الفصل الثاني عشر

نظم التحكم في منسوب الماء الأرضي

جايمس ل. فوس (USDA-ARS، باتون روج، لويزيانا)
روبرت أ. إيفانز (جامعة ولاية كالورينا الشمالية رالي، كالورينا الشمالية)
جايمس إ. أيارز (USDA-ARS، كاليفورنيا)
إيفان ص. كريستن (منظمة الكومنولث للأبحاث الصناعية والزراعية (CSIRO) للأراضي والمياه، جريفيث، نيو ساوث ويلز، أستراليا)

ملخص: يتم تصميم وتركيب نظم إدارة المياه الزراعية للعمل على (١) تحسين إنتاج المحصول عن طريق التحكم في الفترات التي تكون فيها ظروف المياه زائدة أو بها نقص في منطقة الجذور، (٢) تحسين جودة مياه تصرف الصرف عن طريق التحكم في تدفقات الصرف لتقليل الفواقد الزراعية من أراضي المزرعة. والتحكم في تصرف الصرف تحت السطحي للحفاظ على منسوب الماء الأرضي أكثر ضحالة وتحديد تدفقات الصرف للخارج التي تم توضيحها لتقليل الفواقد السنوية في النيترات من أرض المحصول بقدر الإمكان بما يساوي ٥٠٪. إن تطوير نظام تحكم متكامل في منسوب الماء الأرضي يشمل تحديد ما إذا كان الموقع مناسباً، وعمق الصرف والمسافة بين المصارف، وإعداد خطة تركيب حقلية، والدمج بين مكونات تشغيل النظام في الصرف المتحكم به وأنماط الري التحتي. ولابد أن يسمح تصميم النظام بالتحكم في عمق

منسوب الماء الأرضي في قطاع التربة عبر مدى لازم لممارسات العمليات الزراعية حتى يتم اتباعها ولنمو المحاصيل، والمتطلبات التشغيلية لتقليل الفواقد الزراعية. ولابد أن تتضمن هذه الأهداف أيضاً الاستخدام الفعال للمياه الجوفية الضحلة التي يتم إمدادها من خلال تساقط الأمطار أو الري.

هناك عديد من الطرق المتاحة لتحديد عمق الصرف والمسافات بين المصارف المثلى للتصميم بالنسبة لإدارة منسوب الماء الأرضي. فالنمط التشغيلي للنظام، أي ما إذا كان هذا في الصرف تحت السطحي المألوف، أو الصرف المتحكم به، أو نمط الري التحتي، يمكن أن يختلف من يوم لآخر، ومن شهر لآخر، ومن عام لأخر. وفي معظم المواقع، ليس من الواضح ما إذا كانت أكبر احتياجات في تصميم النظام هي توفير إدارة صرف جيدة تحت ظروف منسوب الماء الأرضي الضحل، أو لتوفير ري تحت سطحي كاف أثناء الفترات الأكثر جفافاً. وبسبب تعقيد عوامل التصميم، لابد من استخدام منهج محاكاة النماذج لإجراء تحليل كامل ووضع تصميم نهائي لإدارة مياه الصرف أو نظام التحكم في منسوب الماء الأرضي، وللتنبؤ بأداء النظام عبر فترة من ٢٠ إلى ٣٠ عاماً بالنسبة للأجواء المناخية في موقع محدد.

إن نماذج المحاكاة باستخدام الحاسب الآلي مثل DRAINMOD يمكن استخدامها لتقييم خيارات تصميم النظام المتنوعة بالنسبة لموقع بعينه. ويمكن أن يعمل نموذج محاكاة طويل المدى (٢٠ إلى ٣٠ عاماً) على توفير تقييم جيد للأداء المتوقع للنظام. ويشمل نموذج المحاكاة DRAINMOD-NII روتيناً للقيام على نحو شامل بتقييم تأثير تصميم النظام والمعاملات التشغيلية على نقل أشكال متعددة من النيتروجين داخل قطاع التربة وفواقد الجريان السطحي والتدفق تحت السطحي، وهذا الإصدار من نموذج المحاكاة DRAINMOD يعد أداة هامة لتصميم نظم إدارة مياه الصرف، إلى جانب خطة تشغيل موسمية، لتلبية متطلبات جودة المياه الناتجة لقنوات تجميع المياه السطحية والمجمعات المائية.

إن تصميم نظام إدارة منسوب الماء الأرضي الأمثل يؤدي إلى تعظيم صافي الفائدة، والعمل على تقليل التأثيرات البيئية، ولابد أن يكون التصميم وإستراتيجية الإدارة هما الأفضل. ومن الممكن أن يكون النظام ملائماً من الناحية التقنية، ولكن لابد أن يكون القرار الأخير قائماً على ملاءمة النظام ليس فقط ليقوم بتغطية تكاليفه وإنما لجلب عائد ربح للمزارع مقابل استثماره، في الوقت الذي يعمل فيه على تقليل التأثيرات البيئية من خارج الموقع، وبالتالي، لابد أن يكون القرار النهائي الموصى به لتصميم ما قائماً على تقييم شامل للآثار الاقتصادية والبيئية.

الكلمات الأساسية: الكيماويات الزراعية، جاف، التحكم في الصرف، إدارة الصرف، نمط الصرف، التأثيرات البيئية، المياه الجوفية، الرطبة، الجريان السطحي، الملوحة، الري التحتي، الصرف تحت السطحي، الصرف السطحي، إدارة المياه، جودة المياه، منسوب الماء الأرضي، التحكم في منسوب الماء الأرضي.

(١٨,١) مقدمة

إن نظم الصرف الزراعية ونظم إدارة المياه المرتبطة بها والتي تعمل على التحكم في عمق منسوب الماء الأرضي كان يتم تركيبها من زمن طويل للعمل على الحد من العوامل المتعلقة بالمياه التي تقلل إنتاج المحصول، أو لتقليل هذه العوامل حتى مستويات مقبولة. وفي السنوات الأخيرة، أظهرت الأبحاث أن إدارة مياه الصرف تعمل على توفير الفرصة للتحكم في فاقد المواد الزراعية (الأسمدة المغذية ومبيدات الآفات) من أرض المحصول، حيث يتم حملها مع الجريان السطحي وتصرف الصرف تحت السطحي. وعلى سبيل المثال، فإن التحكم في تصرف الصرف تحت السطحي للحفاظ على منسوب ماء أرضي أكثر ضحالة، وللتحكم في تدفق الصرف للخارج يمكن أن يعمل على تقليل الفقد السنوي في النيترات بما يساوي ٥٠٪. وبالمثل، أوضحت نظم إدارة الصرف السطحي أنها تعمل على تقليل فقد الفوسفور في الجريان السطحي.

إن الانتباه في الآونة الأخيرة لنظم إدارة الصرف الزراعي[١] للتحكم في منسوب الماء الأرضي نتج من التلوث واسع الانتشار بالمغذيات (النيترات والفوسفور) الذي تسبب في نقص كمية الأكسجين في شمال خليج المكسيك (انظر على سبيل المثال، Rablais *et al.*, 1999). إن المصدر الرئيسي للتلوث ينتج من الأراضي الزراعية التي يتم تصريف مياهها في الوسط الغربي ونقله عبر نهر الميسيسيبي إلى الخليج. وفي ولايات غرب الولايات المتحدة التي يتم ريها، فإن هناك عناصر سامة مثل السيلينيوم يتم نقلها من خلال تدفقات الصرف إلى أماكن الحياة البرية، حيث يمكن أن تتراكم هذه العناصر حيوياً إلى مستويات سامة، وفي النهاية تتسبب في القضاء على كائنات الحياة البرية. ومن هنا، تعد نظم إدارة مياه الصرف بالنظم السطحية وتحت السطحية ضرورية للحد من التأثيرات البيئية على كل من أراضي المحاصيل التي يتم ريها بمياه الأمطار وبمياه الري.

وفي أراضي الغرب التي يتم ريها بمياه الري، فإن أهداف التحكم في منسوب الماء الأرضي هي تحسين جودة مياه الصرف المتصرفة (بدلالة المواد الزراعية والملوحة) وتحسين كفاءة استخدام مياه الري. ويتم تحقيق هذا عن طريق تشجيع استخدام مياه المحصول من منسوب الماء الأرضي وتقليل التدفقات المارة بالجوار إلى المصارف، حيث إن هذه التدفقات لا تساهم في نزح الأملاح والخسارة المباشرة لمياه الري. هناك وظيفة هامة أخرى للتحكم في منسوب الماء الأرضي وهي تحويل نظام الصرف تحت السطحي من طور الاستصلاح، عندما يكون نزح الأملاح من منطقة الجذور عند أعلى مستوياته، إلى طور الصيانة، عندما يكون من الممكن أن تعمل مستويات أقل من الصرف على الحفاظ على ملوحة مناسبة في منطقة الجذور.

---

(١) لقد تم تشكيل قوة مهمة نظم إدارة الصرف الزراعي التكاملية في عام ٢٠٠٢ للترويج لتطبيق إدارة مياه الصرف (الصرف المتحكم به) في ثماني ولايات من الوسط الغربي لتقليل فقد النيترات من أرض المحصول التي يتم تصريفها بنظام الصرف تحت السطحي والتي تسهم في زيادة حمل المادة المغذية بنهر الميسيسيبي ونقص الأكسجين بشمال خليج المكسيك، انظر فوسس وآخرين (2004) Fouss *et al.* وقم بزيارة الموقع: http://extension.osu.edu/usdasdru/ADS/ADMSindex.htm.

لابد أن يسمح تصميم النظام بالتحكم في عمق منسوب الماء الأرضي في قطاع التربة عبر المدى اللازم للعمليات الزراعية التي يجب اتباعها، والمحصول الذي يتم زراعته، والمتطلبات التشغيلية التي تعمل على تقليل الفواقد الزراعية. ويشمل التصميم المتكامل لنظام التحكم في منسوب الماء الأرضي تحديد مدى مناسبة الحقل (بما فيها المخرج الكافي)، وعمق المصارف والمسافات بينها، وقطر أنبوبة المصرف، وتخطيط المصرف وخطة التركيب، ومصدر المياه الكافي (إذا كان يتم استخدام نظام الري التحتي)، والطريقة أو التركيبات اللازمة لتشغيل النظام، وخطة المراقبة والتشغيل. ويعتمد التطبيق المقبول للتحكم في منسوب الماء الأرضي على التكاليف المطلوبة لنظام إدارة المياه بالنسبة للأرباح الاقتصادية والبيئية المتوقعة، مثل هذه الأرباح تختلف من عام لآخر مع كل من الأحوال الجوية والاقتصادية ويصعب قياسها بسبب العلاقات المتداخلة المعقدة لإنتاج المحصول والعمليات البيئية.

وبمعرفة المزيد عن نمو النبات والإنتاجية، وتفاعلات التربة-الآلة (مثل، قابلية انتقال الآلات الزراعية)، وملوحة التربة وعمليات الاستصلاح، والفواقد الزراعية في تدفقات الصرف، سوف يصبح من الممكن محاكاة عمليات إنتاج المحصول بأكملها، ومن بينها اختيار المحصول، والمناوبات، والتسميد. وهذا سوف يسمح بالتصميم الأمثل لنظام الإدارة لمنسوب الماء الأرضي بناءً على احتمال الربح والفوائد البيئية أو التأثيرات البيئية. وينقص هذه المعرفة في الوقت الحالي، يصبح من اللازم استخدام أهداف أكثر توسطاً أو تقليدية أكثر لنظم إدارة منسوب الماء الأرضي، ومثل هذه الأهداف من الأيسر قياسها وتكوّن بشكل عام الأساس لاختيار النظام والتصميم.

(١٨,٢) إدارة مياه التربة بالتحكم في منسوب الماء الأرضي

(١٨,٢,١) تطبيق نظم التحكم في منسوب الماء الأرضي

من الممكن وصف معايير أداء نظم إدارة منسوب الماء الأرضي بدلالة معاملات فردية عديدة، مثل قابلية انتقال الآلات الزراعية، والتحكم في ظروف مياه التربة

الزائدة والناقصة، والتحكم في الملوحة، وكفاءة الري التحتي، والتأثيرات البيئية خارج الموقع.

١- *معاملات الصرف التقليدية* : معاملات قابلية انتقال الآلات الزراعية في الحقل والتحكم في مياه التربة الزائدة كانت هي المعاملات المعتادة في المناطق التي يتم ريها بمياه الأمطار. والتركيز في الآونة الأخيرة على إدارة مياه الصرف (الصرف المتحكم به) لتقليل الفقد في المواد المغذية (وعلى وجه التحديد النيترات) في تصرف الصرف تحت السطحي قد تسبب في حدوث تحول في معاملات الأداء ليشمل تأثيرات جودة المياه للصرف تحت السطحي. وفي المناطق الجافة، كان التحكم في الملوحة معاملاً أساسياً وتقليدياً، وفي السنوات الأخيرة أصبحت المعاملات التي تتعلق بالتأثيرات البيئية هامة جداً. إن الاختلاف الرئيسي بين المعاملات الحالية والتقليدية هو أن التشغيل في وجود أنماط الصرف المتحكم بها وأنماط الري التحتي من الممكن أن يعقد أو يقلل قابلية النظام لتلبية متطلبات الصرف التقليدية ومازالت تلبي متطلبات حماية جودة المياه في كل من المناطق التي يتم ريها بمياه الأمطار والمناطق الجافة.

٢- *حالة نقص مياه-التربة* : في حين أن البلل هو الاهتمام الأكبر لمعظم مالكي الأراضي، إلا أن حالات الإنتاج في أنواع التربة رديئة الصرف في وجود مناسيب مياه أرضية ضحلة يتم تقليلها بشكل تبادلي في بعض الأحيان عن طريق حالات النقص في مياه-التربة أو حالات الإجهاد الناتجة عن الجفاف. إن وجود حالات المياه الجوفية الضحلة في منطقة الجذور تعمل في الغالب على تعزيز إجهاد النبات الذي تسبب فيه أحوال الزيادة المفرطة لمياه التربة. ولكن، يؤدي الاختلاف الزمني والمكاني لمياه الأمطار في كثير من المناطق الرطبة في حالات كثيرة إلى مياه تربة زائدة، وتقليل نمو المحصول مرتبط بهذا في بداية موسم النمو متبوعاً بنقص في مياه التربة في أواخر موسم النمو. إن إجهاد المياه الزائدة المبكر يعمل على تفاقم ظروف النقص في مياه الأمطار فيما بعد في أواخر الموسم ؛ لأن أعماق الجذور الضحلة التي يتسبب فيها وجود مناسيب المياه

المرتفعة في أوائل موسم النمو يمكن ألا تكون عميقة بدرجة كافية لنقل مياه تربة أكثر عمقاً لازمة للمحصول في أواخر الموسم. وقد أوضحت دراسات المحاكاة التي قام بها ساجز وتبريزي Skaggs and Tabrizi (1983) أن حالات الإجهاد الناتجة عن الجفاف عملت على تقليل إنتاج المحاصيل في أنواع التربة رديئة الصرف بكالورينا الشمالية بمتوسط يساوي ٢٢٪ بالرغم من أن متوسط سقوط المطر السنوي قد تجاوز ١٣٠٠ مم. ومن الممكن أن تزداد حالات الإجهاد الناتجة عن الجفاف من خلال نظم الصرف التي يكون هناك حاجة لها لزراعة هذه الأنواع من التربة التي بها منسوب مياه ضحل (Doty *et al.*, 1984, 1987; Skaggs and Tabrizi, 1983). إن آثار الصرف ونظم إدارة المياه المتعلقة بها على حالات الإجهاد الناتجة عن الجفاف والإنتاج لابد من أخذها في الاعتبار عند تصميم وتشغيل هذه النظم.

٣- *التحكم في الصرف* : تعتمد معايير أداء نمط التحكم في الصرف للتشغيل على ما إذا كانت الإمكانات موجودة كذلك لتوفير نمط الري التحتي. ومن الممكن تحقيق بعض الفوائد البسيطة بدلالة تقليل حالات نقص مياه التربة في بعض أنواع الترب عن طريق الحفاظ على، و"التحكم" في، أن يكون مستوى منسوب الماء الأرضي قريباً من عمق منطقة الجذور لضمان احتجاز مياه الأمطار في قطاع التربة لاستخدام المحصول. وهذا النمط من التحكم في الصرف يمكن أن يؤدي إلى حالات قصيرة المدى من زيادة مياه التربة في منطقة الجذور مباشرة بعد سقوط الأمطار للاستفادة من الإجهاد الناتج عن نقص مياه التربة الأقل فيما بعد. وإذا ظل منسوب الماء الأرضي مرتفعاً على مدى فترات ممتدة من الزمن أثناء الفترة الأولى لنمو المحصول، فإن جذور المحاصيل من الممكن ألا تنمو إلى العمق الكافي لمنع الإجهاد المترتب على هذا الناتج عن الجفاف في أواخر موسم النمو أثناء لفترات الممتدة التي يكون سقوط المطر فيها أقل من المستوى الطبيعي. ومن هنا، فلابد من تطوير خطة تشغيلية تأخذ في اعتبارها كمية سقوط المطر الموسمية والمتكررة لتحقيق الاتزان بين حالات نقص وزيادة مياه التربة عبر موسم النمو.

٤- *الري التحتي*: تشمل معايير الأداء لتشغيل الري التحتي التحكم في كل من حالات نقص وزيادة مياه التربة. وهذا يعني أن النظم التي يتم تصميمها للري تحت السطحي يجب كذلك أن يتم تصميمها لتعمل مع أنماط الصرف المتحكم بها وأنماط الصرف التقليدية لضمان ألا تتسبب حالات سقوط المطر في تقلبات شديدة لعمق منسوب الماء الأرضي في منطقة الجذور. ومن الممكن أن يكون الري التحتي هو معامل أداء التصميم الذي يحكم العملية حيث إن وجود مسافات بين الأنابيب تحت السطحية قريبة تكون في المعتاد مطلوبة لإمداد كمية مياه تحت سطحي كافية إلى قطاع التربة أكثر من المسافات الكبيرة بين الأنابيب المطلوبة لإزالة مياه التربة الزائدة من منطقة الجذور ومن قطاع التربة. وفي المناطق الأكثر رطوبة، فإن الصرف تحت السطحي الذي يلي تساقط الأمطار التي تحدث أثناء الري التحتي يكون هو في الغالب معامل أداء التصميم المتحكم في العملية. وحتى عندما يكون الري التحتي ممكناً اقتصادياً، فلن يكون بوسع كل المزارعين تركيب أنابيب الصرف في مكان قريب بدرجة كافية للتحديث المستقبلي للري تحت السطحي بسبب التكلفة المبدئية الأعلى بالنسبة للنظام المركب. ولابد أن يأخذ تصميم وتشغيل الري التحتي في الاعتبار التوازن بين توقيت وكمية حالات نقص وزيادة مياه التربة المشابهة للصرف المتحكم به.

٥- *التأثيرات البيئية خارج الموقع*: لقد تسببت مياه الصرف المتصرفة من الأراضي الزراعية التي تحتوي على نيترات النيتروجين في حدوث تأثيرات بيئية غير مرغوبة خارج الموقع على القنوات التي تصلها مياه صرف تلك الأراضي الزراعية. حدد رابااليز وآخرون (2002) Rabalais *et al.* تصريف النترات في مياه الصرف من الأراضي الزراعية في الوسط الغربي وولايات الوسط الغربي كالمصدر الرئيسي للنيترات التي يحملها نهر الميسيسيبي إلى المنطقة التي فيها نقص في الأكسجين (Rabalis *et al.*, 1999) شمال خليج المكسيك. وبدراسة هذه المشكلات على مقياس واسع لتعزيز وتطبيق الحلول التي تتضمن إدارة مياه الصرف، تم تشكيل مجموعة بحث نظم إدارة الصرف

الزراعي التكاملية في عام ٢٠٠٢ (Fouss *et al.*, 2004). والتحكم في تصرف الصرف تحت السطحي للحفاظ على منسوب ماء أرضي أكثر ضحالة والحد من تدفق الصرف للخارج أوضح أنه يعمل على تقليل الفقد السنوي في النيترات من أرض المحصول بما يساوي ٥٠٪ (Gilliam *et al.*, 1979; Evans *et al.*, 1995; Fausey *et al.*, 2004). وقد استنتجت مجموعة البحث أن ملاءمة ممارسات الإدارة الأفضل، وليس فقط إدارة مياه الصرف، سوف تكون مطلوبة لحل مشكلات جودة المياه عبر حوض نهر الميسيسيبي والخليج (Fouss and Appelboom, 2006).

(١٨,٢,٢) تقييم وملاءمة الموقع

هناك كثير من خواص التربة ومعاملات الموقع التي تؤثر على تصميم نظام إدارة منسوب الماء الأرضي. والخواص الهامة تشمل: معامل التوصيل الهيدروليكي الجانبي، وعمق الطبقة المحصورة، وخصائص التربة-المياه، والتدفق لأعلى والمسامية التي تقبل التصريف كدالة في عمق منسوب الماء الأرضي، وطبقات التربة، والتسرب، وعمق جذور المحصول، والتضاريسية، ومخرج الصرف المناسب. ويعد تصميم النظام أكثر حساسية لبعض المعاملات عن الأخرى، والبعض تكون أكثر صعوبة في القياس في الحقل أكثر من الأخرى، وبعض الخواص تكون متغيرة أكثر من الناحية المكانية عن الأخرى. وليس عملياً بشكل عام أن يتم قياس كل معاملات التربة والموقع الهامة في الحقل في كل موقع محتمل. فالخواص التي يتم بشكل عام ممارستها لقياس كل معاملات التربة والموقع الهامة في الحقل هي معامل التوصيل الهيدروليكي (تأثير الحقل)، وخصائص التربة-المياه، عمق وسمك طبقات التربة الأفقية، وعمق الطبقة المحصورة. ويعد معامل التوصيل الهيدروليكي الجانبي في حالة التشبع واحداً من أكثر العوامل أهمية والذي يؤثر على تصميم النظام (Skaggs, 1980, 1981) ويعد أيضاً واحداً من أكثر الخواص المتغيرة المكانية في الحقل (Tabrizi and Skaggs, 1983; Rogers and Fouss, 1989; and Rogers *et al.*, 1991). وبالتالي، لابد من بذل جهد

لحساب قيم معامل التوصيل الهيدروليكي الفعال الممثل للحقل لكل موقع. ويمكن حساب المسامية المصرفة من بيانات خصائص التربة–المياه، عندما تكون متاحة. ويعد تصميم النظام حساساً كذلك للتدفق لأعلى كدالة في عمق منسوب الماء الأرضي (Skaggs, 1980)، وهذه العلاقة يتم تقديرها في العادة من حلول الحالة الثابتة، والتي تتطلب فهم دالة معامل التوصيل الهيدروليكي. ويمكن كذلك تقدير المسامية المصرفة والتسرب من خصائص التربة–المياه ومن فهم دالة معامل التوصيل الهيدروليكي في التربة غير المشبعة.

وتعتمد جدوى الري التحتي في موقع محدد على المصدر، والتكلفة، والاعتماد على مصدر المياه. وقد قام إيفانز وآخرون Evans *et al.* (1988a) بمناقشة أنواع كثيرة من مصادر المياه والاعتماد المرتبط بها والتكلفة في حالة الري التحتي. ويجب كذلك تحديد فواقد التسرب المحتمل. ففي أنواع التربة رديئة التصرف والتي لها حد حاصر (طبقة حاصرة) في القطاع الجانبي، فمن الطبيعي أن تكون الفواقد الرأسية صغيرة. ففواقد التسرب الجانبية، من ناحية أخرى، يمكن أن تستهلك ما يزيد على ٢٥٪ من سعة الضخ في بعض الحالات. ويمكن تقليل فواقد التسرب الجانبي باستخدام التصميم، والتخطيط، والإدارة الجيدة للنظام. ومتى كان الأمر ممكناً، فلابد من عمل ترع إمداد المياه بالقرب من منتصف الحقول التي يتم ريها بنظم الري التحتي بدلاً من أن يتم وضعها على حدود الحقل. ويجب كذلك أن يتم تجهيز القنوات الواقعة على حدود الحقل وترع المخرج بأبنية تحكم. وعندما لا يكون من الممكن التحكم في فواقد التسرب، فمن الضروري أن يتم حساب طول حد التسرب، والميل الهيدروليكي، ومعامل التوصيل الهيدروليكي على امتداد الحد. وقد قام ساجز Skaggs (1980) بوصف طرق لتقدير فواقد التسرب تحت ظروف الحالة المستقرة، مع أمثلة محددة حول كيفية تقريب فواقد التسرب إلى المصارف والقنوات القريبة، المجاورة للحقول التي لم يتم تصريفها، والتسرب الرأسي أو العميق.

