Vol.3, No.6, Page 1358- 1377, 2025 https://doi.org/ 10.59628/jast.v3i5.2129 ISSN 2958-9568 JAST

مجلة جامعة صنعاء للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا
Sana'a University Journal of Applied Sciences and Technology
https://journals.su.edu.ye/index.php/jast/

Assessing the Impact of Climate Change on Water Requirements and Productivity of Improved Arabic wheat crops in the Sana'a Basin

Hassan Mutahhar Amer*, Abdullah Mohammad Yaya and Adel Mohammad Al-Weshali.
Department of Agricultural Engineering and Modern Technologies, College of Agriculture, Food, and Environment, Sana'a University, Yemen.

***Corresponding author**: hmamer2005@gmail.com

ARTICLE INFO
Article history: 3 - August-2025
Received: 22 - October -2025
Accepted: 27 - November - 2025
Published: 28 December 2025

KEYWORDS
1- Climate Changes
2- water requirements
3- Production
4- Wheat Crop
5- Aqua Crop

ABSTRACT

The study aimed to analyze the impact of climate change on water requirements and productivity of improved Arabic wheat in the Sana'a Basin, by conducting field experiments for two agricultural seasons (2023-2024 AD) on the farm of the Faculty of Agriculture, Sana'a University. It included three irrigation treatments: (full irrigation (I_1), 75% deficit irrigation (I_2), and 50% deficit irrigation (I_3) of the full irrigation) using a randomized complete block design. The Aqua Crop model was used for modeling, calibrated with data from the first agricultural season of 2023 and validated with data from the second agricultural season of 2024. The model was validated using three global climate models: CNRM-CM5, GFDL-ESM2M, and EARTH-EC, and two gas emission scenarios: Rcp4.5 and Rcp8.5, for each model, and at an increased and constant CO_2 concentration (350 ppm).

The study revealed that irrigation treatment (I_2) achieved the highest water productivity (WP_{ET}) values during the two seasons, ranging from 0.72 to 0.69 tons/m³, respectively. Its water permeability (WP_I) ranged from 0.74 to 0.72 tons/m³, respectively.

The correlation coefficient (R^2) showed high agreement between the calculated and predicted values for grain productivity and biomass for the two seasons, ranging from 99.93 to 100. and (99, 95%) (%), respectively. The grain productivity values for the two seasons were higher in irrigation treatment (I_1), ranging between (2.27, 2.52) (tons/ha), respectively, compared to irrigation treatments (I_2) and (I_3), which ranged between (2.15, 1.95), (1.0, 1.02) (tons/ha), respectively, at a significance level of (0.05).

Climate changes recorded an increase in maximum temperatures by 2.47°C for the RCP8.5 scenario and the period 2040–2059, according to the EC-Earth model. Meanwhile, rainfall recorded a decrease of 16.18 mm in the RCP8.5 scenario for the same period and the GFDL-ESM2M model, compared to the reference (historical) period (2005 , 1986)

With increased CO_2, irrigation treatment (I_1) achieved the highest grain productivity value. (3.24) (tons/ha) according to the RCP8.5 scenario for the period (2020-2039), while under constant CO_2, the lowest value was recorded for irrigation treatment (I_3) (0.82) (tons/ha) according to the RCP4.5 scenario for the same period.

SUN PUBLISHER
مجلة جامعة صنعاء للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا
Sana'a University Journal of Applied Sciences and Technology
https://journals.su.edu.ye/index.php/jast/

The highest actual evapotranspiration values were recorded for treatment (I_1) at (384.60) (mm) according to the RCP8.5 scenario for the period (2020-2039) under constant CO_2. The lowest values were recorded for treatment (I_3) under increasing CO_2, at (266.0) (mm) according to the RCP8.5 scenario for the period (2039-2020)

The study showed that the experimental site will witness an increase in the productivity of the improved Arabic wheat crop, and assuming an increase in carbon dioxide concentration, this contributes to increased crop productivity.

