دوال إنتاجية المياه ومؤشرات استهلاك المياه لمحصول الفول تحت ظروف الري الناقص

أحمد إبراهيم خماج [1]، حسين سعيد طالب [2]، احمد سالم الجديد [3]، على عبدالله مادي [4]، طارق ابوالقاسم ارحومة [5]
[1]قسم التربة والمياه، كلية الزراعة جامعة طرابلس ، طرابلس، ليبيا
[2]فرع بحوث الزراعات المستدامة، مركز البحوث الزراعية، طرابلس ، ليبيا
[3]كلية الزراعة جامعة بني وليد ، بني وليد، ليبيا
[4] الوكالة الألمانية للتعاون (GIZ)، طرابلس، ليبيا
[5]كلية الزراعة جامعة طرابلس، طرابلس، ليبيا
[1]البريد الالكتروني a.ekhmaj@uot.edu.ly

الملخص: تهدف هذه الدراسة إلى تقييم استراتيجية الري الناقص كوسيلة لإدارة مياه الري وتحسين كفاءة استخدامها في إنتاج محصول الفول، من خلال دراسة تأثير كميات مختلفة من مياه الري على النمو والإنتاجية، وتقدير بعض المؤشرات الاقتصادية لاستهلاك المياه. أُجريت التجربة في منطقة الشتيوية جنوبي مدينة الزاوية خلال فصلي الخريف والشتاء 2024/2023 باستخدام نظام الري بالرش خطي المصدر (Line Source Sprinkler Irrigation). تم تنفيذ سبع معاملات مائية مختلفة على قطع تجريبية بمساحة 1.5 × 6 م لكل منها. جرى تقدير المحتوى الرطوبي الحجمي للتربة عند بداية ونهاية الموسم، ورُصدت كميات مياه الري باستخدام حوض التبخر من النوع A ومعادلة هارجريفس-ساماني المعدلة، بالإضافة إلى استخدام جهاز TDR لمتابعة تغيرات الرطوبة. شملت الدراسة تحديد القرون وهي رطبة ممتلئة بالحبوب، وكل من الوزن الرطب والجاف للحبوب. تم تقدير دالة إنتاجية المياه (WPF)، كفاءة استخدام المياه (WUE)، والعائد لكل وحدة مياه (WPy وWP_M). أظهرت النتائج أن التغير في كميات مياه الري أدى إلى تراجع غير خطي للإنتاجية. بلغ أعلى متوسط لإنتاجية الحبوب الجافة 2.37 طن/هكتار عند إضافة 2617.7 م³/هكتار من مياه الري. كما حُدّدت القيم المثلى لمياه الري اللازمة لتحقيق أعلى إنتاجية بكل من 3027.08، 2674.5، و2494.5 م³/هكتار للقرون الرطبة والحبوب الرطبة والجافة، على التوالي. خلصت الدراسة إلى أن الإدارة الدقيقة لمياه الري باستخدام الري الناقص بإمكانه أن تحسن كفاءة استخدام المياه دون تأثير سلبي كبير على الإنتاجية، مما يعزز من جدوى هذه التقنية في المناطق ذات الموارد المائية المحدودة.

الكلمات المفتاحية: الفول، إدارة الري، الري الناقص، دالة الإنتاجية المائية، مؤشرات الاستهلاك المائي

Water Productivity Functions and Water Consumption Indicators for Faba Bean under Deficit Irrigation Conditions

Ahmed Ibrahim Ekhmaj[1] Hussein Said Taleb [2], Ahmed Salem Al-Jadeed [3], Ali Abdullah Madi[4] , Tareq Abulqasim Arhouma[5]
[1]Soil and Water Department, Faculty of Agriculture, University of Tripoli, Tripoli, Libya
[2]Sustainable Agriculture Research Division, Agricultural Research Center, Tripoli, Libya
[3]Faculty of Agriculture, University of Bani Walid, Bani Walid, Libya
[4]German Agency for International Cooperation (GIZ), Tripoli, Libya
[5]Faculty of Agriculture, University of Tripoli, Tripoli, Libya
[1]email a.ekhmaj@uot.edu.ly

Abstract This study aims to evaluate the deficit irrigation strategy as a means of managing irrigation water and improving its use efficiency in faba bean production. It investigates the effects of different irrigation water quantities on growth and productivity and estimates some economic indicators of water consumption. The experiment was conducted in the Al-Shatwia area, south of the city of Zawia, during the fall and winter seasons of 2023/2024, using a Line Source Sprinkler Irrigation system. Seven different water treatments were applied to experimental plots, each measuring 1.5 meter × 6 meter. The volumetric soil moisture content was estimated at the beginning and end of the season. Irrigation amounts were monitored using a Class A evaporation pan and the modified Hargreaves-Samani equation, in addition to using a TDR device to track moisture variations. The study included measuring the number of pods when they were full and moist, as well as both the wet and dry weights of the grains. The water production function (WPF), water use efficiency (WUE), and return per unit of water (WPy and WP_M) were estimated. The results showed that changes in irrigation water amounts led to a non-linear decrease in productivity. The highest average dry grain yield was 2.37 tons/hectare when 2,617.7 m³/hectare of irrigation water was applied. The optimal irrigation water values required to achieve the highest yield were determined to be 3,027.08, 2,674.5, and 2,494.5 m³/hectare for moist pods, wet grains, and dry grains, respectively. The study concluded that precise irrigation water management using deficit irrigation can enhance water use efficiency without significantly affecting productivity, thereby promoting the feasibility of this technique in areas with limited water resources.

Keywords: Faba bean, irrigation management, deficit irrigation, water production function, water consumption indicators.

1. المقدمة

تُصنّف ليبيا من بين الدول الأكثر فقرًا في الموارد المائية عالميًا. إذ تشير بيانات التقرير العالمي لتنمية المياه لعام 2015 إلى أن نصيب الفرد من المياه لا يتجاوز 120 م³ سنويًا، وهو رقم أقل بكثير من حد الفقر المائي العالمي الذي يقدّر بحوالي 1000 م³ سنويًا للفرد[1]. يعود هذا النقص الحاد إلى عوامل طبيعية أبرزها قلة الأمطار، والاعتماد شبه الكلي على المياه الجوفية غير المتجددة. وقد أدى هذا الواقع إلى بروز إشكاليات حادة تتجلى في الإجهاد المائي (water stress)، وتدهور نوعية المياه، وضعف كفاءة الاستخدام في القطاعات

DOI:10.5281/zenodo.17624380

المختلفة، وعلى رأسها القطاع الزراعي الذي يُعد الأكثر استنزافًا للمياه، إذ يستهلك ما بين 65% إلى 97% من الموارد المائية[2]، في ظل هذه التحديات، أصبح من الضروري تحسين إدارة الموارد المائية من خلال اعتماد تقنيات واستراتيجيات ري أكثر كفاءة. ومن أبرزها استراتيجية الري الناقص (Deficit Irrigation)، وهي استراتيجية تهدف إلى تقليل كميات المياه المستخدمة دون التأثير الكبير على الإنتاجية الزراعية. وقد برزت هذه الممارسة كأحد الحلول المستدامة في المناطق الجافة وشبه الجافة، حيث أظهرت العديد من الدراسات فاعليتها في تقليل الاستهلاك المائي وزيادة كفاءة استخدام المياه (WUE)، إلى جانب إتاحة فرصة التوسع في المساحات المزروعة باستخدام نفس الموارد المائية المحدودة[3][4]. فلقد أظهرت دراسات[5][6] أن تطبيق الري الناقص قد يؤدي إلى انخفاض طفيف في الإنتاجية مقابل توفير كمية كبيرة من المياه يمكن استخدامها في ري محاصيل أخرى، مما يحقق ما يُعرف بالري الاقتصادي. وقد أثبتت تجارب متعددة في سوريا والصين والولايات المتحدة أن خفض مياه الري بنسبة تصل إلى 40–70% قد يتسبب فقط في خسارة إنتاجية لا تتعدى 13% [7][8] . إن هذا التوازن بين الحفاظ على الإنتاج وتوفير المياه يعكس الإمكانيات الكبيرة التي يوفرها الري الناقص كأداة فعالة لتحقيق الأمن الغذائي والمائي معًا.

