محاكاة نمط توزيع رطوبة التربة تحت نظام الري التبادلي بالخطوط للذرة الشامية *Zea mays*

حازم حزام أحمد الأشول*[(1)] ومحمد مصلح السنباني[(2)]

(1). قسم التربة والمياه، المحطة الاقليمية للبحوث الزراعية بالمرتفعات الشمالية، الهيئة العامة للبحوث والارشاد الزراعي، صنعاء، اليمن.

(2). قسم التربة والمياه والبيئة، كلية الزراعة، جامعة صنعاء، اليمن.

(*للمراسلة: حازم حزام أحمد الأشول. البريد الإلكتروني: hazemalashwal@yahoo.com).

تاريخ الاستلام: 2020/05/01 تاريخ القبول: 2020/06/12

الملخص

تم تنفيذ تجربة حقلية في المزرعة البحثية التابعة للمحطة الإقليمية لبحوث المرتفعات الشمالية بصنعاء، الجمهورية اليمنية، لدراسة نمط توزيع رطوبة التربة تحت نظام الري التبادلي بالخطوط للذرة الشامية؛ وقد تم تطبيق ست معاملات هي: EFI1 ري تقليدي (كامل) 100% (طريقة المزارع)، EFI2 ري تقليدي 75%، EFI3 50%، AFI1 ري متبادل 100%، AFI2 ري متبادل 75%، AFI3 ري متبادل 50%، بحيث أن معاملات الري الجزئي (الري التبادلي بالخطوط) يتم إضافة نفس كمية مياه الري في معاملات الري التقليدي ولكن لنصف الخطوط، ويتم التبديل بين الخطوط بين رية وأخرى. تم تصميم التجربة وفقا لتصميم القطاعات العشوائية الكاملة RCBD، بثلاثة مكررات، لدراسة تأثير المعاملات المدروسة على مؤشرات الإنتاجية، وكفاءة استخدام المياه، وقورنت المتوسطات بطريقة داكن Duncan عند مستوى ثقة 0.05، وفيما يخص توزيع رطوبة التربة فقد تم استخدام البرنامج الحاسوبي VS2DI وهو نموذج يقوم بمحاكاة حركة الماء ثنائي الأبعاد في التربة بطرق رقمية، وقد تم تخصيص المعاملة EFI1 لعملية المعايرة إذ تم خلالها معايرة بعض المعالم والمتغيرات الخاصة بالتربة، والنتح؛ وبقية المعاملات خصصت لعملية التحقق، وتم الحكم على مدى صحة النموذج من خلال بعض المعايير الإحصائية الخاصة بتقدير مدى التوافق بين قيم المحتوى الرطوبي المقاسة والمقدرة. أظهرت نتائج المحاكاة الحاسوبية أن نمط توزيع رطوبة التربة يمثل أحد الأسباب الهامة لتفوق طريقة الري الجزئي (التبادلي بالخطوط) على الري بالخطط التقليدي، إذ وجد أن رطوبة التربة في جزء من قطاع التربة أسفل الخط المروي تظل مرتفعة بشكل كاف لنمو النبات في معاملات الري التبادلي مقارنة بالتقليدي عند نفس المستوى من كمية مياه الري؛ وقد وجد أيضا أن التسرب العميق أقل؛ بينما التبخر والنتح التراكمي لم يتأثرا كثيرا بطريقة الري، ولكن معدل التبخر والنتح يكون مرتفعا في المراحل الأولى بعد الري في طريقة الري التقليدي مقارنة بالري الجزئي، ثم يحدث العكس في المراحل المتأخرة بعد الري؛ وبينما يكون معدل النتح مرتفعا نوعا ما في معاملات الري التقليدي في البداية فإنه يصل إلى نقطة زمنية محددة ويحدث له انخفاضا ملحوظا وفقا لحالة رطوبة التربة، بعكس معاملات الري الجزئي الذي يكون فيه معدل النتح منخفضا نسبيا في البداية ولكنه يظل ثابت تقريبا مع الزمن، وهذا يعتبر من الأسباب الهامة التي تفسر عدم تأثر الانتاجية بنقص كمية مياه الري بشكل ملحوظ في معاملات الري التبادلي. وتوصي الدراسة بتطبيق هذه التقنية في المناطق الجافة والتي تكون فيها المياه من العوامل المحددة للإنتاج، والتي لا تفي فيها كمية المياه المتاحة بجميع المتطلبات المائية للذرة الشامية للحصول على إنتاجية أعلى مقارنة بالري التقليدي، لأن هذه التقنية تقلل من الضائعات المائية، وتخفف من حدة تأثير الاجهاد المائي على النبات. كما توصي الدراسة بإجراء دراسات تأكيدية فيما يخص الاستجابة الفسيولوجية للنبات بطريقة الري الجزئي ونقص كمية مياه الري فيما يتعلق بمعدل النتح على مستوى الورقة الواحدة للنبات.

الكلمات المفتاحية: الري التبادلي بالخطوط، الري الجزئي، توزيع رطوبة التربة، محاكاة، نموذج VS2DI.

المقدمة:

تعتبر تقنية الري الجزئي Partial Root–zone Drying (PRD) أحد أنواع الري؛ وتقتضي هذه التقنية في ترطيب نصف المجموع الجذري مع ترك النصف الآخر ليجف إلى مستوى معين. ويمكن تطبيق هذه التقنية على معظم المحاصيل البستانية، والحقلية، ومحاصيل الخضر، وغيرها من المحاصيل التي تناسب أنظمة الري بالخطوط، والري بالتنقيط (بنوعيه السطحي وتحت السطحي)، وقد قدم Sepaskhah and Ahmadi, (2010) مراجعة جيدة للدراسات التي تطرقت لهذه التقنية من جوانب مختلفة. يكون الري الجزئي في نظام الري بالخطوط وذلك بري نصف الخطوط أي ري خط وترك خط (ري كل ثاني خط)، وقد يكون ثابت أي ري نفس الخط في كل مره حتى نهاية الموسم أو متبادل Alternate Furrow Irrigation حيث يتم فيه التبديل في الريات بري نصف الخطوط وترك الأخرى بدون ري وفي الرية التالية يتم ري الخطوط التي لم تروى في الرية السابقة والعكس في كل رية. إن فواقد العناصر الغذائية والمياه عن طريق التسرب العميق قد ينتج عنه كفاءة منخفضة لاستخدام المياه والعناصر الغذائية تحت نظام الري الكامل (Panigrahi *et al.*, 2011). ويمكن تحقيق كفاءة أعلى في استخدام المياه لأي محصول بواسطة رفع الانتاجية و/أو تقليل الفواقد المائية بالتسرب العميق والتبخر من الحقل وتحت نظام الري الجزئي يتوقع انخفاض هذه الفواقد من خلال الترطيب الجزئي لسطح التربة، كما يمكن تحقيق كفاءة أعلى لاستخدام العناصر الغذائية عن طريق تقليل التسرب العميق والتوزيع المناسب للعناصر الغذائية في منطقة الجذور (Panigrahi *et al.*, 2011). إن الحركة الجانبية للمياه في نظام الري الجزئي بالخطوط يمثل مكونا هاما في عملية الرشح، كذلك فإن تقنية الري الجزئي تقلل من كمية المياه المفقودة بالتسرب العميق مما يرفع كفاءة استخدام المياه (Sepaskhah and Kamgar–Haghighi, 1997; Hodges *et al.*, 1989). كما أن رطوبة التربة وتوزيعها المكاني في منطقة الجذور تؤثر معنويا في التبخر–نتح الفعلي ET_c (Panigrahi *et al.*, 2011). لقد قام Kang *et al.* (2000) بدراسة توزيع رطوبة التربة، وانتظامية الري، والميزان المائي تحت نظام الري الجزئي لمحصول الذرة الشامية في المناطق الجافة تحت نظام الري بالخطوط؛ وأظهرت النتائج أن معاملة الري الكامل حقق فارق معنوي في التسرب العميق والتبخر من سطح التربة، كما أشارت النتائج أيضا إلى أن معامل الانتظامية يميل إلى أن يكون أعلى في معاملة الري التبادلي بالخطوط، كما وجد انخفاض معدل التبخر تحت نظام الري الجزئي مقارنة بالري التقليدي. وفي دراسة أجراها Tafteh and Sepaskhah, (2012) بتطبيق نموذج HYDRUS–1D لمحاكاة التسرب العميق للمياه وغسيل والنترات في ثلاث معاملات من الري بالخطوط لمحصول الذرة الشامية هي: ري تقليدي (ري جميع الخطوط)، ومعاملتي ري جزئي تبادلي وثابت؛ وأظهرت النتائج أن مقدار التسرب العميق قد انخفض بنسبة 40٪ و 57٪ في معاملتي الري الجزئي التبادلي والثابت على التوالي مقارنة بمعاملة الري التقليدي. وفي تجربة أجراها Ebrahimian *et al.*, (2012) لدراسة توزيع وضائعات الماء والنترات تحت نظام الري الجزئي بالخطوط، مع إضافة الأسمدة، وقد تم استخدام طريقة الميزان المائي لتقدير الضائعات لثلاث معاملات ري بالخطوط هي: ري تقليدي (ري جميع الخطوط)، ري جزئي تبادلي، وري جزئي ثابت، بحيث ان معاملتي الري الجزئي تستقبل 50% من كمية مياه الري في معاملة الري التقليدي؛ وخلصت النتائج إلى أن كمية الضائعات المائية بالتسرب العميق والجريان السطحي أقل في معاملتي الري الجزئي عنها في معاملة الري التقليدي، وكذلك الحال بالنسبة للنترات المغسولة وقد عزى الباحثون ذلك إلى أن مقدار الرشح في معاملتي الري الجزئي كانت أعلى منها في الري التقليدي وكذلك الحركة الأفقية للماء في التربة، وبسبب حركة الماء الأفقية يعتبر الري الجزئي بالخطوط ذو كفاءة لتقليل الضائعات المائية بالتسرب العميق والجريان السطحي. تهدف هذه الدراسة إلى نمذجة نمط توزيع رطوبة التربة وعناصر الميزان المائي بطريقة رقمية عن طريق استخدام النموذج الحاسوبي الرقمي VS2DTI ثنائي الأبعاد تحت نظام الري التبادلي بالخطوط للذرة الشامية، وتقييم دقة النموذج في محاكاة حركة الماء في التربة.

مواد البحث وطرائقه:

1-موقع وظروف التجربة:

تم تنفيذ التجربة في المزرعة البحثية التابعة للمحطة الإقليمية لبحوث المرتفعات الشمالية، صنعاء، العره (lat. 15° 30' N; long. 44° 12' E) 2200 مترا فوق سطح البحر. ويوضح الجدول (1) أهم الخصائص الفيزيائية للتربة، كما يوضح الجدول (2) أهم عناصر المناخ المقاسة بواسطة المحطة المناخية التابعة للمزرعة البحثية خلال موسم النمو. تم تقسيم التجربة إلى وحدات تجريبية تحتوي كل وحدة تجريبية على خمسة خطوط مغلقة من الجهتين (خمس قمم وست قيعان) بمساحة 15.6 متر مربع، طول الخط الواحد 4 أمتار والمسافة بينها 0.65 مترا. وتم زراعة بذور الذرة الشامية صنف Taiz-2 وهو صنف مطلق من قبل الهيئة العامة للبحوث الزراعية في المحطة الاقليمية لبحوث المرتفعات الجنوبية (المؤسسة العامة لإكثار البذور، 2002) وذلك بمسافة زراعية 0.65 م × 0.30 م.