Vol.3, No.6, Page 1358- 1377, 2025 https://doi.org/ 10.59628/jast.v3i5.2129 ISSN 2958-9568 JAST

مجلة جامعة صنعاء للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا
Sana'a University Journal of Applied Sciences and Technology
https://journals.su.edu.ye/index.php/jast/

SUN PUBLISHER

تقييم أثر التغيرات المناخية على الاحتياجات المائية وإنتاجية محصول القمح العربي المحسن في حوض صنعاء

حسن مطهر عامر*، عبد الله محمد يايه وعادل محمد الوشلي
قسم الهندسة الزراعية والتقنيات الحديثة، كلية الزراعة والأغذية والبيئة، جامعة صنعاء، صنعاء اليمن.

المؤلف: hmamer2005@gmail.com

معلومات المقالة
تاريخ المقالة: 3 - أغسطس -2025
تاريخ التقديم: 22 – أكتوبر -2025
تاريخ القبول: 27 – نوفمبر -2025
تاريخ النشر: 28 ديسمبر 2025

الكلمات المفتاحية
01 التغيرات المناخية
02 الاحتياجات المائية
03 الإنتاجية
04 محصول القمح
05 Aqua Crop

الملخص:

هدفت الدراسة إلى تحليل تأثير التغيرات المناخية على الاحتياجات المائية وإنتاجية القمح العربي المحسن في حوض صنعاء، بتنفيذ تجارب حقلية لموسمين زراعيين (2032–2024م) في مزرعة كلية الزراعة بجامعة صنعاء. تضمنت ثلاث معاملات ري: (ري كامل (I_1)، وري ناقص بنسبة 75% (I_2)، وري ناقص بنسبة 50% (I_3) من الرية الكاملة) وباستخدام تصميم القطاعات العشوائية الكاملة. وتم استخدام نموذج Aqua Crop للنمذجة، مع معايرته ببيانات الموسم الزراعي الأول 2023، والتحقق من صحته ببيانات الموسم الزراعي الثاني 2024، وعند ثلاثة من النماذج المناخية العالمية :(CNRM–CM5، EC – EARTH،GFDL–ESM2M) وسيناريوهين من الانبعاثات الغازية: Rcp4.5 وRcp8.5، لكل نموذج وعند زيادة تركيز (CO_2) ووثباته (ppm350).

كشفت الدراسة أن معاملة الري (I_2) حققت أعلى قيمة لإنتاجية المياه (WP_{ET}) خلال الموسمين تراوحت بين (0.72 – 0.69 طن/م³) على التوالي، في حين تراوحت كفاءة مياه الري (WP_I) بين (0.74 – 0.72 طن/م³) على التوالي.

بينما أظهر معامل الارتباط (R^2) توافقًا عاليًا بين القيم المحسوبة والمتوقعة للإنتاجية الحبية، والكتلة الحيوية للموسمين تراوحت بين (93،99)، و(95،99) (%) على التوالي. وان قيم الإنتاجية الحبية للموسمين كانت اعلى في معاملة الري(I_1) وتراوحت بين (2.52 , 2.27) (طن/هـ) على التوالي. مقارنة بمعاملات الري (I_2)، (I_3) التي تراوحت بين (2.15 ، 1.95)،(1.0 ، 1.02) (طن/هـ) على التوالي عند مستوى معنوية (0.05).

التغيرات المناخية سجلت ارتفاعا في درجات الحرارة الكبرى بمقدار 2.47°م للسيناريو RCP8.5 والفترة 2040–2059 بحسب النموذج EC–Earth. بينما الهطول المطري سجل انخفاضا بمقدار 16.18 مم عند السيناريو RCP8.5 للفترة نفسها وللنموذج GFDL–ESM2M مقارنة بالفترة المرجعية (التاريخية) (2005،1986).

