 132 S., 20,00 €.

Band 68: Elham Fatoorehchi: Sludge disintegration techniques – assessment of their impacts on solubilization of organic carbon and methane production, 2016, 116 S., 20,00 €.

Band 69: Norman Hack: Refraktäre organische Substanzen im Kapillarsaum: ihre Dynamik, Gradienten und Reaktionen, 2016, 152 S., 20,00 €.

Band 70: Di Peng: Disinfection by-products and the application potential of nanofiltration in swimming pool water treatment, 2016, 112 S., 20,00 €.

Band 71: Jueying Qian: Investigation of the fouling driving factors in drip irrigation systems, 2017, 112 S., 20,00 €.

Band 72: Florian Blauert: Investigating biofilm deformation using optical coherence tomography and fluid interaction simulation, 2017, 105 S., 20,00 €.

Band 73: Johannes Ruppert: Möglichkeiten der quantitativen Korrosionsvorhersage für Baustähle in Gewässern mittels einer elektrochemischen Messzelle, 2017, 202 S., 20,00 €.

Band 74-I (in Englisch), 74-II (in Arabisch): Oliver Jung: Handbook: Brackish Water Desalination In Water-Scarce Regions: The Jordan Valley, 2018, Auf Anfrage (Copy On Demand)

Preise verstehen sich zzgl. der gesetzlichen Mehrwertsteuer und Versandkosten.

Bestellungen über:

Lehrstuhl für Wasserchemie und Wassertechnologie und DVGW-Forschungsstelle

am Engler-Bunte-Institut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

Engler-Bunte-Ring 9

D-76131 Karlsruhe

Tel.: +49-(0)721-608-42581

Fax: +49-(0)721-608-46497

E-mail: ebi-sekretariat-wasserchemie@kit.edu