الجدول 1. بعض الخصائص الكيميائية والفيزيائية لتربة منطقة تنفيذ الدراسة

خصائص التربة	وحدة القياس	طبقة التربة	
		0-35 سم	35- 100 سم
- الرمل	%	16	11
- السلت	%	48	39
- الطين	%	36	50
- قوام التربة	-	Silty clay loam	Silty clay
- درجة التوصيل الكهربائي EC	مليموز/سم	0.87	0.87
- الرقم الهيدروجيني pH	-	8	7.9

الجدول 2. أهم عناصر المناخ لمنطقة الدراسة خلال موسم النمو (مأخوذة من المحطة المناخية التابعة للمزرعة البحثية)

الشهر	مايو	يونيو	يوليو	أغسطس	سبتمبر	أكتوبر
متوسط درجة الحرارة العظمى، درجة مئوية	28.1	29.4	31.2	29.7	28.7	26.2
متوسط درجة الحرارة الصغرى، درجة مئوية	13	13.7	14.2	13.9	10.7	7.6
متوسط درجة الحرارة، درجة مئوية	21.3	22.58	23.50	22.16	21.30	18.21
متوسط الرطوبة النسبية، %	42.45	26.30	31.22	47.29	28.25	31.90
متوسط سرعة الرياح، متر/ثانية	0.76	1.15	0.88	0.74	0.71	0.55
متوسط الضغط الجوي، متر	1007	1004	1002	1003	1006	1011
كمية الأمطار، مم/شهر	59.2	1	0	68.4	0.2	0

2-تصميم التجربة والمعاملات المدروسة:

تم إضافة رية محاياة بعد اسبوع من الزراعة (بعد الإنبات) بمقدار 30 مم؛ كما تم إضافة ريتين أخريين قبل تطبيق المعاملات بمقدار 38 مم، 40 مم للرية الأولى والثانية على التوالي، ثم بعد ذلك تم تطبيق المعاملات (من الرية الرابعة وما بعدها) بإضافة 8 ريات أخرى بحسب المعاملات. وكان يتم ري كل خط على حده عن طريق خرطوم متصل به عداد مياه لقياس كمية مياه الري المراد إضافتها باللتر لكل خط. وتم دراسة ست معاملات هي: EFI1 ري جميع الخطوط (تقليدي) وكمية مياه ري تعادل 100% من اضافة المزارع (الشاهد)، EFI2 ري جميع الخطوط (تقليدي) وكمية مياه ري تعادل 75% من اضافة المزارع، EFI3 ري جميع الخطوط (تقليدي) وكمية مياه ري تعادل 50% من اضافة المزارع، AFI1 ري بالخطوط التبادلي وكمية مياه ري تعادل 100% من اضافة المزارع، AFI2 ري بالخطوط التبادلي وكمية مياه ري تعادل 75% من اضافة المزارع، AFI3 ري بالخطوط التبادلي وكمية مياه ري تعادل 50% من اضافة المزارع. وفي معاملات الري بالخطوط التبادلي يتم ري خط وترك الخط الآخر بدون ري وفي الرية التالية يتم التبديل بين الخطوط بحيث يتم ري الخط الذي لم يتم ريه في الرية السابقة والعكس. وقد تم تطبيق المعاملات من الرية الرابعة (بعد 50 يوم من الزراعة)؛ وتعتبر المعاملة EFI1 هي معاملة الشاهد (طريقة المزارع)؛ وقد تم قياس كمية المياه التي يضيفها المزارع من خلال تركيب عداد مياه في حقل يروى من قبل المزارعين وذلك بقسمة كمية المياه على المساحة المروية، وقد بلغ متوسط كمية مياه الري المضافة بحدود 55 مم في الرية الواحدة. وتم قياس كمية مياه الري بالـ مم لباقي المعاملات وفقا لهذا. وتم حساب كمية المياه المراد

إضافتها لكل خط من طريقة الري التقليدي EFI بضرب مساحة الخط (4 م * 0.65 م) في عمق الماء المراد إضافته (55 مم) حيث بلغت 143 و107.25 و71.5 لتر/ خط لكل من مستويات كمية مياه الري 1، 2، 3 على التوالي؛ اما فيما يخص طريقة الري بالخطوط التبادلي AFI فكمية مياه الري لكل خط تبلغ ضعف مثيلتها في طريقة الري التقليدي حيث بلغت 286 و 214.5 و 143 لتر/ خط لكل من مستويات كمية مياه الري 1، 2، 3 على التوالي.

وصف النموذج:

برنامج VS2DTI هو حزمة حاسوبية يستخدم عدة تركيبات من لغات البرمجة Java, C, Fortran ذات واجهة ادخال واخراج البيانات على صورة رسوم بيانية لنمذجة حركة الماء و/أو انتقال الأملاح في وسط مسامي مشبع جزئيا والنماذج الرقمية المستخدمة في الحسابات هي نماذج VS2DT الذي تم تطويره من قبل U.S Geological Survey (Hsieh *et al.*, 2000)، وتم تصميمة بلغة Fortran77، ويتم استخدامه في انواع مختلفة من الدراسات الحقلية، هو نموذج يقوم بحل صورة معدلة من معادلة Richard في بعد واحد أو بعدين (معادلة 1) بطريقة الفروق المحددة، (Lappala *et al.*, 1987). إن العمليات الرياضية التي أجريت بدمج قانون حفظ الكتلة مع الصيغة غير الخطية لقانون دارسي مشابهه تماما لما هو عليه في معادلة Richard، عدا بعض التحويلات الرياضية والاستعاضة ببعض المتغيرات مثل الحد الخاص بالتخزين $\frac{\partial\theta}{\partial t}$ الذي يستعاض عنه باستخدام قاعدة الانتاجية product rule إلى سلسلة من المتغيرات تتضمن السعة الرطوبية النوعية specific moisture capacity $C_m = \frac{\partial\theta}{\partial h}$ والتي تعبر عن ميل منحنى احتفاظ التربة بالماء، وانضغاطية الجزء الصلب matrix compressibility α_c ، وانضغاطية السائل fluid compressibility β_c، والتخزين النوعي specific storage S_s. ولتفاصيل أكثر حول هذه النقطة مراجعة (Lappala *et al.*, (1987، وينتج بعد هذا التحويل معادلة غير خطية يقوم البرنامج بحلها، ويعتمد البرنامج على طريقة الفروق المتناهية Finite–differences عن طريق قيام المستخدم بتقسيم مجال المحاكاة إلى شبكة من المستطيلات ثنائية الأبعاد يطلق على كل منها خلية، وبهذا يتم الاستعاضة عن الجزء الأيمن من معادلة التفاضل الجزئي بنظام من معادلات التفاضل العادي التي تصف الميزان المائي لكل خلية من خلايا الشبكة المكانية؛ ويتم في نفس الوقت تقسيم شبكي للزمن بتقسيم زمن المحاكاة إلى فترات زمنية متناهية في الصغر وذلك لتحويل الجزء الأيسر من معادلة تفاضل جزئي إلى تفاضل عادي. وينتج من هذا نظام من المعادلات الجبرية الآنية غير الخطية لكل نقطة زمنية ومكانية من نقاط التقسيم الشبكي الزماني والمكاني والتي يمكن كتابتها على هيئة مصفوفة رياضية. وتتضمن المصفوفة أجزاء ضمنية لبعض متغيرات التربة تعتمد على الضاغط وهذا يجعلها غير خطية. ويتم تحويل نظام المعادلات غير الخطية عن طريق عدة تحويلات رياضية، فمثلا الأجزاء الضمنية التي تعود إلى خزن التربة يتم تحويلها بطريقة Newton–Raphson technique بطريقة تكرارية والتي تتطلب جهود حسابية إضافية.

$$\frac{\theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left[K\left(\frac{\partial h}{\partial x}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[K\left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1\right)\right] - S \qquad (1)$$

حيث، x المسافة الأفقية [L]، h جهد ماء التربة كضاغط [L]، θ المحتوى الرطوبي الحجمي $[\mathrm{L}^3/\mathrm{L}^3]$، t الزمن $[T]$، z العمق [L]، S مصدر أو مستجمع الماء $[\mathrm{L}^3\mathrm{L}^{-3}\mathrm{T}^{-1}]$، K التوصيل الهيدروليكي غير المشبع $[\mathrm{LT}^{-1}]$. ولا يوجد لمعادلة التفاضل الجزئي السابقة حلا عاما سواء كان تحليلي أو مغلق الشكل؛ وبالتالي يتحتم إجراء بعض التقريبات الرقمية للاشتقاقات المكانية والزمانية عن طريق تقسيم الزمان والمكان إلى شبكة؛ وتقود هذه التقريبات إلى نظام معادلات جبرية آنية غير خطية، والتي يتطلب جعلها غير خطية ثم يتم حلها ويتطلب إنجاز الحل إلى معرفة العلاقة بين متغيرات ومعالم التربة الهيدروليكية، وهناك عدة نماذج لهذا الغرض (Lappala *et al.*, 1987)، وقد تم استخدام نموذج Van Genuchten–Mualem المغلق الشكل في هذه الدراسة حيث يتم التعبير عن التوصيل الهيدروليكي غير المشبع K كدالة في التوصيل الهيدروليكي المشبع K_S $[\mathrm{LT}^{-1}]$ والتوصيل الهيدروليكي النسبي K_r $[-]$، ويمكن صياغة هذه الدالة بالشكل التالي:

$$K(h,z) = K_S(z)K_r(h,z) \qquad (2)$$

ولكي يتم انجاز الحل لابد من معرفة العلاقة بين المتغيرين θ و h وإيجاد حل لدالة التوصيل الهيدروليكي المبينة في المعادلة رقم (2)، وتوجد العديد من المناقشات والمحاولات لإيجاد الحل ومن أهم هذه المحاولات نموذج Van Genuchten–Mualem؛ حيث وقد قام Mualem (1976) باشتقاق نموذج للتنبؤ عن التوصيل الهيدروليكي من معرفة منحنى احتفاظ التربة بالماء والتوصيل الهيدروليكي المشبع، ويقود هذا الاشتقاق إلى معادلة تكاملية بسيطة لوصف التوصيل الهيدروليكي النسبي K_r:

$$K_r = S_e^l \left(\int_0^{S_e} \frac{dS_e}{h(S_e)} \Big/ \int_0^1 \frac{dS_e}{h(S_e)} \right)^2 \qquad (3)$$

والتي تتضمن دالة للضاغط $h(S_e)$ في المحتوى الرطوبي عديم الأبعاد أو التشبع الفعال S_e والذي يعبر عنه بالصيغة التالية:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \qquad (4)$$