من بين المحاصيل التي تبرز أهميتها في هذا السياق، يأتي الفول (*Vicia faba* L.) الذي يُعد من المحاصيل البقولية الأساسية في العديد من مناطق العالم، نظرًا لقيمته الغذائية العالية سواء كحبوب للاستهلاك البشري أو كعلف حيواني. تُزرع مساحات واسعة من الفول في منطقة البحر المتوسط، لكنه غالبًا ما يعاني من الإجهاد المائي خلال مراحل نموه الأساسية نتيجة نقص الأمطار أو ضعف توفر مياه الري. وتؤكد الدراسات أن الفول من أكثر المحاصيل البقولية حساسية للإجهاد المائي، وأن نقص المياه يؤثر بشكل مباشر على خصائصه الإنتاجية[9][10] تُعد دالة الإنتاجية المائية للمحصول (Water Production Function) إحدى الأدوات التحليلية المستخدمة لتقييم كفاءة الري الناقص، حيث تُظهر العلاقة بين كمية المياه المضافة والإنتاجية المحققة. وتُستخدم هذه الدالة في دراسات جدوى اقتصادية لتحديد النقطة المثلى بين كمية المياه والإنتاج المحقق[11][12] ويمكن حساب العائد المتوسط والعائد الهامشي من الري بناءً على هذه الدالة، ما يسمح للمزارعين وصناع القرار بوضع سياسات ري فعالة. أما عن معيار عامل الاستجابة لنقص الري (Ky)، فهو مؤشر مهم لتقييم مدى تأثر المحصول بنقص المياه، ويُعبّر عن العلاقة بين انخفاض الإنتاج والبخر-نتح للمحصول. إذا كانت قيمة (Ky) أكبر من 1 فإن المحصول حساس جدًا لنقص المياه، وإذا كانت أقل من 1 فإن المحصول يُظهر مرونة أعلى ويمكن تطبيق الري الناقص عليه دون خسارة كبيرة. وتتراوح قيم (Ky) للفول في بعض الدراسات بين 0.87 إلى 1.16 حسب الظروف البيئية ومراحل النمو[13][14] ، وقد أكدت تجارب ميدانية في مناطق زراعة جافة، منها شمال الأردن وسوريا، أن الفول يُظهر استجابة جيدة للري الناقص في بعض مراحل نموه، وأن كفاءة استخدام المياه (WUE) تتحسن بشكل ملحوظ عند تقليل كميات المياه المستخدمة، خاصة في المراحل الخضرية المبكرة. كما لوحظ أن الإنتاجية القصوى للمحصول يمكن تحقيقها باستخدام كميات مياه تقل بنسبة 20–30% عن الري الكامل، مما يُمكّن من زراعة مساحات أوسع بنفس كمية المياه المتوفرة[15][4] من مزايا الري الناقص أيضًا أنه يسهم في تقليل مخاطر الأمراض والآفات المرتبطة برطوبة التربة الزائدة، ويُقلل من استخدام الأسمدة، ويحد من تلوث المياه الجوفية، كما قد يُحسّن جودة المحصول من حيث محتوى البروتين وخصائص الخبيز في القمح وطول التيلة في القطن[16][17]. وعليه، فإن تبني استراتيجية الري الناقص لا يمثل فقط خيارًا بيئيًا أو زراعيًا بل هو خيار اقتصادي استراتيجي في دول مثل ليبيا، حيث يمثل العجز المائي التحدي الأبرز أمام استدامة الزراعة والأمن الغذائي. ومن خلال دمج هذا النهج ضمن السياسات الزراعية، يمكن تحقيق تحسين نوعي في استغلال الموارد المتاحة وتعزيز الاستقرار الاقتصادي والاجتماعي. تهدف هذه الدراسة إلى تحديد الكمية المُثلى من مياه الري لمحصول الفول (*Vicia faba* L). والذي لا تتوفر بيانات محلية عن سلوك استهلاكه المائي.

2. المواد وطرائق البحث

1.2. موقع إجراء التجربة

أجريت التجربة الحقلية خلال الفترة من أكتوبر 2022 حتى مارس 2023، في مزرعة خاصة بمنطقة الشتيوية جنوبي مدينة الزاوية، وتحديدًا عند إحداثيات 32.466617° شمالاً و12.489535° شرقًا. يتصف مناخ منطقة التجربة بالاعتدال شتاءً والحرارة صيفًا. ويوضح الجدول (1) متوسطات بعض العناصر المناخية خلال فترة الدراسة، حيث تراوحت درجات الحرارة العظمى بين 17.2 و28.7 درجة مئوية بمتوسط 21.7 درجة مئوية، فيما تراوحت الصغرى بين 9.8 و17.1 درجة مئوية بمتوسط 12.8 درجة. أما متوسط درجات الحرارة اليومية فقد بلغ 17.3 درجة مئوية. كما بلغت سرعة الرياح متوسطًا قدره 494 كم/يوم، وتفاوتت الرطوبة النسبية بين 41% و75%، بمتوسط عام بلغ 52.3%. هذه الظروف المناخية ملائمة لزراعة محصول الفول وفق ما أشار إليه[18].قد تم اختيار الموقع كونه مستويًا ومجاورًا لمصدر المياه. بلغت أبعاد حقل التجربة 25 متراً×40 متراً، وتم حراثته بمحراث قرصي على عمق 30 سم، تلتها عمليات تسوية

قبل بدء التجربة، تم أخذ عينات تربة من أربعة أعماق عند (0-30، 30-60، 60-90، و90-120 سم) لغرض لتحليل خصائصها الفيزيائية والكيميائية وفقًا للطرق القياسية. قدرت بعض الخواص الفيزيائية للتربة حيث قدر قوام التربة بطريقة الماصة[19] يحيى وسليمان (1981)، فكان قوام التربة رمل طميي (Loamy Sand) وذلك عند عمق 0-30سم، و 60-90 سم، بينما كان قوام التربة رملي (Sand) عند عمق 30-60 سم و90- 120سم. تراوحت قيم الكثافة الظاهرية للتربة فكانت بين 1.66 و1.79 جم/سم^3. أما السعة الحقلية فكانت بين 8.01% و10.55% حجميًا، ونقطة الذبول الدائم بين 1.4% و3%، مما يعكس متوسط محتوى رطوبي متاح قدره 7.88%.

أما الخصائص الكيميائية، فقد تم تقديرها عند مستخلص تربة (1:1)، وبلغت قيم pHدرجة التفاعل بين 7.43 و7.57، في حين تراوحت EC درجة التوصيل الكهربائي بين 409 و1437 ميكروسيمنس/سم. تم تحديد نسبة $CaCO_3$ بطريقة نيلسون[20] (1982)، وكانت بين 4% و5.5%. وفيما يتعلق بمياه الري، فبلغ متوسط درجة التفاعل pH حوالي 7.3، ودرجة التوصيل الكهربي 2340 (EC) ميكروسيمنس/سم.

جدول 1. بعض متوسطات العناصر المناخية في منطقة لدراسة خلال فترة إجراء التجربة

الشهر	متوسط درجة الحرارة كبرى (م°)	متوسط درجة الحرارة الصغرى (م°)	متوسط درجة الحرارة (م°)	متوسط سرعة الرياح (كم/يوم)	متوسط الرطوبة النسبية (%)
أكتوبر	28.7	17.1	22.9	408	41
نوفمبر	23.7	15.2	19.5	660	42
ديسمبر	21.9	12.9	17.4	432	75
يناير	17.2	9.9	13.5	564	52
فبراير	18.1	9.8	14.0	504	52
مارس	20.6	12.0	16.3	396	52
المتوسط	21.7	12.8	17.3	494	52.3

2.2. المعاملة المحصولية

أُختير صنف الفول الإسباني (فيتو) لدراسة تأثير الري الناقص على إنتاجية نبات الفول وتعزيز فهم العلاقات المائية المرتبطة بإنتاجيته واستهلاكه المائي. أجريت عملية التسميد على مرحلتين: بداية الزراعة 2022/10/22، باستخدام سماد مركب (12-24-12) بمعدل 160 كجم/هكتار. أما عند منتصف التجربة بتاريخ 2023/1/12، تم إضافة سماد (10-10-10) بمعدل 160 كجم/هكتار، مضافًا إليه 160 كجم/هكتار من اليوريا. كما رُشّ المحصول بمبيد (Delta Kill)، وتم إجراء عمليات تعشيب دورية.

3.2. نظام الري وتقدير كميات المياه المضافة

اعتمد التصميم على نظام ري بالرش من نوع خطي المصدر[21] ، ويتكون من خط ري رئيسي قطره 2.5 بوصة، مزوّد برشاشات نوع Zenith موزعة كل 6 أمتار. شملت التجربة 7 معاملات مائية، مساحة كل منها 1.5 متر×6 متر، احتوت المعاملات من 1 إلى 6 على ثلاثة أسطر، بينما احتوت المعاملة الصفرية (المحاذية لخط الري) على سطرين. تم تجميع المياه باستخدام علب خاصة

DOI:10.5281/zenodo.17624380

موضوعة أسفل الرشاشات. تم متابعة رطوبة التربة باستخدام جهاز (Time Domain Reflectometer، TDR) من نوع TRIME-HD، حيث قدرت الرطوبة الحجمية في التربة عند أعماق مختلفة من السطح حتى 120 سم، وعند أعماق 30، 60، 90، 120 سم. كما تم تقدير التبخر النتح المرجعي (ET_o) باستخدام معادلة هاريجرفس-سماني المعدلة[22] والتي يمكن كتابتها على النحو التالي:

$$ET_o = 0.0023(T_{max} - T_{min})^{0.5}(T_{mean} + 17.8)R_a \quad (1)$$

حيث تمثل ETo: البخر نتح المرجعي (مم/يوم)، T_{max}: درجة الحرارة العظمى (درجة مئوية)، T_{min}: درجة الحرارة الصغرة (درجة مئوية)، T_{mean}: متوسط درجة الحرارة (درجة مئوية).R_a : الاشعاع الشمسي الواصل الى الغلاف الجوي (مم/يوم). تم تقدير كميات المياه المستهلك من المحصول عند المعاملات المختلفة بناء على معادلة الموازنة المائية والتي يمكن كتابتها على النحو التالي:

$$ET_c = I + P - R - D_P \pm \Delta\theta \quad (2)$$

حيث تمثل ETc معدل البخر والنتح للمحصول (مم/يوم) ، I عمق ماء الري (مم/يوم)، P عمق مياه الأمطار خلال موسم النمو (مم/يوم)،R الجريان السطحي (مم/يوم)، D_pعمق مياه الصرف الطبيعي (مم/يوم)، $\Delta\theta$ التغير في المحتوى الرطوبي الحجمي في التربة (مم/يوم).
في هذه الدراسة تم مقارنة قيم ET_c المتحصل عليها من الطريقة الوزنية بتلك المتحصل عليها من حوض البخر من النوع A والذي تم وضعه بالقرب من موقع التجربة حيث قدر البخر نتح من المحصول (ET_c) بالمعادلة التي تم اقتراحها من قبل[23] على النحو التالي:

$$ETc = K_{pan} \times Kc \times E_{pan} \quad (3)$$

حيث تمثل ET_c بخر نتح المحصول (مم/يوم)، K_{pan} معامل الحوض، K_c معامل المحصول، E_{pan} البخر من حوض البخر

4.2. جمع العينات المحصولية

تم جمع المحصول بتاريخ 2023/3/9. حيث تم تجميع قرون الفول وثم وزنها طازجة بعد القطف مباشرةً ثم تقشير القرون ووزن الحبوب طازجة، كما جففت الحبوب هوائياً لعدة أيام حتى استقرار وزنها، ومن ثم قدر وزنها الجاف.