Vol.3, No.6, Page 1358- 1377, 2025 https://doi.org/ 10.59628/jast.v3i5.2129 ISSN 2958-9568 JAST

وعند زيادة CO_2 حققت معاملة الري(I_1) اعلى قيمة للإنتاجية الحبية (3.24) (طن/هـ) وفقا للسيناريو RCP8.5 وللفترة (2020–2039) بينما في حالة ثبات CO_2 سجلت أدنى قيمة عند معاملة الري (I_3) (0.82) (طن/هـ) وفقا للسيناريو RCP4.5 وللفترة نفسها.

كما سجلت اعلى القيم للتبخر–نتح الفعلي للمعاملة (I_1) عند (384.60) (مم) وفقا للسيناريو RCP8.5 والفترة (2020–2039) عند ثبات CO_2، أما أدنى القيم للمعاملة (I_3) عند زيادة CO_2 كانت (266.0) (مم) وفقا للسيناريو RCP8.5 والفترة (2020–2039) .

وأظهرت الدراسة إن موقع التجربة سيشهد زيادة في إنتاجية محصول القمح العربي المحسن، ومع افتراض وجود تزايد لتركيز ثاني أكسيد الكربون فهو يساعد على ارتفاع إنتاجية المحصول.

1. المقدمة:

في ظل الظروف المناخية الجافة وشبه الجافة التي تسود اليمن، حيث تعتمد معظم المناطق على الأمطار المتذبذبة في معدلاتها من منطقة إلى أخرى، تبرز قضية تغير المناخ كأحد التحديات الرئيسية التي تؤثر على الإنتاجية الزراعية. تشير الدراسات العلمية إلى أن اليمن عامة وحوض صنعاء خاصة، سيواجه تغيرات مناخية حادة، تتمثل في انخفاض معدلات هطول الأمطار، وارتفاع درجات الحرارة، وتكرار موجات الجفاف، مما ينعكس سلبًا على الإنتاج الزراعي، سواء في المناطق البعلية أو المروية [1]. ولان القمح في اليمن يحظى بأهمية كبيرة لدوره المحوري في تحقيق الأمن الغذائي، فقد بلغت المساحة المزروعة به عام 2023 حوالي 587,323 هكتارًا، بإنتاجية قدرها 861,409 طنًا، بمتوسط مردود 1.5 طن/هـ. أما في العاصمة صنعاء، فقد وصلت المساحة المزروعة إلى 284 هكتارًا، بإنتاج 409 طنا (بمردود 1.44 طن/هـ) وفق [2]. وفي حوض صنعاء تزداد الضغوط على الموارد المائية والغذائية مما يفرض ضرورة رفع كفاءة الري لتحقيق الأمن الغذائي. ولتحقيق ذلك، لا بد من تطوير النظم الزراعية باستخدام تقنيات متقدمة كنموذج Aqua Crop الذي طورته منظمة الأغذية والزراعة [3] والذي أثبت فاعليته في تحسين إدارة المياه وزيادة الإنتاجية في ظل الإجهاد المائي [4،5] .

لقد استخدم هذا النموذج على نطاق واسع في مناطق مختلفة من العالم لتحديد استجابة المحاصيل للإجهاد المائي ومحاكاتها في المدى الزمني القريب والمتوسط كإثيوبيا [6] ، وإيران [7]، وتركيا [8]، واليونان [9]، ومصر [10]، وسوريا [11] والعراق [12]. وفي اليمن، استخدمه [13] لدراسة تأثير التغيرات المناخية على إنتاجية القمح والذرة الرفيعة في منطقتي صنعاء وذمار، حيث أكدت النتائج دقة النموذج في محاكاة الإنتاجية .