وغالباً، يمكن أن يقوم مهندس يتمتع بالخبرة بتحديد مدى ملاءمة الموقع المحتمل لإدارة منسوب الماء الأرضي عن طريق عمل تحريات حول مواقع مماثلة. فوجود ستة شروط للموقع العام (مناقشة لاحقاً) سوف يوضح في العادة ما إذا كانت إدارة منسوب الماء الأرضي مجدية أو عملية أم لا.

١- *فوائد الصرف للموقع*: بالنسبة للتربة الموجودة في المناطق الجافة من شرق الولايات المتحدة، فإن إدارة منسوب الماء الأرضي تعد أمراً عملياً فقط في المواقع التي سوف تستفيد من الصرف تحت السطحي المحسن. وحيث لا يكون هناك حاجة للصرف تحت السطحي في ظل الظروف الطبيعية، كما في التربة التي تفتقر للمياه الجوفية الضحلة (تربة وافرة الرطوبة)، فإن تلبية احتياجات الري يتم عادةً في أكثر الأحوال فاعلية عن طريق نظم إضافة المياه بالطرق السطحية (مثل، الري بالخطوط، أو بالرش، أو بالتنقيط). وسوف يظهر تقرير مسح التربة أحوال الصرف الطبيعية لسلسلة محددة من أنواع التربة. ويتم تصنيف التربة على أنها رديئة الصرف بعض الشيء، أو رديئة الصرف، أو رديئة الصرف بدرجة شديدة مما سيعمل عادةً على الاستفادة من الصرف الصناعي والتي تعد مرشحة لإدارة مستوى الماء الأرضي.

٢- *التضاريسية*: إن التربة التي تدعم نظم إدارة مستوى الماء الأرضي تكون في العادة مسطحة نسبياً. فعلى سبيل المثال، فإن التربة رديئة الصرف والتي توجد في السهول الساحلية بالجنوب الشرقي، ومنطقة البحيرات العظمى في الوسط الغربي، والغابات الممتدة بفلوريدا، ودلتا نهر الميسيسيبي نادراً ما تشغل قطاعات أرضية على منحدرات تزيد على ٢٪. وفي الحقيقة، فقد تم تركيب قليل جداً من النظم على منحدرات تزيد عن ٠,٥٪. وعندما يقترب الميل إلى ١٪، فإن عدد وتكلفة أبنية التحكم للحفاظ على عمق مستوى ماء أرضي داخل مدى مرغوب لمحصول بعينه يصبح محظوراً من الناحية الاقتصادية. ويمكن أن تتحمل محاصيل الحبوب عادة مدى من عمق منسوب الماء الأرضي من ٠,٣٠ م إلى ٠,٤٥ م، بينما يمكن أن تتحمل محاصيل

الخضروات ضحلة الجذور فقط تقلباً في منسوب الماء الأرضي يساوي من ٠,١٥ م إلى ٠,٢٠ م بدون إظهار علامات إجهاد المياه خلال فترات الجفاف. وحينئذ يكون هناك حاجة لبناء التحكم لكل تغير في ارتفاع سطح الأرض المناظر لمدى منسوب الماء الأرضي المطلوب لهذا المحصول. ومن وجهة النظر الفيزيائية، فإن أقصى انحدار يمكن تحمله يميل إلى أن يكون خاصاً بالموقع ومرتبطاً بمعامل التوصيل الهيدروليكي. وعلى منحدرات تزيد عن ٢٪، يصبح من الصعب الحفاظ على عمق منسوب مياه منتظم بسبب التسرب الجانبي عندما يتجاوز معامل التوصيل الهيدروليكي ٠,٥ م/اليوم (٠,٧ بوصة/الساعة). وفي المقابل، فعند معامل التوصيل الهيدروليكي أقل، تصبح تكلفة المسافات بين المصارف الأقرب لبعضها مانعة. وبشكل عام، فإن المعامل المحدد بالنسبة للميل سوف يكون الاقتصاديات أكثر من ظروف الميل الطبيعي.

٣- *معامل التوصيل الهيدروليكي*: إن معامل التوصيل الهيدروليكي هو معامل التربة الأكثر أهمية الذي يؤثر على الجدوى الاقتصادية لنظام إدارة مستوى الماء الأرضي. وبالنسبة لعمليات التخطيط التمهيدية، يمكن تقدير معامل التوصيل الهيدروليكي من القيم المسجلة في تقارير مسح التربة. وكما مع الميل، فإن قيم معامل التوصيل الهيدروليكي المانعة تكون دالة في الاقتصاديات أكثر من القيود الفيزيائية في تصميم وتشغيل النظام. وسوف يحدد إلى حد كبير معامل التوصيل الهيدروليكي المحدد لموقع بعينه قيم المحصول الزائد التي يتم الحصول عليها، أو القيم المحتملة لقيم الإنتاج العالية التي يتم الحصول عليها باستمرار عاماً بعد عام.

٤- *الطبقة الصماء ومنسوب الماء الأرضي الضحل الموسمي*: في المواقع المحتملة نمطياً توجد عند عمق ما من قطاع التربة، والذي يمنع فواقد التسرب الرأسية المفرطة. ويتم في الغالب مصادفة الطبقة الصماء فيما بين ١,٥م إلى ١٠م. وتزداد صعوبة تحديد موقع وجود الطبقة الغير منفذة (الطبقة الصماء) بشكل متزايد ببريمة حفر يدوية عندما يتجاوز عمقها ٣ م. ووجود منسوب الماء الأرضي الضحل الموسمي يعد عادة دليلا

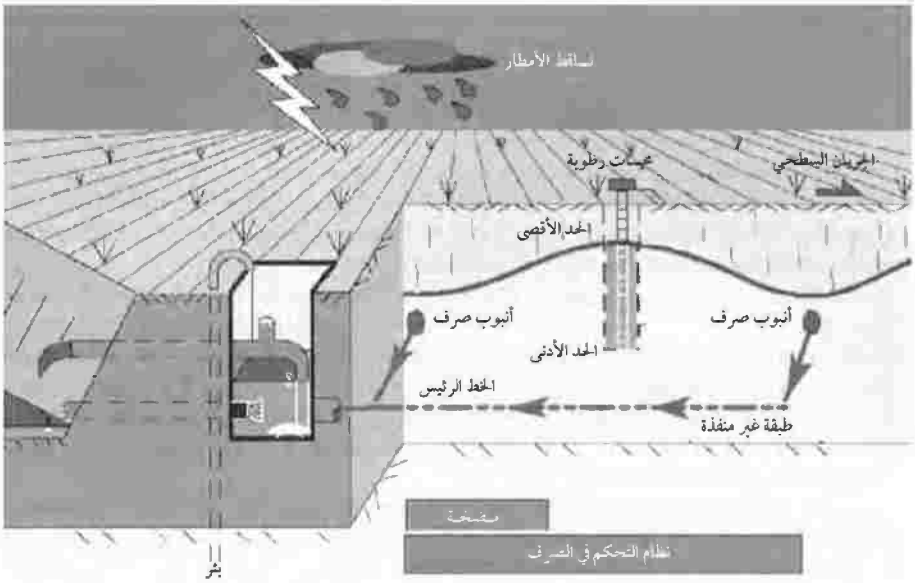
كافياً لإيضاح أن منسوب الماء الأرضي يمكن الحفاظ عليه في موقع عند ارتفاع مناسب للري تحت السطحي، سواء كان من الممكن تحديد موقع الطبقة الصماء أم لا. وبالإضافة إلى ذلك فإن عمق المياه الجوفية الضحلة الموسمية يعد مؤشراً على الصرف السنوي للموقع.

ويمكن تقدير عمق منسوب الماء الأرضي الضحل الموسمي من مسح التربة أو عن طريق المراقبة في الحقل. وتوضح النقاط الملونة باللون الرمادي في قطاع التربة موضع منسوب الماء الأرضي الموسمي في ظل ظروف الصرف الطبيعية. وعندما تقع النقاط ذات اللون الرمادي عند مسافة ٠,٥ م من سطح التربة، فإن هذا الموقع يصير مرشحاً لتطبيق إدارة منسوب الماء الأرضي. وبزيادة مسافة موقع النقاط الرمادية حتى ١,٠ م، فإن هذا الموقع يكون مناسباً من الناحية الهامشية ومن الممكن أن يسبب التسرب الزائد مشكلة. وفي هذه الحالة، فلابد من حساب العمق الفعلي للحد الحاصر. فأنواع التربة التي تكون النقاط الرمادية فيها واقعة على مسافة أكبر من ١,٠ م من السطح هي التي يتم تصريفها بشكل طبيعي. وفي هذه الحالات، فإن الاستفادة من الصرف تحت السطحي سوف يكون عند أدناه وسوف يتم تعديل التحكم في منسوب الماء الأرضي على أساس المستفاد من الري التحتي وحده. وما لم يكن في الإمكان تدبر وجود حالة صرف طبيعية، فسوف يحدث التسرب المفرط ولكن يكون الموقع مناسباً إدارة منسوب الماء الأرضي.

٥- *متطلبات مصب الصرف*: عند تقييم احتمالية أي موقع لكونه مناسباً لنظام إدارة منسوب الماء الأرضي، فإن مصب الصرف يعد اعتباراً أساسياً. إن مخرج الصرف الذي سوف يزيل المياه السطحية وتحت السطحية الزائدة خلال فترة زمنية مقبولة (بشكل نمطي تكون ٢٤ ساعة) يجب أن يكون متاحاً. وعندما يكون هناك مخرج يعمل على أساس الجاذبية يوجد عند مخرج مجرى مائي أو قناة متاحاً، فإن مخرج الصرف يجب أن يكون على مسافة على الأقل ١,٢ م أقل من أدنى نقطة من سطح الأرض

بالنسبة للنظام. وعندما يكون هذا المخرج غير متاح أو غير ممكن الوجود، فمن الممكن القيام بإنشاء بناء للصرف (مثل، غرفة تفتيش أو محطة ضخ) ويتم ضخ تدفق الصرف إلى ارتفاع أعلى مما هو في حالة الصرف إلى قناة صرف موجودة أو تم إنشاؤها أو تستعمل بغرض التخزين ثم استخدام هذه المياه في وقت لاحق لأجل الري التحتي. وفي بعض الحالات يمكن أن يكون هناك حاجة لإنشاء غرفة تفتيش صرف فقط لأجل الصرف تحت السطحي، حيثما يكون تدفق الصرف المتاح بفعل الجاذبية موجوداً لأجل الجريان السطحي. وأحد الأمثلة على غرفة تفتيش مصب الصرف الذي يتم ضخه تحت السطحي موضح في الشكل رقم (١٨,١)، وهذا النظام موضح في تشغيل نموذج الصرف المتحكم به. وفي الحالات التي يكون من اللازم ضخ مياه الصرف، يصبح من المطلوب تخزين أكبر كمية ممكنة من مياه الصرف في بركة قريبة داخل المزرعة أو في خزان للمياه. وعند تخزين هذه المياه، فمن الممكن استخدامها في وقت لاحق أثناء موسم النمو لتلبية متطلبات الري التحتي، وفي الغالب بدون الحاجة إلى أن يتم ضخها مرة أخرى. وهذا النظام المخصص للصرف تحت السطحي-الري التحتي يتطلب عادة القيام بالضخ فقط في اتجاه واحد. ومثل هذه النظم يمكن أن تستخدم عادةً تدفق الجاذبية في النموذج المضاد.

٦- *متطلبات إمداد المياه:* إن الاعتمادية، وموقع، وكمية، وجودة مياه الري تعد اعتبارات حيوية في تقييم موقع إعداده للري التحتي. ويجب أن يتم وضع مصدر المياه في أقرب مكان ممكن لتقليل الفواقد الناتجة عن نقل المياه ولتقليل التكاليف. وسوف تختلف كمية المياه اللازمة للري التحتي بناءً على الطقس (تساقط المطر والبخر-نتح)، والمحصول الذي يتم ريه، وفقد المياه من الحقل عن طريق التسرب العميق والجانبي. ويمكن أن تتدرج متطلبات المياه من ٧٠ لتر/دقيقة/هكتار لأراض يتم ريها في الجنوب الشرقي من الولايات المتحدة إلى ٤٠ لتر/دقيقة/هكتار لأراض يتم ريها في الوسط الغربي الأكثر برودة وفي كندا.



الشكل رقم (١٨,١). نموذج للتحكم في الصرف والري التحتي عند تشغيل إدارة منسوب الماء الأرضي، التحكم في مستوى مصب المياه (غرفة التفتيش) يعتمد على التغذية الراجعة لعمق منسوب الماء الأرضي في الحقل.

وبمجرد أن يتم تحديد الملاءمة الفيزيائية لموقع لأجل استخدام إدارة منسوب الماء الأرضي، فلابد من القيام بتقدير تكلفة النظام ومناقشته مع مالك الأرض قبل تمضية مزيد من الوقت في التصميم. والتكلفة المتوسطة لكثير من مكونات النظام تكون متاحة عادةً من الهيئة المحلية للحفاظ على الموارد الطبيعية (NRCS)، أو هيئة الخدمة التوسعية التعاونية، أو مصنعي أنابيب الصرف، أو مقاولي الصرف في المنطقة. والتكاليف السائدة في النظام هي في العادة تكاليف أنابيب الصرف، وتركيب النظام، وإنشاء المخرج (إذا كان مخرج الجاذبية غير متاح)، وتكاليف إمداد المياه، وأجهزة التحكم في النظام. وإن أقطار أنابيب الصرف بالنسبة للخطوط الجانبية وخطوط التجميع الرئيسة

والمسافة بين المصارف يجب أن يتم تقديرها قبل حساب تكاليف الأنابيب والتركيب. وعند هذه المرحلة من عملية التصميم، فإنه يكفي أن يتم تقدير المسافات بين المصارف من القواعد المحلية الموجزة أو عن طريق الطرق المختصرة لأي من الصرف تحت السطحي (ومن بينه الصرف المتحكم به) أو الري التحتي، اعتماداً على أي البدائل هي المرغوبة أو الأكثر أهمية.

(١٨,٣) تصميم وتشغيل النظام في المناطق الرطبة

(١٨,٣,١) أهداف تصميم النظام

تشمل أهداف تصميم نظام التحكم في منسوب الماء الأرضي الأهداف التقليدية لنظم الصرف، بالإضافة إلى أهداف المحافظة على مياه التربة وتقليل حالات النقص في مياه التربة، إلى جانب تقليل فواقد الكيماويات الزراعية عند تصريف مياه الصرف. وهذه الأهداف تشمل:

- توفير ظروف يمكن تنقل المركبات الزراعية فيها أو يمكن العمل فيها؛ وبهذا يمكن القيام بعمليات الزراعة مثل، إعداد أماكن وضع البذور، والحراثة، والحصاد، بأسلوب زمني، وبدون تلف لقوام التربة.
- تقليل إجهاد النبات الذي يتسبب فيه حالات مياه التربة المفرطة.
- التحكم في ملوحة وقلوية التربة.
- تقليل أو إزالة إجهاد النبات الذي تتسبب فيه حالات النقص في مياه التربة.
- تقليل التأثيرات البيئية الضارة على خارج الموقع الناتجة عن فواقد الكيماويات الزراعية.
- الحفاظ والاستخدام الكفء للمياه المضافة عن طريق تساقط الأمطار، وبالتالي تقليل احتياجات مياه الري.
- صيانة بيئة مياه التربة، وبهذا فإن الممارسات الأخرى مثل الحفاظ على الحراثة، وبقايا ما بعد الحصاد، أو محاصيل التغطية، هي الأكثر فاعلية وفائدة.

وتعد الأهداف الثلاثة الأولى أهدافاً تقليدية بالنسبة لتصميم نظام الصرف. وللدمج بين الصرف المتحكم به أو الري التحتي، فمن الممكن الاهتمام بالأهداف الأخرى. والأهمية النسبية لهذه الأهداف تعتمد على الحالة، وتختلف من الناحية الموسمية من عام لآخر مع التربة، والمحصول، والموقع، والعوامل الكيماوية الحيوية. فعلى سبيل المثال، فإن شدة الصرف المطلوب لتوفير بيئة عمل على التربة للزراعة في الربيع يمكن أن تتسبب في التصريف الزائد وزيادة ظروف النقص في مياه التربة فيما بعد خلال موسم النمو. ويمكن تجنب هذا الموقف من خلال التصميم الملائم والإدارة الزمنية، بفرض أن مصمم النظام يأخذ في اعتباره على نحو سليم العوامل التي تتحكم في أداء النظام، ومن بينها الطبيعة المتغيرة لتساقط الأمطار. إن معلومات النشرة الجوية (مثل احتمال سقوط الأمطار) يمكن أن تصبح مدخلاً هاماً للتشغيل الزمني الفعلي لنظم إدارة المياه، وخاصة الإدارة المتكاملة للمياه والكيماويات الزراعية لتحسين جودة المياه.

ويمكن أن يكون هناك العديد من بدائل تصميم نظام إدارة المياه التي تعمل على تحقيق أهداف التصميم والمتطلبات البيئية. وما إذا كان سيعمل نظام ما أم لا على تحقيق الأهداف فهذا يعتمد على الموقع، والمحصول، وخواص التربة. وبالطبع فإن الأهداف نفسها يمكن أن تعتمد على إمكانيات الإدارة لدى المزارع المنفرد، والمعدات، والقوة البشرية المتاحة. فعلى سبيل المثال، يمكن أن يكون بعض المزارعين مهتمين فقط بالصرف المتحكم به ولا يشعرون أن إنفاق مزيد من التكاليف لأبنية الري التحتي يمكن أن يكون مبرراً لمغامرتهم في مزرعتهم. وفي تصميم النظام، مع هذا، لابد من أخذ التحول المستقبلي لنظام الصرف المتحكم به للتشغيل في نمط الري التحتي في الاعتبار.

(١٨,٣,٢) طرق التصميم

إن عمق المصرف عادة ما تحدده النفاذية النسبية لطبقات التربة، وعمق طبقات الصرف البطيء، وعمق المخرج، وقيود معدات التركيب، والمقاييس المحلية لميل وعمق المصرف. وعندما تسمح خصائص التربة والموقع بالمرونة في تحديد عمق

المصرف، فإن عمقاً بين ٠,٧٥ م و ١,٥ م سوف يكون العمق الأمثل عادةً. ولكن ومع التركيز الأخير على جودة المياه الناتجة من تدفق الصرف تحت السطحي، فإنه يُوصى (ADMS-TF, 2005) بأنه إذا أمكن يجب تجنب أعماق المصارف الأكبر من ١,٠ م (بدون وسائل تحكم في المخرج). والمصارف التي توضع على أعماق أكثر ضحالة، حتى بدون وجود وسائل تحكم في المخرج، تعمل على إزالة مياه أقل من قطاع التربة وبالتالي تقلل من الفواقد المحتملة للكيماويات الزراعية المضافة.

هناك العديد من الطرق المتاحة لتحديد المسافة المثلى بين المصارف في التصميم. فعلى أساس من حقل إلى حقل، سوف تعمل كل الطرق على توفير تقدير أفضل للمسافة بين المصارف المطلوبة إذا تم قياس معامل التوصيل الهيدروليكي المشبع والعمق إلى الطبقة المقيدة (الغير منفذة) في موقع محدد أكثر من التي يتم تقديرها من أعمال مسح التربة أو إرشادات الصرف المحلية. وإن تشغيل هذا النظام، سواء كان في نظام الصرف تحت السطحي التقليدي، أو الصرف الخاضع للتحكم، أو نمط الري التحتي، فإنه يختلف من يوم لآخر ومن عام لآخر. وهذا يزيد من تعقيد تصميم الصرف ونظم التحكم به ونظم الري التحتي. وفي معظم المواقع، ليس من الواضح ما إذا كان المطلب الأكبر في تصميم النظام هو توفير صرف جيد تحت منسوب المياه الجوفية الضحلة أو لتوفير ري تحت سطحي كاف لتلبية احتياجات البخر-نتح (ET) خلال الفترات الأكثر جفافاً. ولهذه الأسباب، فإننا نوصي أن يتم استخدام نهج نموذج المحاكاة للقيام بتحليل كامل ووضع التصميم النهائي لنظام إدارة منسوب الماء الأرضي، وللتنبؤ بأداء النظام على مدى ٢٠ إلى ٣٠ عاماً بالنسبة لظروف المناخ في الموقع. إن مناهج حل الحالة الثابتة، مثل حل هووقاودت مع استخدام معدلات صرف التصميم التي تم حسابها محلياً (Skaggs and Tabrizi, 1986) ، يمكن أن يتم استخدامها للحصول على تقدير أولي جيد نسبياً للمسافة بين المصارف المطلوبة في نموذج الصرف تحت السطحي المناسب. وعندما يتم تشغيله في نمط الصرف المتحكم به أو الري التحتي، فإنه يمكن

استخدام حلول الحالة الثابتة التي يقدمها إرنست (1975) Ernst. ويعمل برنامج الحاسب SI-DESIGN (Belcher *et al.*, 1933) على توفير تقدير سريع للمسافة بين المصارف المطلوبة لتدفق التصميم المفاجئ. وهذه التقديرات سوف تعمل على تقليل عدد محاولات المحاكاة اللازمة لتحديد المسافة المثلى بين المصارف. وبخلاف هذا، فإن مدى أكبر من المسافات بين المصارف، بدءاً من المسافات شديدة الضيق إلى المسافات الواسعة جداً، سوف يكون هناك حاجة لمحاولة القيام بها في عمليات محاكاة متتابعة لتحديد المسافة المثلى بين المصارف.

(١٨,٣,٢,١) نموذج نمط الصرف DRAINMOD

إن نموذج المحاكاة باستخدام الحاسب الآلي DRAINMOD (Skaggs, 1978, 1980; NRCS, 1994) يمثل أحد أكثر الطرق شمولية المتعلقة بالتصميم مع الربط بين نظام إدارة المياه وخواص التربة، والظروف المناخية، واحتياجات المحصول (وخاصة الذرة وفول الصويا)، وبدائل الإدارة (Fouss *et al.*, 1987a). وقد وضع النموذج تحديداً لأجل تحليل الصرف تحت السطحي، والصرف المتحكم به، ونظام الري التحتي، وهو يأخذ في اعتباره تأثير تسرب مياه الأمطار، والبخر- نتح، والجريان السطحي، والصرف أو الري التحتي، والتسرب على عمق منسوب الماء الأرضي. ويتجنب النموذج استخدام طرق الحساب الرقمية المعقدة والمستهلكة للوقت عن طريق استخدام تبسيط الافتراضات مثل وجود ظروف "المصارف إلى الوصول إلى الاتزان" مباشرة فوق منسوب الماء الأرضي. ويسمح هذا بقيام أجهزة الحاسب الشخصية أو أجهزة محطات العمل على إجراء أعمال المحاكاة لتقييم خيارات تصميم النظام العديدة. ومع هذا لم يكن المقصود من وراء استخدام نموذج DRAINMOD أن يتنبأ أو يحاكي التغيرات المؤقتة في عمق منسوب الماء الأرضي (أو شكله) التي يمكن أن تحدث مع وجود التغيرات الكبيرة أو المتكررة في منسوب مياه مخرج الصرف كما هو الحال مع نظم إدارة منسوب الماء الأرضي المتحكم بها (Fouss, 19885). ويمكن أن يتم استخدام

النموذج بشكل مرضٍ لتصميم النظم المتحكم بها بفرض أن التغيرات في منسوب مياه المخرج تكون غير متكررة. وكما هو الحال مع النظم التي يتم التحكم بها يدوياً، أو الصغيرة (مثلاً، ±٠,١٥ م) حيث تحدث التغيرات الآلية في منسوب مياه المخرج بشكل لا يزيد تكراره عن ٣ أيام فاصلة بينها. وهناك نماذج محاكاة أكثر تعقيداً متاحة لأن يقوم المصمم باستخدامها في تقييم أداء الأبنية المختارة أو خيارات التصميم في حالة التحكم الآلي الكامل لمستوى مياه المخرج (وخاصة مياه الصرف التي يتم ضخها من أبنية مخرج المستنقع)، انظر فويز ورجورز Fouss and Rogers (1992).