حيث θ المحتوى الرطوبي $[L^3/L^3]$، θ_r المحتوى الرطوبي المتبقي $[L^3/L^3]$ وهو المحتوى الرطوبي لتربة جافة جدا عنما يكون التوصيل الهيدروليكي مساويا للصفر، θ_s المحتوى الرطوبي المشبع $[L^3/L^3]$. ولغرض حل المعادلة المشتقة من قبل Mualem هناك حاجة الى تعبير رياضي يربط بين التشبع الفعال مع الضاغط وقد أعطى Van Genuchten (1980) معادلة تصف هذه العلاقة بالتعبير الرياضي التالي:

$$Se = \left(\frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right)^m \qquad (5)$$

وبربط المعادلات السابقة ولأجل تبسيط الحل فقد أعتبر h موجبا في المعادلة (5) مع أخذ قيمة m مساوية لـ $1-1/n$ و n أكبر من الواحد ليتم إنجاز التكامل بسهولة وبعد اجراء العمليات الرياضية تم الحصول في النهاية على نموذج تحليلي مغلق الشكل من قبل Van Genuchten (1980) والذي يمكن توضيحه كما يلي:

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \dfrac{\theta_s + \theta_r}{[1 + |\alpha h|^n]^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \qquad (6)$$

$$K(h) = K_s S_e^l \left[1 - \left(1 - S_e^{1/m} \right)^m \right]^2 \qquad (7)$$

إن المعادلات السابقة تتضمن خمسة متغيرات أو معالم مستقلة (المعالم الهيدروليكية للتربة) هي θ_s، θ_r، α، n، K_s بالإضافة الى المتغير l الذي يعبر عن ايصالية المسام (pore–connectivity)، والذي وجد بأنه يساوي 0.5 للغالبية العظمى من الترب الزراعية (Mualem, 1976). ويمكن الحصول على قيم هذه المعالم من النماذج التحليلية مغلقة الشكل عن طريق مطابقة المنحنيات إما بطريقة الشكل البياني أو باستخدام الحاسب الآلي بواسطة عملية تعديل المربعات الدنيا الى الحل الأمثل (least–square optimization process) المعتمد على طريقة المجاورة العظمى (Maximum neighbourhood method).

ولأجل تحقيق الغرض من هذه الدراسة في محاكاة حركة الماء في التربة ونمذجة نمط توزيع رطوبة التربة فقد تم استخدام النموذج الحاسوبي VS2DTI version1.3 (Hsieh *et al.*, 2000). ويتطلب الحل معرفة الظروف الابتدائية والظروف الحدودية، ويمكن أن تكون الظروف الابتدائية إما محتوى رطوبي أو ضاغط في جميع أنحاء مجال المحاكاة عند الزمن صفر او في بداية عملية المحاكاة، أو يمكن أن يكون على أساس معرفة حالة الاتزان لماء التربة equilibrium في الحالة المستقرة؛ أما الظروف الحدودية يمكن أن تكون إما ضاغط من الماء أو تدفق ثابت داخل أو تبخر–نتح أو خليط منها للظروف الحدودية العليا، صرف حر أو نزّ

seepage للظروف الحدودية السفلى والجانبية. ويتم حساب التبخر الفعلي عند أي نقطة من الحدود العليا على أنه مقدار التدفق إلى أعلى بسبب انحدار في جهد الضغط بين التربة والجو، ويتم حسابه كالتالي:

$$E_a = KK_r\, SRES\, (HA - h) \qquad (8)$$

حيث: E_a التبخر الفعلى من سطح التربة [L/T]، K التوصيل الهيدروليكي غير المشبع للتربة [L/T]، K_r التوصيل الهيدروليكي النسبي [–]، $SRES$ مقاومة السطح [L^{-1}] وتساوي 2/DELZ(2)، حيث DELZ(2) عبارة عن المسافة بين أول نقطة من الأعلى لشبكة التقسيم المكاني إلى سطح التربة، h جهد الضغط للتربة [L]، HA جهد الضغط للجو [L] الذي يمكن حسابة من المعادلة:

$$HA = \frac{RT}{M_w g} \ln h_a \qquad (9)$$

حيث: R ثابت الغاز المثالي [$ML^2\ T^{-2}\ K^{-1}\ Mol^{-1}$]، T درجة الحرارة المطلقة [K]، M_w كتلة مول واحد من الماء [$M\ Mol^{-1}$]، g عجلة الجاذبية الأرضية [LT^{-2}]، h_a الرطوبة النسبية للهواء [–]. أما النتح الفعلي فيتم حسابه كالتالي عند كل نقطة من نقاط التقسيم الشبكي المكاني:

$$T_{ai} = KK_r(h) \times r(z,t) \times (h_{root} - h) \qquad (10)$$

حيث: $r(z,t)$ عبارة عن دالة نشاط الجذور [L^{-2}]، وهي دالة في الزمان والمكان، h_{root} الضاغط في الجذور [L]، ويتم حساب النتح الفعلي على أنه مجموع النتح الفعلي عند كل نقطة تحتوي على جذور. وليتمكن البرنامج من حساب النتح الفعلي يجب توفر خمسة مدخلات هي: التبخر–نتح الكامن T_p [LT^{-1}]؛ جهد الضغط في جذور النبات h_{root}؛ عمق الجذور $L_r(t)$ أقصى عمق للجذور عند زمن حساب النتح؛ نشاط الجذور RABOT ، RATOP [L^{-2}] السفلي والعلوي على التوالي، وهو عبارة عن دالة لنشاط الجذور في طبقة التربة السفلية والعلوية على التوالي في مجال المحاكاة ويعبر عنها بالكثافة الطولية للجذور Root Length Density (RLD) وهي عبارة عن طول الجذور في حجم معين من التربة.

معايرة النموذج:

تم اختيار المعاملة EFI1 لإجراء عملية معايرة النموذج عليها وباقي المعاملات لعملية التحقق. يحتاج برنامج VS2DTI للعديد من المدخلات لتنفيذ عملية المحاكاة، وتتمثل هذه المدخلات في أبعاد مجال عملية المحاكاة، ومدخلات خاصة بالتربة، وظروف ابتدائية تتمثل في رطوبة التربة عند الزمن صفر، ومدخلات خاصة بالظروف الحدودية كالتبخر والنتح والأمطار والري والصرف وغيرها، ويمكن تفصيلها فيما يلي:

1–مجال عملية المحاكاة:

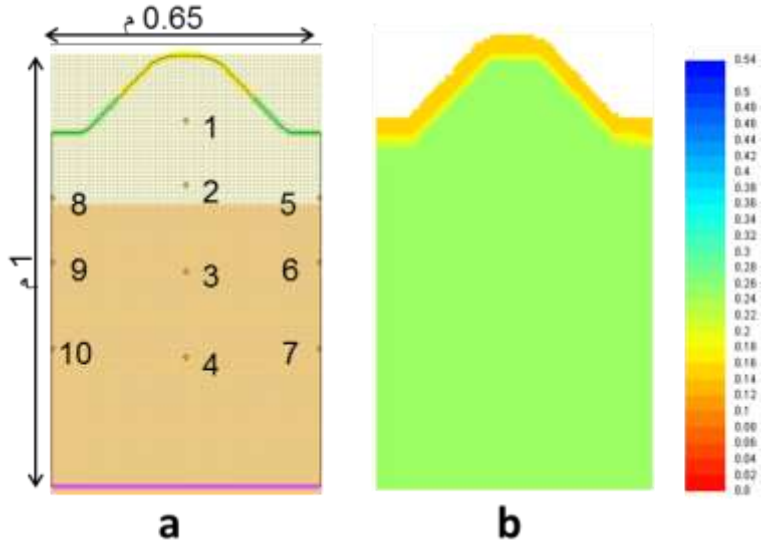
يوضح الشكل (1) مجال عملية المحاكاة. وتم تحديد 10 نقاط مراقبة عند احداثيات محددة.

1–1–التربة:

تم إدخال المعالم الهيدروليكية المأخوذة من (Al–Ashwal, 2016) والتي تظهر في الجدول (3)، بالإضافة إلى مدخلات أخرى خاصة بالتربة والتي تتمثل في التخزين النوعي S_s والذي تم وضع القيمة الافتراضية في البرنامج التي تساوي $10^{-4}\ m^{-1}$؛ وكذلك النسبة بين التوصيل الهيدروليكي الرأسي إلى الأفقي Kzz/Khh والذي تم معايرته بطريقة المحاولة والخطأ ابتداء من القيم الافتراضية في البرنامج حتى تم الحصول على أفضل توافق بين قيم المحتوى الرطوبي المقاسة والمقدرة.

1–2–الظروف الابتدائية:

تم استخدام المحتوى الرطوبي لقطاع التربة عند الزراعة كظروف ابتدائية إذ تم قياس المحتوى الرطوبي لعدة نقاط ضمن مجال المحاكاة بالطريقة الوزنية، وتحويلها إلى رطوبة حجمية بالاستفادة من الكثافة الظاهرية، ويوضح الشكل (1) توزيع رطوبة التربة في قطاع التربة عند الزمن صفر أو زمن بداية عملية المحاكاة عند الزراعة.



الشكل 1. (a) مجال عملية المحاكاة والظروف الابتدائية ونقاط المراقبة والظروف الحدودية، (b) المحتوى الرطوبي الابتدائي

الجدول 3. المعالم الهيدروليكية لطبقتي التربة المقدرة بطريقة الحل العكسي ومقدار الخطأ القياسي (SE) فيما يخص الثلاثة المعالم α، n، وK_s المقدرة بواسطة الحل العكسي

طبقة التربة	المعالم الهيدروليكية للتربة	طريقة الحل العكسي	SE
1	θ_r cm^3/cm^3	0.04	
	θ_s cm^3/cm^3	0.52	
	α m^{-1}	0.599	± 0.1279
	n	2.0533	± 0.024025
	K_s m/h	0.002577	± 0.0005883
	l	0.5	
2	θ_r cm^3/cm^3	0.04	
	θ_s cm^3/cm^3	0.54	
	α m^{-1}	1.2978	± 0.58618
	n	1.7774	± 0.19847
	K_s m/h	0.060	± 0.064578
	l	0.5	

المصدر: Al-Ashwal (2016)

1-3-الظروف الحدودية:

وتم تحديد أربعة ظروف حدودية هي: الظروف الحدودية السفلية وتم اعتبارها صرف حر أو صرف بالجاذبية، والظروف الحدود الجانبية وتم اعتبار أنه لا يوجد عندها سريان للماء (q=0) نظرا لوجود تماثل محوري للسريان عند هذه الحدود. أما الحدود العلوية فهي معقدة نسبيا وتتضمن نوعين من الحدود هما: معدل تدفق داخل (ري وأمطار)، ومعدل تدفق خارج (تبخر ونتح). وتتضمن الحدود العليا مدخلات كثيرة ضمن فترات زمنية تسمى فترة تغذية Recharge Period (RP)، وتعرف على أنها فترة يسري خلالها ظرف حدودي محدد أو أكثر تتضمن معدلات تغذية أو تبخر–نتح، وقد تم تحديد 41 فترة بحيث تم تخصيص RP واحدة لكل عملية ري وكل عملية تساقط أمطار، وأخرى لفترات للتبخر نتح (11 فترة للري، 9 فترات للأمطار، 21 فترة ما بين كل ريتين أو كل فترتين تغذية من الري