كما أجريت دراسات مماثلة ضمن مشروع المبادرة الإقليمية لتقييم أثر تغير المناخ على الموارد المائية وقابلية تأثر القطاعات الاجتماعية والاقتصادية في المنطقة العربية ريكار (RICCAR)، والتي شارك في أطلاقها جامعة الدول العربية ومنظمات تابعة للأمم المتحدة وبمشاركة تسع دول عربية (اليمن، فلسطين، العراق، لبنان، سوريا، المغرب، تونس، مصر، والسودان) استخدم فيها نموذج Aqua Crop ، وثلاثة من النماذج المناخية العالمية: (EC – EARTH ، GFDL–ESM2M ، CNRM–CM5) ، وسيناريوهين مناخيين (RCP4.5 و RCP8.5) لكل نموذج وعند حالتين من زيادة تركيز ثاني أكسيد الكربون ووثباته عند (ppm350). وأظهرت النتائج تأثر في الإنتاجية بسبب تغير المناخ [14]. بينما وجد [15] في المغرب أن ارتفاع الحرارة يؤدي إلى انخفاض في الإنتاجية بنسبة 30%. كما أشارت دراسة [16] الى انخفاض إنتاج القمح العالمي بنسبة 6% لكل درجة حرارة إضافية، وأما دارسة [17] فكشفت تأثير ثاني أكسيد الكربون على فسيولوجيا النبات. بينما أظهرت دراسة [18] استجابة إنتاجية المحاصيل للإجهاد المائي.

نسعى من خلال هذه الدراسة إلى تقديم رؤية علمية تساعد في وضع سياسات زراعية مستدامة تعزز القدرة على التكيف مع التغيرات المناخية في حوض صنعاء بهدف تقييم تأثير التغيرات المناخية على الاحتياجات المائية وإنتاجية القمح في الحوض باستخدام نموذج Aqua Crop، مع التركيز على التفاعل بين العوامل المناخية (مثل ارتفاع ثاني أكسيد الكربون، ودرجات الحرارة، وتغير هطول الأمطار) ومدى تأثيرها على الإنتاجية المائية والإنتاجية الحبية.

2. المواد وطرق البحث:

2.1 موقع الدراسة:

أجريت التجارب الحقلية خلال موسمين متتاليين (2023–2024م) في المزرعة التعليمية لكلية الزراعة والأغذية والبيئة بجامعة صنعاء ضمن نطاق حوض صنعاء والممثلة للسلسلة الجبلية للمرتفعات الشمالية والتي تقع بين خطي الطول والعرض (

15.37N، 44.18E) وعلى ارتفاع 2264 مترا عن سطح البحر. نظراً لوجود محطة مناخية تابعة لمحطة للهيئة العامة للأرصاد والطيران المدني بالقرب منها تمكننا من إجراء كافة القياسات الحقلية المطلوبة للبحث وبيانات الإدارة اللازمة لتشغيل برنامج Aqua Crop (الاصدار 7.1).

2.2 إعداد وتصميم التجربة:

تم تقسيم المساحة المخصصة للتجربة والمحضرة تحضيراً جيداً للزراعة إلى (9) قطع تجريبية مساحة القطعة الواحدة (12م^2) بأبعاد (4*3 م) موزعة على ثلاث مكررات وكل مكرر يضم (3) قطع عبارة عن أحواض وباستخدام نظام الري السطحي وتم ترك مسافة (2) بين المكررات طولا وعرضا. وتم زراعة محصول القمح للموسم الأول في (2023/7/10) وحصد في 2023/10/9م. والموسم الثاني في (2024/7/10) وحصد في 2024/10/11م. ونفذت التجربة وفق تصميم القطاعات العشوائية الكاملة، تكون فيها معاملات الري (معاملة الري الكامل(I_1) (100%) من (ET_C)الاحتياج الكامل، معاملة الري الناقص (I_2) (75%) من قيمة الرية الكاملة، ومعاملة الري الناقص(I_3) (50%) من قيمة الرية الكاملة) العامل الرئيس للتصميم ومحصول القمح العربي المحسن (Triticum turgidum) العامل الثانوي الذي يمثل الأصناف الرباعية الصلبة موزع على الأحواض. كما تم إضافة كامل الأسمدة الآزوتية (يوريا 46%) على دفعتين الأولى عند الزراعة مباشرة والثانية بعد شهر ونصف من الإضافة الأولى بحسب التوصية السمادية المعمول بها في [19].