إن خطوات استخدام نموذج DRAINMOD هي إجراء سلسلة من عمليات المحاكاة بأسلوب منتظم للوصول إلى مسافة مثلى بين المصارف وأفضل موضع للهدار في حالة التحكم في منسوب مياه المخرج أثناء موسم النمو، كلها بيانات قام بتوثيقها نولت Nolte (1986)، وإيفانز وسكاجز Evans and Skaggs (1989)، وهيئة المحافظة على الموارد الطبيعية NRCS (1994). وهكذا فليس هناك مثال تفصيلي للتصميم معطى هنا. ويحتوي هذا الفصل على مختصر للنقاط الرئيسية ومناهج المحاكاة الإضافية الخاصة بنظم منسوب الماء الأرضي المتحكم بها. ويقترح إيفانز وسكاجز Evans and Skaggs (1989) أن المسافة بين المصارف الذي يتم حسابها من إحدى الطرق المختصرة، مثل معادلة إرنست Ernst (1975)، يمكن استخدامها كنقطة بداية. ويتم اختيار عمق هدار تقريبي ويتم إجراء عمليات المحاكاة على مدى من المسافات، على الأقل اثنان أقل واثنان أكبر من التقدير الأول. ويتم تمثيل الناتج النسبي بيانياً لتحديد المسافة التي تعطي أكبر إنتاجية. ويمكن إجراء عمليات محاكاة إضافية لثلاثة أو أكثر من أوضاع الهدارات بالنسبة لنظام الصرف المتحكم به وفترة تشغيل الري التحتي. وأعمال المحاكاة هذه توفر البيانات لأداء تقييم اقتصادي (Evans *et al.*, 1988b)، والمسافة بين المصارف وموضع الهدار التي تنتج أعلى صافي ربح ناتج يتم اختيارها على أنها معاملات التصميم النهائي. وبالنسبة لاختيار التصميم النهائي، فمن المقترح القيام

بخطوة تقييم إضافية، وهذا يتضمن القيام بأعمال المحاكاة حيثما يتغير زمن بدء الري التحتي (أي، رفع الهدار)، مثل، ابتداء ضخ الري مرتين إلى ثلاثة في الأسبوع بعد الزراعة في حالة محصول الذرة وتغيير زمن البدء من ٧ إلى ١٠ أيام حتى ظهور كيزان النبات. ويتضمن التقييم النهائي للتصميم استخدام المياه وتكلفة الضخ بالنسبة لأزمنة البدء المختلفة. ولا يشمل نموذج DRAINMOD تحليلات الأثر الاقتصادي أو البيئي، ولهذا فلابد من القيام بهذه التحليلات بشكل منفصل (انظر الجزء ١٨,٣,٣).

إن عمليات المحاكاة الأخرى للوصول إلى المسافة المثلى بين المصارف وكذلك أعماق التحكم في منسوب الماء الأرضي من المخرج (الارتفاعات) يمكن القيام بها بطريقة أسهل بعض الشيء باستخدام النموذج المعدل، DRAINMOD مع التحكم في التغذية الاسترجاعية (Fouss, 1985; Fouss *et al.*, 1989). وهذه النسخة من النموذج لديها روتين فرعي يعمل على القيام بتعديلات في المحاكاة بالنسبة لمستوى مياه المخرج (الهدار) عند بيانات سابقة الاختيار (مدخلات) ومستويات مسبقة التحديد، وعند مستويات مختلفة بناءً على كمية المطر المتساقط وعمق منسوب الماء الأرضي التي تمت مراقبتها في الحقل (أي، عمق منسوب الماء الأرضي عند نقطة المنتصف بين المصارف)، ولمستويات مياه المخرج التي يتم تعديلها بشكل دوري والتي تقوم على إشارات التغذية الاسترجاعية لعمق منسوب الماء الأرضي الذي تمت مراقبته. ولهذا النموذج تطبيق مباشر في تصميم واختيار الطريقة التشغيلية النهائية لنظام إدارة منسوب الماء الأرضي، وما تجدر ملاحظته هنا بسبب التطبيق المحتمل له في الوصول إلى المسافة بين المصارف النهائية للتصميم والخطوط الإرشادية للتحكم في منسوب مياه المخرج. ويقترح كل من فاوس (1985) Fouss وفاوس وآخرين (1990) Fouss *et al.* القيام بعمليات محاكاة تكميلية لتقييم أداء تصميم النظام الذي تم اختياره (العمق والمسافات بين المصارف) بالنسبة للأعوام الأكثر ترطيباً والأكثر جفافاً خلال فترة من ٣٠ عاماً، والقيام بمقارنة أداء الطرق المختلفة أو النظم المختلفة للتحكم في مستوى مياه المخرج.

وبالنسبة لمعظم النظم، فإن مستوى مياه المخرج يجب أن يتم إبقاؤه ثابتاً نسبياً عند ارتفاع مثالي ما إذا كان أداء النظام وكميات إنتاج المحصول مقبولة. مثل هذه الخطة التشغيلية المبسطة تعمل على تقليل الحاجة إلى التعديلات المتكررة أو لتحكم أكثر تعقيداً (أي، التحكم الآلي في التغذية الاسترجاعية) لمستوى مياه المخرج، وبالتالي تعمل على تقليل تكلفة النظام.

ويسمح نموذج DRAINMOD-NII (Youssef *et al.*, 2005) بأن يحتوي تقييم تصميم نظام الصرف على تحليل شامل لتأثير تصميم النظام والمعاملات التشغيلية على نقل الأشكال المختلفة من النيتروجين داخل قطاع التربة وفواقد الجريان السطحي وتدفق الصرف تحت السطحي. وهذه النسخة من نموذج DRAINMOD تعد أداة هامة لتصميم نظم إدارة مياه الصرف، إلى جانب خططهم التشغيلية، لتلبية متطلبات جودة المياه المترتبة عليهم. وليس لهذه النسخة تحكم آلي أو خيارات إدارة تشغيلية متحدة مع شفرة التشغيل، غير تلك التغيرات التشغيلية التي يتم القيام بها يدوياً (مثل، عمق هدار المخرج) في تواريخ محددة التي يمكن أن تكون مدخلات لنموذج المحاكاة. ويتم التخطيط لعمل نموذج معدل لنموذج DRAINMOD-NII ليشتمل على نظم خيارات الإدارة التشغيلية، ومن بينها التحكم الآلي.

(١٨,٣,٣) تخطيط النظام وترتيب المكونات

في حالة كل من الصرف المتحكم به أو الري التحتي، فإن هناك حاجة لوجود عمق ثابت نسبياً لمنسوب الماء الأرضي عبر جزء كبير من الموسم الزراعي. ولتحقيق هذا الأمر، يجب أن يتم تقسيم الحقل إلى مناطق حيث لا تختلف الارتفاعات السطحية أكثر من ٠,٣ إلى ٠,٤٥ م. وداخل كل منطقة، تقوم أنابيب جانبية على مسافات متساوية بنقل المياه إلى الأنابيب المجمعة والتي تقوم بتوصيل المياه إلى مخرج النظام. وفي حالة الري التحتي، فإن نفس هذه الأنابيب "المجمعة" تقوم بتسليم مياه الري إلى كل منطقة.

وإذا تم افتراض وجود تدفق في أنبوب ممتلئ كلياً بدون وجود ضغط، فإن معادلة مانننق تقوم بالربط بين خشونة الأنبوب، ومساحة التدفق، ونصف القطر الهيدروليكي، وخط الميل الهيدروليكي (HGL)، ومن الممكن أن يتم استخدامها على أنها المعادلة الأساسية لتحديد قطر الأنبوب. وفي حالة نظم الصرف المتحكم بها، فإنه يتم القيام بعمل الأنابيب المجمعة بالحجم الذي يتلاءم مع أقصى معدل تصرف هناك حاجة له لتحقيق الأداء الأمثل للنظام مع أخذ خط الميل الهيدروليكي (HGL) على أنه ميل قاع أنبوب التجميع. وفي حالة الري التحتي، فلابد من اختيار حجم الأنبوب في الغالب بحيث يتلاءم مع كل من أقصى معدل تصرف الذي يكون فيه خط الميل الهيدروليكي مساوياً لميل القاع وكذلك مع معدل الري التحتي عندما يتم استخدام خط الميل الهيدروليكي (HGL) كدالة في أوضاع الهدار أثناء القيام بالري التحتي.

وهناك عدد من وسائل المساعدة المتاحة في التصميم لتحديد حجم أنابيب التجميع. وهذه الوسائل تتخذ شكل الجداول، والرسائل العلمية، والقواعد الجانبية، وجداول العمل في الحاسب الآلي، وبرامج الحاسب الآلي، فعلى سبيل المثال، يمكن استخدام النموذج الرئيسي MAIN في تصميم SI-DESIGN (Belcher *et al.*, 1993) لتحديد الأقطار اللازمة لأنابيب التجميع الرئيسية والفرعية. ويقوم المستخدم بوصف تخطيط النظام عن طريق البيانات المدخلة المناسبة. ويقوم النموذج بحساب معاملات تصميم أنبوب التجميع مثل معامل التصرف، ومعدل الري التحتي، وعمق منسوب مياه الري التحتي، وعمق الأنبوب. ويمكن استخدام البيانات الناتجة من نمطي LSPACE وMAIN في نموذج COST لتقدير تكلفة تركيب النظام.

وتعد الخريطة التضاريسية والمفصلة أمراً ضرورياً للعمل على تحقيق التصميم السليم لنظام إدارة منسوب الماء الأرضي، وأثناء تشغيل النظام باستخدام الري التحتي، من الضروري أن يتم الحفاظ على المياه الجوفية الضحلة عند عمق منتظم نسبياً أسفل سطح التربة، وما لم تكن الأرض مسطحة تقريباً، فإن هذا يتطلب تقسيم الحقل إلى مناطق تحكم بمناسيب سطح منتظمة تقريباً.

وقد وصف بورنهام وبلشر Burnham and Belcher (1985) نظام المسح السطحي بالليزر الذي يساعد في تصميم وتخطيط نظم إدارة المياه. ويمكن استخدام مكونات معدات الليزر لعملية المسح الأرضي وكذلك للقيام بالتدريج الآلي والتحكم في عمق الماكينات التي تقوم بتركيب المصارف المغطاة أو القيام بتدريج الأرض (Kendrick-Peabody, 2004). وبالنسبة لعملية مسح الأرض فإن وحدة لاقط الليزر يتم تركيبها على عربة دفع بأربع عجلات ويتم قراءة مخارج ارتفاع اللاقط وتخزينها مباشرة عن طريق جهاز كمبيوتر متنقل خلال مرور العربة على كل نقطة من الشبكة يتم اختيارها بشكل مسبق. ويتم حساب عبور كل شبكة من خلال وحدة قياس التحرك على الأرض التي تكون متصلة بدائرة منطق بالحاسب الآلي أثناء تنقل العربة على امتداد الخطوط مسبقة الاختيار والتحديد في الحقل، مثلاً، حوالي ٣٠ م. وبشكل نمطي يمكن تغطية حقل مساحته ٣٢ هكتاراً (٨٠ أكراً) في ساعتين. وبعد انتهاء العمل في الحقل، يتم تحميل البيانات من جهاز الحاسب الآلي المتنقل ويتم جعلها برامج متاحة تجارياً والتي يتم استخدامها لرسم الخرائط التضاريسية-الكنتورية والصور ثلاثية الأبعاد للحقل، وهناك سطح تداخل إلكتروني بين التصميم والتركيب في طور التطوير. ومن المتوقع لنظام التحكم بالليزر الذي يتبع معدات التركيب سيكون قادراً على تنسيق عمل وتوجيه الماكينة أثناء التركيب، والتحكم في العمق والتدرج عن طريق استخدام البيانات التي تم تحميلها من جهاز التصميم. وحالياً تستخدم نظم تحديد الموقع العالمية المتاحة تجارياً (GPS) للحصول على بيانات مسح الحقل أثناء تركيب أنابيب الصرف.

وهناك حزم برامج متخصصة أخرى متاحة لمساعدة المهندسين في تطوير الخرائط التضاريسية، وتخطيط الصرف تحت السطحي ونظم التحكم في منسوب الماء الأرضي، وإعداد قائمة بالمواد اللازمة، وتقدير تكاليف المواد والتركيب. وتشمل أمثلة هذه البرامج برنامج SUBDRAIN (Bottcher *et al.*, 1984)، من جامعة كورنل، لتصميم الصرف تحت السطحي، وLANDDRAIN (Sands and Gaddis, 1985)، وبرنامج

التصميم بالاستعانة بالحاسب الآلي (CAD) لنظم الصرف تحت السطحي، باستخدام الخطوات الروتينية للحساب الآلي لحجم أنابيب الصرف. وفي كل الحالات، يجب أن يتم حساب المسافة بين المصارف بشكل مسبق باستخدام طرق أخرى. وهناك برنامج مصاحب، LANDIMPROVE (Sands and Gaddis, 1985)، متاح لتصميم برنامج تسوية وتدريج الأرض. وأخيراً، هناك الآن نظم مسح بالليزر قائمة على نظام تحديد المواقع العالمي GPS متاحة تجارياً لمساعدة المصمم أو المقاول في هذا الصدد (Grandia, 2002; Welch, 2002).[٢]

(١٨,٣,٤) الأهداف التشغيلية للنظام

لقد تم ذكر الأهداف العامة للتصميم وكذلك الأهداف التشغيلية لنظم إدارة منسوب الماء الأرضي في الأجزاء السابقة. فالأهداف التشغيلية المحددة لنظام إدارة منسوب الماء الأرضي يمكن أن تختلف مع المحصول، والتربة، والمناخ، وظروف التضاريس، ولكن الأهداف التالية تنطبق على معظم النظم المصممة للعمل في المناطق الرطبة:

- توفير ظروف تربة يمكن التنقل فيها والضرورية لإجراء العمليات الحقلية الزراعية في التوقيت المناسب، بدون التسبب في تلف قوام التربة (لاحظ أن تصريف قطاع التربة الذي يكون له عمق أكبر يمكن أن يمثل ضرورة خلال الزمن المطلوب للعمليات الحقلية).
- تقليل تكرار وفترة مياه التربة الزائدة في منطقة الجذور التي يتسبب في حدوثها تساقط الأمطار وكذلك تقليل فترات النقص في مياه التربة أثناء فترات الجفاف.
- منع التصرف الزائد لقطاع التربة، وبالتالي الحفاظ على منسوب الماء الأرضي عند عمق ضحل بصورة كافية يسمح بتوفير إمداد مياه كاف للتربة إلى منطقة جذور المحصول (وأيضاً تقليل الفواقد الزراعية في أي تصريف لمياه الصرف).

---

(٢) هناك ذكر لأسماء العلامات والشركات التجارية في هذه الدراسة للعمل على إفادة القارئ ولكن بدون ذكر موافقة أو تفضيل لأي من المنتجات التي ذكرتها USDA أو معاونوها.

• تقليل الحاجة إلى ضخ مياه الري التحتي من خلال الاستخدام الكفء لمياه الأمطار المتسربة.

وفي حالات التضاريس التي تتطلب الحاجة إلى وجود مخرج صرف تحت سطحي يعمل بالضخ (مثلاً، المخرج الذي يعمل بالجاذبية غير متاح أو ممكن)، فإن تقليل متطلبات الضخ (الطاقة) بالنسبة لتدفق المصرف المغطى يمكن كذلك أن يكون هدفاً هاماً. وكما هو ملاحظ مما سبق، فإن المبادرة وتعزيز وتنفيذ تكنولوجيا إدارة مياه الصرف (الصرف المتحكم به) لتحسين جودة مياه تدفق الصرف يمكن فقط أن يكون بداية التغيرات في أهداف تصميم إدارة المياه. وفي المستقبل، يمكن أن يكون من اللازم وجود إدارة متكاملة للمياه، والأسمدة، ومبيدات الآفات لتحقيق والحفاظ على جودة مياه سطحية وجوفية مقبولة.

(١٨,٣,٥) اختيار وتصميم الطرق التشغيلية

يوجز هذا الجزء الطرق المتعددة التي وضعت لغرض مزدوج لتشغيل الصرف المتحكم به ونظم الري التحتي لإدارة منسوب الماء الأرضي. وفي حالة كل من التشغيل اليدوي والآلي لنظم إدارة منسوب الماء الأرضي، فلابد من فهم المبادئ الأساسية واتباعها للعمل على تحقيق الأهداف التشغيلية.

(١٨,٣,٥,١) التشغيل اليدوي

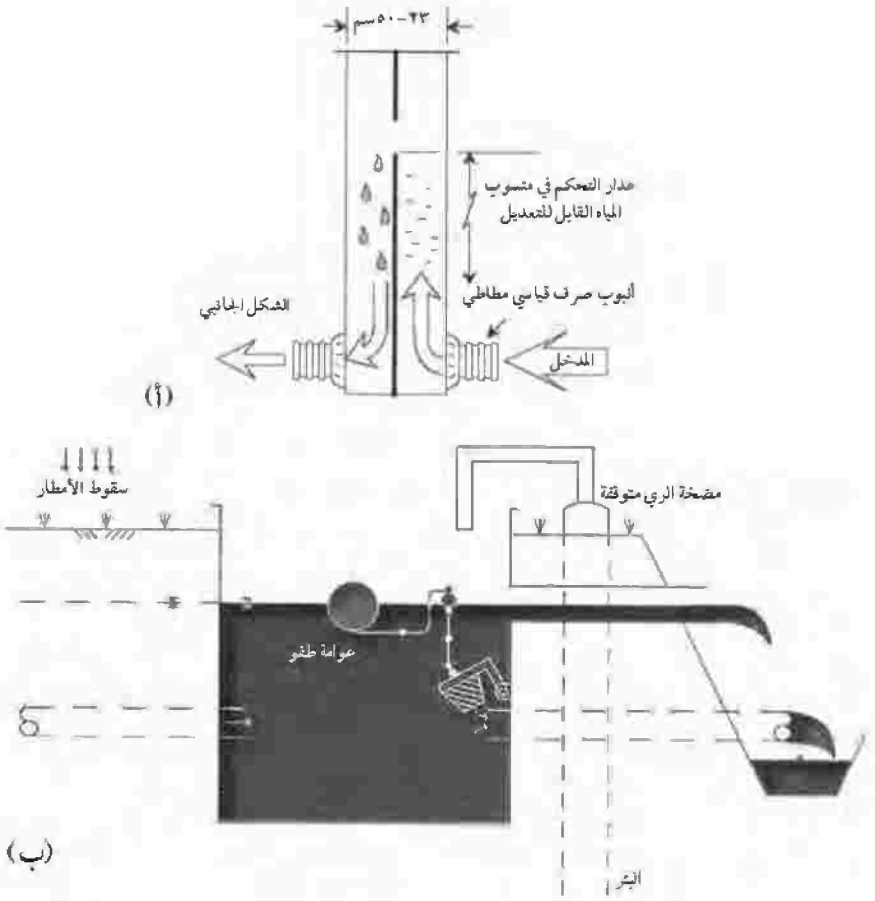
كثير من النظم ثنائية الغرض في المناطق الرطبة يتم تشغيلها يدوياً. ويتطلب التشغيل اليدوي السليم وجود مهارة لدى المزارع أو المدير والانتباه لردود فعل النظام وأداء النظام. وهناك حاجة للقيام بزيارات حقلية متكررة خلال الموسم الزراعي لمراقبة عمق منسوب الماء الأرضي.[٣]

---

(٣) يتم القياس بقياسات منسوب المياه يدوياً بشكل شائع في مشاهدات الآبار الصناعية ذات الأقطار الصغيرة، والأنابيب المموجة، والأنابيب البلاستيكية التي يتم تركيبها بشكل رأسي في الأرض عند منتصف المسافة بين خطوط أنابيب الصرف. وفي بعض أنواع الترب هناك حاجة للقيام بعمل ماص مرشح أو ردم بالرمال حول البئر. وفي المعتاد يتم استخدام أنبوب نفخ لقياس عمق منسوب المياه.

ويتم بصورة شائعة التحكم في معدل الصرف عن طريق الهدار الذي يتم ضبطه يدوياً عند مخرج المصرف في كل منطقة أو في قناة المخرج الرئيسية، أو في قنوات توصيل رئيسة أو فرعية، أو ربما في خطوط المصارف الفرعية المنفردة. وبناءً على حجم وطول قناة مخرج فردية تتحكم في المنطقة، فإن استجابة عمق منسوب الماء الأرضي في الحقل يمكن أن تكون بطيئة نسبياً (عدة ساعات) بسبب كمية المياه الكبيرة التي يجب إزالتها (صرفها) أو إضافتها (الري التحتي) لتغيير مستوى المياه في القناة، انظر الشكل رقم (١٨,٢)، وهناك أمثلة على أجهزة تحديد التدفق للخطوط الفرعية تحت السطحية أو الخطوط الرئيسة تحت السطحية موضحة في الشكل رقم (١٨,٣أ) ورقم (١٨,٣ب)، وتكون استجابة منسوب الماء الأرضي في الحقل باستخدام هذا النوع من وسيلة التحكم في مستوى مياه المخرج أسرع مما هو عند استخدام قناة مخرج.

الشكل رقم (١٨,٢). رافعة العارضة عند قمة الهدار من النوع الذي يتم استخدامه في المصرف المكشوف. ومن الممكن أن يكون هناك حاجة لفترة زمنية طويلة لرفع أو خفض منسوب الماء الأرضي في القناة طبقاً لحجم القناة.



الشكل رقم (١٨,٣). (أ) جهاز تحديد التدفق من نوع الهدار داخل أنبوب صرف أو أنبوب رفع فرعية، و(ب) صمام التحكم في التدفق الذي ينشط بالطفو داخل أنبوب صرف أو أنبوب رفع فرعية.