5.2. دالة الإنتاجية المائية للمحصول

تم الحصول على دالة الإنتاجية المائية للمحصول لتحديد كميات مياه الري المثلى والتي تحقق أعلى إنتاجية اعتمادا على التحليل الاحصائي لبيانات متوسطات كميات مياه الري المضافة ومتوسطات الأوزان الرطبة للقرون والحبوب الرطبة والحبوب الجافة. إن دالة الإنتاجية المائية المستخدمة في هذه الدراسة كانت على الصيغة الرياضية التي تمثلها المعادلة (4) والتي يمكن كتابتها على النحو التالي:

$$Y = a + bW + cW^2 \quad (4)$$

حيث تمثل Y الإنتاجية (طن/هكتار)، W كمية المياه المستهلكة ($م^3$/هكتار)، a، b، c: معاملات الانحدار.
إن الدالة متعددة الحدود من الدرجة الثانية (المعادلة 4) يمكن توظيفها لإجراء التحاليل الاقتصادية وذلك لدقتها وبساطتها وسهولة التعامل معها رياضياً [11]
هناك العديد من الدراسات المحلية-والعالمية استهدفت تطبيق دوال الإنتاجية المائية للمحاصيل المختلفة. فعلى الصعيد المحلي تم تقدير دالة الانتاجية المائية لمحصول الصفصفة من قبل[24] ولمحصول الخس [25] ، ولمحصول الفلفل[26]. كما تم اشتقاق هذه الدالة للعديد من المحاصيل والتي شملت الشعير والشوفان والصفصفة والذرة السكرية كمحاصيل علفية والبطاطا والبصل الأخضر والجاف والطماطم [27] .تم اشتقاق العديد من تلك الدوال من خلال دراسات أجريت لإنتاج بعض المحاصيل في بعض المناطق من العالم، فعلى سبيل المثال للفول [28] والقمح من تجارب الري التكميلي التي أجريت في سوريا [8] وسهل شمال الصين [29] وولاية أوريجون، الولايات المتحدة الأمريكية[7][30] الذرة، لقد أجمعت نتائج تلك الدراسات على أنه بالإمكان تطبيق مثل تلك الدوال لتوفير كميات كبيرة من مياه الري يمكن استعمالها للتوسع في ري مساحات إضافية جديدة والرفع من قيمة الإنتاج الكلي للزراعات المروية.

6.2. مؤشرات الاستهلاك المائي

تم الاعتماد في هذه الدراسة على بعض المؤشرات المستخدمة لتقييم الاستهلاك المائي للمحاصيل والمتمثلة في العائد الإنتاجي لوحدة الحجم من مياه الري WP_Y، العائد النقدي لوحدة الحجم من مياه الري WP_M، كفاءة استعمال المياه WUE.
تم تقدير العائد الإنتاجي لوحدة الحجم من مياه الري WP_Y (كجم/$م^3$) بناء على المعادلة المقترحة من قبل[31] ، والتي يمكن كتابتها على النحو التالي:

$$WP_y = \frac{Y}{I} \quad (5)$$

حيث تمثل:Y : الانتاجية الكلية للمحصول (كجم)، I: مياه الري الكلية المضافة ($م^3$).
كما تم تقدير صافي العائد النقدي لوحدة الحجم من مياه الري WP_M (دينار/$م^3$)، بناء على المعادلة (6) والتي تم اقتراحها من قبل [32].

$$WP_M = \frac{MU}{I} \quad (6)$$

حيث تمثل MU العائد النقدي (دينار). I كمية مياه الري الكلية المضافة ($م^3$).

إن كفاءة استعمال المياه WUE (كجم/$م^3$) تم تقديرها بناء على المعادلة (7) والتي تم اقتراحها من قبل [33].

$$WUE = \frac{Y}{ETc} \quad (7)$$

حيث تمثل:Y الانتاجية الكلية للمحصول (كجم/هكتار)، ETc البخر نتح المحصول ($م^3$/هكتار).
بناء على المسح العملي الذي تم عبر الاستبيان عن سعر البيع لكل من القرون الرطبة، والحبوب الرطبة، والحبوب الجافة كانت قيم متوسط سعر الكيلوجرام 3 دينار، 8 دينار، 6 دينار، على التوالي. إن تسعيرة المياه غير متوفرة رسمياً ووفقا لذلك تم افتراض أن يكون سعر المتر المكعب من المياه 0.50، 0.75، 1 دينار

7.2. معامل استجابة المحصول (Ky)

على نحو مخالف لمؤشرات الاستهلاك السابقة ذات المدلول الاقتصادي فإن هذا المؤشر ذو دلالة فسيولوجية مرتبطة بالاستهلاك المائي للمحصول. تم حساب معامل استجابة المحصول (K_Y) بناء على المعادلة (8) والتي اقترحت من قبل[34] .

$$K_y = \frac{\left(1-\frac{ETa}{ETm}\right)}{\left(1-\frac{Ya}{Ym}\right)} \quad (8)$$

حيث تمثل:Ya : الإنتاجية الفعلية (طن/ هكتار)،Ym الانتاجية العظمى (طن/هكتار)، ETa البخر نتح الفعلي (مم/موسم)، ET m: البخر نتح الأعظم (مم/موسم)، Ky ثابت استجابة المحصول للنقص في الري (بدون وحدات).
تفيد قيمة معامل الاستجابة Ky الأقل من 1 بأن هناك انخفاض نسبي في الانتاج أعلى من الانخفاض النسبي الناتج عن الاستهلاك المائي للمحصول. كما إن الزيادة في قيمة Ky تدل على انخفاض كفاءة استخدام الماء النسبية مما يشير إلى على عدم كفاءة الري الناقص في هذه الحالة. ومن ناحية أخرى يشكل انخفاض قيم Ky عن 1 دلالة على إمكانية توفير الماء نتيجة عملية الري الناقص.

8.2.التحليل الإحصائي المستخدم

لإجراء التحاليل الإحصائية تم استخدام برنامج (SPSS, IBM Statistics, 23) وذلك لغرض تحليل التباين بين العينات، بالإضافة إلى تحليل الانحدار، والمقارنة بين المتوسطات.

3. النتائج والمناقشة

1.3.الموازنة المائية

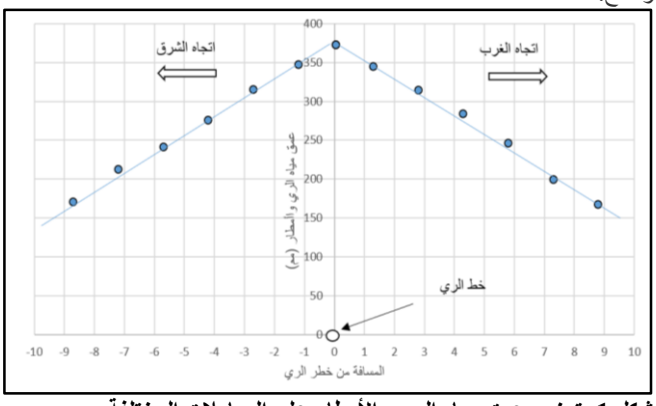
DOI:10.5281/zenodo.17624380

تهدف الموازنة المائية في الدراسات الحقلية إلى تقدير الاستهلاك المائي الفعلي للنبات (البخر-نتح) خلال موسم النمو، انطلاقًا من قياس كميات المياه الداخلة إلى النظام الزراعي (مياه الري والأمطار)، والمتبقية في التربة، والتغيرات الحاصلة في رطوبة التربة. في هذه الدراسة، استخدم نظام الري بالرش خطي المصدر لتوفير تدرج منتظم في كميات المياه المضافة، ما يُمكّن من دراسة تأثير الري الناقص على العلاقات المائية للنبات ومحصول الفول تحت ظروف مناخية محددة. يوضح الشكل (1) نمط التوزيع المثلي الشكل لكميات مياه الري والأمطار المتجمعة في المعاملات المختلفة. لوحظ وجود تجانس توزيع مياه الري غي كل معاملة من معاملات الري، مع التناقص الخطي في كميات مياه الري مع الابتعاد عن خط الري. هذا التدرج في كمية المياه المضافة يعكس كفاءة نظام الري المستخدم في توليد بيئات مائية مختلفة ضمن الحقل الواحد، وهو ما يخدم الهدف الأساسي للدراسة وهو اختبار فاعلية الري الناقص.

يوضح الجدول (2) القيم الكمية لعناصر الموازنة المائية لكل معاملة. تناقصت كميات مياه الري بشكل تدريجي من المعاملة الصفرية (التي تمثل الري الكامل) وحتى المعاملة السادسة (الأقل ريًا)، حيث بلغ عمق الري في المعاملة الصفرية 320 مم، ليصل إلى 116 مم في المعاملة السادسة. فيما انخفض معدل البخر نتح أيضًا تدريجيًا من 363 مم في المعاملة الصفرية إلى 156 مم في المعاملة السادسة. إن التناسق الخطّي بين كميات مياه الري المضافة ومعدلات البخر-نتح، يثبت أيضاً فعالية التصميم التجريبي في توليد درجات مدروسة من العجز المائي لتقييم أداء المحصول.