أو المطر). وتضمنت الفترة الخاصة بالري والمطر ظرفين حدوديين هما ري أو مطر و تبخر–نتح، وتضمنت الفترات بين الريات أو الأمطار ظرف حدودي واحد هو التبخر نتح؛ وفيما يلي تفصيل لهذه المدخلات:

- تدفق داخل رأسي Specified flux into domain– vertical (qv): تم إدخال كمية الري والمطر على أساس تدفق داخل رأسي بوحدات م/ساعة كمعدل ثابت لكل رية أو مطر، وتم إتاحة وقت كافي لاستيعاب كمية مياه الري أو المطر كما تم عمله في دراسة أجراها Mckeering (2004) حتى يتم استيعاب كمية المياه المطلوبة؛ نظرا لصعوبة تطبيق حدود Dirichlet[1] في الحقل (Bethune *et al.*, 2008).
- تبخر/نتح Evaporation/Transpiration (ET): تتضمن هذه الظروف الحدودية مدخلات كثيرة هي: E_p، SRES، HA، T_p، L_r، RABOT، RATOP، h_{root} (والتي سبق تعريفها)؛ وقد تم إدخال هذه البيانات لكل ساعة. ويجب الفصل بين التبخر الكامن E_p والنتح الكامن T_p قبل إدخالها في البرنامج، بالاستفادة من التبخر–نتح المرجعي ET_O والذي يمكن اعتباره في هذه الحالة على أنه التبخر–نتح الكامن (Simunek, 2015 اتصال شخصي) والتي تم الحصول عليها من محطة الأرصاد الجوية التابعة للمزرعة البحثية لكل ساعة وقد تم فصلهما بالمعادلة التالية (Simunek et al., 2009):

$$E_p(das) = \left(1 - Cp(das)\right) ET_O \qquad (11)$$

$$T_p(das) = Cp(das)\, ET_O \qquad (12)$$

حيث $Cp(das)$ معامل الفصل أو التغطية على أساس يومي، وتم حسابة على أساس يومي من المعادلة التالية:

$$Cp(das) = 1 - e^{-\propto LAI(das)} \qquad (13)$$

حيث $\propto$ معامل النبات، $LAI(das)$ دليل المساحة الورقية اليومي، والذي تم حسابة وفقا للنموذج الذي قدمه Mailhol *et al.*, (1997)[2]:

$$LAI(das) = LAI_{max}\left[\left(\frac{TT(das) - T_S}{T_f}\right)^2 exp\left\{\frac{2}{\delta}\left(1 - \left(\frac{TT(das) - T_S}{T_f}\right)^{\delta}\right)\right\} - (1 - \left(stress(das)\right)^{\gamma}\right] \qquad (14)$$

$$TT(das) = \sum_{k=1}^{k=das} (T(das) - T_b) \qquad (15)$$

حيث: LAI_{max} دليل المساحة الورقية الأقصى، $TT(das)$ الزمن الحراري على أساس يومي (C°.days) thermal time، T_S الزمن الحراري للإنبات، T_f الزمن الحراري عند وصول النبات إلى LAI_{max}، δ معامل يتعلق عكسيا بميل منحنى LAI، $T(das)$ متوسط درجة الحرارة اليومية C°، T_b درجة الحرارة الأساسية للمحصول (C°) crop base temperature، ويتعلق الحد الأخير $(1 - \left(stress(das)\right)^{\gamma}$ بعدد أيام الاجهاد المائي الذي تعرض له النبات. وقد تم حساب دليل المساحة الورقية اليومي لكل معاملة على حده وفقا لقيم المتغيرات على النحو التالي: حيث تم حساب قيمتي T_S و T_f من واقع بيانات متوسط درجة الحرارة اليومية المقاسة وملاحظة نمو المحصول (عدد الأيام حتى الانبات وحتى الوصول إلى أقصى مساحة ورقية) حيث بلغتا 96.8 و 1220 درجة مئوية.يوم على التوالي؛ ودليل المساحة الورقية الأقصى تم حسابة من خلال قسمة المساحة الورقية للنبات على المساحة التي يشغلها النبات لكل معاملة على حده، أما بالنسبة لقيمة T_b فقد اختلفت الكثير من المراجع في تحديد قيمته، فقد تراوحت بين 6 – 10 درجة مئوية، ولكن أغلب المراجع أوردت القيمة 8 C° مثل (Yang *et al.*, 2004) وغيرها، لهذا فقد تم اعتماد هذه القيمة في هذه الدراسة. كذلك الحال بالنسبة لقيمة معامل النبات $\propto$ فقد تفاوتت قيمته من مرجع إلى آخر وتراوحت قيمته بين 0.55 – 0.85، وقد تم اعتبار قيمته 0.70 كما في كثير من الدراسات مثل (Mailhol *et al.*, 1997; Schmitz *et al.*, 2007)؛ أما قيمة δ فقد تم اعتبارها

[1] وهو نوع من الظروف الحدودية الذي يعبر عن معدل التغير في ضاغط الماء فوق سطح التربة مع الزمن (Lappala *et al.*, 1987)

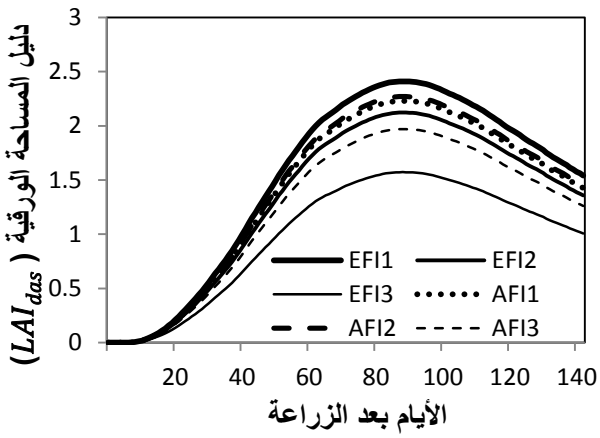
[2] النموذج مقدم أساسا لنمذجة دليل المساحة الورقية لنباتات الذرة الرفيعة، ولكن كثير من الدراسات تستخدمه للذرة الشامية بتغيير قيم بعض المتغيرات.

1.75 (Mailhol *et al.*, 1997)؛ وتم حساب دليل المساحة الورقية اليومي لكل معاملة على حده، ويظهر الشكل (2) منحنيات دليل المساحة الورقية للمعاملات المدروسة.

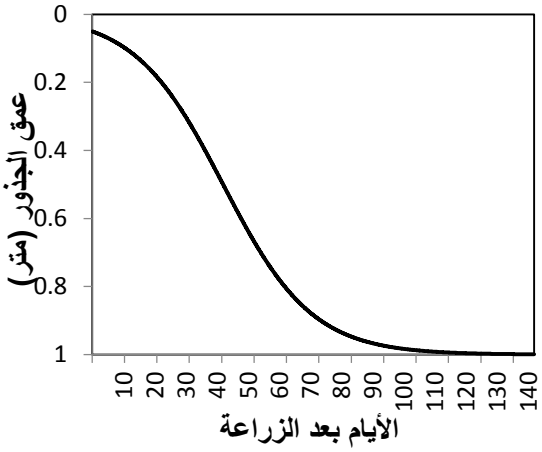
وتم بعد ذلك حساب التبخر الكامن والنتح الكامن لكل ساعة بضرب قيمها في ذلك اليوم بقيم معاملي التصحيح لذلك اليوم، أما مقاومة السطح *SRES* تم حساب قيمته والتي تساوي $200\ m^{-1}$، حيث وهو يساوي 2 على المسافة من السطح حتى أول نقطة من التقسيم الشبكي المكاني، أما جهد الضغط في الجو *HA* فتم حسابه لكل ساعة من خلال المعادلة (9) سالفة الذكر، بالاستفادة من البيانات المناخية المقاسة الداخلة في المعادلة (Lappala *et al.*, 1997). أما دالة نشاط الجذور *r(z,t)* فإنها تتضمن دالة عمق الجذور، ودالة نشاط الجذور؛ وقد تم حساب عمق الجذور L_r كدالة في الزمن بحسب النموذج الذي ورد في Simunek *et al.* (2009), Tafteh and Sepaskhah (2012) كالتالي:

$$L_r(t) = L_m\left[\frac{L_o}{L_o + (L_m - L_m)e^{-rt}}\right] \qquad (16)$$

حيث: $L_r(t)$ عمق الجذور عند زمن t [سم]، L_m أقصى عمق للجذور [سم] وقد تم اعتباره مساويا لعمق المحاكاة 100 سم، L_o العمق الابتدائي للجذور [سم] وهو يساوي عمق البذار 5 سم، r معدل نمو الجذور ويساوي 0.07 سم/يوم للذرة الشامية (Tafteh and Sepaskhah, 2012)، t الزمن باليوم ويظهر الشكل (3) منحنى عمق الجذور مع الزمن.



الشكل 2. دليل المساحة الورقية مع الزمن للمعاملات المختلفة



الشكل 3. دالة عمق الجذور مع الزمن

وتعتبر كثير من المصادر أن قيمة الضاغط في الجذور h_{root} تساوي −150 م لمعظم المحاصيل الزراعية (Lappala *et al.*, 1987)؛ وفيما يخص نشاط الجذور العلوي والسفلي RABOT، RATOP، فلم نجد نموذج واضح يصف نشاط الجذور (والذي يعبر عنه بالكثافة الطولية للجذور Root Length Density RLD بوحدة m^{-2}) كدالة في الزمان والمكان، وتؤثر في قيمها كثير من العوامل المحصولية وعوامل التربة (فيزيائية وكيميائية) (Zhuang *et al.*, 2001). كما أنه وبعد الاطلاع على كثير من الدراسات التي تناولت هذا الموضوع فقد وجد أن قيمة RLD لنبات الذرة الشامية تتفاوت كدالة في الزمان والمكان، حيث تتفق الكثير من الدراسات أن قيمة RLD السفلية أقل تغيرا للتغير في الزمن حيث تتراوح بين 200 – 1000 م$^{-2}$ (Zhuang *et al.*, 2001; Peng *et al.*, 2012) بمتوسط 600 م$^{-2}$، أما قيمة RLD العلوي فيتفاوت كثيرا مع الزمن وبحسب موقعة من النبات حيث يبدأ بقيم صغيرة من $2000\ m^{-2}$ في بداية الموسم ثم ترتفع تدريجيا الى ان تصل إلى $12000\ m^{-2}$ اسفل النبات و $1000\ m^{-2}$ بعيد عن النبات في منتصف الموسم ثم يبدأ في التناقص (Peng *et al.*, 2012). وتشير كثير من الدراسات إلى أن قيم RLD العلوي تتراوح في المتوسط من 4000 الى 8000 بمتوسط $6000\ m^{-2}$، ونظرا لعدم وجود نموذج منشور لنمذجة RLD كدالة في الزمان والمكان فقد

تم افتراض أن قيمة RLD العلوية متماثلة مكانيا وتزداد خطيا من $2000\ m^{-2}$ إلى $6000\ m^{-2}$ مع الزمن حتى أقصى مرحلة للنمو ثم يتناقص إلى أقل قيمة، اما قيمة RLD السفلي فقد تم افتراض أنها ثابته في كل من الزمان والمكان وتساوي $600\ m^{-2}$.