2.3 معايرة النموذج Aqua Crop بنتائج الموسم الزراعي الأول (2023):

تم معايرة النموذج باستخدام المؤشرات والبيانات الحقلية المأخوذة من الموسم الزراعي 2023م، ومن المعاملة التي طبقت فيها الظروف المثلى للزراعة من ري كامل وتسميد آزوتي مثالي أي ضمن ظروف زراعة خالية من أي إجهاد خصوبي أو رطوبي وهو النمو الأمثل الممكن للقمح. وتم معايرة بعض المتغيرات مثل بيانات الإدارة (كمية مياه الري المضافة، التسميد، مكافحة الأعشاب) وكذلك المحتوى الرطوبي الابتدائي وتاريخ الزراعة والمؤشرات الموضحة بالجدول (1) وتم تكرار عملية المعايرة عدة مرات بحسب ما أشار إليه [20].

2.3.1 الاعتبارات المأخوذة عند إعداد ملفات البيانات في النموذج Aqua Crop:

تم تحويل سرعة الرياح من ارتفاع 10م إلى 2م كون البيانات المناخية لصنعاء مأخوذة من محطة المطار. تم إعداد ملف مناخي لمنطقة الدراسة (حوض صنعاء) وهي بيانات يومية لفترة موسمين (2023–2024م)

2.3.2 تقييم النموذج والتحقق من صحته:

وكذلك تم إنشاء المشاريع الخاصة بالنموذج وإعداد الملفات الأخرى الخاصة بكل مشروع ابتداء بملف المحصول إذ تم اختيار ملف المحصول للقمح المخزن في قاعدة بيانات البرنامج وتم التعديل عليه بنظام التقويم اليومي (CD) وفقا لبيانات المحصول المذكورة آنفا ثم تحويله إلى تقويم الحرارة التراكمية (GDD)، وتم إنشاء ملفات الري وتحديد موعد الري وكمية مياه الري المضافة في كل رية، وقد جرى معايرتها ثم تم إنشاء ملف الحقل المتضمن مستوى التسميد ومكافحة الحشائش بقيم افتراضية معتدل Moderate للمعايرة وتم وضع الخيار "منع الجريان السطحي" باعتبار أن الزراعة لا بد أن تكون في أحواض مغلقة، ثم إنشاء ملف التربة بحسب البيانات المذكورة، ثم بعد ذلك تم إعداد ملف الرطوبة الابتدائية ومعايرتها وتم إنشاء ملف المشروع لكل حالة وتشغيله للحصول على قيم المتغيرات بعد عملية المعايرة.