أظهرت النتائج اختلافًا في التغير الصافي في رطوبة التربة خلال موسم النمو، حيث تراوح بزيادة قدرها (+12.8 مم) في المعاملة السادسة (رغم قلة الري، بسبب تراجع النمو وضعف الامتصاص وموت بعض النباتات)، وبانخفاض قدره (-1.95 مم) في المعاملة الثانية. تشير هذه التغيرات إلى أن النبات استهلك جزءًا من مخزون التربة الرطوبي، خاصة في المعاملات ذات العجز، ما يعزز أهمية دراسة الرطوبة المتبقية في فهم توازنات الماء في النظام الزراعي.

لقد تم تقدير سلوك التغير في متوسطات معدل البخر نتح للمحصول باستخدام كل من طريقة الموازنة المائية باستخدام TDR، وحوض البخر ومعادلة هاريجرفس وسماني المعدلة وذلك للمعاملة الأولى والتي لا تعاني من العجز المائي مما يسمح بإمكانية المقارنة بين الطرق المختلفة لتقدير الاستهلاك المائي. يوضح الشكل (2) سلوك هذا التغير باستخدام قيم متوسطات البخر نتح التراكمية والمقدرة خلال فترات نمو المحصول من زراعته حتى حصاده. إن السلوك غير الخطي الذي أبدته متوسطات معدل البخر نتح التراكمي للمحصول المتحصل عليه من استخدام TDR قد يعزى إلى الظروف المحيطة بالمحصول من مياه ري، تربة ومناخ.

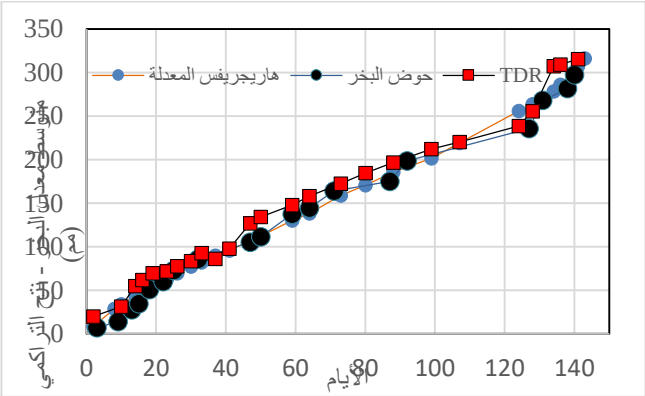


شكل 1. توزيع عمق مياه الري والأمطار على المعاملات المختلفة

إن مثل هذه التباينات في قيم متوسط البخر نتح للمحصول متوقعة تحت الظروف الحقلية وضمن اختلاف طرق التقدير للبخر نتح المستخدمة. إن القيم المتحصل عليها لتقديرات البخر نتح باستخدام طريقة الموازنة المائية باستخدام قيم الرطوبة المبدئية عند بداية ونهاية التجربة تم تبنياها في هذه الدراسة لإجراء التحاليل المتعلقة بتأثيرات الاستهلاك المائي على الإنتاجية بالإضافة الى تقدير كفاءة استخدام مياه الري.

جدول 2. الموازنة المائية لمعاملات الري المختلفة

معاملة الري	الرطوبة الأولية للتربة (مم)	عمق الأمطار (مم)	عمق ماء الري (مم)	مجموع عمق الأمطار ومياه الري (مم)	الرطوبة النهائية للتربة (مم)	التغير في رطوبة التربة (مم)	البخر نتح (مم)
م0	132	52.77	320	373	141.5	9.5	363
م1	134	52.77	293	346	139	11.1	335
م2	142.	52.77	262	315	134	1.95-	317
م3	129	52.77	722	280	125	1.89	278
م4	118	52.77	191	244	117	4.38	239
م5	118	52.77	153	206	121	8.59	198
م6	100	52.77	116	169	108	12.88	156



شكل 2. متوسط البخر نتح التراكمي مقدرا بطريقة هاريجريفس – سماني المعدلة، *TDR*، حوض البخر.

هذا الاختيار تم اعتمادا على دقة مثل هذه التقديرات وخلوها من التعقيدات التقنية المرتبطة بجهاز TDR وإمكانية توفره، ودقة وجودة البيانات المناخية التي تعتمد عليها طريقة هاريجرفس وسماني المعدلة، ووضعية حوض البخر والمشاكل المصاحبة لتقديراته. وعلى كل، فإن النتائج المتحصل عليها تعتبر واعدة من حيث دقة التقديرات.

2.3. الإنتاجية الكلية من القرون الرطبة

أظهرت النتائج الواردة في الجدول (3) أن أعلى متوسط وزن رطب للقرون بلغ 14.94 طن/هكتار عند كمية مياه ري مضافة 2931.5 م³/هكتار. مع انخفاض كمية مياه الري، تناقص متوسط الوزن الرطب للقرون بنسب تراوحت بين 21.55% و85.14% عند كميات مياه ري أقل من الكمية المثلى، حيث سجلت أدنى قيمة إنتاجية 2.22 طن/هكتار عند 1159.6 م³/هكتار. يعكس هذا الانخفاض الواضح تأثير الإجهاد المائي الناجم عن نقص الإمداد المائي، حيث يقلل من قدرة النبات على بناء المستقلبات الضرورية للتمثيل الضوئي، مما يؤدي إلى ضعف العمليات الفسيولوجية الحيوية مثل تخليق البروتين ونشاط الإنزيمات، وهو ما يتفق مع دراسات [35][36][37][38][39] .

DOI:10.5281/zenodo.17624380

جدول 3. كمية مياه الري المضافة (م³/هكتار) ومتوسط الإنتاجية للقرون الرطبة (طن/هكتار)

كمية مياه الري المضافة (م³/هكتار)	متوسط الإنتاجية للقرون الرطبة (طن/هكتار)	متوسط الإنتاجية الرطبة من الحبوب (طن/هكتار)	متوسط الإنتاجية الجافة من الحبوب (طن/هكتار)
3197.3	11.72^{b}	4.54^{d}	1.383^{c}
2931.5	14.94^{a}	6.004^{b}	2.342^{a}
2617.7	13.072^{ab}	6.257^{a}	2.37^{a}
2269.7	10.98^{b}	5.04^{c}	2.278^{a}
1909.7	7.61^{c}	3.45^{e}	1.557^{b}
1533.9	4.73^{d}	2.29^{f}	1.197^{d}
1159.6	2.22^{e}	1.169^{g}	0.657^{e}

3.3. الإنتاجية الكلية من الحبوب الرطبة والجافة

يوضح الجدول (3) أن متوسط الإنتاجية الكلية من الحبوب الرطبة وصل إلى أقصى قيمة 6.257 طن/هكتار عند كمية مياه ري 2617.7 م³/هكتار، مع تسجيل انخفاضات نسبية كبيرة عند كميات مياه ري أقل أو أكثر من هذه الكمية، حيث بلغ الانخفاض النسبي حتى 81.31% عند 1159.5 م³/هكتار. أما الإنتاجية الجافة من الحبوب فبلغت ذروتها عند 2.37 طن/هكتار مع كمية مياه ري 2617.7 م³/هكتار، لكنها انخفضت إلى 0.657 طن/هكتار عند أدنى كمية مياه ري (1159.6 م³/هكتار)، ما يعكس نفس الاتجاه الانحداري الواضح. تعكس هذه النتائج تأثير الإجهاد المائي على انخفاض عدد الأوراق والقرون، ما يحد من قدرة النبات على التمثيل الضوئي وتراكم الكتلة الحيوية، ويبطئ نقل نواتج التمثيل الضوئي إلى البذور أثناء مرحلة ملء الحبوب، وهو ما أشار إليه [40][41]. علاوة على ذلك، يوضح التأثير السلبي للإجهاد المائي على الطاقة الأيضية المتاحة لعمليات النمو، مما يترتب عليه انخفاض في إنتاجية المحصول، وهو ما تدعمه دراسات [42].

4.3. العلاقة بين محتوى الماء النسبي في الحبوب وكميات مياه الري

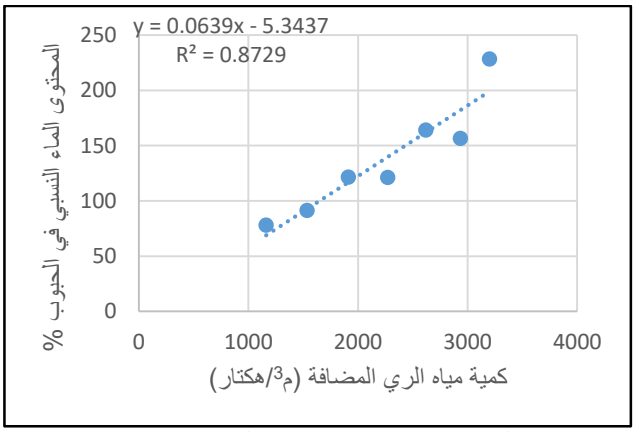
يوضح الشكل (3) علاقة إيجابية قوية بين كميات مياه الري المضافة والمحتوى المائي النسبي في الحبوب، حيث يؤدي زيادة توافر الماء في التربة إلى تعزيز العمليات الفسيولوجية للنبات، خاصة التمثيل الضوئي وامتصاص المغذيات، مما ينعكس إيجابًا على الإنتاجية. تتوافق هذه النتائج مع دراسات [43][44][45] مما يؤكد الدور المحوري لكميات الري المضافة في تعزيز نمو الفول.