1-4-التقسيم الشبكي:

تم تقسيم مجال المحاكاة إلى مربعات صغيرة ذات أبعاد (1×1 سم) بحيث يكون هناك 100 صف و65 عمود؛ أما فيما يخص تقسيم الزمن فقد تم تقسيم كل فترة تغذية RP سالفة الذكر إلى فترات زمنية صغيرة وفق الإعدادات التالية: الخطوة الزمنية الأولى Initial time step (DELT) = 10^{-10} ساعة، مضاعفة الخطوة الزمنية(TMLT) Time step multiplier = 1.2، أقصى فترة زمنية Maximum time step (DLTMX) = 12 ساعة لفترة التبخر–نتح، 1 ساعة لفترة الري أو المطر، أصغر فترة زمنية Minimum time step (DLTMIN) = 10^{-12} ساعة، عامل تخفيض الخطوة الزمنية Time step reduction factor (TRED) = 0.1.

تم أخذ العديد من العينات لتقدير المحتوى الرطوبي الحجمي وذلك لغرض مقارنة قيم المحتوى الرطوبي المقاسة والمقدرة وقد تم أخذ العينات من أعماق وأماكن مختلفة بحيث تكون ممثلة للمحتوى الرطوبي عند نقاط المراقبة، وقد تم أخذ عينات في 12 موعد زمني بحسب ما أمكننا ذلك في فترة تراوحت بين بداية تطبيق المعاملات (الرية الرابعة) حتى نهاية الموسم حيث بلغت عدد العينات المأخوذة 120 عينة لكل معاملة بمجموع 720 عينة.

عملية التحقق:

بعد إنجاز عملية المعايرة تم استخدام نفس المدخلات (بعد معايرة بعض المدخلات) لبقية المعاملات ما عدا كمية المياه المضافة، وذلك بإجراء خمس عمليات محاكاة (للمعاملات الخمس المتبقية)؛ ثم تم التحقق من صحة النموذج عن طريق الحكم على مدى التوافق بين قيم المحتوى الرطوبي المقاسة والمقدرة بواسطة المعايير الإحصائية والتي تتمثل فيR^2، $RMSE$، $NRMSE$، CRM، D، بالإضافة إلى الخطأ في الميزان الكتلي لعملية المحاكاة Mass Balance Error (MBE) والذي يقوم البرنامج بحسابه كنسبة مئوية لكل خطوة زمنية ولعملية المحاكاة بالكامل؛ وبعد التحقق من توافق القيم والحكم على صحة النموذج، تم دراسة بعض المخرجات المتحصل عليها من البرنامج كرطوبة التربة وسرعة ومعدل تدفق الماء في أي لحظة زمنية وأي نقطة مكانية في مجال المحاكاة، والميزان المائي للتربة المتمثل في التدفقات الداخلة (الري والأمطار) والخارجة (تبخر، نتح، وتسرب عميق) التراكمية ومعدلاتها، وكذلك مقدار التغير في خزن التربة للماء.

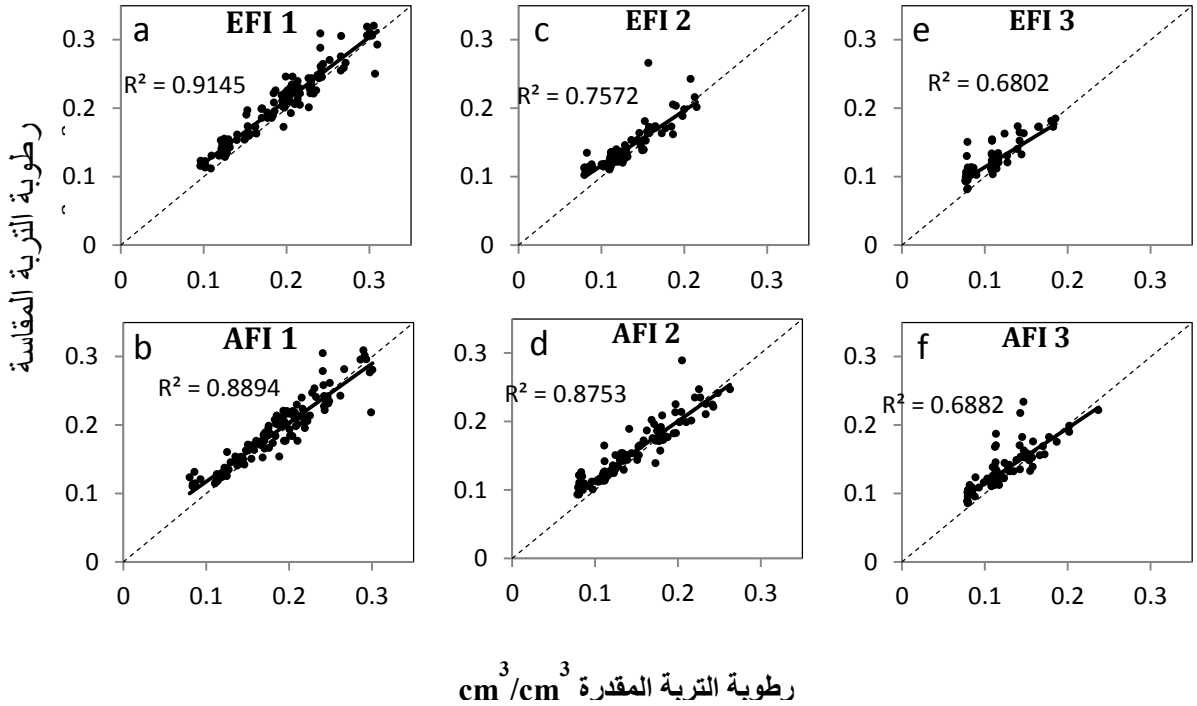
النتائج والمناقشة:

عملية المعايرة:

تضمنت عملية المعايرة تعديل بعض متغيرات ومعالم التربة بطريقة المحاولة والخطأ حتى تم الحصول على أفضل توافق بين قيم المحتوى الرطوبي المقاسة والمقدرة وذلك لمعاملة EFI1 بتنفيذ سلسلة من عمليات المحاكاة ببرنامج VS2DTI. وقد تم معايرة معلمتين من معالم التربة هما النسبة بين التوصيل الهيدروليكي الرأسي إلى الأفقي Kzz/Khh، المحتوى الرطوبي المتبقي θ_r. ويظهر الشكل (4a) التوافق البياني بين قيم المحتوى الرطوبي المقدرة والمقاسة، إذ يتضح وجود توافق جيد وقد بلغت قيمة معامل التحديد (R^2) 0.91، كذلك المعايير الإحصائية الأخرى المستخدمة في التقييم المتمثلة في *RMSE*، *NRMSE*، *CRM*، *D*، *MBE* فقد بلغت 0.02، 0.097، 0.061، 0.966، 0.003 على التوالي (جدول 4)، وهذه تعتبر مؤشرات جيدة إلى حد ما بصحة النموذج ودقة نسبية في تقدير قيم المعالم الهيدروليكية للتربة.

عملية التحقق:

بالإضافة إلى معاملة EFI1 التي تم إجراء عملية المحاكاة لها، فقد تم إجراء خمس عمليات محاكاة إضافية لكل معاملة من المعاملات المدروسة EFI2، EFI3، AFI1، AFI2، AFI3 وفقا للمتغيرات والمعالم التي تمت معايرتها في عملية المعايرة؛ وقد تم إدخال جميع المتغيرات والمعالم والمدخلات والإعدادات نفسها لجميع عمليات المحاكاة الخمس كما هي في عملية المعايرة عدا مدخلات الظروف الحدودية العليا المتعلقة بعملية الري والتبخر نتح، فهذه المدخلات تخص كل معاملة على حده. توضح الأشكال (4f–4b) مدى التوافق البياني بين قيم المحتوى الرطوبي المقاسة والمقدرة لكل معاملة على حدة، ويظهر توافق جيد من خلال النظر في الأشكال؛ وقد بلغت قيم معامل التحديد R^2 0.76، 0.68، 0.89، 0.88، 0.69 لكل من المعاملات EFI2، EFI3، AFI1، AFI2، AFI3 على التوالي؛ وبشكل عام فإن جميع قيم R^2 تعتبر مقبولة وتعطي توافق مرضي في جميع الحالات، وتقترب القيم التي حصلنا عليها مع ما تم الحصول عليه في كثير من الدراسات وقد تم اعتبارها مرضية، فعلى سبيل المثال(Ebrahimian *et al.,* (2012b. وتراوحت قيم *RMSE*، *NRMSE* بين 0.018– 0.020 و0.097–0.153 على التوالي (جدول 4) وهذه القيم قريبة من ما حصل عليه كل من (Ritter *et al.,* (2003); Fghire *et al.,* (2015); Tafteh and Sepaskhah (2012، وقد فسروا هذه القيم بدقة النماذج. أما قيمة *CRM* فقد تراوحت بين 0.034–0.103 (جدول 7) وتتقارب هذه القيم مع نتائج بعض الدراسات مثل Fghire *et al.,* (2015)، أما فيما يخص معامل التوافق *D* أو يسمى أحيانا بكفاءة النموذج فقد تراوحت قيمته بين 0.97– 0.82 وتعتبر هذه القيم ضمن المدى المقبول، وقد تفاوتت قيم هذا المعيار لدى كثير من الباحثين من قيم مرتفعة جدا 0.99 (Tafteh and Sepaskhah, 2012) إلى قيم تقارب أصغر قيمة حصلنا عليها بحدود 0.80 (Georgiou *et al.,* 2010). ومن خلال مقدار الخطأ *MBE* الذي يقدر في حدود أجزاء من مائة بالمائة، والمعايير الإحصائية سالفة الذكر فإنه يمكن الحكم على دقة عمليات المحاكاة بأنها مرضية من حيث التوافق بين قيم المحتوى الرطوبي المقاسة والمقدرة، وهذا يعطي مؤشراً بصحة ودقة عمليات المحاكاة لجميع المعاملات.