جدول (1) يبين المعايير المستخدمة لمعايرة القمح العربي المحسن في برنامج Aqua Crop

المؤشر	القيمة
مؤشرات درجة الحرارة	
صفر النمو البيولوجي(م°)	0
درجة الحرارة العظمى المحددة للنمو(م°)	26
مؤشرات النمو	
الغطاء النباتي الأولي(cco). التغطية النباتية (%)	3.38
التغطية النباتية العظمى(ccx)الغطاء الأعظمي (%)	95
توقف التغطية النباتية (CGC) امتداد التغطية (%)	13.3
مؤشرات الاستجابة للإجهاد المائي	
عامل استنزاف ماء التربة المحدد لنمو الأوراق، الحد الأعلى	0.1
عامل استنزاف ماء التربة المحدد لنمو الأوراق، الحد الأدنى	0.45
معامل الإجهاد المائي المحدد لنمو الأوراق، عامل الشكل	6.0
عامل استنزاف ماء التربة للتحكم المسامي	0.80
معامل الإجهاد المائي للتحكم المسامي، عامل الشكل	2.5
عامل استنزاف ماء التربة المترافق بتوقف النمو الخضري	0.70
معامل استنزاف ماء التربة المترافق بتوقف النمو الخضري، عامل الشكل	2.5
مؤشرات الإنتاج	
ظهور البادرات من تاريخ الزراعة (يوم)	6
مدة الوصول الى اقصى تغطية نباتية (ccx)من تاريخ الزراعة(يوم)	50
مدة الوصول الى اقصى عمق تجذير (يوم)	55
اقصى عمق تجذير (Zx) متر	0.60
بدء مرحلة الشيخوخة من تاريخ الزراعة (يوم)	70
الوصول الى مرحلة النضج من تاريخ الزراعة (يوم)	92
المدة للوصول الى غاية الإزهار(يوم)	50
الوصول الى مؤشر الحصاد (HIO)(يوم)	41
مدة الإزهار (يوم)	12
الإنتاجية المائية للمحصول (m2/g)	15
مؤشر الحصاد المرجعي (%)	38
تاريخ الزراعة في الموسم الأول 2023	2023\7\10
تاريخ الحصاد في الموسم الأول 2023	2023\10\9

بعد الانتهاء من عملية معايرة النموذج، تم البدء بتقييم النموذج والتحقق من صحته، حيث استخدمت البيانات المأخوذة من التجربة المنفذة خلال الموسم الزراعي 2024م، وذلك لتقييم أداء نموذج (Aqua Crop) في التنبؤ بإنتاجية القمح في موقع التجربة ودون إجراء أية تعديلات على النموذج المعاير مسبقا.

2.4 القياسات والحسابات التجريبية:

2.4.1 قياسات رطوبة التربة:

لتقدير رطوبة التربة الوزنية أخذ عينات رطوبة للتربة في فترات زمنية محددة المحتوى المائي النهائي والمحتوى المائي الابتدائي في التربة خلال الفترة الحسابية (عند الزمن الأول بعد الري وعند الزمن الثاني قبل الرية التالية):

2.4.2 التحاليل الفيزيائية والكيميائية والتحليل الميكانيكي للتربة:

أجريت التحليلات الفيزيائية والكيميائية والتحليل الميكانيكي لتربة التجربة وسجلت البيانات لنتائج التحاليل كما في الجداول (2)، (3) و(4).

أما نتائج تحليل عينة المياه المضافة فكانت قيمة التوصيلية الكهربائية(EC=0.4) ملليموز/ سم ودليل PH=8.وهي مياه جيدة للري.

جدول (2): التحليل الميكانيكي للتربة.

العمق(سم)	التركيب الميكانيكي			تصنيف القوام
	رمل (%)	سلت (%)	طين (%)	
30 – 0	50	24	26	رملية لومية طينية
60 – 30	33	30	37	لومية طينية

جدول (3): التحليل الفيزيائي للتربة.

العمق(سم)	الكثافة		المسامية	السعة الحقلية	نقطة الذبول الدائم	درجة التشبع	الماء المتاح الكلي	التوصيل الهيدروليكي
	الظاهرية	الحقيقية		وزنا	وزنا	وزنا		
الرمز	ρb	ρS	n	FC	pwp	Sat	TAW	Ksat
الوحدة	جم/سم^3	جم/سم^3	%	%	%	%	مم/م	مم/ساعة
30 – 0	1.46	2.608	44.02	20.08	10.98	30.27	132.86	8.72
60 – 30	1.38	2.579	46.50	25.81	13.10	33.82	175.49	3.31

جدول (4): التحليل الكيميائي للتربة.