5.3. معامل الاستجابة للإنتاجية (Ky) وأهميته

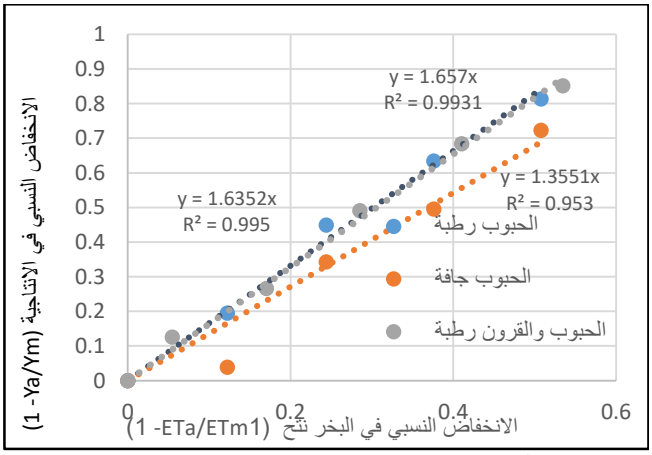
تم تقدير معامل الاستجابة للإنتاجية (Ky) لمكونات الإنتاج الثلاثة: القرون الرطبة، الحبوب الرطبة، والحبوب الجافة، حيث بلغت القيم 1.355، 1.657، و1.6352، على التوالي مع معاملات تحديد مرتفعة تفوق 0.98 (الشكل 4). وتعني القيم التي تزيد عن الواحد أن محصول الفول حساس بشكل ملحوظ لنقص المياه. وهذا يتوافق مع ما ذكره[34][46] اللذين أكدا أن القيم الأعلى من 1 تدل على حساسية المحصول للإجهاد المائي.

6.3. التحليل الاقتصادي للإنتاجية

تم تقدير الكميـــة المثلـــى من كميات مياه الري لمكونات انتاجية محصول الفول والمتمثلة في متوسطات إنتاجية القرون الرطبة والحبوب الرطبة والحبوب الجافة (طن/هكتار) وذلك بالاعتماد على قيم متوسطات كميات مياه الري المضافة (م³/هكتار). وقد أظهرت النتائج المتحصل عليها من خلال التحليل الاحصائي باستخدام تقنية الانحدار غير الخطي والموضحة في الشكل (5) أنها دوال تناقصية من الدرجة الثانية لمحصول الفول. بالإمكان كتابة تلك الدوال على النحو التالي:



شكل 3. العلاقة بين عمق مياه الري المضافة (م³/هكتار) والمحتوى المائي النسبي في الحبوب (%)



شكل 4. العلاقة بين الانخفاض النسبي في البخر نتح والانخفاض النسبي لإنتاجية القرون الرطبة والحبوب الرطبة والحبوب الجافة

أولاً: دالة الإنتاجية المائية للقرون الرطبة

$$y = -16337 + 18.757x - 0.003x^2 \quad (9)$$

R^2= 0.9346

ثانياً: دالة الإنتاجية المائية للحبوب الرطبة

$$Y = -8604.7 + 10.146x - 0.0018x^2 \quad (10)$$

R^2= 0.90

ثالثاً: دالة الإنتاجية المائية للحبوب الجافة

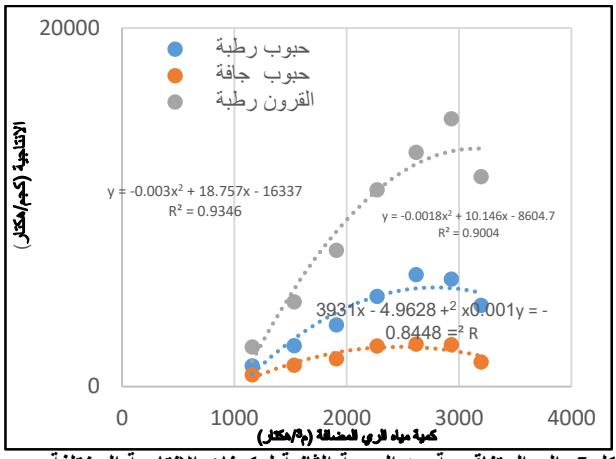
$$y = -3931 + 4.9628x - 0.001x^2 \quad (11)$$

R^2= 0.8448

يتضح من خلال المعادلات (9)، (10)، (11) ارتفاع قيم معامل التحديد والتي كانت 0.9346، 0.90، 0.8448، وذلك للدوال الإنتاجية المائية للقرون الرطبة والحبوب الرطبة والحبوب الجافة، على التوالي. هذا يفسر أن التغيرات التي حدثت في كميات مياه الري المضافة تفسر التغيرات التي حدثت بسببها في الإنتاجية بنسب 93.46%، 90%، 84.48%، لكل من إنتاجية القرون الرطبة والحبوب الرطبة والحبوب الجافة، على التوالي. وأن النسب المتبقية 6.54%، 10%، 15.52%، تفسر أن التغيرات في إنتاجية القرون لرطبة والحبوب الرطبة والحبوب الجافة، على التوالي، ليس مسؤولا عنها التغيرات في كميات

DOI:10.5281/zenodo.17624380

مياه الري المضافة، إنما حدثت بفعل عوامل أخرى لم يتم أخذها في الاعتبار في العلاقة بين كميات مياه الري المضافة والإنتاجية.



شكل 5. الدوال تناقصية من الدرجة الثانية لمكونات الإنتاجية المختلفة لمحصول الفول

لتحديد كميات مياه الري المثلى (م³/هكتار) التي يتحقق عندها أعلى إنتاجية تم إجراء عملية التفاضل للمعادلات (9)، (10)، (11) وتم الحصول على المعادلات التالية:

أولاً: المشتقة الأولى لدالة الإنتاجية المائية للقرون الرطبة

$$\frac{dy}{dx} = MP_x = 18.757 - 0.006x \quad (12)$$

$\mathbf{MP_X}$= قيمة المشتقة الأولى للناتج الحدي.

ثانياً: المشتقة الأولى لدالة الإنتاجية المائية للحبوب الرطبة

$$\frac{dy}{dx} = MP_x = 10.146 - 0.0036x \quad (13)$$

ثالثاً: المشتقة الأولى لدالة الإنتاجية المائية للحبوب الجافة

$$\frac{dy}{dx} = MP_x = 4.9628 - 0.002x \quad (14)$$

بمساواة المعادلات (12)، (13)، (14) بالصفر يتم الحصول على كمية المياه المثلى والتي يتحقق عندها أعلى إنتاجية، والتي كانت 3027.08، 2674.5، 2494.5(م³/هكتار) وذلك للقرون الرطبة، والحبوب الرطبة والحبوب الجافة، على التوالي.

عند هذه القيم من كميات مياه الري المثلى، بالإمكان تحديد الشرط الكافي لتعظيم الربح لمياه الري. ويتأتى ذلك بمعرفة القيمة التسويقية للإنتاجية حسب نوعها، بالإضافة إلى سعر المتر المكعب من المياه. وبناء على المسح العملي الذي تم عبر الاستبيان عن سعر البيع لكل من القرون الرطبة، والحبوب الرطبة، والحبوب الجافة كانت قيم متوسط سعر الكيلوجرام 3 دينار، 8 دينار، 6 دينار، على التوالي. إن تسعيرة المياه غير متوفرة رسمياً ووفقا لذلك تم افتراض أن يكون سعر المتر المكعب من المياه 0.50، 0.75، 1 دينار. يتحقق الشرط الكافي لتعظيم الربح لمياه الري بأن تكون قيمة المشتقة الثانية للدوال الإنتاجية سالبة القيمة. وبناء على ذلك تم تقدير الشرط الضروري المعظم للربح بالتعويض في المعادلات (12)، (13)، (14) ووفقاً للأسعار المفترضة للمتر المكعب من المياه فكانت على النحو التالي:

أولاً: القرون الرطبة

$$0.50 = (18.757 - 0.006x)3 \quad (15)$$
$$0.75 = (18.757 - 0.006x)3 \quad (16)$$
$$1.00 = (18.757 - 0.006x)3 \quad (17)$$

إن معدلات مياه الري المُثلى وفقاً لمستوى الأسعار للقرون الرطبة بلغت 3098، 3084، 3070 م³/هكتار، وذلك على اعتبار أن سعر المتر المكعب من المياه 0.50، 0.75، 1.00 دينار، على التوالي. إن قيم معدلات المياه المثلى تعظم الانتاج. وعليه فإن أي معدلات مياه أكبر من 3098، 3084، 23070م³/هكتار وفقاً للأسعار المفترضة لكميات مياه الري، تعتبر معدلات غير اقتصادية بالنسبة لظروف التجربة، وذلك على اعتبار أنها كميات فائضة عن احتياج المحصول. وفيما يتعلق بتقدير الشرط الكافي لتعظيم الربح لمياه الري يكمن في تناقص الناتج الحدي ويتحقق ذلك رياضياً بأن تكون قيمة مشتقة الناتج الحدي سالبة، أي أن:

$$\frac{dMP_x}{dx} = -0.006 \quad (18)$$

وكما تم الإشارة إليه، هذه النتيجة السالبة تحقق الشرط الكافي مما يعني أن كمية مياه الري المضافة تحقق الكفاءة الاقتصادية.