وعند حدوث تساقط مفرط لمياه الأمطار، فإن مستوى المياه عند الهدار أو المخرج يمكن أن ينخفض إلى عمق المصرف ليسمح للنظام بأن يعمل في نمط الصرف تحت

السطحي المناسب إلى منسوب الماء الأرضي الأكثر انخفاضاً بسرعة أكبر. وللقيام بتشغيل النظام بطريقة يدوية، فإن خفض الهدار أو ضبط جهاز تحديد التدفق إلى وضع "الفتح الكامل" يتم تأجيله عادة إلى ما بعد العاصفة الممطرة، عندما تتواجد ظروف مياه التربة الزائدة بالفعل. ومن القرارات الرئيسة التي ترجع إلى المزارع فهي متى يقوم برفع أو إعادة تحديد مستوى مياه المخرج، والتأجيل لفترة طويلة يمكن أن يؤدي إلى التصريف الزائد من قطاع التربة، وعليه يتم تقليل الفواقد الزراعية المحتملة في تصريفات مياه التربة وتسارع الحاجة إلى الري إذا لم يعمل تساقط المطر اللاحق على إعادة مياه التربة المطلوبة إلى منطقة الجذور. وإذا انتظر المزارع إلى أن يتراجع منسوب الماء الأرضي المشاهد (المقاس) في منتصف الطريق بين المصارف إلى العمق السابق على العاصفة، فمن الممكن أن يحدث تصريف زائد لقطاع التربة، وخاصة في التربة ناعمة القوام. وخلال الفترات التي يكون هناك حاجة فيها إلى الري التحتي، فإنه يتم رفع هدار المخرج (يدوياً) ومن الممكن أن يتم ضخ مياه الري إلى تركيب هدار المخرج بشكل دوري عندما يكون هناك حاجة خلال ساعات مختارة كل يوم. ومن الممكن أن يتم استخدام صمام منشط بالطفو في خط مياه الري للحفاظ على مستوى المياه عند مستوى ثابت تقريباً تماماً أسفل ارتفاع تدفق الهدار. وإذا لم يكن إمداد مياه الري متاحاً، فإنه يتم رفع هدار التحكم في المخرج للتحكم في الصرف تحت السطحي ولاستبقاء مياه الأمطار في قطاع التربة إلى ارتفاع الهدار. وأي زيادة في مياه الأمطار تتدفق فوق الهدار المنضبط الوضع ويتراجع منسوب الماء الأرضي ببطء حتى ارتفاع الهدار.

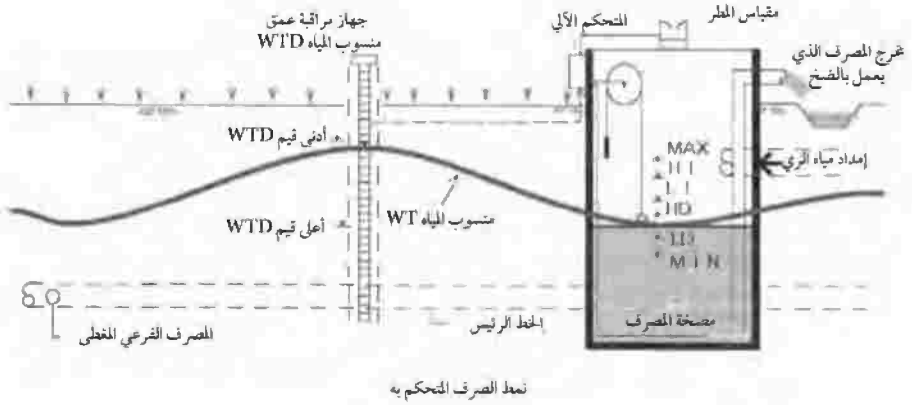
(١٨,٣,٥,٢) التشغيل الآلي

يعمل التشغيل الآلي للنظام ثنائي الغرض على توفير بديل لطرق إدارة النظام الذي يحتاج إلى عمالة مكثفة. فالتحكم الآلي للنظام يمكن أن يتخذ أشكالاً أو خيارات متعددة. فالتحكم الآلي بشكل كامل أو التحكم شبه الآلي لمستوى مياه المخرج، مع أو بدون التغذية الاسترجاعية لعمق منسوب الماء الأرضي المراقب في الحقل، سوف يسمح بأن يتم الحفاظ على منسوب مياه الحقل داخل حدود عمق مسبقة التحديد.

ولأغراض المناقشة هنا، من المفترض أن يتم توصيل أنابيب الصرف إلى بناء حوض تجميع للتحكم في مستوى مياه المخرج، ويمكن التحكم في مستوى المياه في الحوض المجمع أثناء دورة الصرف عن طريق الضخ من الحوض المجمع إلى قناة صرف سطحية (انظر الشكل رقم (١٨,١)). وأثناء الري التحتي، يتم الحفاظ على مستوى المياه في الحوض المجمع في إطار مدى مسبق التحديد عن طريق الضخ من مصدر خارجي مثل بئر ما. إن التحكم الآلي في مستوى مياه الحوض المجمع (SWL) للعمل على تنظيم التصرف تحت السطحي (أي، التصرف المتحكم به) والتدفق تحت السطحي إلى قطاع التربة يمكن أن يحتوي بشكل إضافي على خيارات مع أو بدون التغذية الاسترجاعية لعمق منسوب الماء الأرضي المراقب في الحقل (WTD) بين خطوط أنابيب الصرف. ومن المفضل أكثر بكثير وجود التحكم الآلي مع التغذية الاسترجاعية. وهناك شكل تخطيطي للقطاع العرضي لهيكل الحوض المجمع وجهاز الاستشعار WTD[٤] لمراقبة عمق منسوب الماء الأرضي في نمط الصرف المتحكم به للتشغيل موضح في الشكل رقم (١٨,٤)، وطريقة عملها هو تحويل نمط التشغيل بشكل آلي عن طريق وحدة التحكم في النظام من الصرف المتحكم به في الري التحتي، والعكس بالعكس، عند وجود حاجة للحفاظ على عمق منسوب الماء الأرضي SWL بين أقصى وأدنى ارتفاعات مستوى مياه محددة. وهناك ذكر موجز لمواصفات طرق التحكم المتنوعة موضح لاحقاً. وينبغي التأكيد هنا على أن الصرف فوق الزائد للحفاظ على أو لخفض منسوب الماء الأرضي سريع التغير إلى عمق ضحل أثناء أوقات سقوط الأمطار يمكن أن يؤدي إلى خسارة مفرطة في الكيماويات الزراعية في مياه الصرف المنصرفة. وهكذا، فهناك حاجة لاتباع الاتزان التشغيلي بين الصرف تحت السطحي المتحكم به وأنماط الري التحتي لمنع الفواقد الزراعية المفرطة قصيرة المدى في مياه الصرف (ADMS-TF, 2005).

---

(٤) قام كل من فويس وروجرز Fouss and Rogers (1992, 1998)، وفويس وآخرين Fouss *et al.* (1999) بعرض مناقشات مفصلة للأنواع المختلفة من أجهزة مراقبة عمق منسوب المياه (WTD) التي يمكن استخدامها في نظم التحكم الآلية.



الشكل رقم (١٨,٤). نمط الصرف المتحكم به لإدارة منسوب الماء الأرضي – الحوض المجمع المتحكم به. WTD= عمق منسوب الماء الأرضي، HI= أقصى ارتفاع ري، LI= أدنى ارتفاع ري، HD= أقصى ارتفاع صرف، LD= أدنى ارتفاع صرف لمياه الحوض المجمع.

تفعيل التحكم بمفتاح الطفو: يمكن إعداد اتحاد من أربعة من المفاتيح الكهربية التي تنشط بالطفو لتشغيل مضخات الصرف والري في بناء حوض مجمع للمخرج. ويمكن استخدام مفتاح مفرد ينشط بالطفو عند أقصى ارتفاع لمستوى مياه الحوض المجمع إلى تغيير تشغيل النظام من الري التحتي إلى الصرف المتحكم به. ويمكن استخدام مفتاح مفرد آخر ينشط بالطفو عند أدنى ارتفاع لمستوى مياه الحوض إلى تغيير تشغيل النظام من صرف متحكم به إلى ري تحت سطحي. ويمكن استخدام زوجين من المفاتيح التي تنشط بالطفو لتشغيل مضخة الصرف بين مستويات الحوض المجمع في حالة الصرف العالي (HD) والصرف المنخفض (LD). ويتم استخدام زوجين آخرين من المفاتيح التي تنشط بالطفو لتشغيل مضخة الري (أو الصمام) بين مستويات مياه الحوض المجمع بين الري المنخفض (LI) والري المرتفع (HI)، وهذا النوع من نمط

التحكم لا يتضمن التغذية الاسترجاعية الحقلية لعمق منسوب الماء الأرضي (WTD). وتتطلب ارتفاعات مفاتيح الطفو في المعتاد إعادة تحديد موضع عتبة السيطرة بطريقة يدوية لضبط الارتفاعات الحرجة للتحكم في مستوى مياه الحوض المجمع (SWL)، وهي أدنى ارتفاع لمستوى مياه الحوض (MIN)، والصرف المنخفض (LD)، والصرف العالي (HD)، والري المنخفض (LI) والري المرتفع (HI)، وأقصى ارتفاع لمستوى مياه الحوض المجمع (MAX) في الحوض. ويمكن كذلك القيام بتشغيل مضخات الصرف تحت السطحي ومضخات الري التحتي (أو الصمامات) عن طريق المفاتيح الكهربية اليدوية، إذا كانت هناك رغبة في هذا، وهذا يتم عادة القيام به بشكل دوري للتأكد من عمل مضخات الصرف ومضخات الري أو الصمامات.

نظم التحكم بوحدة المعالجة الدقيقة: وهذا النظام يتم التحكم به آلياً بالكامل. ففي نمط الصرف المتحكم به، وبدون التغذية الاسترجاعية لعمق منسوب الماء الأرضي في الحقل WTD، فإنه يتم الحفاظ على مستوى المياه في الحوض المجمع SWL والارتفاعين الحاليين HD وLD في الحوض المجمع (الشكل رقم ١٨,٤) عن طريق ضخ المياه من الحوض المجمع. والارتفاعان المرغوبان HD وLD (مستويي مفتاح الغلق/التشغيل الكهربي لمضخة الصرف) يمكن أن يتم تخزينهما كقيم برمجية في نظام يتم التحكم به باستخدام وحدة المعالجة الدقيقة. وعندما يتراجع تدفق الصرف تحت السطحي وتنخفض قيمة SWL إلى أدنى ارتفاع (من خلال التدفق تحت السطحي من الحوض المجمع)، فإنه يتم تحويل تشغيل النظام إلى وضع الري التحتي. ومع التغذية الاسترجاعية لعمق منسوب الماء الأرضي في الحقل، فإن هذا النظام سوف يقوم بتشغيل مضخة الصرف كما هو مذكور سابقاً للصرف المتحكم به بدون التغذية الاسترجاعية، إلا إذا كانت قيمة عمق الماء الأرضي WTD واقعة خارج مدى العمق المرغوب ($WTD_{min} \le WTD \le WTD_{max}$) خلال فترة ٢٤ ساعة الماضية (من منتصف الليل إلى منتصف الليل). وإذا كانت قيمة WTD واقعة خارج المدى، فإن ارتفاعات التحكم

الحرجة لمستوى المياه في الحوض المجمع SWL (MAX، وHI ، وLI ، وHD وLD، وMIN) يتم ضبطها أتوماتيكياً لقيمة أعلى أو أقل، أيهما كان مناسباً، عن طريق استخدام مقدار قدره Y مخزن في برنامج الحاسب الآلي في برنامج التحكم بوحدة المعالجة الدقيقة، على مدى فترة ٢٤ ساعة التالية. وبمجرد أن يعود عمق منسوب الماء الأرضي WTD إلى المدى المرغوب، يتحول تشغيل النظام إلى الري التحتي في أي لحظة ينخفض فيها مستوى المياه في الحوض المجمع SWL إلى أقل من أدنى ارتفاع.

وفي نمط الري التحتي، وبدون التحكم بالتغذية الاسترجاعية، يتم الحفاظ على قيمة مستوى المياه في الحوض المجمع SWL بين ارتفاع الري العالي وارتفاع الري المنخفض عن طريق الضخ إلى الحوض المجمع من بئر قريب. والنظام الذي يتم التحكم به بوحدة المعالجة الدقيقة، كما هو موصوف سابقاً بالنسبة لنمط الصرف المتحكم به، يمكن استخدامه لتشغيل مضخة بئر الري. فعندما يقل الري التحتي الذي يتدفق بفعل الجاذبية من الحوض المجمع مستوى المياه في الحوض SWL إلى ارتفاع الري المنخفض، فإن مضخة الري سوف تعمل لرفع مستوى المياه في الحوض المجمع SWL إلى ارتفاع الري العالي. ولا يتم مراقبة عمق منسوب الماء الأرضي WTD في هذا النمط. ومع وجود التغذية الاسترجاعية، فإن عمل الحوض المجمع هو نفسه عند القيام بالري السطحي بدون تغذية استرجاعية. فيما عدا أن ارتفاعات التحكم الحرجة في مستوى المياه في الحوض المجمع SWL يتم تعديلها كما هو مذكور أعلاه في حالة الصرف المتحكم به مع وجود التغذية الاسترجاعية، مهما كان عمق منسوب الماء الأرضي المراقب في الحقل WTD خارج المدى المرغوب في الفترة من منتصف الليل إلى منتصف الليل أي فترة ٢٤ساعة. ونفس معامل تعديل التغذية الاسترجاعية Y الذي يتم استخدامه لنمط الصرف المتحكم به من الممكن أن يتم استخدامه لنمط الري التحتي، أو من الممكن أن يتم اختيار معامل تعديل مختلف Z، إذا لزم الأمر. وسوف تعتمد قيمة كل من Y، وZ على تصميم النظام، وخصائص التربة، واستجابة منسوب الماء الأرضي، ... إلخ،

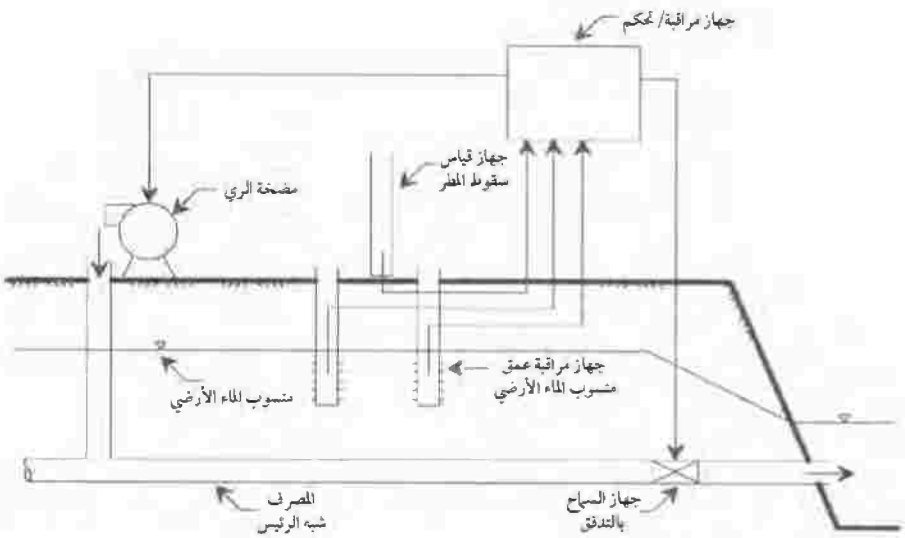
ولكن من المعتاد أن يتم وضع قيمة حوالي ١٠٪ إلى ١٥٪ من عمق المصرف. وإذا حدث تساقط للأمطار عندما يكون النظام يعمل في نمط الري التحتي، وتكونت كمية تراكمية تتجاوز النقطة الحرجة في فترة محددة من الزمن، فإن تشغيل النظام يمكن أن يتحول إلى نمط الصرف المتحكم به. وإذا لم يتجاوز سقوط الأمطار هذه النقطة الحرجة (التي تقوم على الخبرة في الموقع)، ولكن من الصعب أن يتسبب التسرب في حدوث صرف تحت سطحي إلى الحوض المجمع الذي يرفع مستوى المياه في الحوض المجمع SWL إلى أقصى ارتفاع، فإن تشغيل النظام سوف يتحول إلى نمط الصرف المتحكم به.

وقد سجل كل من فويس وروجرز Fouss and Rogers (1998)، وفويس وآخرين Fouss *et al.* (1995,1999) أحد الأمثلة على التشغيل الآلي بشكل تام للصرف المتحكم به ونظام الري التحتي للتحكم في منسوب الماء الأرضي، وهناك تفاصيل كاملة وضعها ويلز وآخرين Willis *et al.* (1991) حول التصميم وأهداف المشروع البحثي.

صمام الطفو شبه الآلي في نظم التدفق بالجاذبية: عندما يكون في الإمكان التدفق من المخرج بالجاذبية، فإن الطريقة البديلة للتحكم في مستوى المياه في الحوض المجمع في نمط الصرف تحت السطحي يمكن أن تتضمن صماماً ثنائي التنشيط بالطفو كالموضح في الشكل رقم (١٨,٣ب). فالطفو الأكبر يعمل على توفير طاقة كافية للإمساك بسدادة الأنبوب ومنعه من الانغلاق مرة أخرى إلى أن يتراجع مستوى المياه في الحوض المجمع إلى مستوى منخفض مسبق الإعداد. وآلية صمام مثل هذه تسمح بالتصرف تحت السطحي السريع أثناء حالات التدفق القصوى، والتي تعمل بشكل شبيه بالهدار ثنائي المرحلة الذي قام بوصفه فويس وآخرون Fouss *et al.* (1987b). وتسمح أنبوب التدفق الزائد في الحوض المجمع بالتصرف الكافي للتحكم في مستوى المياه في الحوض المجمع SWL أثناء حالات سقوط المطر الأقل عندما يكون التصرف السريع غير مطلوب؛ لأن حالات مياه التربة الزائدة تستمر فقط لفترات قصيرة من الزمن.

التشغيل الآلي لنظم التدفق بالجاذبية: في المناطق الرطبة، غالباً ما يكون للنظم ثنائية الغرض مناطق متعددة في الحقل مع قيام كل منطقة بإخراج مياه الصرف إلى مخرج رئيسي ويقوم المخرج الرئيسي بالتصريف عن طريق الجاذبية إلى قناة مفتوحة. إن القيام بجعل مثل هذه النظم آلية يتطلب تعديلاً بسيطاً للطرق المذكورة سابقاً بالنسبة لنظم المخرج التي تعمل بالضخ. وقد تم وضع نموذج محدد باستخدام الحاسب الآلي لنظام التشغيل الآلي، في جامعة ولاية ميتشجان (Belcher and Fehr, 1990). وهذا النظام قادر على تقليل تذبذب منسوب الماء الأرضي فوق أو أقل من الارتفاع المطلوب، مما ينبه من يقوم بالتشغيل إلى وجود مشكلات (مثل وجود مضخة لا تعمل)، وتوفير عرض بصري في المكتب (من خلال المودم والحاسب الشخصي) لما يحدث في الحقل، وتوفير القدرة للمستخدم أن يقوم بإدخال ارتفاع منسوب الماء الأرضي المطلوب في كل منطقة كدالة في الزمن، وتخزين بيانات التشغيل الصحيحة عبر الموسم الزراعي (أعماق منسوب الماء الأرضي، مدة الضخ، ... إلخ).

يقوم النظام باستخدام مياه الأمطار، وضخ الأنابيب تحت السطحية، والتغذية الاسترجاعية لمستوى منسوب الماء الأرضي المشاهد للتحكم في دورات الغلق/الفتح لمضخة الري. وعندما تمطر السماء، يقوم النظام بغلق مضخة الري ويعمل على تعديل جهاز التحكم في التدفق في كل منطقة عند الحاجة إلى إبقاء منسوب الماء الأرضي قرب العمق المرغوب. وعندما ينخفض منسوب الماء الأرضي إلى أقل من العمق المرغوب، يقوم النظام بتقييد تدفق الصرف ويعمل على تنشيط مضخة الري. ويسمح النظام لمن يقوم بتشغيل نظام الري التحتي بمراقبة وتعديل معاملات تشغيل الري التحتي من المكتب عن بعد من خلال الحاسب الشخصي والمودم. ويعد الشكل رقم (١٨,٥) رسماً تخطيطياً للنظام الآلي بالنسبة لمنطقة إدارة منسوب مياه مفردة. وقد قام ميتشجان بتصميم واختبار نظام له المقدرة على التعامل مع عدد من المناطق بلغ ١٦ منطقة (Belcher and Fehr, 1990).



الشكل رقم (١٨,٥). رسم تخطيطي لتحكم التغذية الاسترجاعية الآلي لتصرف الري التحتي بالجاذبية.

ولقد تم استخدام نوعين من أجهزة التحكم في التدفق في نظام التحكم الآلي هذا. الجهاز الأول يتكون من صمام غشاء حاجز يتم وضعه على الخط شبه الرئيسي. ويقوم جهاز التحكم بالتحكم في التدفق عن طريق انتفاخ الصمام والسماح للتدفق بتفريغ الصمام. والجهاز الثاني هو تعديل لبناء التحكم بالهدار الموضح في الشكل رقم (١٨,٣أ)، والذي فيه يتم إضافة موتور يعمل بالتيار الثابت لرفع أو خفض قاع لوحة الهدار للغلق أو للسماح بتدفق الصرف تحت السطحي. وهذا النوع من بناء التحكم بالهدار يعد متاحاً تجارياً، مثلاً، "نظام الصرف الذكي".(٥)

التحكم عن بعد: هناك ثلاثة أنواع عامة من التحكم عن بعد متاحة حالياً في نظم إدارة منسوب الماء الأرضي: التحكم بموجات الراديو أحادية أو ثنائية الاتجاه،

(٥) مؤسسة المصارف الزراعية، ١٤٦٢ الشارع ٣٤٠، أدير، للاستعلام ٥٠٠٢: info@agridrain.com.

والاتصالات الإلكترونية من الهواتف الخلوية، والاتصالات الرقمية من أجهزة الحاسب الشخصي وأجهزة المودم عبر خطوط الهاتف. وتعد الاتصالات من خلال القمر الصناعي مجدية اقتصادياً فقط في حالة المشروعات الكبيرة والتي تقع على مسافات بعيدة من مركز اتخاذ القرار. وسوف يكون التطبيق النمطي للتحكم عن بعد بهدف تغيير نمط التشغيل عند واحد أو أكثر من أبنية المخرج (الحوض المجمع)، على سبيل المثال، لإيقاف ضخ مياه الري التحتي و/أو للسماح بتصريف النظام قبل حدث سقوط مطر غزير متوقع (انظر لاحقاً حول استغلال التنبؤات الجوية). ويسمح الاتصال بموجات الراديو ثنائية الاتجاه بالتأكد من أن التغيير التشغيلي تم القيام به بالفعل عند مواقع بعيدة. وتسمح الاتصالات الإلكترونية من خلال الحاسب الشخصي وجهاز المودم إلى نظام التحكم بوحدة المعالجة الدقيقة لأبنية الحوض المجمع بالتحكم المعقد عن بعد، أو بتوفير الوسائل لتخطي نظام تحكم آلي. مثل هذا التحكم عن بعد أو تخطي التحكم يمكن أن يسمح للمدير بتغيير مستويات المياه في الحوض المجمع في حالة الصرف المتحكم به، والري التحتي، أو مستويات مفاتيح النمط الأخرى، فقط من خلال تغيير القيم المخزونة في برنامج وحدة المعالجة الدقيقة. ويسمح نظام التحكم بوحدة المعالجة الدقيقة أيضاً بمراقبة معاملات الموقع الحقلية، مثل عمق منسوب الماء الأرضي، وكميات سقوط المطر، أو نمط التشغيل من جهاز الحاسب الشخصي في مركز التحكم.