العمق	PH	EC	CaCo3	O.M	N	C	C/N	K	P
	دليل	التوصيلية الكهربائية	كربونات الكالسيوم	المادة العضوية	النتروجين	الكربون		البوتاسيوم	الفسفور
(سم)	1:1	ملليموز/سم	%	%	%	%	–	ppm	ppm
30 – 0	8.22	0.63	8.79	0.92	0.08	0.53	0.53	236.57	14.71
60 – 30	8.35	0.36	7.10	1.01	0.13	0.59	0.59	196.27	13.62

2.4.3 حسابات جدولة الري:

حسب الاستهلاك المائي الموسمي وجدولة الري المقترحة خلال الموسم الأول والثاني ولكل طور من الأطوار المميزة لمحصول القمح باستعمال النهج المتبع لمعادلة الموازنة المائية وفق [21] حيث تم حساب الاستهلاك المائي الصافي من معادلة الموازنة المائية الآتية:

$$ETC = I + P \pm DSW - DP - RO \dots\dots\dots (1)$$

I= كمية الماء المضافة (مم) ، و P كمية الأمطار الفعالة خلال موسم النمو (مم). ، وDSW الفرق بين المحتوى المائي النهائي والمحتوى المائي الابتدائي في التربة خلال الفترة الحسابية (عند الزمن الأول بعد الري وعند الزمن الثاني قبل الرية التالية) (مم) ، وDp الرشح العميق (مم) وRo الجريان السطحي (مم).

ونظراً لصغر مساحة القطعة التجريبية وإمكانية التحكم بها اعتبر الجريان السطحي معدوماً، وتم إهمال قيمة الرشح العميق، وعليه تصبح المعادلة (1) كالتالي:

$$ETC = \Delta DSW \dots\dots\dots (2)$$

تم حساب إنتاجية المياه من المعادلتين (3) و(4) وفق منهجية [18] على النحو التالي:

$$WP_{ET} = \frac{Y}{ET} \dots\dots\dots (4)$$

$$WP_I = \frac{Y}{I} \dots\dots\dots (4)$$

WP_{ET} هي إنتاجية المتر المكعب من المياه (الري والأمطار) أو كفاءة استخدام المياه (طن/ م^3) ، و WP_I إنتاجية المتر المكعب من مياه الري(طن/ م^3) ، وY يمثل الإنتاج الحبي الفعلي للمحصول (طن/ هـ^1)، و ETc الاستهلاك المائي الصافي للمحصول (م^3/ هـ^1) وI مجموع حجوم الريّات (م^3/ هـ^1).

تم حساب معامل استجابة المحصول للإجهاد المائي بحسب معادلة ستيوارت رقم (5) وفق [18] والتي تشير إلى الانخفاض النسبي في الإنتاج نتيجة الانخفاض النسبي في الاستهلاك المائي.

$$Ky = \frac{(1 - \frac{Ya}{Ymax})}{(1 - \frac{ETa}{ETmax})} \dots\dots\dots\dots\dots (5)$$

Ya= تشير إلى الإنتاج الفعلي لمحصول القمح في حالة الري الناقص (طن/ هـ^{1}). ، و Ym تشير إلى الإنتاج الأعظمي للري الكامل في حال عدم وجود إجهادات مائية (طن/ هـ^{1}) ، و Eta تمثل الاستهلاك المائي لمعاملة الري الناقص (م^{3}/ هـ^{1}). و ETmax تمثل الاستهلاك المائي للري الكامل (م^{3}/ هـ^{1}).

جدولة الري خلال الموسم الأول والثاني لمحصول القمح العربي المحسن باستعمال النهج المتبع للموازنة المائية من قبل [21] ووفق برنامج (Cropwat8.0). وبفاصل زمني بين الرية والأخرى (10) أيام كما موضح بالجدول (5).