ثانياً: الحبوب الرطبة

$$0.50 = (10.146 - 0.0036x)8 \quad (19)$$
$$0.75 = (10.146 - 0.0036x)8 \quad (20)$$
$$1.00 = (10.146 - 0.0036x)8 \quad (21)$$

إن معدلات مياه الري المُثلى وفقاً لمستوى الأسعار للحبوب الرطبة بلغت 2800، 2792، 2783م³/هكتار، وذلك على اعتبار أن سعر المتر المكعب من المياه 0.50، 0.75، 1.00 دينار. إن قيم معدلات المياه المثلى تعظم الانتاج. وعليه فإن أي معدلات مياه أكبر من 2800، 2792، 2783م³/هكتار ووفقاً للأسعار المفترضة لكميات مياه الري، تعتبر معدلات غير اقتصادية بالنسبة لظروف التجربة، وذلك على اعتبار أنها كميات فائضة عن احتياج المحصول.

وفيما يتعلق بتقدير الشرط الكافي لتعظيم الربح لمياه الري فكانت:

$$\frac{dMP_x}{dx} = -0.0036 \quad (22)$$

ثالثاً: الحبوب الجافة

$$0.50 = (4.9628 - 0.002x)6 \quad (23)$$
$$0.75 = (4.9628 - 0.002x)6 \quad (24)$$
$$1.00 = (4.9628 - 0.002x)6 \quad (25)$$

إن معدلات مياه الري المُثلى وفقاً لمستوى الأسعار للحبوب الجافة بلغت 2440، 2419، 2398 م³/هكتار، وذلك على اعتبار أن سعر المتر المكعب من المياه 0.50، 0.75، 1.00 دينار، على التوالي. إن قيم معدلات المياه المثلى تعظم الانتاج. وعليه فإن أي معدلات مياه أكبر من 2440، 2419، 2398 م³/هكتار ووفقاً للأسعار المفترضة لكميات مياه الري، تعتبر معدلات غير اقتصادية بالنسبة لظروف التجربة، وذلك على اعتبار أنها كميات فائضة عن احتياج المحصول، وفيما يتعلق بتقدير الشرط الكافي لتعظيم الربح لمياه الري، فإن الشرط الكافي لتعظيم الربح يكمن في تناقص الناتج الحدي ويتحقق ذلك رياضياً بأن تكون قيمة مشتقة الناتج الحدي سالبة، أي أن:

$$\frac{dMP_x}{dx} = -0.002 \quad (26)$$

7.3. كفاءة استخدام الماء والإنتاجية المائية للمحصول

يوضح الجدول (4) قيم مؤشرات الاستهلاك المائي للمحصول والمتمثلة في كفاءة استخدام الماء (WUE) والإنتاجية المائية (WP) بنوعيها المعتمدة على كمية المياه المستهلكة كبخر نتح (CWP) وتلك المعتمدة على العائد النقدي بالدينار (CWP_m)، وذلك للإنتاجية المكونة من القرون الرطبة(طن/هكتار)، الحبوب الرطبة (طن/هكتار)، والحبوب الجافة (طن/هكتار). تشير النتائج إلى ارتفاع قيمة (WUE) 5.10 (كجم/م³) للإنتاجية المتمثلة في القرون الرطبة عند المعاملة الثانية بكمية مياه ري مضافة 2931 (م³/هكتار). ومن الملاحظ أن قيمة (WUE) بلغت أقل قيمة لها 1.92(كجم/م³) عند المعاملة السادسة بمتوسط كمية مياه ري مضافة 1159 (م³/هكتار). ومن الملاحظ أيضاً انخفاض قيمة 3.66 (WUE)(كجم/م³) المتحصل عليها عند معاملة الري الصفرية بمتوسط كمية مياه ري مضافة 3197 (م³/هكتار) عن تلك المتحصل عليها 3.95 (كجم/م³) عند معاملة مياه الري الرابعة بمتوسط كمية مياه ري مضافة 1909 (م³/هكتار)، مما يدل على ضياع كميات من مياه الري خارج منطقة الجذور ويقلل من إمكانية استفادة المحصول من المياه المضافة.، وفيما يتعلق بالإنتاجية المائية المحصولية (CWP) للقرون الرطبة فإن أقصى قيمة لها كانت 4.46 (كجم/م³) وذلك عند معاملة الري الأولى بمتوسط بخر نتح مقدر 3348 (م³/هكتار)، فيما كانت أقل قيمة (CWP) 1.43 (طن/م³) وذلك في المعاملة السادسة والتي قدر فيها متوسط البخر نتح 1558 (م³/هكتار). يتطلب تقدير الإنتاجية المائية المعتمدة على العائد

DOI:10.5281/zenodo.17624380

النقدي لوحدة الحجم من مياه الري المضافة معرفة متوسط سعر وحدة الناتج بالدينار الليبي. تم تقدير متوسط السعر بناء على المسح الاستبياني لمحلات البقالة في منطقة الزاوية فكانت 3، 8، 6 (دينار/كجم)، وذلك للقرون الرطبة، الحبوب الرطبة، والحبوب الجافة، على التوالي. بلغت قيمة الإنتاجية المائية للقرون الرطبة (CWP_m) أقصى قيمة لها عند معاملة الري الأولى 15.29 (دينار/م^3) يليها المعاملة الثانية والثالثة بقيمة 14.98، 14.51(دينار/م^3)، على التوالي. في حين كانت أقل قيمة للإنتاجية المائية للقرون الرطبة 5.75 (دينار/م^3) وذلك للمعاملة السادسة بمتوسط كمية مياه ري مضافة 1159(م^3/هكتار).

إن القيم المتحصل عليها لكل من كفاءة استخدام الماء، والإنتاجية المائية المحصولية والإنتاجية المائية المعتمدة على العائد النقدي لوحدة الحجم من مياه الري المتحصل عليها في هذه الدراسة تعتبر مرتفعة نسبياً عن تلك التي تم تقديرها من دراسة[47] والتي تم تقديرها بناء على القيم المتحصل عليها من استبيان مسحي استهدف المنطقة الممتدة من مصراته حتى صبراتة ويغطي أغلب منطقة سهل الجفارة وقد شمل الفول الأخضر كوزن رطب للقرون. فلقد كانت قيم المتوسطات لجميع معاملات الري لكفاءة استخدام الماء والإنتاجية المائية المحصولية والإنتاجية المائية المعتمدة على العائد النقدي لوحدة الحجم من المياه هي 4.25 (كجم/م^3)، 3.13 (كجم/م^3)، 12.76 (دينار/م^3)، على التوالي، في حين كانت تلك القيم لكفاءة استخدام الماء والإنتاجية المائية المحصولية والإنتاجية المائية المعتمدة على العائد النقدي لوحدة الحجم من المياه هي 4.25 (كجم/م^3)، 3.13 (كجم/م^3)، 12.76 (دينار/م^3)، على التوالي، وذلك لدراسة[47]. إن التباين بين هذه القيم قد يعزى إلى اختلاف مصدر البيانات المستخدمة في تقدير هذه المؤشرات. حيث بنيت دراسة [47] على نتائج استبيانيه لكميات مياه الري المضافة، وحسابياً معتمدة على البينات المناخية لتقدير البخر نتح للمحصول، في حين كانت نتائج هذه الدراسة من الواقع الحقلي.

يوضح الجدول (4) نتائج تقدير كفاءة استخدام الماء (كجم/م^3) والإنتاجية المائية المحصولية (كجم/م^3) والإنتاجية المائية المعتمدة على العائد النقدي لوحدة الحجم من المياه (دينار/م^3) وذلك للحبوب الرطبة. يتضح من خلال النتائج ارتفاع قيمة كفاءة استخدام الماء بقيمة 2.39 (كجم/م^3) وذلك للمعاملة الثانية بمقدار كمية مياه ري مضافة 2617 (م^3/هكتار)، بينما كانت أقل قيمة لكفاءة استخدام الماء 1.01 (كجم/م^3) عند المعاملة السادسة والتي كانت كميات مياه الري المضافة فيها 1159 (م^3/هكتار). إن متوسط قيمة كفاءة استخدام الماء المتحصل عليها من هذه الدراسة 1.77 (كجم/م^3) تختلف عن تلك المتحصل عليها من دراسة [48] والتي كانت فيها قيم متوسط كفاءة استخدام الماء 1.28 (كجم/هكتار). قد تعزى مثل هذه الاختلافات إلى اختلاف ظروف التجربة والواقع الحقلي. وفي هذا الصدد أشارت النتائج المتحصل عليها[49] إلى أن القيم المتحصل عليها لكفاءة استخدام الماء لنبات الفول تعتمد اعتمادا كبيرا على موعد الزراعة، وهو ما قد يبرر اختلاف قيم كفاءة استخدام المياه عند مقارنة النتائج المتحصل عليها من مناطق تتباين مناخياً وجغرافياً.

وفيما يتعلق بتقدير الإنتاجية المائية المحصولية للحبوب الرطبة فلقد أظهرت النتائج ارتفاع قيمتها 1.98 (كجم/م^3) وذلك عند معاملة الري الثانية. أما أقل قيمة لها فكانت عند المعاملة السادسة 0.75 (كجم/م^3). إن قيم الإنتاجية المائية المحصولية المقدرة اعتمادا على العائد النقدي لوحدة الحجم من مياه الري المضافة كانت مرتفعة للمعاملة الثانية وبمقدار 19.12 (دينار/م^3) بينما كانت أقل قيمة لها عند المعاملة السادسة والمعاملة الصفرية حيث كانت قيمتها 8.06، و11.36(دينار/م^3)، على التوالي. إن الاختلاف الطفيف بين هاتين القيمتين تعزى بدرجة أساسية إلى المقدار الكبير في الفاقد بين الوزن الرطب للقرون والوزن الرطب للحبوب في المعاملة الصفرية مقارنة بالمعاملة السادسة، هو ما قد يعطي دلالة على أن الوزن الرطب للقرون قد لا يعد مؤشراً يعتمد عليه عند تسويق نبات الفول، وذلك لارتفاع وزن القشور والتي تعتبر أحياناً غير مرغوب للاستهلاك البشري.