أنماط التحكم الموسمية في التشغيل: في المنطقة عالية الرطوبة بالولايات المتحدة وكندا، تعد إزالة مياه التربة الزائدة من الحقل هي الدور الأكثر أهمية للنظام. وظروف الجفاف في التربة التي توجد في هذه المناطق عادة ما تكون ذات طابع مؤقت، وبالتالي يعمل النظام في الصرف المتحكم به أو نمط الصرف تحت السطحي المناسب في غالبية الوقت. وعندما يكون هناك حاجة للصرف السريع، فإن بناء التحكم في مستوى مياه المخرج يجب أن يتم ضبطه عند عمق قناة الصرف تحت السطحي لتوفير أقصى معدل للصرف، ولابد من إدراك أن من الممكن أن يتسبب هذا في حدوث فواقد مفرطة

للكيماويات الزراعية المضافة من قطاع التربة في حين يتم السماح بحدوث الصرف السريع. وعندما تكون هناك حاجة للعمليات الحقلية التي تستلزم تحرك مركبات زراعية، فإن مستوى مياه المخرج يجب أن يتم الحفاظ عليه قريباً من أو أعلى قليلاً من عمق المصرف حتى بعد أن يتم زراعة المحصول. والممارسة التشغيلية الموصى بها أثناء فصول الشتاء (عدم الزراعة) هي الحفاظ على النظام في نمط الصرف المتحكم به للحفاظ على منسوب الماء الأرضي الضحل في قطاع التربة، والذي يعمل على تقليل فواقد النيترات لأن تدفق المصرف للخارج يقل، ومن الممكن أن تتطور منطقة لإعادة النيترة في طبقات التربة العليا (Gilliam *et al.*, 1979, 1999). وأثناء موسم النمو، ينبغي التحكم في مستوى مياه المخرج (من خلال واحدة من الطرق المذكورة سابقاً) للحفاظ على عمق منسوب مياه الحقل ضمن المدى المرغوب بالنسبة لمنطقة جذور المحصول لتوفير إمداد ثابت من المياه إلى جذور النباتات باستخدام التدفق لأعلى. وفي فترة من أسبوع لعشرة أيام قبل حصاد المحصول، لابد من أن يتم تقليل مستوى مياه المخرج مرة أخرى إلى مستوى قريب من أو أعلى قليلاً من عمق المصرف لتوفير ظروف نقل جيدة لنقل مركبات الحقل لأجل عمليات الحصاد، وللعمل على تقليل الأضرار التي تلحق بقوام التربة نتيجة لحركة الآلات الزراعية في الحقل. وبعد الحصاد، تتكرر الدورة السنوية للتشغيل والتحكم المذكورة سابقاً.

استخدام النشرات الجوية للمساعدة في الإدارة التشغيلية: في كثير من المناطق عالية الرطوبة في الولايات المتحدة، فإن الاحتمالية المتوقعة لسقوط المطر وكمية سقوط المطر المتوقعة يومياً في خدمة النشرات الجوية القومية (مثلاً، النشرات الجوية اليومية، والتي تتكرر كل ثلاثة أيام، وكل سبعة أيام) تصبح دقيقة بشكل كاف لتسمح بتعديل التشغيل من يوم لآخر لنظم إدارة منسوب الماء الأرضي، وللمساعدة في وضع جداول زمنية لإضافة الأسمدة ومبيدات الآفات (Fouss and Willis, 1994; Schneider and Garbrecht, 2006). ومن الممكن أن تكون أهداف الإدارة الأساسية هي تقليل حدوث حالات مياه التربة الزائدة، وفترة دوام حالات النقص في مياه التربة، وتحسين كفاءة

استخدام مياه الأمطار المستلمة، وزيادة فعالية الأسمدة ومبيدات الآفات المضافة، وتقليل احتمالية حدوث فواقد.

على سبيل المثال، إذا كان من المتوقع سقوط كميات كبيرة من الأمطار، فإن تشغيل النظام يمكن أن يتحول من الري التحتي إلى الصرف المتحكم به أو الصرف تحت السطحي التقليدي لعدة ساعات إلى يوم قبل حدوث المطر المتوقع. وكذلك، فبعد سقوط الأمطار وحالة الانحسار اللاحقة لمنسوب الماء الأرضي إلى العمق المرغوب، فإن إعادة بدء الري التحتي من الممكن تأجيله إذا كان من المتوقع سقوط كميات كبيرة من الأمطار مرة أخرى خلال اليومين إلى ثلاثة أيام التالية. ومن الممكن أن تختلف أدنى نسب الاحتمالية لحدوث هذه الحالات في مناطق جغرافية متنوعة بسبب دقة النشرات الجوية الإقليمية (Schneider and Garbrecht, 2006). وسوف يكون هناك حاجة لاستشارة خبير أو وجود خبرة لتحديد أدنى نسب الاحتمالية التي تنطبق على أفضل نحو في منطقة ما. فاستخدام النشرات الجوية للمساعدة في الإدارة التشغيلية يتلاءم على أفضل نحو مع المحاصيل عالية القيمة، مثل الخضروات، والمحاصيل الأكثر تضرراً بظروف التربة المبللة.

(١٨,٤) تصميم وتشغيل النظام في المناطق الجافة

(١٨,٤,١) ظروف المناخ المميزة

في المناطق عالية الرطوبة يكون مصدر المياه المستخدمة في نظم التحكم في منسوب الماء الأرضي إما المطر المتساقط الذي يتسرب خلال التربة، والذي يتم إبقاؤه عن طريق وسائل التحكم التي توجد في نظام الصرف، أو المياه التي يتم ضخها إلى نظام الصرف. إن الطبيعة العشوائية لتساقط الأمطار تجعل من الصعب، إن لم يكن من المستحيل، القيام بتحديد إتاحة مياه الأمطار في نظام تحكم في منسوب الماء الأرضي. وعندما يتم استخدام نظام الصرف للري تحت السطحي ويكون هناك مصدر متاح للمياه، فمن الممكن أن يتم ضخ المياه إلى نظام الصرف، عند الحاجة، للحفاظ على مستوى المياه. وفي هذه الحالة يكون مصدر المياه إما مجرى مائياً أو نهراً، أو مياهاً راكدة.

في المناطق الجافة وشبه الجافة يكون مصدر المياه الزائدة التي يتم استخدامها في نظام التحكم في منسوب الماء الأرضي هو بشكل عام التسرب العميق الناتج من الري على الحقل الذي يتم العمل فيه أو من التدفق الجانبي من حقل مجاور. وتكون كميات الأمطار في هذه المناطق بشكل عام محدودة وتضيف قليلاً من المياه إلى المياه الجوفية الضحلة. على سبيل المثال، يعد الجانب الغربي من واي سان جواكين منطقة شبه جافة، حيث يبلغ متوسط تساقط الأمطار بها ١٥٠ مم كل عام، ويحدث هذا عامة خلال فصول الشتاء. ويعد حدث سقوط المطر الذي يعطي في المتوسط ٥ مم أو أقل من المياه ليس بذي فاعلية في إمداد المياه سواء لاستخدام المحصول في فصل الشتاء أو للتسرب العميق. ومن الممكن أن يكون سقوط المطر أكثر أهمية في مناطق أخرى، مثل جنوب شرق أستراليا، مما يؤدي إلى تكوّن مناسيب ضحلة من المياه في فصل الشتاء أو بعد حالات سقوط المطر الغزيرة المتقطعة. وهذا يجعل إدارة الري أكثر صعوبة، ومن الممكن أن يساعد التحكم في منسوب الماء الأرضي في تحسين استخدام هذه المساهمات من تساقط الأمطار. وبشكل عام، فحيث إن تساقط الأمطار لا يعد مساهماً كبيراً في إمدادات المياه الإجمالية، فمن الممكن القيام بتقدير مدى توافر المياه الجوفية الضحلة بناءً على الاحتياجات المائية من تناوب المحاصيل وكفاءة وممارسات نظام الري.

(١٨,٤,٢) حالات المياه الجوفية الضحلة المميزة

تتأثر المياه الجوفية الضحلة بالطبيعة الجيولوجية للمنطقة وممارسات الري في الحقول المجاورة، بالإضافة إلى ممارسات الري في الحقل نفسه. وفي المناطق التي يغلب على التربة فيها الرواسب الطمية، فإن هناك في الغالب حزماً رملية أو مناطق في التربة لها معامل توصيل هيدروليكي عال تمر من الحقل إلى الحقل المجاور له عند أعماق أقل من ٢ م. وفي هذه الحالات، يتم نقل التسرب العميق في الحقول المجاورة إلى الحقل الذي يتم العمل به ويصبح التحكم في منسوب الماء الأرضي أكثر صعوبة بكثير. وفي المناطق عالية الرطوبة، تتميز حالات نوعية المياه الجوفية الضحلة بوجود الكيماويات الصناعية مثل النيترات، وعناصر الأسمدة الأخرى، ومبيدات الآفات. وفي المناطق

الجافة من الممكن أن تحتوي المياه الجوفية على الملح والعناصر النادرة، بالإضافة إلى الملوثات التي من صنع الإنسان، مما يجعل من الصعب القيام بتمييز أو تحديد نوعيتها.

سوف يتم في باقي هذا الجزء مناقشة تأثير الملح والعناصر النادرة في المياه الجوفية على إدارة المياه الجوفية الضحلة. وكثير من هذه الموضوعات تمت مناقشتها بتفصيل أكبر في موضع آخر من هذه الدراسة. ولكن، سيتم هنا عرض المفاهيم الرئيسية لوضع الأساس لمناقشة تصميم وإدارة نظم الصرف التي يتم استخدامها لإدارة منسوب الماء الأرضي في المناطق الجافة.

(١٨,٤,٢,١) ملوحة التربة

تشمل مصادر ملوحة مياه الري، الأسمدة، والمصادر الطبيعية مثل الملح المترسب من المحيط أثناء تكوّن التربة. وبغض النظر عن نقاوتها، فإن كل مياه الري تحتوي على الأملاح. فمياه الري التي يكون لها معامل توصيل كهربي قدره ٠,٣ ديسمنز/م تعد مناسبة للاستخدام مع كل المحاصيل، ولكن، حتى هذا النوع من مياه الري يحتوي على أملاح تساوي تقريباً ٢٠٠ مجم/لتر، والتي تتراكم في التربة خلال امتصاص المحاصيل للمياه.

في المناطق الجافة وشبه الجافة، من الشائع جداً أن تحتوي التربة على أملاح لها أصل جيولوجي، إن مادة الصخر الطيني الزيتي، وهي المادة الأصلية في التربة التي توجد في الوادي الكبير بولاية كلورادو، تحتوي على بلورات من الأملاح التي ترسبت أثناء الفترة التي تكونت فيها التربة تحت المحيط (Walker *et al.*, 1979). وقد تكونت التربة التي توجد على الجانب الغربي من وادي سان جواكين بكاليفورنيا من السلاسل الجبلية الساحلية، والرواسب البحرية، وكنتيجة لهذا فهي تحتوي على تركيزات عالية من الملح وبعض العناصر مثل البورون، والسيلنيوم، والزرنيخ، وغيرها من العناصر النادرة (Deverel and Fio, 1990). وفي جنوب شرق أستراليا فإن التخزين الضخم للأملاح التي تم العثور عليه في طبقات الأرض قد ترسبت عبر الزمن الجيولوجي من خلال الغبار ونقل مياه الأمطار (Herczeg *et al.*, 2001; Landaney-Bell and Acworth, 2002).

ويزداد تركيز الملح في التربة بشكل عام مع العمق في المناطق الجافة وشبه الجافة من الزراعة المروية. والتربة في المناطق المروية من جنوب شرق أستراليا وشبه الجافة في كثير من الأحيان تزداد الملوحة بها بمقدار ١٠ أضعاف بين عمق ٠,١ م و ٢ م (Hornbuckle and Christen, 1999). وفي التربة السطحية تتسرب الأملاح ويتم نقلها إلى عمق أسفلها، وبالتالي فإن تركيز الملح في التربة السطحية منخفض بما فيه الكفاية بحيث لا يتأثر سلباً إنبات البذور ولا نمو النبات في وقت مبكر.

إذا كان منسوب الماء الأرضي قريباً من سطح التربة، فمن الممكن أن يعمل البخر على نقل المياه والأملاح لأعلى من المياه الجوفية الضحلة المالحة وأن يعمل على تراكم الأملاح على سطح التربة. وعندما يقوم محصول ما باستخدام كميات كبيرة من المياه من المياه الجوفية الضحلة المالحة فإن الملح يتحرك مع المياه ويترسب في منطقة الجذور. وتعمل كلتا الحالتين على خلق قطاع ملوحة عكسي والذي فيه تقل ملوحة التربة مع العمق. وهذا النوع من القطاع يجب أن يتم التحكم به لمنع الآثار الضارة على إنبات البذور ونمو النبات. إن عملية الري السابقة على الزراعة أثناء فترة إراحة الأرض تعد واحدة من الطرق التي يتم توظيفها بشكل روتيني في وادي سان جواكين بكاليفورنيا للقيام بغسيل الأملاح واستعادة القطاع المالح قبل الزراعة.

(١٨,٤,٢,٢) الغسيل

يعد الغسيل مطلوباً للقيام بكل من الحفاظ على اتزان الأملاح في منطقة الجذور ومنع تكون قطاعات مالحة. وبفرض وجود إزاحة كبس وعدم مساهمة أي أملاح من المياه الجوفية، فإن أقل كمية مضافة من المياه اللازمة للحفاظ على الاتزان الملحي يُشار إليها باحتياجات الغسيل (L_r)، ويتم القيام بهذا بناءً على مدخل الملح وتحمل المحصول للملوحة وحجم الحد الأدنى من المياه التي يجب أن تمر خلال قطاع التربة للحفاظ على الاتزان الملحي. ويجب إضافة احتياجات غسيل الأملاح إلى احتياجات المحصول من المياه. ويمكن تقدير الاحتياجات الغسيلية من:

$$L_r = D_d^*/D_a = c_a/c_d^* \qquad (١٨,١)$$

حيث إن D_d يعادل العمق المار أسفل منطقة الجذور، و D_a العمق المناظر للإضافة (الري زائد المطر) (Hoffman, 1990)، و c_a متوسط التركيز الموزون للمياه المضافة، و c_d تركيز الملح في المياه التي تمر أسفل منطقة الجذور. وتتميز القيم المطلوبة مقابل القيم الفعلية عن طريق العلامة النجمية في الطباعة. وعندما يتم التحكم في منسوب الماء الأرضي لتوفير جزء من الاحتياجات المائية للمحصول، فإنه يكون هناك حاجة لتعديل قيمة c_a لتشمل ملوحة المياه الجوفية والنسبة المئوية للمياه التي يستهلكها المحصول (Fouss *et al.*, 1990).

وجزء الغسيل (L_r) هو كمية المياه الفعلية التي تمر عبر التربة بدلاً من الكمية المطلوبة. ويتم مواجهة احتياجات الغسيل في الغالب من خلال عدم كفاية الري و/أو عدم انتظامية توزيع مياه الري، أو حتى في بعض الحالات عن طريق سقوط الأمطار في الشتاء، وبالتالي لا يكون هناك حاجة لمزيد من المياه الإضافية للغسيل. وينطبق هذا بصفة خاصة عندما يتم استخدام طريقة الري السطحي، مثل الري بالغمر/الشرائح أو بالخطوط.

وتتحرك المياه التي تمر عبر منطقة الجذور إلى المياه الجوفية الضحلة حيث يتم إما جمعها وتصريفها للتخلص منها من خلال نظام الصرف تحت السطحي أو يتم تسربها إلى المياه الجوفية المحلية، أو إذا ظل منسوب الماء الأرضي ضحلاً من الممكن أن تتبخر المياه الجوفية مما يؤدي إلى تراكم الأملاح في طبقات السطح.

(١٨,٤,٢,٣) تحمل المحصول للأملاح

إن تحمل المحصول للأملاح، وملوحة التربة، وجودة المياه المضافة، وجودة المياه الجوفية، ومرحلة النمو سوف تعمل على وضع الاحتمال للمياه الجوفية الضحلة أن تلبي الاحتياجات المائية للمحصول. وقد تم تقدير مدى تحمل المحصول للأملاح من

خلال التجربة على أنها محاصيل حساسة إلى متحملة للأملاح. ويمكن تميز مدى تحمل الأملاح رياضياً باستخدام معادلة ماس-هوفمان (Mass and Hoffman, 1977)، والتي تضع قيمة حرجة للملوحة تبدأ عندها الإنتاجية في الانخفاض، ويختلف معدل انخفاض الإنتاجية مع أنواع المحاصيل ومدى تحملها للأملاح.

إن الدراسات التي تم استخدامها لتمييز ملوحة النبات تم القيام بها في ظروف ملوحة متساوية في منطقة الجذور، وهي حالة لا توجد بشكل عام في الحقل. وقد أظهر بحث آخر أن متوسط الملوحة في منطقة الجذور (Shalhevet, 1994) هو العامل الأكثر أهمية للأخذ في الاعتبار عندما يتم تمييز تحمل وتوزيع الملح في قطاع التربة. وسوف يقوم المحصول على نحو اختياري باستنزاف المياه من الأجزاء الأقل ملوحة في منطقة الجذور. وعندما يصبح قطاع التربة أكثر ملوحة، سوف يكون هناك مياه أقل متاحة لاستهلاك المحصول ويتم تزايد احتمال وجود فاقد في الإنتاج.

وحيث إن المحاصيل تقوم باستخدام المياه من منسوب الماء الأرضي الضحل، فقد وجد أنه من الواضح أن المحاصيل تستخدم المياه عند مستويات ملوحة أعلى من المتوقع عند استخدام معاملات ماس وهوفمان بدون حدوث انخفاض في الإنتاج، وأسباب حدوث هذا ليست مفهومة على نحو جيد، حيث إن المحاصيل تقوم فقط بشكل عام بتسلم جزء من احتياجات المياه الخاصة بها من منسوب الماء الأرضي (المالح) وتتسلم بقية احتياجاتها من المياه من مياه الري (غير المالحة) والحجم الكلي الموزون للملوحة الموجودة في المياه الذي يتم استخدامه من خلال المحصول من الممكن أن يكون متحملاً. ويمكن إيضاح هذا عن طريق استخدام بيانات أيارس وشونمان Ayars and Schoneman (1984) بالنسبة لمحصول القطن، وكان البخر-نتح المقدر للمحصول هو ٦٤٧ مم مع ٤٢٩ مم من المياه المضافة منخفضة الملوحة (٢ ديسمنز/م) و ١٦٧ مم من المياه المضافة المالحة (٧ ديسمنز/م). والمتوسط الموزون من المياه المضافة

من هذين المصدرين هو ٣,١٣ ديسمنز/م، وتعد هذه القيمة أقل من القيمة الحرجة لملوحة التربة التي سوف تؤدي إلى انخفاض في الإنتاجية، وحيث إن هذه القيمة أقل من القيمة الحرجة، فإن زمن امتصاص المياه من المياه الجوفية الضحلة له أيضاً تأثيره حيث إن كثيراً من استخلاص المياه يحدث في وقت متأخر من دورة النمو عندما يكون النبات في الغالب متحملاً للأملاح.

وقد تكون هناك أيضاً بعض الشكوك في الملوحة الفعلية للمياه الجوفية وبالتالي في المياه التي يمتصها المحصول، ويمكن أن يكون هذا راجعاً إلى الاختلاف المكاني في ملوحة المياه الجوفية عبر الحقل وأيضاً للاختلاف الزمني الناتج عن ارتفاع وانخفاض مناسيب المياه. وهناك كذلك تغير تمت مصادفته عن طريق جمع عينات من أعماق المياه الجوفية ومن أعماق أقل من ذلك ووجد تفاعل بين المياه الجوفية مع المياه في منطقة الجذور (Northey *et al.*, 2006).

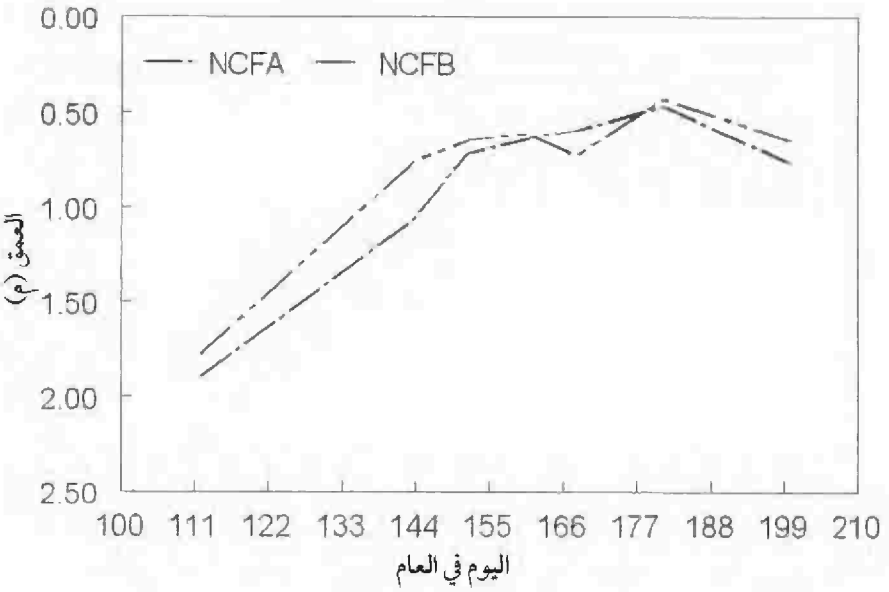
(١٨,٤,٢,٤) جودة مياه الصرف

إن جودة مياه الصرف ليست بشكل عام وصفاً دقيقاً لجودة المياه الجوفية الضحلة التي يتم استخدامها في نظام التحكم في منسوب الماء الأرضي. وتعد المياه الجوفية الضحلة التي توجد أسفل منطقة الجذور خليطاً من الأملاح التي توجد في حال اتزان مع ملوحة التربة عند هذا العمق والتسرب العميق من مياه الري المضافة. وتعد مياه الصرف التي تنتج من المصرف المغطى خليطاً من المياه الجوفية الضحلة والمياه الجوفية الأكثر عمقاً. وفي كثير من المناطق الجافة تصبح جودة المياه أكثر رداءة على نحو مستمر بزيادة العمق في قطاع التربة. ويوضح قريسمر Grismer (1990) أنه بزيادة المسافة بين المصارف أو بزيادة عمق المصارف، فإنه من ناحية التناسب يتم امتصاص مزيد من المياه من مكان أكثر عمقاً في قطاع التربة، مما يؤدي إلى جودة مياه أقل من المتوقع من جمع العينات من المياه الجوفية. ويوضح أيضاً كريستن وسكهان

Christen and Skehan (1999) أن ملوحة مياه المصرف تزداد بزيادة عمق منسوب الماء الأرضي وبالتالي تصبح مسارات التدفق إلى المصارف أكثر عمقاً، وقد وجدا أن زيادة قدرها ٥٠٪ في ملوحة التدفق في المصرف منذ أن كان منسوب الماء الأرضي في منتصف المصرف عند ١م (٨ ديسمنز/م) وعند ١,٦ م (١١,٥ ديسمنز/م)، وإن جودة المياه التي توجد في العينات التي تم جمعها من المياه الجوفية الضحلة باستخدام الآبار المثبتة عند أعماق مناسبة سوف تعمل على توفير تمييز أفضل لجودة المياه الجوفية الضحلة أكثر من عينات مياه الصرف.

(١٨,٤,٢,٥) عمق المياه الجوفية

في المناطق المروية يكون مصدر المياه الجوفية الضحلة في أغلب الأحيان من التسرب العميق من الري غير الكفء، ونتيجة لهذا، استجابات تقلب المياه الجوفية لإدارة الري في المنطقة. وفي أوائل الموسم يكون من الصعب وضع جدولة لعمليات الري وأن يتم جعلها ملائمة لمنطقة الجذور الحاصرة للنباتات الصغيرة وغالباً ما يتم القيام بالري السابق على الزراعة. وعمليات الري هذه في أوائل الموسم تؤدي إلى أحجام ضخمة من الصرف بعد منطقة الجذور؛ ولهذا تكون المياه الجوفية في الغالب في الوضع الأقرب إلى سطح التربة عند بداية موسم النمو، وبتقدم موسم الري، فإن العمق إلى منسوب الماء الأرضي يزداد من خلال اتحاد التدفق الجانبي والرأسي في نظام المياه الجوفية وامتصاص النبات. وإذا كان نظام الري غير كفء، فمن الممكن أن يكون هناك حالة حيث يقل العمق إلى المياه الجوفية حتى نهاية موسم الري وهو الزمن الذي يقل العمق عنده بالتدريج. فعلى سبيل المثال، يوضح الشكل رقم (١٨,٦) بيانات عمق المياه الجوفية التي توضح زيادة في ارتفاع منسوب الماء الأرضي تحت قطعة الأرض المزروعة بالطماطم والتي يتم ريها بالخطوط في الحقل بدون وجود مصارف مغطاة. ويؤثر العمق إلى المياه الجوفية على الامتصاص الكلي من خلال النباتات ويبدأ زمن الامتصاص (Ayers *et al.*, 2006).