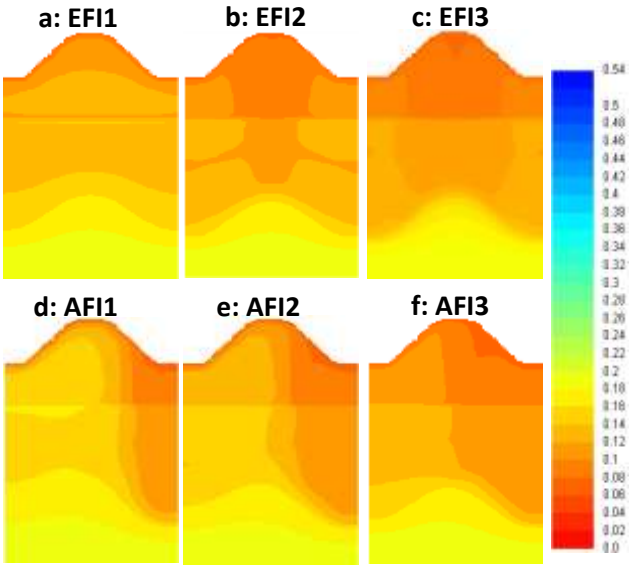
الشكل.4: ارتباط قيم المحتوى الرطوبي المقاسة والمقدرة في جميع المعاملات

الجدول 4. قيم المعايير الاحصائية المستخدمة في الحكم على مدى التوافق بين رطوبة التربة المقاسة والمقدرة وعلى دقة عملية المحاكاة: R2 معامل التحديد، RMSE جذر مربع متوسط الخطأ، NRMSE جذر متوسط مربع الخطأ الطبيعي، CRM معامل القيمة المتبقية، D دليل التوافق، MBE الخطأ في الميزان الكتلي

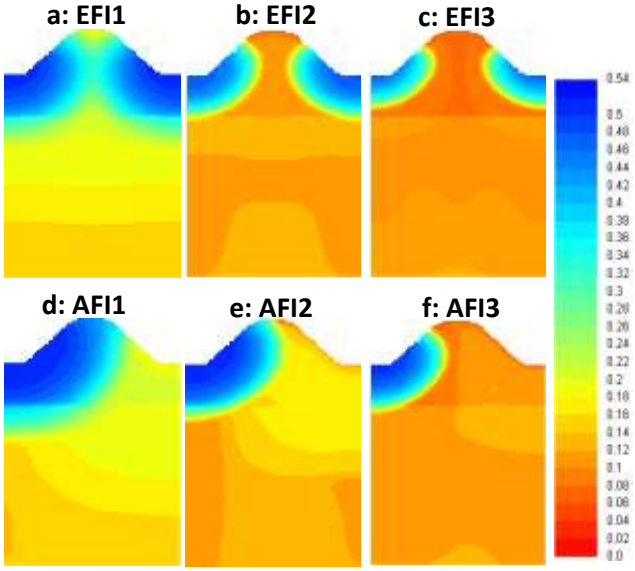
المعاملة	R^2	RMSE	NRMSE	CRM	D	MBE %
EFI 1	0.91	0.020	0.097	0.061	70.9	-0.30
EFI 2	0.76	0.019	0.139	0.086	90.8	-0.02
EFI 3	0.68	80.01	0.148	0.103	20.8	-0.01
AFI 1	0.89	0.019	0.102	0.034	70.9	-0.13
AFI 2	0.89	0.018	0.121	0.062	0.95	-0.01
AFI 3	0.69	0.020	0.153	0.088	0.86	-0.01

تأثير المعاملات على نمط توزيع رطوبة التربة:

يعتبر نمط التوزيع المكاني والزماني لرطوبة التربة من أهم العوامل المؤثرة على نمو وانتاجية المحاصيل، وهذا بدوره يؤثر عليه العديد من العوامل منها ما يتعلق بالمناخ، ومنها ما يتعلق بالتربة، ومنها ما يتعلق بإدارة عملية الري. وتعتبر دراسة نمط توزيع رطوبة التربة ذات أهمية كبيرة فيما يتعلق بتصميم وإدارة نظم الري بكافة أنواعها، وذلك بهدف تحقيق أقصى كفاءة للري، وتقليل الفواقد المائية، وتوفير رطوبة مثلى في منطقة الجذور للحصول على إنتاجية أعلى. إن المخرجات المتحصل عليها من عمليات المحاكاة التي تم تنفيذها بهذا البرنامج كثيرة جدا، حيث يمكن الحصول على رطوبة التربة والجهد وتدفق وسرعة الماء ضمن مجال المحاكاة والتدفقات الداخلة والخارجة في أي نقطة مكانية في مجال المحاكاة وأي لحظة زمنية خلال زمن المحاكاة؛ لهذا فالمعلومات المتحصل عليها كبير جداً ولن يتسنى عرضها كلها؛ لذلك بالنسبة لتوزيع رطوبة التربة فقد تم اختيار ريتين لعرض نتائجها ومناقشتها، هما الرية الرابعة (وهي أول رية تم تطبيق المعاملات فيها) وقد اختيرت لتمثل المراحل الأولى من نمو النبات، والرية الثامنة واختيرت لتمثل المرحل المتوسطة والأخيرة من نمو النبات، وذلك لدراسة نمط توزيع رطوبة التربة في جميع المعاملات المدروسة. يوضح الشكل 5 نمط توزيع رطوبة التربة عند اليوم التاسع بعد الرية الرابعة قبل الرية الخامسة مباشرة يتضح أن متوسط رطوبة التربة خلال قطاع التربة تنخفض بانخفاض كمية مياه الري المضافة لكلا طريقتي الري، ويلاحظ أيضا أن الري التبادلي بالخطوط AFI يقوم بحفظ رطوبة التربة بشكل ملحوظ، حيث وبمجرد النظر إلى الشكل 5 يتبين أن المحتوى الرطوبي يكون أعلى في معاملات AFI1, AFI2, AFI3 مقارنة بمعاملات الري التقليدي EFI1, EFI2, EFI3 على التوالي؛ فبينما يكون جزء من قطاع التربة في معاملات طريقة الري التبادلي بالخطوط جافا إلى حدود حرجة قد تصل إلى نقطة الذبول، فإن الجزء الآخر (تحت الخط المروي) يظل محتفظا برطوبة جيدة وملائمة لنمو النبات قد يصل إلى حدود في منتصف المدى بين السعة الحقلية ونقطة الذبول أو أكثر بحسب كمية مياه الري المضافة. ويلاحظ أن معاملة EFI3 تمثل أسوأ توزيع لرطوبة التربة، وتمثل المعاملتين AFI1, AFI2 أفضل المعاملات في نمط توزيع رطوبة التربة، حيث يبقى جزء من قطاع التربة محتفظا برطوبة جيدة لنمو النبات برغم أن كمية مياه الري المضافة هي نفسها في المعاملتين EFI1, AFI1، والمعاملتين EFI2, AFI2 إلا أنه يتضح أن رطوبة التربة في معاملات الري التبادلي كانت أعلى في جزء من قطاع التربة، وكذلك فقد بدت معاملة AFI2 أفضل من EFI1 برغم أن كمية مياه الري المضافة في الأولى تمثل 75% من الأخرى. أما فيما يخص مراحل النمو بعد منتصف الموسم التي تمثلها الرية الثامنة (الشكل 6)، فقد حدث ما حدث في مراحل النمو قبل منتصف الموسم وكما تم مناقشته أعلى هذا عدا أن معاملة EFI1 بدت أفضل من AFI1 بعد اليوم الأول بعد الري، ثم يحدث العكس مع التقدم في الزمن حتى موعد الرية التالية. إن بقاء رطوبة التربة في جزء من قطاع التربة يعمل على توفير رطوبة جيدة للنمو والحصول على إنتاجية جيدة في معاملات الري التبادلي مقارنة بمعاملات الري التقليدي، وهذا ما يفسر تفوق معاملات الري التبادلي في معظم مكونات النمو والإنتاجية وكفاءة استخدام المياه مقارنة بمعاملات الري التقليدي؛ وبشكل عام يمكن الجزم بأن الإنتاجية تتأثر بشكل مباشر بتوزيع الرطوبة في قطاع التربة، ويلاحظ أن مقدار الإنتاجية يتبع هذا السيناريو.



الشكل 5. نمط توزيع رطوبة التربة في اليوم التاسع بعد الرية الرابعة لجميع المعاملات، حيث يعبر اللون الأحمر عن الجفاف (رطوبة التربة قريبة من الصفر) واللون الأزرق يعبر عن التشبع



الشكل 6. نمط توزيع رطوبة التربة في اليوم الأول بعد الرية الثامنة لجميع المعاملات، حيث يعبر اللون الأحمر عن الجفاف (رطوبة التربة قريبة من الصفر) واللون الأزرق يعبر عن التشبع

1.1. تأثير المعاملات على الميزان المائي

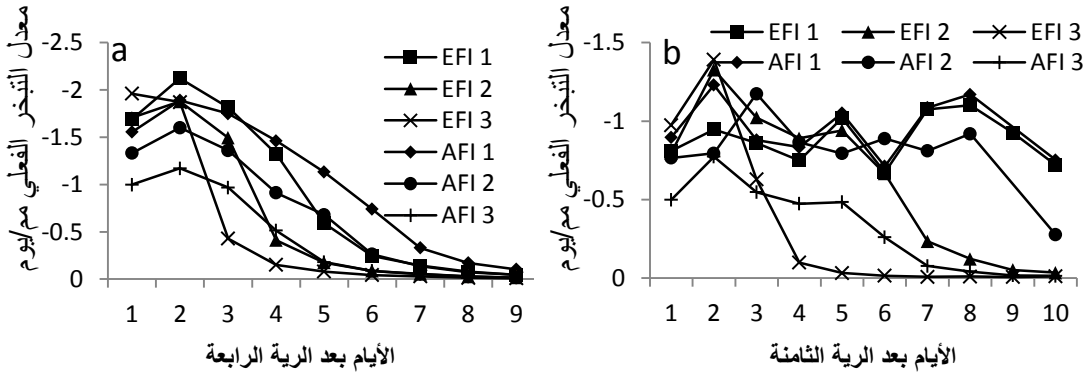
يظهر الشكل (7) والجدول (5) عناصر الميزان المائي لجميع المعاملات المتمثلة في الكمية التراكمية للمياه الداخلة إلى قطاع التربة أو مجال المحاكاة (ري وأمطار)، والتسرب العميق التراكمي، والتبخر والنتح التراكمي، والتغير في كمية المياه المخزنة في التربة، وقد تم اعتبار الجريان السطحي مساويا للصفر لأن الخطوط مغلقة من الجهتين.