يوضح الجدول (4) قيم كل من نتائج تقدير كفاءة استخدام الماء (كجم/م^3) والإنتاجية المائية المحصولية (كجم/م^3) والإنتاجية المائية المعتمدة على العائد النقدي لوحدة الحجم من المياه (دينار/م^3) وذلك للحبوب الجافة. تشير النتائج المتحصل عليها ارتفاع طفيف في قيمة كفاءة استخدام الماء 1.00(كجم/م^3) لمعاملة الري الثالثة مقارنة ببقية المعاملات التي كانت فيها قيم كفاءة استخدام الماء 0.80، 0.91، 0.82، 0.78 (كجم/هكتار)، وذلك لمعاملات الري الأولى والثانية والرابعة والخامسة، على التوالي. وعلى نحو مخالف كانت قيمة كفاءة استخدام الماء منخفضة 0.43، 0.57 (كجم/هكتار)، وذلك لمعاملة الري الصفرية الأكثر مقداراً في كميات مياه الري المضافة (3197م^3/هكتار)، وللمعاملة السادسة الأقل مقداراً في كميات مياه الري المضافة (1159م^3/هكتار)، وهو ما يعطي دلالة على أن الزيادة والانخفاض المفرطين في كميات مياه الري المضافة لا يعملان على تحسين كفاءة استخدام المياه للحصول على إنتاجية مرتفعة من الحبوب الجافة. وإن تأثير الزيادة المفرطة في كميات مياه الري المضافة تساهم في تخفيض قيم كفاءة استخدام الماء للحصول على إنتاجية مرتفعة من الحبوب الجافة بدرجة أعلى مما تساهم به الكميات المنخفضة من مياه الري يمكن ان يعزى السبب الى ان هذه المعاملة استقبلت كميات كبيرة من المياه مما يودي سلبا على عمليات التنفس في منطقة الجذور، ومن ثم انخفاض قدرة النبات في امتصاص الماء

جدول 4. مؤشرات الاستهلاك المائي لمكونات الانتاجية المختلفة وفقا لمعاملات مياه الري.

القرون الرطبة			
المعاملة	WUE	CWP	CWP m
م0	3.66	3.23	10.99
م1	5.10	4.46	15.29
م2	4.99	4.13	14.98
م3	4.84	3.95	14.51
م4	3.98	3.18	11.95
م5	3.08	2.39	9.25
م6	1.92	1.43	5.75
الحبوب الرطبة			
المعاملة	WUE	CWP	CWP m
م0	1.42	1.25	11.36
م1	2.05	1.79	16.38
م2	2.39	1.98	19.12
م3	2.22	1.81	17.76
م4	1.81	1.44	14.45
م5	1.49	1.16	11.94
م6	1.01	0.75	8.06
الحبوب الجافة			
المعاملة	WUE	CWP	CWP m
م0	0.43	0.38	2.60
م1	0.80	0.70	4.79
م2	0.91	0.75	5.43

DOI:10.5281/zenodo.17624380

م3	**1.00**	**0.82**	**6.02**
م4	**0.82**	**0.65**	**4.89**
م5	**0.78**	**0.61**	**4.68**
م6	**0.57**	**0.42**	**3.40**

والعناصر الغذائية من التربة. أما بالنسبة للإنتاجية المائية المحصولية، فكانت قيمها 0.38، 0.70، 0.75، 0.82، 0.65، 0.61، 0.42 (كجم/م^3)، وذلك لمعاملات الري الصفرية، والأولى والثانية والثالثة والرابعة والخامسة والسادسة، على التوالي. ومن الجدير بالملاحظة هنا هو ارتفاع قيمة الإنتاجية المائية المحصولية لمعاملة الري الثالثة وتقارب قيمها في المعاملات الأولى والثانية والرابعة والخامسة. أما بالنسبة لقيمة الإنتاجية المائية المحصولية للمعاملة الصفرية الأكثر استقبالا لمياه الري واستهلاكا مائيا من قبل المحصول فكانت أقل من تلك للمعاملة السادسة والتي استقبلت فيها كميات مياه الري الأقل والأقل قيمة في استهلاك الماء بين جميع معاملات الري الأخرى. مثل هذه النتائج تؤكد على ضرورة استخدام مفهوم الري الناقص لتحسين مؤشرات الأداء للمحصول وللحصول على وحدات انتاج مرتفعة بأقل وحدات مياه ري مستهلكة. وفيما يتعلق بقيمة الإنتاجية المائية المعتمدة على العائد النقدي لوحدة الحجم من المياه (دينار/م^3) للحبوب الجافة فكانت أقصى قيمة لها 6.02 (دينار/م^3) وذلك عند معاملة مياه الري الثالثة، بينما كانت 2.60، 4.79، 5.43، 4.89، 4.68، 3.40 (دينار/م^3)، وذلك لمعاملات الري الصفرية والأولى والثانية والرابعة والخامسة والسادسة، على التوالي. تعزى القيمة المنخفضة للإنتاجية المائية المعتمدة على العائد النقدي لوحدة الحجم من المياه إلى الارتفاع النسبي لكميات مياه الري المضافة والتي قد تفقد في قطاع التربة كرشح عميق ولا يستفيد منه النبات. كما أكدت نتائج الأبحاث أن الري الناقص ناجح في تحسين كفاءة إنتاجية المياه لمختلف المحاصيل دون التسبب في انخفاض حاداً في الإنتاج. ومع ذلك، يجب ضمان حد أدنى معين من الرطوبة في التربة[50] .

4. التوصيات

يُوصى **بإجراء** دراسات علمية موسعة تشمل مستويات مختلفة من الري الناقص لتحديد التأثير الدقيق على إنتاجية الفول. كما ينبغي دراسة تأثير الري الناقص عند مراحل نمو المحصول المختلفة، لتحليل استجابة النبات وتحديد المراحل الأكثر حساسية لنقص المياه، الأمر الذي يساعد في تطوير برامج ري مدروسة توازن بين كفاءة الاستخدام والمحافظة على جودة الإنتاج.إضافة إلى ذلك، فإن تعميم هذه الدراسات على أنواع متعددة من التربة والمناطق البيئية المختلفة، سيساهم في تعميم الفائدة. كما أن توعية المزارعين بأهمية هذه الاستراتيجية وتفعيل دور الإرشاد الزراعي في توجيههم نحو استخدام كميات مياه ري مثلى، مع تحسين أداء أنظمة الري للحد من الفاقد المائي، سيساعد في تفادي تعريض المحاصيل للإجهاد المائي ويحافظ على خصائصها الإنتاجية.

5. الشكر والتقدير

يتقدم المشاركون في هذه الورقة بجزيل الشكر والامتنان إلى السيد رضا محمود حباس لتوفيره مستلزمات التجربة من موقع الحقل والامداد المائي، وإلى فرع بحوث الزراعات المستدامة بمركز البحوث الزراعية لدعمه غير المحدود بالأدوات والأجهزة والتحاليل ذات العلاقة.

6. المراجع

[1] Ohlsson L. (2002) Water and Conflict. Unesco Encyclopaedia on Life Support Systems

[2] الباروني، سليمان صالح. 2020. علاقة الموارد المائية بالأمن الغذائي في ليبيا. المجلة الليبية للعلوم الزراعية، 25(3).

[3]Tavakoli, A, Oweis T, Farahani H, Ashrafi S, Hormoz A, Siadat H, And. Liaghat A. (2010). Improving Rainwater Productivity with Supplemental Irrigation in Upper Karkheh River Basin of Iran. International Center for Agricultural Research in The Dry Areas (Icarda), Aleppo, Syria

[4]Kirda, C. 2000. Deficit Irrigation Scheduling Based on Plant Growth Stages Showing Water Stress Tolerance. In Deficit Irrigation Practices. C. Kirda, P. Moutonnet, C. Hera and D.R. Nielsen (Eds). Water Report 22 FAO, Rome

[5]Du, T., S. Kang, J. Sun, X. Zhang, And J. Zhang. 2010. An Improved Water Use Efficiency of Cereals Under Temporal and Spatial Deficit Irrigation in North China. Agricultural Water Management 97: 66–74

[6]Karrou, M. And Oweis T. (2012). Water And Land Productivities of Wheat and Food Legumes with Deficit Supplemental Irrigation in A Mediterranean Environment. Agricultural Water Management 107: 94-103

[7]English, M.J. And Nakamura, B.C. (1989) Effects of Deficit Irrigation and Irrigation Frequency on Wheat Yields. Journal Of American Society of Civil Engineering 115(Ir2), 172–184.

[8]Zhang, H. And Oweis, T. (1999) Water-Yield Relations and Optimal Irrigation Scheduling of Wheat in The Mediterranean Region. Agricultural Water Management 38, 195–211.

[9] Mcdonald Gk And Paulsen Gm. (1997). High Temperature Effects on Photosynthesis and Water Relations of Grain Legumes. Plant And Soil 196: 47-58

[10] Amede T, Schubert S (2003) Mechanisms of Drought Resistance in Grain Legumes I. Osmotic Adjustment. Ethiop. J. Sci. 26, 37-46

[11]Helweg, O. J. (1991). Functions of crop yield from applied water. Agronomy Journal, 83(4), 769-773.