الشكل رقم (١٨,٦). استجابة منسوب الماء الأرضي تحت قطعتي أرض مزروعتين بالطماطم ويتم ريهمـا بالخطوط (NCFA, NCFB) في الحقل بدون وجود صرف تحت سطحي.

(١٨,٤,٣) اختيار، وإدارة، وتشغيل نظام الري

سـوف يعتمـد اختيـار نظـام الـري علـى التربـة، والمحـصول، والظـروف الماليـة للاستثمار، وتفضيل المدير، ويمكن أن يتم تقسيم النظم المتاحة إلى نظـم تعمـل بالـضغط ونظم لا تعمل بالضغط، وداخل كل نوع هناك الكثير من الخيارات، وتشمل النظم الـتي تعمـل بالـضغط، الرشاشـات (الحركـة اليدويـة)، والنظـام المحـوري، ونظـام الحركـة المستقيمة، ونظم التنقيط، والرذاذ الدقيق. وتشمل النظم التي لا تعمـل بالـضغط (طـرق الـري الـسطحية) الأحـواض المستوية، والخطـوط بالـدفقات، و/أو نظـم الأنابيـب ذات الفتحات. وقد تمت مناقشة تصميم هذه النظم في موضع آخر من هذه الدراسة. والجوانب الهامة لتصميم نظام الري في هذا الجزء هي كفاءة الري المحتملة، والانتظامية، والإدارة.

وتتميز نظم الري غير المضغوطة بأنها النظم الأقل كفاءة في كفاءة الري وتوزيع الانتظامية في حدود من ٥٠٪ إلى ٨٠٪، مما يؤدي إلى تسرب عميق كبير، ويعمل معدل التسرب لسطح التربة على تحديد كفاءة الري المحتملة وانتظامية التوزيع بسبب تغير التسرب الزماني والمكاني. ومن الصعب جداً أن يتم إضافة أعماق صغيرة من المياه باستخدام الري السطحي باستثناء نظم الأحواض المستوية التي تضيف كمية أقل من ٥٥ مم في الإضافة الواحدة (Dedrick *et al.*, 1982). وتعمل النظم السطحية على أفضل نحو في التربة، مثل الطينية والطينية اللومية، بسبب معدلات التسرب المنخفضة لها مقارنة بالتربة الرملية.

ولأن النظم المضغوطة لها احتمال وجود انتظامية عالية في التطبيق، وانتظامية توزيع عالية، وأعماق إضافة صغيرة، فإنها تعمل على تمكين تحكم أفضل في فواقد التسرب العميق. وتمتاز النظم المضغوطة عن النظم غير المضغوطة بأن التسرب يتم التحكم فيه عن طريق معدل إضافة الرشاش بدلاً من التحكم بسطح التربة، ومع النظم المضغوطة من الممكن أن يتم إضافة كميات ري صغير حتى ٢ إلى ٤ مم، لثلاث أو أربع مرات يومياً، عند المقارنة بالنظم السطحية التي تكون محدودة بما يساوي ٥٠ مم على أنها الإضافة الأقل.

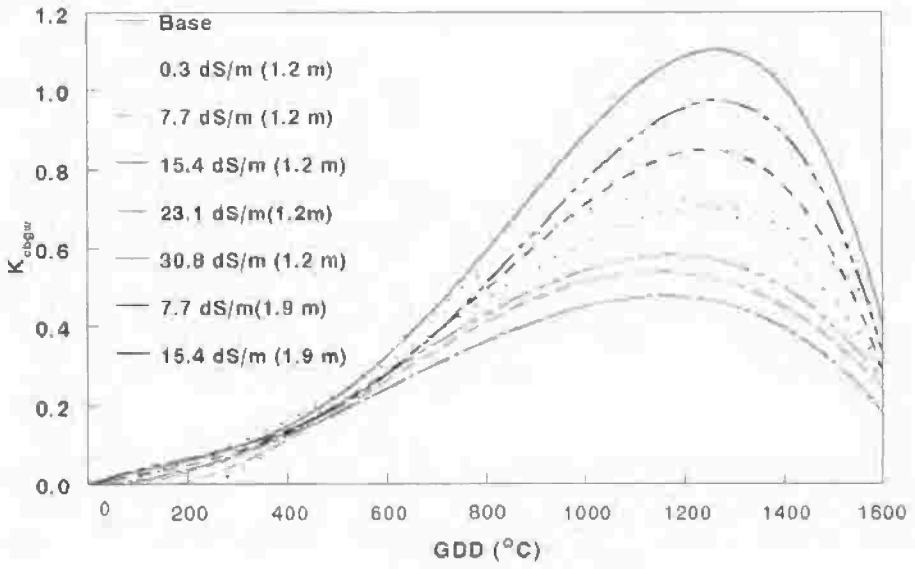
وتحدد جدولة الري زمن وعمق الإضافة، وفي وجود مياه جوفية ضحلة فمن الممكن أن يتغير توقيت وعمق الإضافة من خلال استهلاك المحصول للمياه من المياه الجوفية الضحلة، فالتوقيت يتغير لأن جزءًا من احتياجات المياه تلبيه المياه الجوفية، وليس المياه المخزنة في التربة، وتفترض حسابات اتزان الحجم التقليدية أن كل استهلاك المياه يأتي من مياه التربة المخزنة (Ayars and Hutmacher, 1994)، وبالتالي، تساهم المياه الجوفية في اتساع الفترة بين الريات عندما يكون التوقيت قائماً على استهلاك مياه التربة. وإذا كان يتم استهلاك المياه الجوفية المالحة عن طريق النباتات، فإن الأملاح تنتقل إلى منطقة الجذور ويتواجد الاحتمال لزيادة إجهاد الجهد الأسموزي لمياه التربة، والذي يضاف إلى الجهد الشعري. وسوف يستجيب النبات إلى الإجهادين المتحدين، ويتضح من هذا ضرورة القيام

بعملية ري مبكرة أكثر مما يفعل الإجهاد الشعري وحده. وفي هذه الحالة سوف يتم تحريك مياه أقل من مياه التربة المخزونة أكثر مما يتضح بالإجهاد الشعري وحده.

وقد وضعت طرق بديلة لتحديد مستويات إجهاد النبات التي يمكن استخدامها كمؤشرات لتوقيت الري في مناطق المياه الجوفية الضحلة. وقد تم استخدام جهد أوراق النبات، الذي يعكس الإجهاد الشعري والأسموزي، بنجاح لوضع جدولة لري محصول القطن (Ayars and Schonman, 1984; Kite and Hanson, 1984)، وتعد هذه التقنية متاحة ويمكن تطبيقها للمحاصيل التي لها قيم إجهاد لازمة لوضع جدولة الري.

وقد اتضح أيضاً أن مؤشر إجهاد مياه المحصول يعكس كلا من الإجهاد الشعري والأسموزي باستخدام قياس الحرارة باستخدام الأشعة تحت الحمراء لحساب درجة حرارة النبات، ويتم استخدام بيانات درجة الحرارة مع بيانات ضغط البخار لتحديد هذا المؤشر (Howell *et al.*, 1984)، وعند الوصول إلى القيمة الحرجة، تتضح ضرورة القيام بالري. وهذه التقنية محدودة بالوقت بعد الوصول إلى الغطاء الكلي لظلة النبات لمنع قراءات درجة حرارة التربة الخلفية من أن تؤثر على النتائج. وفي الوقت الحاضر يعد استخدام هذه التقنية محدوداً بسبب نقص البيانات اللازمة لتحديد قيم المؤشر الحرجة اللازمة لوضع جدولة الري.

وبعد تحديد الوقت الذي سيتم فيه القيام بالري، يتم حساب عمق الإضافة، وحالياً يتم القيام بهذا من خلال تحليل الجاذبية أو باستخدام الإضعاف النيتروني لتحديد استهلاك المياه في الفترة الزمنية بين عمليات الري، وهناك أجهزة جديدة يتم استخدامها لتحديد محتوى التربة من المياه مما يعد مبشراً باستخدام نظم قياس انعكاس المدى الزمني ونظم السعة. وقد أوضح أيارس وهاتماخر Ayars and Hutmacher (1994) معامل محصول القطن المعدل الذي يبرر مساهمة المياه الجوفية في استخدام المحصول للمياه كدالة في ملوحة المياه الجوفية والعمق مما يساعد على القيام بحساب اتزان الحجم لاستهلاك مياه التربة من خلال المحصول، الشكل رقم (١٨,٧).



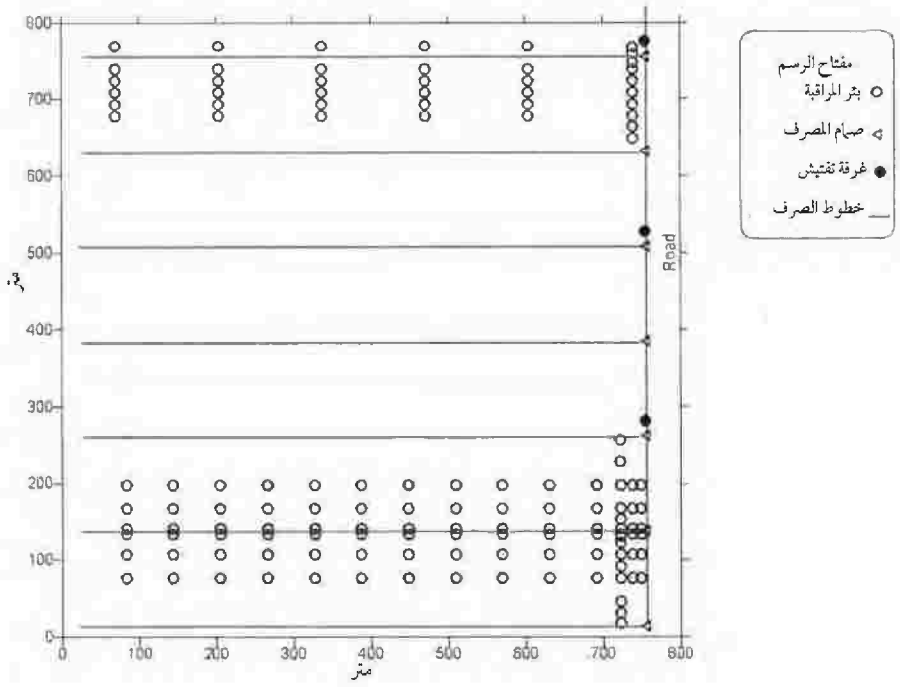
الشكل رقم (١٨,٧). معامل باسال لمحصول القطن والمحسارات معاملات المحصول المعدلة المشتقة من بيانات الليسوميترات لخمس كميات من المياه الجوفية عند أعماق مختلفة.

(١٨,٤,٤) تصميم نظام الصرف تحت السطحي لإدارة المياه الجوفية الضحلة

سيتم في هذا الجزء مناقشة إمكانيات التصميم في كل من النظم القائمة والنظم الجديدة على حد سواء. فهناك ملايين من الهكتارات من الأراضي التي يتم ريها وتصريفها والتي يمكن التفكير فيها من جهة إدارة المياه الجوفية الضحلة، فالقدرة على التحكم في التدفق من المصارف والحفاظ على منسوب الماء الأرضي عند مستوى مرغوب فوق جزء كبير من الحقل يعد العامل الرئيس في تحديد مدى ملاءمة هذا الحقل لإدخال تعديلات على التحكم في المياه الجوفية الضحلة، وكذلك، فإن تكلفة تعديل النظام والصعوبات المحتملة للعمليات الزراعية في الحقل يجب أخذها في الاعتبار في التصميم. وقد شملت تعديلات نظام الصرف السابقة استخدام صمامات تحديد التدفق

من نوع الهدار (الشكل رقم ١٨,٣ أ، ب) التي تم تركيبها عند الخطوط الفرعية للصرف (Lord, 1987) للتحكم في منسوب الماء الأرضي.

وعلى سبيل المثال، تم تعديل نظام صرف قائم في حقل مساحته ٦٥ هكتاراً على الجانب الغربي من وادي سان جواكين شبه الجاف عن طريق تركيب صمامات فراشة على كل فرع من أفرع الصرف السبعة (Ayars, 1996) لاختبار أبنية التحكم المحتملة. وبالإضافة إلى ذلك، تم تركيب الهدارات على امتداد الخط شبه الرئيس لتوفير التحكم الإقليمي لمنسوب الماء الأرضي، وهناك رسم تخطيطي للنظام موضح في الشكل رقم (١٨,٨)، في هذا النظام تم تركيب خطوط الصرف الفرعية بشكل عمودي على اتجاه الزراعة في الحقل.



الشكل رقم (١٨,٨). الرسم التصميم التخطيطي لنظام المصارف وأبنية التحكم في موقع دراسة إدارة المياه الجوفية الضحلة في حقل يقع على الجانب الغربي من وادي سان جواكين بكاليفورنيا.

وهناك أمثلة لأبنية التحكم البديلة في منسوب الماء الأرضي موضحة في الشكل رقم (١٨,٩) والشكل رقم (١٨,١٠). فالبناء الموضح في الشكل رقم (١٨,٩) تم استخدامه في الخطوط الفرعية الفردية في كرمة بأستراليا، وقد تم استخدام بناء الهدار الموضح في الشكل رقم (١٨,١٠) على الخط الفرعي لنظام الصرف المبين في الشكل رقم (١٨,٨). ويقدم الشكلان رقما (١٨,١١ أ، ب) عمق منسوب الماء الأرضي بين مجموعة من أفرع ثلاثة نظم صرف تحت سطحية في الحقل التجريبي في موعدين أثناء إنتاج محصول الطماطم. وقد أدى نظام التحكم في منسوب الماء الأرضي إلى مياه ري مضافة أقل وتحسين جودة المحصول في المناطق التي يكون منسوب الماء الأرضي فيها هو الأقرب لسطح التربة (Ayars, 1996; Atars *et al.*, 2000).

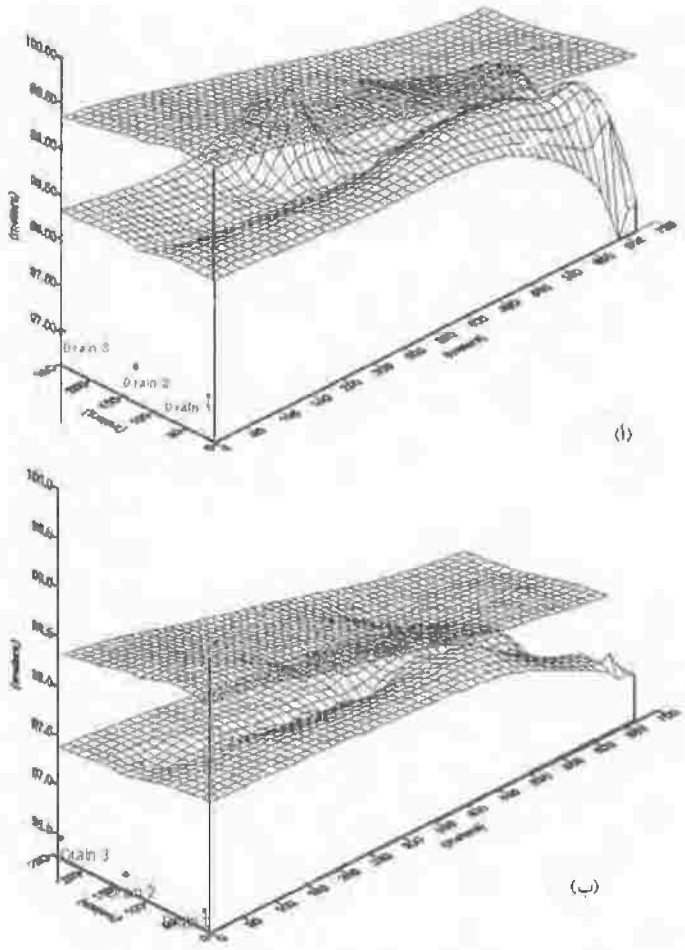
الشكل رقم (١٨,٩). بناء التحكم في الخط الفرعي الفردي المستخدم للتحكم في منسوب الماء الأرضي في كرمة بأستراليا.

الشكل رقم (١٨,١٠). بناء التحكم المستخدم لقياس تدفق الصرف والتحكم في منسوب المياه في كاليفورنيا.

وفي دراسة قام بها كريستن وسكهان Christen and Skehan (2001) في كرمة بجنوب شرق أستراليا شبه الجافة لم يتم مقارنة الإدارة (التدفق المستمر) بالإدارة النشطة للمصارف المغطاة، التي تقع على عمق ٢ م وعلى مسافات فيما بينها تساوي ٢٠ م. وقد أدت إدارة النظام إلى منع الصرف بمجرد أن وصل منسوب الماء الأرضي إلى عمق ١,٢ م أو عندما كانت تحدث إحدى عمليات الري. وبدون الإدارة، تدفقت المياه باستمرار في المصارف أثناء موسمي الري بمياه تبلغ ملوحتها حوالي ١١ ديسمنز/م. وقد أدى هذا إلى حمل ملح صرف عبر الموسمين قدره ٥٨٦٧ كجم/هكتار. وكانت قياسات الإدارة قادرة على تقليل حجم الصرف وملوحته، مما أدى إلى تقليل قدره ٥٠٪ في حمل الملح. وقد قامت المصارف الغير مدارة بإزالة ١١ ضعفاً من الأملاح أكثر مما أُضيف في مياه الري (أي، كان هناك تعدين للملح الجيولوجي)، بينما عملت إدارة الصرف على تقليل هذا إلى خمسة أضعاف الملح المضاف (الجدول رقم ١٨,١). وقد

وجدت هذه الدراسة أيضاً أن ملوحة منطقة الجذور تم التحكم فيها بنجاح في المعالجة المدارة وأنه لم يكن هناك اختلافات في إنتاج الكرمة بين المعالجات.

وتوضح هذه النتائج التجريبية أن إدارة الصرف في المناطق المروية شبه الجافة يمكن أن يكون لها فوائد زراعية وبيئية.



الشكل رقم (١٨,١١). العمق إلى المياه الجوفية بعد غلق (أ) أو فتح (ب) صمامات التحكم الفرعية في الحقل الموضح في الشكل رقم (١٨,٨).

الجدول رقم (١٨,١). آثار إدارة الري على موسمي ري في جنوب شرق أستراليا شبه الجاف.

	مصارف غير مدارة	مصارف مدارة
حجم الصرف (مم)	٧٠	٤٧
ملوحة الصرف في عملية الري الأولى (ديسمنز/م)	١٢	١١
ملوحة الصرف في عملية الري الأخيرة (ديسمنز/م)	١١	٧
حمل الملح (كجم/هكتار)	٥٨٦٧	٢٩٧٨
نسبة الملح المنقول إلى الحمل المضاف	١١	٥

إن تصميم نظم الصرف لدمج إدارة المياه الجوفية الضحلة سوف يتطلب اعتماد معايير تصميم جديدة لعمق، وموضع فتحات تصريف المياه، والعمق إلى منسوب الماء الأرضي عند نقطة المنتصف بين المصارف (Doering *et al.*, 1982; Ayars, 1996)، وهناك حاجة لتقليل كل من عمق المصرف وعمق نقطة المنتصف المسموح به من التوصية الحالية البالغة ٢,٤ م لعمق المصرف و ١,٢ م لعمق منسوب الماء الأرضي عند نقطة المنتصف (وزارة الداخلية الأمريكية، ١٩٩٣). وسوف تتطلب التغييرات في التصميم التي تطلق المعايير الحالية معايير إدارة إضافية لمنع ارتفاع درجة ملوحة قطاع التربة.

إن التغيير الأول المقترح في تصميم الصرف تحت السطحي هو من خلال وضع عمق منسوب الماء الأرضي عند نقطة المنتصف الموصى بها عند حوالي ٠,٩ م تقريباً في كل الحالات، وقد تم اختيار القيمة ٠,٩ م كحل وسط للسماح باستخدام المصارف التي يتم تركيبها عند عمق أكثر ضحالة وفي نفس الوقت الحفاظ على مسافة جانبية واسعة بدرجة معقولة. وقد شوهد في دراسة سابقة (Ayars and McWhorter, 1985)، أنه عندما يتم احتواء الاحتياجات المائية للمحصول في تصميم نظام الصرف، فإن أدنى عمق لمنسوب الماء الأرضي يحدث مبكراً في بداية الموسم عندما يكون عمق الجذور ضحلاً.

والتغيير الثاني في معايير تصميم النظام هو تقليل عمق المصرف للعمل على تقليل العمق الفعال لجمع المياه الجوفية باستخدام نظام الصرف، ولكن، تقليل عمق

المصرف يؤدي كذلك إلى تقليل المسافة بين الخطوط الفرعية للعمل على التحكم بشكل كاف لوضع منسوب الماء الأرضي الجوفية، وسوف يعمل متطلب تحديد موضع عمق منسوب الماء الأرضي عند نقطة المنتصف على التعويض للعمل على الحفاظ على مسافة مناسبة بين المصارف في الحالات المروية.

وعن طريق تقليل العمق والمسافة بين المصارف، فإنه يتم جمع عمق أقل من المياه الجوفية في قطاع التربة، وفي الحالات التي تقل فيها جودة المياه مع زيادة العمق في قطاع التربة، فإنه سيتم استخراج مياه رديئة الجودة بكمية أقل (Grismer, 1990)، وسوف يؤدي التقليل في عمق المصارف أيضاً إلى أحجام أقل من المياه التي يتم تصريفها من المصارف ومزيد من المياه التي يتم استخدامها من قبل المحصول (Doering *et al.*, 1982). وإن وضع جدولة للري على دراية بإجهاد الملوحة عند إنبات البذور، ولاحقاً عند التدفق لأعلى من منسوب الماء الأرضي لتلبية الاحتياجات المائية للمحصول، وسيصبح جزءًا من إدارة الملوحة المطلوبة في منطقة الجذور في نظام إدارة الري/الصرف الكلي.

إن الخطوات المقترحة لتصميم نظام متكامل لإدارة المياه في المناطق الجافة هي على النحو التالي. وضع معيار عمق منسوب الماء الأرضي عند نقطة المنتصف بناءً على النمو غير المحدود لجذور النبات كدالة في الزمن بحيث لا يتجاوز عمق الجذور عمق منسوب الماء الأرضي خلال موسم النمو. ويمكن تقريب نمو الجذور باستخدام البيانات الحقلية أو علاقة بورج وقرايمز Borg and Grimes (1986). والخطوة التالية هي وضع جدولة الري للمحاصيل باستخدام معامل محصول معدل (K_c) الذي يشبه ما تم وضعه من قبل أيارس وهوتماخر Ayars and Hutmacher (1994) لتحديد توقيت وعمق الإضافة. وبعد ذلك سوف يتم استخدام كفاءة نظام الري لتحديد فواقد التسرب العميق للنظام، والتي تعد من مدخلات برنامج التصميم، ويمكن استخدام طريقة أيارس وماك فورتر Ayars and McWhorter (1985) لحساب عمق منسوب الماء الأرضي عند نقطة المنتصف باستخدام التسرب العميق للتصميم وجدولة الري.

وسوف يختلف العمق والمسافة بين المصارف إلى أن يتم التوقف عن خرق معيار امتداد الجذور، ويمكن عندئذ استخدام برنامج توازن مائي بسيط لتحديد التراكم الملحي في منطقة الجذور، وسيعمل هذا على توفير البيانات اللازمة لإدارة الاتزان الملحي.