الجدول 5. عناصر الميزان المائي التراكمي بالمليمتر لجميع المعاملات خلال موسم النمو

المعاملة / عناصر الميزان المائي	EFI1	EFI2	EFI3	AFI1	AFI2	AFI3
التدفق الداخل التراكمي، مم	616.2	506.2	396.2	616.2	506.2	396.2
التسرب العميق التراكمي، مم	27.1	23.2	23.6	23.8	23.1	23.2
التبخر الفعلي التراكمي، مم	155.4	124.5	115.5	163.0	132.3	107.8
النتح الفعلي التراكمي، مم	554.5	492.8	392.7	561.0	484.3	400.2
التبخر-نتح الفعلي التراكمي، مم	709.95	617.28	508.20	724.01	616.45	508.00
تغير المخزون المائي، مم	-115.98	-134.09	-135.49	-129.52	-133.29	-134.92
الخطأ، مم	-4.82	-0.21	-0.11	-2.08	-0.21	-0.08

يلاحظ من الجدول (5) تقارب المعاملات في قيمة التسرب العميق التراكمي عدا معاملة EFI1، ويرجع سبب تساوي الخمس المعاملات في التسرب العميق إلى أن كمية مياه الري كانت قليلة بحيث كانت كفيلة بتغطية احتياجات النبات من التبخر–نتح، ولكن بشكل عام فإن فواقد المياه بالتسرب العميق كان أكثر في معاملة EFI1 مقارنة بمعاملة AFI1 بالرغم أن كلتا المعاملتين تلقتا نفس كمية المياه، وهذا يعطي مؤشرا بأن فواقد المياه بالتسرب العميق تكون أكبر في طريقة الري التقليدي بالخطوط مقارنة بطريقة الري التبادلي، وتتفق هذه النتائج مع ما توصل إليه كل من Ebrahimian *et al.*, (2012a)؛ Kang *et al.*, (2000) وغيرهم؛ ويرجع هذا إلى أن سعة الرشح أكبر في الري التبادلي وكذلك الحركة الأفقية أو الجانبية تكون أعلى مقارنة بالري التقليدي والتي تكون فيها حركة رطوبة التربة في الغالب إلى أسفل. أما بالنسبة للتبخر التراكمي من سطح التربة (التبخر الفعلي)، يتضح بشكل عام انخفاض التبخر التراكمي من سطح التربة بانخفاض كمية مياه الري المضافة، ويلاحظ أيضا أن التبخر في معاملات الري التبادلي بالخطوط AFI1، AFI2 كان أعلى من معاملات الري التقليدي EFI1، EFI2، وحدث العكس في المعاملة الأقل في كمية مياه الري المضافة

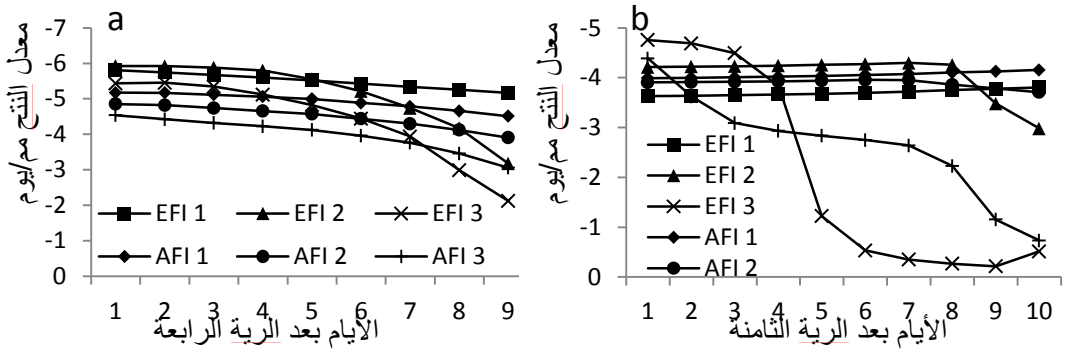
فقد حققت المعاملة EFI3 قيمة أكبر في التبخر التراكمي من سطح التربة (115.5 مم) مقارنة بمعاملة AFI3 التي بلغت 107.8 مم. إن هذه النتيجة كانت غير متوقعة، حيث وأن الكثير من الباحثين أشاروا إلى أن تقنية الري الجزئي تعمل على خفض مقدار التبخر من سطح التربة بشكل ملحوظ، وقد عزى الكثير منهم ذلك إلى أن مساحة او نسبة البلل تكون أقل في معاملات الري الجزئي مما يؤدي هذا إلى انخفاض التبخر من سطح التربة؛ قد تتفق هذه الاستنتاجات مع ما توصلنا إليه فيما يخص المعاملتين EFI3, AFI3، وقد تكون صحيحة في حالة انخفاض كمية مياه الري المضافة؛ ولكنها تختلف عكسيا في بقية المعاملات، وقد يكون الوضع هنا في هذه الدراسة يمثل حالة خاصة بسبب ظروف قد تكون متعلقة بالتربة أو المناخ أو المحصول أو بسبب تفاوت في منحنى دليل المساحة الورقية والذي تم على أساسه حساب قيم التبخر والنتح الكامنين، أحد هذه الأسباب أو كلها قد أدت إلى نتائج معاكسة لما أستنتجه الكثير من الباحثين مثل Panigrahi *et al.*, (2011); Kang *et al.*, (2000)، وبشكل عام فإن طريقة الري لم تؤثر تأثيرا ملحوظا على التبخر من سطح التربة. ويمكن تفسير هذا الأمر والذي يمكن أن يكون حالة خاصة كما ذكر سابقا، بأنه عند الري تتخلل المياه إلى عمق أكبر في معاملات الري التبادلي مقارنة بمعاملات الري التقليدي بسبب أن كمية المياه المضافة لكل خط في الري التبادلي تمثل ضعف كمية المياه في الري التقليدي، أما في معاملات الري التقليدي فإن الرطوبة تتراكم في الطبقة السطحية، وبالتالي يعمل هذا الأمر على زيادة معدل التبخر في الساعات والأيام الأولى بعد الري، ولكنه لا يلبث إلا أن يحدث العكس حيث تستنزف رطوبة التربة بسرعة في معاملات الري التقليدي وبالتالي يقل معدل التبخر بشكل ملحوظ تبعا لحالة رطوبة التربة، بينما في معاملات الري التبادلي فإن المياه المتخللة إلى الطبقات تحت السطحية تبدا في الصعود إلى أعلى بالخاصية الشعرية، وهذا يعمل على إمداد الطبقة السطحية – الواقعة تحت تأثير التبخر – بالرطوبة وهذا يبقي على معدل التبخر أعلى مما هو عليه في معاملات الري التقليدي؛ ويوضح الشكل (7) معدل التبخر في فترتين من الزمن وهو يدعم هذا التفسير حيث وأن معدل التبخر في معاملات الري التقليدي يكون أعلى مما هو في الري التبادلي وذلك في الساعات والأيام الأولى بعد الري، ثم يحدث العكس. أما فيما يخص المعاملتين EFI3, AFI3 فإن الحالة الرطوبية للتربة هي التي تتحكم في معدل التبخر، ولأن كمية مياه الري المضافة قليلة في معاملة AFI3 بالقدر الذي يعمل على عدم تخلل الماء إلى أعماق كبيرة مقارنة بالمعاملتين 1، 2 من طريقة الري التبادلي.



الشكل 7. معدل التبخر اليومي مم/متر بين الرية الرابعة والخامسة: (a) في الفترة الزمنية بين الرية الرابعة والخامسة ، (b) بين الرية الثامنة والتاسعة

وبالعودة إلى الجدول (5) يظهر أن النتح الفعلي التراكمي يقل بانخفاض كمية مياه الري المضافة، بينما لم تتأثر قيمته كثيرا بطريقة الري، فقد كانت قيم النتح الفعلي التراكمي متقاربة مع بعضها البعض بين معاملات الري التقليدي EFI و AFI عند المقارنة عند نفس المستوى من كمية مياه الري المضافة. وقد لا يعني هذا أن الاختلافات أيضا طفيفة بين المعاملات فيما يخص معدل النتح؛ إن منحنيات معدل النتح تشبه كثيرا ما تمت مناقشته في الفقرات السابقة فيما يخص معدل التبخر (الشكل 8)، إذ يتضح أن معدل النتح في معاملات الري التبادلي يضل أقل مما هو عليه في معاملات الري التقليدي في الساعات والأيام الأولى بعد الري وهذا يرجع إلى تأثير يسمى (تأثير PRD). يستمر معدل النتح بتناقص تدريجي طفيف وغير ملحوظ في معاملات كلا طريقتي الري، إلى أن تصل

التربة إلى مرحلة معينة من الجفاف يبدأ فيها معدل النتح بالتناقص بشكل سريع وملحوظ في معاملات الري التقليدي ويتوقع أن يصاحب ذلك تناقص في معدل البناء الضوئي في هذه المرحلة الأمر الذي يسبب خسارة في الانتاجية في معاملات الري التقليدي، ولا يحدث ذلك في معاملات الري التبادلي بسبب نمط توزيع رطوبة التربة الذي تمت مناقشته في فقرات سابقة، ويكون التناقص في معدل النتح أكثر حده كلما كانت كمية مياه الري المضافة أقل. هذا الأمر أيضا يفسر سبب تفوق معاملات الري التبادلي أو الجزئي على معاملات الري التقليدي أو الري الكامل و الري الناقص التقليدي؛ وبرغم وضوح هذه الاستنتاجات إلا أنه لا ينبغي تعميم توصية بهذا الأمر قبل تنفيذ دراسات تأكيدية من جوانب فسيولوجية متخصصة بالاستجابة الفسيولوجية للنبات.



الشكل 8. معدل النتح اليومي مم/متر بين الرية الرابعة والخامسة: (a) في الفترة الزمنية بين الرية الرابعة والخامسة، (b) بين الرية الثامنة والتاسعة

1.2. تأثير المعاملات على الانتاجية والقدرة الانتاجية لمياه الري

بالنظر إلى الجدول (6) يلاحظ تناقص الإنتاجية معنويا بتناقص كمية مياه الري المضافة لكلا طريقتي الري، وبشكل عام فقد حققت معاملات الري التبادلي إنتاجية أعلى معنويا عند 75% و50% من مستوى مياه الري مقارنة بمعاملات الري التقليدي، وحققت معاملة AFI1 أعلى قيمة بلغت 4,365 كغ/هكتار متفوقة بذلك معنويا على جميع المعاملات الأخرى عدا EFI1، وبلغت معاملة EFI3 أقل قيمة بلغت 862.4 كغ/هكتار بفارق معنوي عن جميع المعاملات الأخرى. ويلاحظ أيضا من الجدول (6) ارتفاع الإنتاجية في معاملات الري التبادلي عن الري التقليدي عند نفس المستوى من مياه الري، وبلغت نسبة الزيادة 13.95%، 39.89%، 169.38% عند مستوى 100، 75، 50٪ من مياه الري المضافة على التوالي، وبشكل عام يمكن القول أن تطبيق تقنية الري بالخطوط التبادلي يصبح فعالا للذرة الشامية في ظروف شحة مياه الري مقارنة بالري الناقص، أي أنه في حالة أن كمية مياه الري المتوفرة لا تلبي المتطلبات المائية لنباتات الذرة الشامية فإنه بتطبيق تقنية الري الجزئي يمكن الحصول على انتاجية أعلى يمكن أن تصل إلى أكثر من الضعف في حالة الري التقليدي. ويلاحظ أيضا من جدول 6 أن المعاملة AFI2 حققت أعلى قيمة في القدرة الإنتاجية لمياه الري IWP، وبخسارة غير معنوية في الإنتاجية بلغت 6.02% فقط، وبتوفير في كمية مياه الري المضافة تقدر بـ 20.07% مقارنة بمعاملة EFI1.