[12] Zhang Heping, Z. H. (2003). Improving Water Productivity Through Deficit Irrigation: Examples from Syria, The North China Plain and Oregon, USA. In Water Productivity in Agriculture: Limits and Opportunities for Improvement (Pp. 301-309). Wallingford Uk: Cabi Publishing.

[13] Cuenca, R. H. 1989. Irrigation System Design: An Engineering Approach. Prentice Hall. Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, USA

[14] Calvache Ulloa, A. M., & Reichardt, K. (1997). Efeito de epocas de deficiencia hidrica na produtividade e na eficiencia do uso de agua e de nitrogenio da cultura do feijao cv. Imbabello.

[15] Lovelli, S.; Perniola, M.; Ferrara, A. and di Tommaso T. (2007). Yield response factor to water (Ky) and water use efficiency of Carthamus tinctorius L. and Solanum melongena L. Agric. Water Manag. 92, 73–80.

[16] Cicogna, A., Dietrich, S., Gani, M., Giovanardi, R., Sandra, M., 2005. Use Of Meteorological Radar to Estimate Leaf Wetness as Data Input for Application of Territorial Epidemiological Model (Downy Mildew – Plasmoparaviticola): Agrometeorology 2003. Phys. Chem. Earth 30, 201–207

DOI:10.5281/zenodo.17624380

of dry farming systems in West Asia and North Africa. J. Agricultural Water Management , 80, 57–73
[33] Teare, I.D., Kanemasu, E.T., Powers, W.L., Jacobs, H.S., 1973. Water-use efficiency and its relation to crop canopy area, stomatal regulation, and root distribution. Agron. J. 65,207-211.
[34] Doorenbos, J. And Kassam. A. H. 1979. Yield Response to Water. Fao, Irrigation and Drainage Paper No: 33, Rome, 193
[35] Simpson, G.M. (1981). Water Stress on Plant. Published By Praeger Publisher Cbs. Educational. A. Division of Cbs Inc. And Professional Publishing New York.
[36] Salih, F.A. (1985). Varietal Performance of Faba Bean Under Two Different Watering Intervals. Fabis Newsletter 13, 16 – 19. (C.F. Faba Bean Abstracts 1986, 6 (4), 408).
[37] Abd El-Haleem, A.K. (1994). Growth and Yield of Faba Bean as Affected by Inoculation, Phosphorous Fertilization and Irrigation Frequency. J. Agric. Sci. Mansoura Univ., 19 (11): 3563 – 3574.
[38] Kortam, M.A. (1995). Yield And Yield Components of Broad Bean (*Vicia faba* L.) As Affected by Irrigation Frequency, Phosphorus and Potassium Fertilization. Egypt. J. Appl. Sci. 10 (9) : 266 – 280.
[39] Mwanamwenge, J.; S.P. Loss; K.H.M. Siddique and P.S. Cocks (1999). Effect Of Water Stress During Floral Initiation, Flowering and Podding on The Growth and Yield of Faba Bean (*Vicia faba* L.). European J. Of Agronomy 11 (1): 1 – 11.
[40] Turk, G. And Hall R., (1983). The Development, Production and Problems of Faba Bean (*Vicia faba* L..) In West Asia and North Africa.Fabis Water Stress at Different Growth Stage M. Sc.
[41] Fadol, Hussien Abdulaziz, Sirelkhetm Hassan Ahamed, and Yahia Dawoud Eldie. "Effect of Water Stress on Growth and Yield of different faba bean varieties (*Vicia faba* L.) in Kabkabia Suburb North Darfur. https://www.researchgate.net/publication/335723168.
[42] Okasha, S. A., & Mubarak, M. H. (2018). Evaluation of some sugar beet genotypes under drought stress based on selection indices. Journal of Agronomy Research, 1(1), 34-48.
[43] Erdem, Y., Seshril, S., Erdem, T., Kenar, D., 2006. Determination of crop water stress index for irrigation scheduling of bean (Phaseolus vulgaris L.). Turk. J. Agric. 30, 195–202
[44] Hammad, S.A., Kaoud, E.E., Matter, K., Khamly, M.A., 1990. Effect of soil and water management practices on broad been in sandy soil. Egypt. J. Soil Sci. 30 (1–2), 341–355
[45]Abd El-Mawgoud, A.M.R., 2006. Growth, yield and quality of green bean (Phaseolus vulgaris) in response to irrigation and compost applications. J. Appl. Sci. 2 (7), 443–450.
[46] Steduto P, Hsiao Tc, Fereres E, Raes D. 2012. Crop Yield Response to Water. Fao Irrigation and Drainage Paper 66. Food And Agriculture Organization of The United Nations, Rome, Italy.
[17] Geerts, S., Raes, D., Garcia, M., Condori, O., Mamani, J., Miranda, R., Cusicanqui, J., Taboada, C., Vacher, J., 2008. Could Deficit Irrigation Be a Sustainable Practice for Quinoa (Chenopodium Quinoa Willd.) In The Southern Bolivian Altiplano? Agr. Water Manage. 95, 909–917
[18]Subash N & Priya N, Climatic Requirements for Optimizing Faba Bean Faba L.) A Potential Legume for India (A K Singh and R C Bhatti, Eds.,) Icar, Rc for Er, Patna (2012) P. 197-204.
[19] يحي، الطاهر أحمد وسليمان، خليل أبوبكر. 1981. الدليل المعملي لخواص التربة الطبيعية. منشورات جامعة طرابلس كلية الزراعة/ طرابلس.
[20] Nelson, R. (1982). Carbonate and gypsum. p.181–197. AL Page et al.(ed.) Methodsof soil analysis. Part 2. Agron.Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison,WI. Carbonate and gypsum. p. 181–197. In AL Page et al.(ed.) Methods ofsoil analysis. Part 2. 2nd ed. Agron.Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison,WI.
[21] Bresler, E., Dagan G. and Hanks, R.J., (1982). Statistical Analysis of Crop Yield Under Controlled Line Source Irrigation. Soil Science Society American J. 46:841-847
[22]Ezlit. Y.Z, Ekhmaj.A. I, Elaalem.M. M and Farjani. A. 2015. Calibration of Hargreaves – Samani Equation for Better Estimating Reference Evapotranspiration in Nortwest Libya. Rural Development Conference. 13-15 MARCH 2015 Bangkok- Thailand. 2015 (19- 29).
[23] Doorenbos. J and Pruitt. W. O. (1977). Guidelines for predicting crop water requirements. FAO, Rome, Irrig. Drain. Paper No. 24, p 144.
[24] الغرياني، سعد أحمد. 1986. دراسة الاحتياجات المائية لمحصول الصفصفة في منطقة الشريط الساحلي. الهيئة القومية للبحث العلمي، طرابلس، ليبيا.
[25] فهيد، فريدة عمر، البي، نوري مسعود واحمد إبراهيم خماج. 2019. تقدير الاستخدام الأمثل لمياه الري في إنتاجية محصول الخس-مقاربة اقتصادية. مجلة جامعة مصراته للعلوم الزراعية. 1 (1): 209-217.
[26] خماج،أحمد إبراهيم وأحمد سالم الجديد، & طارق أبوالقاسم ارحومة. (2025). استجابة الفلفل (Capsicum annuum L.) للري الناقص. مجلة شمال إفريقيا للنشر العلمي (NAJSP), 110-127.
[27] الغرياني. سعد أحمد، الزليط، يونس ضو، خماج. أحمد إبراهيم والعالم. مختار محمود. 2019. رصد وتقييم الأثار الاقتصادية والبيئية للزراعة المروية في منطقة شمال عرب ليبيا. دراسة مقدمة بدعم ومتابعة من هيئة أبحاث العلوم الطبيعية والتكنولوجيا. وزارة التعليم. هيئة أبحاث العلوم الطبيعية والتكنولوجيا.
[28] Oweis, T., Hachum, A., & Pala, M. (2005). Faba bean productivity under rainfed and supplemental irrigation in northern Syria. Agricultural Water Management, 73(1), 57-72.
[29] Zhang, H., Wang, X., You, M. and Liu, C. (1999) Water-Yield Relations and Water-Use Efficiency of Winter Wheat in The North China Plain. Irrigation Science 19, 37–45.
[30] English, M.J. And Raja, S.N. (1996) Perspectives on Deficit Irrigation. Agricultural Water Management 32, 1–14
[31] Alghariani, S. A. (2006). Reducing Agricultrual Water Demand In Libya Through Improving Water Use Efficinecy And Crop Water Productivity. AARINENA Water Use Efficiency Network, 118.
[32] Oweis, T., and Hachum, A., 2006. Water harvesting and supplemental irrigation for improved water productivity

DOI:10.5281/zenodo.17624380

[47] خماج، احمد أبراهيم والمحظي، المنتصر جمعة. 2015. مؤشرات استهلاك المياه لبعض المحاصيل في شمال غرب ليبيا. المجلة الليبية للعلوم الزراعية، مج. 20، ع. 1-2، ص. 84-95.

[48] Hegab, A. S. A., Fayed, M. T. B., Hamada, M. M., & Abdrabbo, M. A. A. (2014). Productivity and irrigation requirements of faba-bean in North Delta of Egypt in relation to planting dates. Annals of Agricultural Sciences, 59(2), 185-193.

[49] Power.J. F. 1991. Growth Characteristics of Legume Cover Crops in A Semiarid Environment. Soil Sci. Soc. Am. J. 55:1659-1663.

[50]. Geerts, S., & Raes, D. (2009). Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. Agricultural water management, 96(9), 1275-1284.

DOI:10.5281/zenodo.17624380