(١٨,٤,٤,١) مثال لتصميم نظام المصارف باستخدام التغييرات المقترحة

لقد تم حساب المسافة بين المصارف وعمق المصرف لنوعين من أنواع التربة، الطينية اللومية والرملية اللومية، بناءً على سنة واحدة من البيانات المناخية للجانب الغربي من وادي سان جواكين، ووضع جدولة مقبولة للري مشتركة لكيفية نمو محصول القطن المزروع في هذه الأنواع من التربة. وقد تم التفكير في نوعين مختلفين لجدولة الري: أحدهما يفترض أنه ليس هناك مساهمة للمياه الجوفية لهذا المحصول، والآخر يفترض مساهمة المياه الجوفية. وقد تم العمل بكلتا الجدولتين بافتراض وجود كفاءتين للري قدرهما ٦٠٪ و٨٠٪، وهناك برنامج تم وضعه في مختبر أبحاث إدارة المياه في USDA-ARS الذي يقوم بتنفيذ طريقة التصميم الخاصة بأيارس وماك فورتر Ayars and McWhorter (1985) تم استخدامه في حساب المسافة بين المصارف وموضع منسوب الماء الأرضي، وقد تم إيجاز نتائج التصميم في الجدول رقم (١٨,٢).

وتوضح النتائج الموضحة في الجدول رقم (١٨,٢) أن تحسين كفاءة الري يؤثر بشكل كبير على المسافة بين المصارف المحسوبة مما يؤدي إلى تقليل تدفقات المصارف والأحجام التي يتم التخلص منها. وإن تدفقات المصارف المخفضة نتيجة لتحسين كفاءة الري أمر متوقع حيث يكون هناك تسرب عميق أقل للمياه. وأيضاً، من المحتمل استخدام مسافة أكبر بين المصارف في التربة الرملية اللومية، بالمقارنة مع المسافة في التربة الطينية اللومية، كما هو متوقع. وأيضاً ستعمل مساهمة المياه الجوفية في مياه المحصول على زيادة المسافات بين المصارف بالنسبة للحالة التي لا يتم فيها تضمين مساهمة المياه الجوفية في إدارة مياه المحصول.

وإن تصميم المثال الذي يعكس استخدام معايير تصميم USBR هو لعمق مصارف قدره ٢,٤ م مع عمق تصميم لمنسوب الماء الأرضي قدره ١,٢ م وكفاءة ري

قدرها ٦٠٪. وتعد هذه الحالة نمطية لنظام الري بالخطوط في أنحاء كثيرة من العالم، ويتم استخدامها هنا كقاعدة للمقارنة مع التصاميم الأخرى.

الجدول رقم (١٨,٢). موجز للمسافة بين المصارف المحسوبة باستخدام التغيرات التقليدية والمقترحة في معايير تصميم الصرف لتحديد جودة المياه.

عمق المصرف (م)	عمق الماء الأرضي (م)	نوع التربة	كفاءة الري: المسافة بين المصارف (م) (مساهمة المياه الجوفية) ٦٠٪	كفاءة الري: المسافة بين المصارف (م) (مساهمة المياه الجوفية) ٨٠٪	كفاءة الري: المسافة بين المصارف (م) (عدم مساهمة المياه الجوفية) ٦٠٪	كفاءة الري: المسافة بين المصارف (م) (عدم مساهمة المياه الجوفية) ٨٠٪
١,٥	٠,٩	طينية لومية	٣١٧	٣٤١	١٦٠	٣٢٠
١,٨	٠,٩	طينية لومية	٤٤٥	٥٧٣	٢٢٨	٤٤٧
٢,٤	٠,٩	طينية لومية	٦٣٠	٨٣٣	٣٨٠	٦٢٥
٢,٤	١,٢	طينية لومية	٥٤٣	٧٠٧	٢٩٩	٥٤٢
١,٥	٠,٩	رملية لومية	٤٩٥	٦٣٨	٢٨٥	٤٦٨
١,٨	٠,٩	رملية لومية	٧٠٩	٩٢٦	٤٠١	٦٤٢
٢,٤	٠,٩	رملية لومية	٩٩٤	١٣٨١	٦٠٠	٨٩٠
٢,٤	١,٢	رملية لومية	٨٦١	١١٦٨	٤٩٩	٧٧٣

وحدث ما لم يكن متوقعاً وهو أن المسافة بين المصارف في التصميم بالنسبة لعمق المصرف البالغ ١,٥ م، ويبلغ عمق المياه الجوفية للتصميم ٠,٩ م، وكفاءة الري ٨٠٪ بدون مساهمة المياه الجوفية لاستخدام المحصول للمياه، كانت ٣٢٠ م في التربة الطينية اللومية، و ٤٦٨ م في التربة الرملية اللومية، وهي مشابهة لما تحقق من نتائج كفاءة الري البالغة ٦٠٪ مع مساهمة المياه الجوفية في استخدام المحصول للمياه، حيث كانت المسافة بين المصارف ٣١٧ م في التربة الطينية اللومية، و ٤٩٥ م في التربة الرملية اللومية. وهذا مساو تقريباً للمسافة بين المصارف التي ذكرتها هيئة استصلاح الأراضي الأمريكية USBR لكل من نوعي التربة وهي ٢٩٩ م في التربة الطينية اللومية و ٤٩٩ م في التربة الرملية اللومية. ومن منظور تكلفة التركيب، فإن التغيرات المقترحة لا يُتوقع

أن تكون أكثر تكلفة من تصاميم هيئة استصلاح الأراضي الأمريكية USBR وربما أقل. وتتوافق التصاميم البديلة مع المعايير الجديدة المقترحة للتركيبات الأكثر ضحالة والعمق الأكثر ضحالة لمنسوب الماء الأرضي عند نقطة المنتصف.

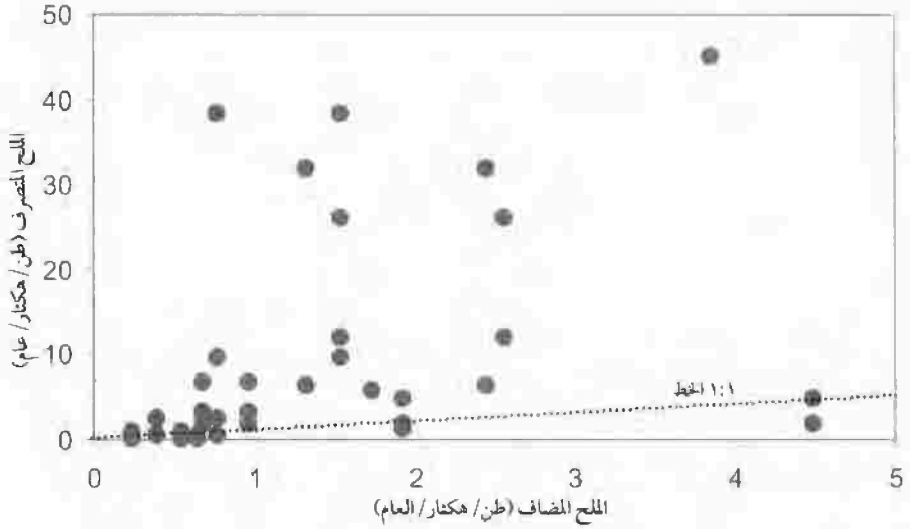
وتوضح النتائج أن هناك طريقتين لتحقيق أعماق التصميم الجديدة، والطريقة الأولى تكون من خلال تحسين كفاءة الري من ٦٠٪ إلى ٨٠٪، والتي يمكن القيام بها من خلال التغيير من نظم الخطوط إلى النظم المضغوطة أو نظام الخطوط الذي يتم إدارته بكثير من الاجتهاد، والطريقة الثانية تكون من خلال احتواء استخدام مياه المحصول من المياه الجوفية الضحلة لتعمل على موازنة عدم الكفاءة في نظام الري، مما يؤدي تقريباً إلى نفس المسافة بين المصارف المحسوبة.

وهناك تطوير مفاهيمي مماثل لممارسات تصميم وإدارة الصرف لتقليل الفاقد من مياه الري، ولتحسين استخدام المحصول للمياه من مناسيب المياه الجوفية، ولتقليل أحمال الملح في الصرف تم وضعه للصرف تحت السطحي في استخدامات الأراضي المروية في أستراليا (Christen and Ayars, 2001)، وقد جاء هذا كرد فعل للقيود دائمة الزيادة على التخلص من مياه الصرف تحت السطحي إلى المجاري المائية نتيجة للمستويات العالية للأملاح، ولمدى أقل للكيماويات الزراعية.

(١٨,٤,٥) إدارة نظام الصرف تحت السطحي

يتعامل الجزء المذكور سابقاً مع معايير جديدة للتصميم لإدارة منسوب الماء الأرضي. وإلى جانب هذه المعايير الجديدة للتصميم يكون من المطلوب تصميم خطة إدارة تشغيلية والتي تحدد الكيفية التي سيتم بها إدارة نظام الصرف، ولهذا أيضاً أهمية كبيرة في إدارة نظم الصرف تحت السطحي القائمة بالفعل، والتي لم تستفد من معايير التصميم الجديدة لنظم الصرف المحسنة؛ وبهذا تستفيد هذه النظم من الإدارة الماهرة، وقد وجد كريستن وآخرون (2001) *Christen et al.* عند استعراضهم أثني عشر نظاماً من نظم الصرف تحت السطحي في المناطق المروية بأستراليا أن معظم النظم كانت تقوم

بتصريف أحجام من المياه أكبر مما تم تصميمها عليه، مما يؤدي إلى كميات غسيل عالية بشكل مفرط، وتقليل كفاءة استخدام مياه الري، وقد وجدوا أيضاً أن حمل الملح الذي تمت إزالته بهذه النظم في الغالب أكبر من الملح المضاف عن طريق الري، مما يوضح تعدين الملح الجيولوجي، الشكل رقم (١٨,١٢).



الشكل رقم (١٨,١٢). أحمال مياه الري ومياه الصرف من ملح في ١٢ منطقة مروية بأستراليا.

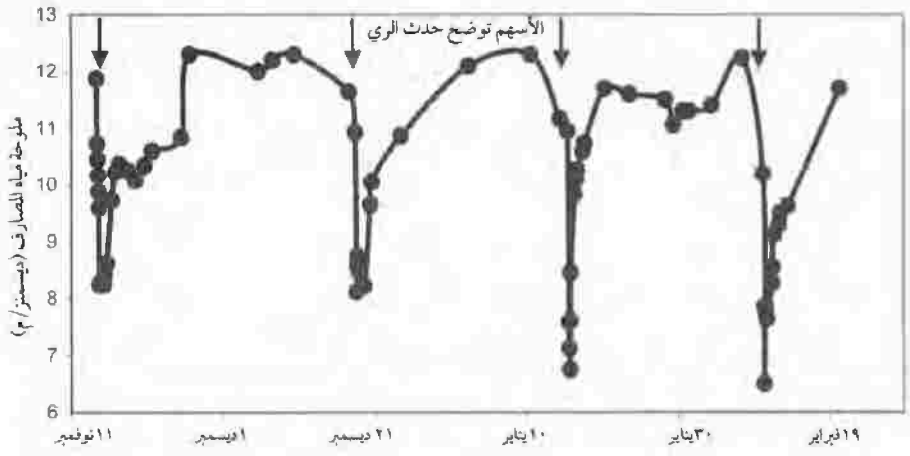
وتركز إدارة نظم الصرف تحت السطحي في المناطق المروية شبه الجافة على تقييد تدفق الصرف في فترات معينة، مما يؤدي إلى ارتفاع منسوب الماء الأرضي لأعلى حيث إن هذا يحدث عادة بشكل طبيعي إذا تم السماح للمصارف بالتدفق بحرية. وتعتمد طريقة تقييد تدفق المصارف على تصميم نظام الصرف، وسهولة الإدارة، والتضاريسية، والتكلفة. ومن الممكن تحقيق تقييد للتدفق عن طريق وضع هدارات داخل الأحواض المجمعة، والرافعات في نهاية الخطوط الفرعية، الشكل رقم (١٨,٩)، أو لتقليل عمق

مفتاح الطفو عند نقطة الضخ، وهذه الطرق سوف تسمح بتدفق المصارف عندما يزداد ارتفاع منسوب الماء الأرضي فوق المستوى المطلوب (Ayars *et al.*, 2000).

إن الطرق التي تقيد التدفق تماماً تشمل وضع صمامات على خطوط الصرف أو عند غلق المضخات، وعندما يتم القيام بهذا يكون هناك حاجة لمراقبة موضع منسوب الماء الأرضي للتأكد من أنها لا تصبح ضحلة بشكل مؤذٍ، وهناك تطورات جديدة في هذا المجال تقدم أساليب للربط الإلكتروني الاستشعاري من خلال أجهزة مراقبة لارتفاع منسوب الماء الأرضي مع مضخة أو صمام للعمل على توفير نظام آلي، فجعل مثل هذه النظم تعمل آلياً يمكن أن يشمل أيضاً مراقبة المياه المستقبلة، والتحكم في تدفقات الصرف لتتوافق مع أي تقييدات أو شروط ترخيص. وعندما يكون التخلص من مياه الصرف مقيداً بأحواض التبخر فإنه يمكن تطوير النظام ليشمل مراقبة مستوى المياه في الحوض وتعديل تدفق الصرف على النحو المطلوب (Christen *et al.*, 2004).

وفيما يتعلق بإدارة نظام الصرف، من المهم التفكير في الموقف حيث يتم تصميم نظام الصرف وتركيبه كممارسة استصلاح في حالات المياه المالحة والتغدق بالمياه (مثل معظم نظم الصرف)، ثم يكون هناك حاجة لتطبيق الإدارة اللاحقة لنظام الصرف بمجرد أن تكتمل مرحلة الاستصلاح، عندما يتم القيام بغسيل الأملاح المخزونة من منطقة الجذور ويكون هناك حاجة لوجود أقل مستوى من الصرف للحفاظ على نسبة الملوحة في منطقة الجذور. وخلال مرحلة الاستصلاح هناك حاجة لوجود درجة عالية من الغسيل، ولكن، يجب أن يتم تجنب التدفق المباشر إلى المصارف من خلال التدفق المفضل عبر منطقة الخنادق حيث إن هذا يساهم بشكل يسير في عملية الغسيل ويهدر مياه الري. وقد وجد قريسمر Grismer (1990) أنه في تدفق خندق التربة الطينية الثقيلة التي تحدد تقريباً كل تدفق المصارف لمدة ٤٠ ساعة بعد الري، يؤدي إلى انخفاض ملوحة مياه الصرف. وقد وجد كريستن وسكهان Christen and Skehan (1999) أيضاً أن ملوحة تدفق المصارف التي هبطت بصورة كبيرة أثناء الري ما يوضح التدفق المفضل لمياه الري غير

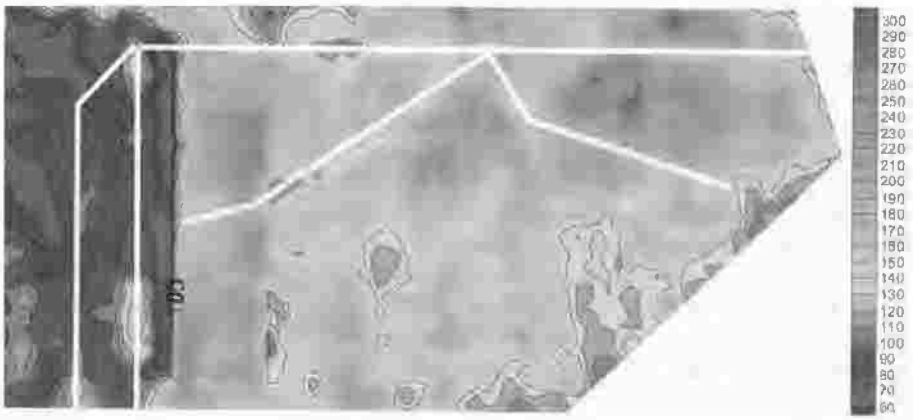
المالحة، الشكل رقم (١٨,١٣). وهذا يوضح أنه لمدة ٢٤ ساعة بعد الري فإن حوالي ٥٠٪ من مياه الصرف كانت مياه ري. ومنع هذا الخندق من التدفق أثناء الري يمكن القيام به عن طريق غلق المضخة أو سد (أو غلق) الصمام على المصارف. وعندما يتم القيام بهذا يمكن القيام بتوفير كميات ضخمة من المياه وحمل الأملاح. وهذا النوع من الإدارة يقبل التطبيق كذلك بعد القيام بالاستصلاح، للحفاظ على مياه الري.



الشكل رقم (١٨,١٣). تأثير الري على ملوحة مياه الصرف.

إن تحديد متى يجب القيام بتقليل الصرف المقرر من قبل يمكن معرفته بقياس ملوحة التربة باستخدام الجمع بين أخذ العينات من التربة وعمليات المسح الكهرومغناطيسي، ونادراً ما يكون استصلاح الصرف منتظماً، ويمكن أن يعمل المسح المكاني على توفير مؤشرات تتعلق بالمكان الذي يتطلب فيه مزيد من أعمال الصرف، ويمكن رؤية هذا في مثال من مزرعة مراع يتم ريها، ويوضح الشكل رقم (١٨,١٤) توزيع معامل التوصيل الكهربائي الظاهري للتربة (EC_a) التي يتم قياسها بعملية المسح EM38 بعد ثلاث سنوات من تركيب الصرف تحت السطحي، فالمنطقة الداكنة على

يسار المسح تم استصلاحها بشكل تام ويمكن أن يتم تقليل الصرف إلى مستوى الإدارة، وفي بقية المساحة حيث يتم تركيب المصارف نجد أن ملوحة التربة منخفضة، ولكن هناك بعض المناطق التي بها بقايا ملوحة عالية للتربة "نقاط ساخنة"، وهذه النقاط الساخنة من الممكن أن يتم الاهتمام بها من خلال عدة إجراءات مثل تركيب مزيد من المصارف، أو عمل الشقوق العميقة، أو إضافة الجبس. وهذه النتائج من الممكن أيضاً أن يتم استخدامها لبيان نوع الإدارة التي يجب تطبيقها على أجزاء مختلفة من الصرف اعتماداً على ملوحتها ووضع منسوب الماء الأرضي (Christen *et al.*, 2002).



الشكل رقم (١٨,١٤). مسح EM38 للمراعي المروية بعد ثلاث سنوات من تركيب نظام الصرف تحت السطحي والذي يوضح معامل التوصيل الكهربائي الظاهري للتربة (EC_a). الخطوط البيضاء هي أنابيب نظام الصرف تحت السطحي (Christen *et al.*, 2004).

(١٨,٥) توثيق تصميم وتركيب النظام

لقد تم وضع معايير للممارسة الهندسية لتصميم، وتركيب، وتشغيل نظم إدارة المياه الجوفية الضحلة لإنتاج المحاصيل الزراعية، وقد أصدرت الجمعية الأمريكية للمهندسين الزراعيين والبيولوجيين (ASABE، سابقاً ASAE) الممارسة الهندسية

479 (EP) التي تغطي التصميم، والتركيب، والتشغيل لنظام أنابيب الصرف تحت السطحي لكل من نظام الري التحتي والصرف المتحكم به في نظم إنتاج المحاصيل (مقاييس ASABE, 2006). وقد أصدرت الجمعية الأمريكية لاختبار المواد (ASTM) ممارسة قياسية لتركيب أنابيب من البلاستيك الحراري المموج للصرف الزراعي تحت سطح الأرض للتحكم في منسوب الماء الأرضي، وقد خصصت لجنة الاختبار والمواد ASTM لهذه الممارسة مسمى F-449 (ASTM, 2006). وقد تم أيضاً وضع ممارسة يوصى باستخدامها لتصميم وتركيب المصارف تحت السطحية للتحكم في منسوب الماء الأرضي من خلال هيئة المحافظة على الموارد الطبيعية (NRCS, 2006).

ويحتاج التصميم النهائي لنظام إدارة منسوب الماء الأرضي إلى أن يتم توثيقه بصورة كافية من خلال المهندس أو المصمم لوضع المراجع لاستخدام المزارعين والمقاولين كي يقوموا بشكل سليم بإعداد الموقع وتركيب مكونات النظام. ويجب أن يشمل التوثيق خطة تخطيط شاملة توضح مواقع وأعماق كل أنابيب المصارف وأبنية التحكم، وقائمة بكل المواد ومكونات المعدات اللازمة لتركيب النظام، وطرق التركيب والمعدات الموصى بها أو المقبولة، وقائمة بممارسات التركيب التي يمكن تطبيقها ومواصفات أو مقاييس المواد، وخطوطاً إرشادية تفصيلية وخطة لتشغيل النظام. وإذا كان نظام إدارة منسوب الماء الأرضي هو عبارة عن تحديث لنظام صرف تحت سطحي قائم، فإن التوثيق يجب أن يحدد كلا من المكونات الموجودة سابقاً والجديدة، وعلاوة على هذا، يُنصح بأن يشمل التوثيق التقييم الاقتصادي النهائي لتصميم النظام الموصى به. ويجب أن يتم تعديل التوثيق عند الحاجة (عن طريق المهندس، أو المزارع، أو المقاول) لعكس تصميم النظام كما تم تركيبه.

ومن المستحسن أن يتم الاحتفاظ بتوثيق النظم المركبة حديثاً في سجل دائم مع وثائق الملكية الأخرى لاستخدامها عند الحاجة. وربما يود المقاولون أن يحتفظوا بنسخة من وثيقة التركيب لاحتمال الرجوع إليها مستقبلاً، مثلاً، لأعمال الصيانة أو

الإصلاحات، وإذا تم تأجير أو بيع الأرض، أو تغيير الاستخدام، فإن مثل هذا التوثيق يجب أن يتم تقديمه للمالك أو المستأجر الجديد للأرض.

(١٨,٦) ملخص

يتم تصميم وتركيب نظم إدارة المياه الزراعية من أجل (١) تحسين إنتاج المحاصيل عن طريق التحكم في فترات النقص والزيادة في مياه التربة في منطقة الجذور، و(٢) تحسين جودة المياه الناتجة من تفريغ المصرف عن طريق التحكم في تدفقات الصرف لتقليل فواقد الكيماويات الزراعية من الأرضي الزراعية، وإن وضع تصميم متكامل لنظام التحكم في منسوب الماء الأرضي يشمل تحديد مدى ملاءمة الموقع، وعمق والمسافة بين المصارف المطلوبة، وإعداد خطة تركيب النظام في الحقل، واختيار و/أو تصميم نظام تشغيل في الصرف المتحكم به وأنماط الري التحتي. ويجب أن يسمح تصميم النظام بالتحكم في عمق منسوب الماء الأرضي في قطاع التربة عبر المدى اللازم لممارسات الزراعة التي يجب اتباعها والمحاصيل التي يراد زراعتها، والمتطلبات التشغيلية للعمل على تقليل فواقد الكيماويات الزراعية. وهذه الأهداف يجب أيضاً أن تتضمن الاستخدام الفعال للمياه الجوفية الضحلة التي يتم إمدادها من خلال سقوط المطر الطبيعي أو من خلال الري.

وهناك العديد من الطرق الجديدة المتاحة الآن لتحديد عمق والمسافة بين المصارف التصميم الأمثل لإدارة منسوب الماء الأرضي، فتشغيل النظام، أي، ما إذا كان هذا نظاماً تحت سطحي تقليدياً، أو صرفاً متحكماً به، أو نمط ري تحت سطحي، يختلف من يوم لآخر ومن عام لآخر. وفي معظم المواقع، ليس من الواضح ما إذا كانت الاحتياجات الأكبر في تصميم النظام هو ما إذا كان من خلال توفير إدارة صرف جيدة في ظل ظروف منسوب الماء الأرضي الضحلة، أو توفير ري تحت سطحي كاف خلال أكثر الفترات جفافاً. وبسبب عوامل تعقيد التصميم هذه، يُنصح بأن يتم استخدام

نموذج محاكاة لإجراء تحليل شامل وتصميم نهائي لإدارة مياه الصرف أو نظام التحكم في منسوب الماء الأرضي، وللتنبؤ بأداء النظام عبر فترة من ٢٠ إلى ٣٠ عاماً بالنسبة للأحوال المناخية في موقع بعينه.