الجدول 6. تأثير المعاملات على الانتاجية وكفاءة استخدام المياه ومقدار الوفر في مياه الري والتغير في الانتاجية عن معاملة الشاهد

المعاملات	كمية مياه الري مم	كمية المياه المستهلكة مم	الانتاجية كغ/هكتار	القدرة الانتاجية لمياه الري IWP كغ/مم.هكتار	مقدار الوفر في مياه الري مقارنة بالشاهد %	مقدار التغير في الانتاجية مقارنة بالشاهد %
EFI1	548	709.95	3.830.7 ab	6.99 ab	-	-
EFI2	438	617.28	2.573.5 c	5.88 b	20.07	-32.82

-77.50	40.15	2.63 c	862.4 d	508.2	328	**EFI3**
+13.95	0.00	7.96 a	4.365 a	724.01	548	**AFI1**
-6.02	20.07	8.22 a	3.600 b	616.45	438	**AFI2**
-39.36	40.15	7.08 ab	2.323.1 c	508	328	**AFI3**
		12.46	11.94			**CV %**

الأرقام في نفس العمود المتبوعة بحروف متشابهة لا تختلف عن بعضها معنويا وفقا لطريقة دانكن Duncan عند مستوى معنوية 0.05

الاستنتاجات والتوصيات:

- تعتبر تقنية الري الجزئي تقنية واعدة ومناسبة للتطبيق في ظروف المناطق الجافة والتي تعاني من شحة وكلفة مياه الري، وينصح باستخدام طريقة الري التبادلي بالخطوط أفضل من الري الناقص التقليدي، للحصول على نمو وإنتاجية أعلى.
- يمكن استخدام البرنامج الحاسوبي VS2DTI لمحاكاة حركة الماء في التربة في حالات المحاكاة في بعد واحد أو بعدين، ويمكن من خلاله دراسة نمط توزيع رطوبة التربة، وتقدير الميزان المائي، والضائعات المائية بدقة مرضية طالما توفرت البيانات والمدخلات الكافية.
- إجراء المزيد من الدراسات التي تعنى بعمليات محاكاة حركة الماء في التربة تحت ظروف مختلفة ومحاصيل مختلفة، بالاستعانة بهذا البرنامج أو أي نموذج رقمي آخر لنفس الغرض تمهيدا لتطبيقها وتعزيز دورها في عمليات تصميم وإدارة نظم الري، نظرا لأن الحلول الرقمية أكثر دقة لأخذها في الاعتبار مدخلات أكثر مقارنة بالطرق الأخرى، وفي نفس الوقت أصبح استخدامها أكثر سهولة.
- على مطوري برنامج VS2DTI أن يعملوا على تطويره فيما يخص طبيعة امتصاص الجذور للماء، ودالة نشاط الجذور.
- تأكيد النتائج الخاصة بالتبخر والنتح بإجراء المزيد من الدراسات في ظروف مختلفة من حيث المناخ والتربة والمحصول.
- إجراء دراسات تأكيدية من جوانب فسيولوجية متخصصة بالاستجابة الفسيولوجية للنبات لتأثير الري الجزئي، وبحث التغيرات الآنية في معدل النتح على مستوى الورقة الواحدة وعلاقته بطريقة الري وحالة جهد ماء التربة.

المراجع:

الساهوكي، مدحت وصدام حكيم جياد (2013). جداول تقدير المساحة الورقية للذرة الصفراء باعتماد طول ورقة واحدة. مجلة العلوم الزراعية العراقية. 44 (2): 164-167.

المؤسسة العامة لإكثار البذور (2002). أصناف المحسنة من الذرة الشامية في اليمن، مطوية إرشادية صادرة عن مؤسسة إكثار البذور.

Al-Ashwal, H.H. (2016) Soil moisture distribution and water use efficiency for corn under alternate furrow irrigation. Ms. Thesis, Faculty of Agriculture, Sana'a University: P 90.

Belder, M.; and L. Al-Asbahi (1998) The soils of Al-Irrah agricultural research station. FAO, Environmental Resource Assessment for Rural Land Use Planning, GCP/YEM/021/NET, Field document. 10: P 53.

Bethune, M.G.; B. Selle; and Q. J. Wang (2008). Understanding and predicting deep percolation under surface irrigation. Water Resour. Res., 44(12):1-16.

Ebrahimian, H.; A. Liaghat; M. Parsinejad; and E. Playán (2012a). Distribution and loss of water and nitrate under alternate and conventional furrow fertigation. Spanish Journal of Agricultural Research. 10(3): 849-864.

Ebrahimian, H.; A. Liaghat; M. Parsinejad; E. Playán; F. Abbasi; and M. Navabian (2012b). Comparison of one- and two-dimensional models to simulate alternate and conventional furrow fertigation. J. Irr. And Drain. Eng., 138(10): 929-938.

Fghire, R.; S. Wahbi; F. Anaya; A. O. Issa; O. Benlhabib; and R. Ragab (2015). Response of quinoa to different water management strategies: field experiments and SALTMED model application results. Irrigation and Drainage. 64(1): 29-40.

Georgiou, P.E.; V.Z. Antonopoulos; and E.H. Lekakis (2010, July). Soil water balance and distribution in a field of maize under partial root-zone drying drip irrigation. In E-Proceedings of the International Conference PRE10 Protection and Restoration of the Environment X, Corfu, Greece (pp. 5-9).

Hodges, M.E.; J.F. Stone; and H.E. Reeves (1989). Yield variability and water use in wide-spaced furrow irrigation. Agricultural Water Management: (16): 15–23 [Abstract].

Hsieh, P.A.; W. William; and R.W. Healy (2000). VS2DI—A Graphical Software Package forSimulating Fluid Flow and Solute or EnergyTransport in Variably Saturated Porous Media. Water-Resources Investigations Report 9, 9-4130. U.S. GEOLOGICAL SURVEY.

Kang, S.Z.; P. Shi; Y.H. Pan; Z.S. Liang; X.T. Hu; and J. Zhang (2000). Soil water distribution, uniformity and water-use efficiency under alternate furrow irrigation in arid areas. Irrigation Science. 19(4): 181-190.

Lappala, E.G.; R.W. Healy; and E.P. Weeks (1987). Documentation of computer program VS2D to solve the equations of fluid flow in variably saturated porous media. Department of the Interior, US Geological Survey.

Mailhol, J.C.; A.A. Olufayo; and P. Ruelle (1997). Sorghum and sunflower evapotranspiration andyield from simulated leaf area index. Agricultural Water Management 35: 167-182

McKeering, L.M. (2004). Evaluating the potential to impose partial root zone drying (PRD) on clay soils in commercial cotton production systems, in fulfilment of the requirements of Courses ENG4111 and 4112 Research Project, Faculty of Engineering and Surveying, University of Southern Queensland: p13.

Mualem, Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resour. Res., 12(3): 513-522.

Panigrahi, P.; N.N. Sahu; and S. Pradhan (2011). Evaluating partial root-zone irrigation and mulching in okra (*Abelmoschus esculentus* L.) under a sub-humid tropical climate. Journal of Agriculture and Rural Development in the Tropics and Subtropics (JARTS), 112(2): 169-175.

Peng, Y.; P. Yu; Y. Zhang; G. Sun; P. Ning; X. Li; and C. Li (2012). Temporal and spatial dynamics in root length density of field-grown maize and NPK in the soil profile. Field Crops Research. 131: 9-16.

Ritter, A.; F. Hupet; R. Muno-Carpena; S. Lambot; and M. Vanclooster (2003). using inverse methods for estimating soil hydraulic properties from field data as an alternative to direct methods. Agricultural Water Management. (59): 77-96.

Schmitz, G.H.; N. Schütze; and T. Wöhling (2007). Irrigation control: towards a new solution of an old problem (Vol. 5). IHP-HWRP Germany.

Sepaskhah, A.R.; and S.H. Ahmadi (2010). A review on partial root-zone drying irrigation. International Journal of Plant Production. 4(4): 241-258.

Sepaskhah, A.R.; and A.A. Kamgar-Haghighi (1997). Water use and yields of sugar beet grown under every-other-furrow irrigation with different irrigation intervals. Agricultural Water Management. 34(1): 71-79.

Simunek, J.; H. Šejna; M.S. Sakai; and M.Th. van Genuchten (2009). The HYDRUS-1D software package for simulating the movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated

media, version 4.08, HYDRUS. Department of Environmental Sciences, University of California Riverside, Riverside Edition, USA, 296.

Tafteh, A.; and A.R. Sepaskhah (2012). Application of HYDRUS-1D model for simulating water and nitrate leaching from continuous and alternate furrow irrigated rapeseed and maize fields. Agricultural Water Management. 113: 19-29.

van Genuchten, M.T. (1980) A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal. 44(5): 892-898.

Yang, H.S.; A. Dobermann; J.L. Lindquist; D.T. Walters; T.J. Arkebauer; and K.J. Cassman (2004). Hybrid-maize—a maize simulation model that combines two crop modeling approaches. Field Crops Research. 87(2): 131-154.

Zhuang, J.; G.R. Yu; and K. Nakayama (2001). Scaling of root length density of maize in the field profile. Plant and Soil. 235(2): 135-142.

Simulation of Soil Moisture Distribution Patterns under Alternate Furrow Irrigation of *Zea mays*

Hazem H. Al-Ashwal [(1)*] and Mohamed M. Alsanabani [(2)]

(1). Northern Highland Agricultural Research Station, Agricultural Research and Extension Authority (AREA), Sana'a, Yemen.
(2). Soil and Water Department, Faculty of Agriculture, Sana'a University, Sana'a, Yemen.
(*Corresponding author: Hazem H. Al-Ashwal. E-Mail: hazemalasshwal@yahoo.com).

Received: 01/05/2020 Accepted: 12/06/2020

Abstract

An experiment was conducted at Northern Highlands Agricultural Research Regional Station in Sana'a, Yemen, to simulate distribution of soil moisture under alternative furrow irrigation, and soil water balance. Six treatments applied, namely: EFI1, EFI2, EFI3, AFI1, AFI2 and AFI3; which EFI means conventional (or full) furrow irrigation, and AFI alternative furrow irrigation, and the numbers 1,2,3 related to levels of irrigation water 100%, 75% and 50% respectively, which the treatment EFI1 was the farmer practice. VS2DI model was used to simulate water movement in soil for all treatments. EFI1 treatment used for calibration process to calibrate some parameters related to soil and transpiration, and the rest 5 treatments for verification. Results showed that there was satisfactory agreement between measured and estimated soil water content, and there was goodness of fit in the statistical values of (R^2), (RMSE), and (D) in all cases. The results also showed that the pattern of soil moisture distribution plays an important role in benefit of alternative furrow irrigation over conventional irrigation, which has been found that the soil moisture in parts of soil profile (under irrigated furrow) maintain high, and suitable for plant in AFI treatments compared with EFI at the same level of irrigation water, generally compared with AFI, the deep percolation was higher in EFI, the cumulative evaporation and transpiration didn't affected by irrigation method, but the evaporation and transpiration rates are affected; In the first stages after irrigation the evaporation and transpiration rates was higher in EFI than AFI, and vice versa in the late stages after irrigation, then at a certain time after irrigation, the transpiration rate dramatically decreased in EFI, but that wasn't noticeable effect in AFI; this explain the slightly effects on yield in AFI with decrease in irrigation water compared with EFI. The study concluded that another studies concerned in the physiological response of plant in transpiration to partial root zone drying and soil moisture distribution must be conducted, and the root activity function must be improved in VS2D model. Also concluded that the AFI technique is practicable and useful in arid areas where the water is cost.

Key words: Alternate furrow irrigation, Soil moisture distribution, Simulation, VS2DI module.