ويمكن استخدام نماذج المحاكاة باستخدام الحاسب الآلي مثل DRAINMOD لتقييم خيارات تصميم النظام العديدة لموقع بعينه. ويمكن أن تعمل عملية محاكاة طويلة المدى (٢٠ إلى ٣٠ عاماً) على توفير تقييم جيد للأداء المتوقع لنظام إدارة منسوب مياه ما. ويشمل نموذج DRAINMOD-NII نظاماً للقيام بالتقييم الشامل لتأثير النظام والمعاملات التشغيلية على نقل الأشكال المختلفة من النيتروجين داخل قطاع التربة والفواقد في الجريان السطحي والتدفق تحت السطحي، وهذا الإصدار الجديد لنموذج DRAINMOD يعد أداة هامة لتصميم نظم إدارة مياه الصرف، إلى جانب خطة التشغيل الموسمية، لتلبية متطلبات جودة مياه التربة الناتجة. ويسمح برنامج الحاسب SI-DESIGN للمصممين أن يقوموا بحساب سقوط المطر للنظام وتقييم المسافة بين المصارف تحت السطحية وبدائل حجم الأنابيب المجمعة الرئيسة، ويعمل هذا البرنامج أيضاً على توفير السبل لتقدير تكلفة النظام، وإجراء تحليل اقتصادي للفائدة المحتملة من تشغيل النظام، وتقدير كفاءة الإنتاج الحيوي لنظام إدارة المياه.

وإن تصميم نظام إدارة منسوب الماء الأرضي الذي يؤدي إلى صافي الفائدة الأمثل، وفي نفس الوقت تقليل التأثيرات البيئية خارج الموقع، يجب أن يكون أفضل إستراتيجية تصميم وإدارة يُنصح بها المزارع. ومن الممكن أن يكون النظام مجدياً من الناحية الفنية، ولكن القرار الأخير يجب أن يكون قائماً على جدوى النظام ليس فقط من ناحية تغطية تكاليفه وإنما لإرجاع عائد إلى المزارع مقابل استثماره، وفي نفس الوقت العمل على تقليل التأثيرات البيئية خارج الموقع. وبالتالي، من المهم جداً أن يكون القرار الأخير لتصميم ما قائماً على التقييم الشامل للآثار الاقتصادية والبيئية.

المراجع

ADMS-TF. 2005. Agricultural Drainage Management Systems Task Force web site, http://extension.osu.edu/ ~usdasdru/ ADMS/ ADMSindex.htm.

ASAE. 1990. EP479: Design, installation and operation of water table management systems for subirrigation/controlled drainage in humid regions. St. Joseph, Mich.: ASAE.

ASTM. 2006. F-449: Subsurface installation of corrugated polyethylene pipe for agricultural drainage or water table control. West Conshohocken, Pa.: American Society for Testing Materials.

Ayars, J. E. 1996. Managing irrigation and drainage systems in arid areas in the presence of shallow groundwater:case studies. Irrig. Drain. Systems 10: 227-244.

Ayars, J. E., and R. A. Schoneman. 1984. Managing irrigation in areas with a water table. In Water Today and Tomorrow, Proc. Spec. Conf Irrig. and Drain. Div., ASCE, 528-536. J. A. Replogle, and K. G. Renard, eds. New York, N.Y.: American Soc. Civil Engineers.

Ayars, J. E., and D. B. McWhorter. 1985. Incorporating crop water use in drainage design in arid areas. In Proc. Spec. Conf. Irrig. and Drain. Div., ASCE, 380-389. C. G. Keyes, and T. J. Ward, eds. New York, N.Y.: American Soc. Civil Engineers.

Ayars, J. E., and R. B. Hutmacher. 1994. Crop coefficients for irrigation cotton in the presence of groundwater. Irrig. Sci. 15 (1): 45-52.

Ayars, J. E., R. B. Hutmcaher, R. A. Schoneman, R. W O. Soppe, S. S. Vail, and F. Dale. 2000. Realizing the potential of intetgrated irrigation and drainage water management for meeting crop water requirements in semi-arid and arid areas. Irrig. Drain. Systems 13: 321-347.

Ayars, J. E., E. W Christen, R. W Soppe, and W. Meyer. 2006. Resource potential of shallow ground for crop water use: A review. Irrig. Sci. 24: 147-160.

Belcher, H. W., and B. W. Fehr. 1990. Performance of a subirrigation automation system. ASAE Paper No. 90-2607. S1, Joseph, Mich.: ASAE.

Belcher, H. W., and F M. D'Itri, eds. 1995. Subirrigation and Controlled Drainage. Boca Raton, Fla.: Lewis Publishers.

Belcher, H. W., G. E. Merva, and W. H. Shayya. 1993. SI-DESIGN: A simulation model to assist with the design of subirrigation systems. In 15th Int'l. Cong. of ICID Workshop on Subsurface Drainage Models, 295-308. The Hague, Netherlands: ICID-CUD, CEMAGREF

Bengtson, R. L., C. E. Carter, H. F. Morris, and S. A. Bartkiewicz. 1988. The influence of subsurface drainage practices on nitrogen and phosphorus losses in a warm, humid climate. Trans. ASAE 31: 729-733.

Bengtson, R. L., C. E. Carter, J. L. Fouss, L. M. Southwick, and G. H. Willis. 1995. Special Issue: Water Quality in Humid Regions. Agricultural drainage and water quality in Mississippi Delta. J. Irrig. Drain. Eng. 121(4): 292-295.

Borg, H., and D. W. Grimes. 1986. Depth development of roots with time: An empirical description. Trans. ASAE 29: 194-197

Bottcher, R., T. Steenhuis, and M. Walter. 1984. SUBDRAIN: An interactive, colorgraphics subsurface tile drainage design program. Northeast Regional Agricultural Engineering Service, Cooperative Extension Report. Ithaca, N.Y.:Cornell Univ.

Bucks, D. A. 2004. A new agenda for management of agriculturally drained lands. In Proc. Eighth Int'l. ASAE Drainage Symp. R. A. Cooke, ed. St, Joseph, Mich.: ASAE.

Burnham, J., and H. W Belcher, Jr. 1985. Laser surveying for water management system design. ASAE Paper No. 85-2559. St, Joseph, Mich.: ASAE.

Carter, C. E., J. L. Fouss, and V McDaniel. 1988. Water management increases sugarcane yields. Trans. ASAE 31(2): 503-507.

Christen, E. W., and D. Skehan. 1999. Design and management of subsurface drainage for improved water quality: A field trial. CSIRO Land and Water Technical Report 6/99. Griffith, NSW, Australia: CSIRO Land and Water, Griffith.

Christen, E. W., J. E. Ayars, and J. W Hornbuckle. 2001. Subsurface drainage design and management in irrigated areas of Australia. J. Irrig. Sci. 21: 35-43.

Christen, E. W., and D. Skehan. 2001. Design and management of subsurface horizontal drainage to reduce salt loads. J. Irrig. Drain. Eng. 127(3): 148-155.

Christen, E. W., and 1. E. Ayars. 2001. Subsurface drainage system design and management in irrigated agriculture: Best management practices for reducing drainage volume and salt load. Tech. Report 38-01. Griffith, NSW, Australia. CSIRO Land and Water. Available at: www.clw.csiro.au/ publications/technical 2001/ tr3801. pdf.

Christen, E. W., J. W. Hornbuckle, and S. Herath. 2002. Management options to reduce salt loads from tile drainage in the Campaspe West District. Tech. Report XX/02. Griffith, NSW, Australia: CSIRO Land and Water.

Christen, E. W., Hornbuckle, lW., and R. Zandonna. 2003. Automated subsurface drainage management system to reduce costs and downstream environmental impact. In Engineering Salinity Solutions 2004, Proc. 1st National Salinity Engineering Conference, 194- 199. S. Dogramaci and A. Waterhouse, eds. Engineers Australia.

Christen, E.W., Hornbuckle, J.W., and J.E. Ayars. 2004. A methodology to assess the performance of subsurface drainage salinity control. In Engineering Salinity Solutions 2004, S. Dogramaci and A. Waterhouse, eds. Proc. 1st National Salinity Engineering Conference, 21-25. Engineers Australia.

Dedrick, A. R., L. J. Erie, and A. J. Clemmens. 1982. Level-basin irrigation. In Advances in Irrigation, 1: 105-145. D. Hillel, ed. New York, N.Y.: Academic Press.

Deverel, S. J., and J. L. Fio. 1990. Ground-water flow and solute movement to drain laterals, western San Joaquin Valley, California I: Geochemical assessment. Open file Report 90-136. Sacramento, Calif.: U.S. Geological Survey.

Doering, E. J., L. C. Benz, and G. A. Reichman. 1982. Shallow-water-table concept for drainage design in semiarid and subhumid regions. In Advances in Drainage, Proc. of the Fourth National Drainage Symposium, 34-41 St Joseph, Mich.: ASAE.

Doty, C. W., J. E. Parsons, A. Nassehzadeh- Tabrizi, R. W Skaggs, and A. W. Badr. 1984. Stream water levels affect field water tables and com yields. Trans. ASAE 27(5): 1300-1306.

Doty, C. W., J. E. Parsons, and R. W Skaggs. 1987. Irrigation water supplied by stream water level control. Trans. ASAE 30 (4): 1065-1070.

Ernst, L. F 1975. Formulae for groundwater flow in areas with subirrigation by means of open conduits with a raised water level. Misc. Reprint 178, 55-84. Rome, Italy: Institute for Land and Water Development Division, FAO.

Evans, R. O., and R. W. Skaggs. 1989. Design guidelines for water table management systems on coastal plain soils. Applied Eng. in Agric. 5(4): 539-548.

Evans, R. O., R. E. Sneed, and R. W. Skaggs. 1988a. Water supplies for subirrigation. AG-389. Raleigh, N.C.: North Carolina Agricultural Extension Service.

Evans, R. O., R. W. Skaggs, and R. E. Sneed. 1988b. Economic evaluation of controlled drainage and subirrigation systems. Ag-397. Raleigh, N.C.: North Carolina Agricultural Extension Service.

Evans, R. O., R. W Skaggs, and R. E. Sneed. 1990a. Normalized crop susceptibility factors for com and soybeans to excess water stress. Trans. ASAE 33(4): 1153-1161.

Evans, R. O., J. W. Gilliam, and R. W Skaggs. 1990b. Controlled drainage and subirrigation effects on drainage water quality. Proc. Fourteenth Intl.l Congo on Irrigation and Drainage, ICID. 1A(Q42): 13-20.

Evans, R. O., J. W Gilliam, and R. W Skaggs. 1995. Controlled versus conventional drainage effects on water quality. Irrig. Drain. Division, ASCE 121(4):271-276.

Feddes, R. A., P J. Kowalik, and H. Zaradny, 1978. Simulation of field water use and crop yield. PUDOC, Wageningen: Simulation Monographs.

Fausey, N. R., K. W. King, B. J. Baker, and R. L. Cooper. 2004. Controlled drainge performance on Hoytville soil in Ohio. In Drainage VIII: Proc. Eighth Int'l. Drainage Symp., 84-88. R. Cook, ed. St, Joseph, Mich.: ASAE.

Fouss, J. L. 1985. Simulated feedback-operation of controlled-drainage/subirrigation systems. Trans. ASAE 28(3): 839-847.

Fouss, J. L., and G. H. Willis. 1990. Research need on integrated system for water and pest management to protect groundwater quality. In Proc. of the 1990 Conference IR Div., 288-296. New York, N.Y.: American Soc. Civil Engineers.

Fouss, J. L., and J. S. Rogers. 1992. Drain outlet water level control: A simulation model. In Proc. Sixth Int'l. Drainage Symp, Drainage and Water Table Control, 46-61. St, Joseph, Mich.: ASAE.

Fouss, J. L., and G. H. Willis. 1994. Integrated water-fertilizer-pesticide management for environmentally sound crop production. In Proc. Univ. Florida Second Conf Environmentally Sound Agriculture, 53-61. St. Joseph, Mich.: ASAE.

Fouss, J. L., and J. S. Rogers. 1998. Justification of automated water table control systems. In Proc. 7th Int'l. Drainage Symposium, Drainage in the 21st Century: Food Production and the Environment, 400-412. St. Joseph, Mich.: ASAE.

Fouss, J. L., and T. W. Appelboom. 2006. Combination of drainage water management, cover cropping, and wetland diversion, as a suite of BMPs to reduce nitrogen loss from cropland. In Examining the Confluence of Environmental and Water Concerns. Proceedings of the ASCE-EWRI 2006 World Environmental and Water Resources Congress, Session on Drainage BMPs for Nitrogen Management Randall Graham, ed. CD-ROM.

Fouss, J. L., R. L. Bengtson, and C. E. Carter. 1987a. Simulating subsurface drainage in the lower Mississippi valley with DRAINMOD. Trans. ASAE 30 (6): 1679-1688.

Fouss, J. L., R. W. Skaggs, and J. S. Rogers. 1987b. Two-stage weir control of subsurface drainage for water table management. Trans. ASAE 30 (6): 1713-1719.

Fauss, J. L., J. S. Rogers, C. E. Carter. 1989. Sump-controlled water table management predicted with DRAINMOD. Trans. ASAE 32(4): 1303-1308.

Fouss, J. L., R. W. Skaggs, J. E. Ayars, and H. W Belcher. 1990. Water table control and shallow groundwater utilization. In Management of Farm Irrigation Systems, 783-824. St. Joseph, Mich.: ASAE.

Fouss, J. L., J. S. Rogers, G. H. Willis, L. M. Southwick, and C. E. Carter. 1995. Automated water table control/data acquisition for water quality research. In Clean Water-Clean Environment-21st Century, 101-104. St. Joseph, Mich.: ASAE.

Fauss, J. L., R. O. Evans, D. L. Thomas, and H. W Belcher. 1999. Operation of controlled-drainage and subirrigation facilities for water table management. In Agricultural Drainage. 743-766. R. W Skaggs, and J. van Schilfgaarde, eds. Agron. Monog. 38. Madison, Wis.: ASA, CSSA, and SSSA.

Fouss, J. L., D. A. Bucks, and B. C. Grigg. 2004. The agricultural drainage management systems task force: Decreasing nutrient export through the Mississippi River drainage basin. In Total Maximum Daily Load (TMDL) Environmental Regulations IL Conference Proc. A. Saleh, ed. St. Joseph, Mich.: ASAE.

Gayle, G., R. W. Skaggs, and C. E. Carter. 1985. Evaluation of a water management model for a Louisiana sugar cane field. J. American Soc. of Sugar Cane Technologists 4: 18-28.

Gayle, G. A., R. W. Skaggs, and C. E. Carter. 1987. Effects of excess soil water conditions on sugarcane yields. Trans. ASAE 30(4): 993-997.

Gilliam, J. W 1987. Drainage water quality and the environment. Proc. Fifth Nat'l. Drainage Symp. ASAE, St. Joseph, Mich. pp. 19-28.

Gilliam, J. W., J. L. Baker, and K. R. Reddy. 1999. Chapter 24: Water quality effects of drainage in humid regions. In Agricultural Drainage, 801-830. R.W. Skaggs and J. van Schilfgaarde, eds. Madison, Wisc,: Crop Sci. Soc. America, Soil Sci. Soc. America, and American Soc. Agronomy.

Gilliam, J. W., and R. W. Skaggs. 1985. Use of drainage control to minimize potential detrimental effects of improved drainage systems. In Development and Management Aspects of Irrigation and Drainage Systems, 352-362. New York, N. Y.: American Soc. Civil Engineers.

Gilliam, J. W., and R. W Skaggs. 1986. Controlled agricultural drainage to maintain water quality. J. Irrig. Drain. Eng. 112: 254-263.

Gilliam, J. W., R. W Skaggs, and S. B. Weed. 1979. Drainage control to reduce nitrate losses from agricultural fields. J. Environ. Qual. 8(1): 137-142.

Grandia, C. 2002. Pioneering GPS for site prep (Trimble). Midwest Contractor, August 26, 2002, 6 pp.

Grismer, M. E. 1990. Subsurface drainage system design and drain water quality. I.Irrig. Drain. Eng. 119: 537-543.

Hardjoamidjojo, S., R. W Skaggs, and G. O. Schwab. 1982. Predicting corn yield response to excessive soil water conditions. Trans ASAE 25(4): 922-927, 934.

Herczeg, A. L., S. S. Dogramaci, and F W. Leaney. 2001. Origin and evolution of solutes in a large semi-arid, regional multi-aquifer system: Murray basin, for Australia. Marine Freshwater Res. 52: 41-52.

Hoffman, G. J. 1990. Leaching fraction and root zone salinity control. In Agricultural Salinity Assessment and Management, 237-261. K. K. Tanji, ed. New York, NY.: American Soc. Civil Engineers.

Hornbuckle, J. W., and E. W. Christen. 1999. Physical properties of soils in the Murrumbidgee and Coleambally irrigation areas. CSIRO Land and Water Technical report 17/99. Griffith, Australia: CSIRO Land and Water.

Howell, T. A., J. L. Hatfield, J. D. Rhoades, and M. Meron, 1984. Response of cotton water stress indicators to soil salinity. Irrig. Sci. 5: 25-36.

Kendrick-Peabody, E. 2004. Success stories in agriculture: Researchers Fauss and Fausey develop laser grade-control system that transforms drainage and irrigation technology; News CAST Vol. 31(1): 15-18. Washington, D.C.: Council for Agricultural Science and Technology, www.cast-science.org/cast/src/cast_top.htm.

Kite, S. W., and B. R. Hanson. 1984. Irrigation scheduling under saline high water tables. California Agric. 38: 12-14.

Ladaney-Bell, J. R. W., and R. L. Acworth 2002. Salinisation processes in the irrigation environment riverine plain, Murray Darling Basin. In Irrigation Australia 2002 conference, Irrigation: Conservation or Conflict? Sydney, Australia: Irrigation Association of Australia, Sydney.

Logan, T. J., G. W Randall, and D. R. Timmons. 1980. Nutrient content of tile drainage from cropland in the North Central Region. North Central Res. Bull. No. 268. Wooster, Ohio.

Lord, J. M. 1987. Phase II: Study of innovative techniques to reduce subsurface drainage flows. Sacramento, Calif.: San Joaquin Valley Drainage Program, U.S. Bureau of Reclamation.

Maas, E. V., and G. J. Hoffman. 1977 Crop salt tolerance-current assessment. Irrig. Drain. Division, ASCE 103: 115-134.

Munster, C. L., R. W Skaggs, J. E. Parsons, R. O. Evans, J. W. Gilliam, and M. A. Breve. 1994. Simulating aldicarb transport in a drained field. Trans. ASAE 37(6): 1817-1824.

Nolte, B. L., R. L. Burris, C. J. W. Drablos, N. R. Fausey, L. R. Massie, S. W Melvin, G. E. Merva, T. J. Olscheske, J. F Rice, G. O. Schwab, R. D. Wenberg, and R. Z. Wheaton. 1986. DRAINMOD: Documentation for the water management simulation model. NCCI Software J. 2 (1): June 1986.

Northey, J., E. W Christen, J. E. Ayars, and J. Jankowski. 2006. Occurrence and measurement of salinity stratification in the shallow groundwater in the Murrumbidgee Irrigation Area, south-eastern Australia. Ag. Water Mgmt. 81: 23-40.

NRCS (Natural Resources Conservation Service, USDA). 2006. Recommended practice for the design and installation of subsurface drains for water table control. NRCS, USDA; Section IV, FOTG, Code 606, Subsurface Drain.

NRCS (Natural Resources Conservation Service, USDA). 1994. DRAINMOD Users Guide. Washington, D.C.: USDA, NRCS.

Rabalais, N. N., R. E. Turner, D. Justic, Q. Dortch, and W. J. Wiseman, Jr. 1999. Characterization of hypoxia: Topic 1 report for the integrated assessment on hypoxia in the Gulf of Mexico. Coastal Ocean Program Decision Analysis Series No. 15. Silver Spring, Md.: NOAA Coastal Ocean Program.

Rabalais, N. N., R. E. Turner, and D. Scavia. 2002. Beyond science into policy: Gulf of Mexico hypoxia and the Mississippi River. BioScience 52 (2): 129-142.

Rogers, J. S. 1985. Water management model evaluation for shallow sandy soils. Trans. ASAE 28(3): 785-790, 794.

Rogers, J. S., and J. L. Fouss. 1989. Hydraulic conductivity determination from vertical and horizontal drains in layered soil profiles. Trans. ASAE 32(2): 589-595.

Rogers, J. S., H. M. Selim, C. E. Carter, and J. L. Fouss. 1991. Variability of auger hole hydraulic conductivity values for a Commerce silt loam. Trans. ASAE 34 (4): 876-882.

Sands, G. R., and R. J. Gaddis. 1985. LANDRAIN: A computer-aided-design (CAD) program for subsurface drainage systems. ASAE Paper No. 85-2556. St. Joseph, Mich.: ASAE .

Schneider, J. D., and J. M. Garbrecht. 2006. Dependability and effectiveness of seasonal forecasts for agricultural applications. Trans. ASABE 49 (6): 1737-1753.

Shalhevet, J. 1994. Using water of marginal quality for crop production: Major issues. Agric. Water Mgmt. 25: 233-269.

Skaggs, R. W. 1978. A water management model for shallow water table soils. Report No. 134. Chapel Hill, N.C.: Water Resources Research Institute, Univ. North Carolina.

Skaggs, R. W 1980. Drainmod reference report: Methods for design and evaluation of drainage-water management systems for soils with high water tables. Ft. Worth, Tex.; USDA-SCS, Nat'l. Technical Ctr.

Skaggs, R. W 1981. Water movement factors important to the design and operation of subirrigation systems. Trans. ASAE 24(6): 1553-1561.

Skaggs, R. W. 1982. Field evaluation of a water management simulation model. Trans. ASAE 25(3): 666-674.

Skaggs, R. W., and J. W. Gilliam. 1981. Effect of drainage system design and operation on nitrate transport. Trans. ASAE 24(4): 929-934.

Skaggs, R. W., and A. Tabrizi. 1983. Optimum drainage for com production. Tech. Bulletin 274. Raleigh, N.C.: North Carolina Agricultural Research Service.

Skaggs, R. W., and A. N. Tabrizi. 1986. Design drainage rates for estimating drain spacings in North Carolina. Trans. ASAE 29(6): 1631-1640.

Skaggs, R. W., N. R. Fausey, and B. H. Nolte. 1981. Water management model evaluation for North Central Ohio. Trans. ASAE 24(4): 922-928.

Tabrizi, A. N., and R. W Skaggs. 1983. Variation of saturated hydraulic conductivity within a soil series. ASAE Paper No. 83-2044. St. Joseph, Mich.: ASAE.

Thomas, D. L., R. R. Lowrance, and M. C. Smith. 1991. Drainage-subirrigation effect on water quality in Georgia Flatwoods. J. Irrig. Drain. Eng. 117(1): 126-137.

Thomas, D. L., P G. Hunt, and J. W. Gilliam. 1992. Water table management for water quality improvement. J. Soil Water Cons. 47(1): 65-70.

U.S. Department of Interior. 1993. Drainage manual. Denver, Colo.: U.S. Department of Interior.

Walker, W R., G. V Skogerboe, and R. G. Evans. 1979. Reducing salt pickup from irrigated lands. J. Irrig. Drain. Eng. 105: 1-14.

Welch, B. 2002. 3-D systems save prep time (Trimble). Construction News, August 19, 2002: 4 pp.

Willis, G. H., J. L. Fouss, J. S. Rogers, C. E. Carter, and L. M. Southwick. 1991. Chapt. 11: System design for evaluation and control of agrochemical movement in soils above shallow water tables. In Groundwater Residue Sampling Design, 195-211. ACS Symposium Series 465. Washington, D.C.: ACS.

Youssef, M. A., R. W Skaggs, G. M. Chescheir, and J. W. Gilliam. 2005. The nitrogen simulation model, DRAINMOD-NII. Trans. ASAE 48(2): 611-626.