جدول (5) يبين متوسط معدل مياه الري المضافة خلال كل رية ولمختلف معاملات الري

رقم الريات	الشهر	تاريخ الري	معدل الري بـــ(مم) معاملات الري		
			I_1	I_2	I_3
1	يوليو	2023/7/10	17	13	9
2	يوليو	2023/7/20	17	13	9
3	يوليو	2023/7/30	28	21	14
4	أغسطس	2023/8/9	36	29	18
5	أغسطس	2023/8/19	46	37	23
6	أغسطس	2023/8/29	64	47	32
7	سبتمبر	2023/9/8	67	50	33
8	سبتمبر	2023/9/18	69	51	34
9	سبتمبر	2023/9/28	38	29	19
الإجمالي خلال الموسم الواحد			382	292	191

2.5 معالجات البيانات المناخية:

تم الحصول على بيانات المناخ اليومية للموسمين الزراعيين (2023-2024). مثل درجة الحرارة الكبرى (T_{max}) والصغرى (T_{min}) بالدرجة المئوية، والرطوبة النسبية (%)، وسرعة الرياح (م/ث)، والإشعاع الشمسي (ميجا جول /م^{2}. يوم) والأمطار (مم/يوم) وساعات السطوع الشمسي (ساعة /يوم) من الهيئة العامة للأرصاد والطيران المدني بمطار صنعاء وهي البيانات المناخية المطلوبة في عملية النمذجة للنموذج Aqua Crop.

أما الملفات للبيانات المناخية اليومية المتوقعة فمن الموقع الإلكتروني للمبادرة الإقليمية لتقييم أثر تغير المناخ على الموارد المائية وقابلية تأثر القطاعات الاجتماعية والاقتصادية في المنطقة العربية ريكار (RICCAR)، للثلاثة نماذج المناخية العالمية (CNRM-CM5، EC-EARTH،GFDL-ESM2M) وسيناريوهين لكل نموذج (RCP8.5, RCP4.5)، وعند زيادة تركيز (CO2) وثباته عند 350 ppm والمرتبطة بدرجة الحرارة الكبرى والصغرى بالدرجة المئوية والهطول المطري(pr) مم/يوم. للفترة المرجعية (1986-2005) وفترتي المستقبل القريب (2020- 2039)، والمستقبل المتوسط (2040-2059)، ولفترة عشرون عاما والملفات المتحصل عليها عبارة عن ملفات NetCDF ،تم أنشأ شرائح (بيانات نقطية raster) باستخدام برنامج نظام المعلومات الجغرافية (GIS) وأدخلت الإحداثيات الخاصة بمنطقة الدراسة بعد تحويلها من النظام الجغرافي الى الرقمي الديكارتي (Nlat،Nlon) بدقة مكانية (MNA-5044*50 كم) ومن ثم تحويل الرسترات الى ملفات اكسل (EXCEL) وإدخال ملفات الأكسل الى برنامج الأكسل لتصفيتها وفرزها وتجهيزها كملفات نصية لنقلها الى نموذج Aqua Crop ومن ثم مقارنة البيانات المقاسة للإنتاجية والتبخر- نتح الفعلي من واقع التجارب المنفذة خلال الموسمين الزراعيين الأول 2023والثاني2024 مع البيانات المتوقعة للإنتاجية

والتبخر– نتح الفعلي للفترات المرجعية ، والمستقبل القريب والمتوسط.

2.6 التحليل الإحصائي:

تم استخدم البرنامج الإحصائي Statisix8.1 لتحليل بيانات الإنتاجية الحبية والكتلة الحيوية المتحصل عليها لمحصول القمح من موسمي الزراعة.وتم استخدام بعض المؤشرات الإحصائية لتحديد الدقة وسلامة المعايرة عند تحديد القيم الفعلية والمقدرة بالبرنامج لتقييم أداء نموذج Aqua Crop في التنبؤ بإنتاجية القمح العربي المحسن في موسمي النمو ضمن محطة الأرصاد بالمطار، تم حساب مدى ملائمة القيم المقاسة حقليا والقيم المتوقعة المحاكاة عن طريق حساب مقاييس الاختلاف التي تحدد نوعية ومصدر الخطأ لتلك القيم معامل التحديد (R^2)، متوسط خطأ التحيز (MBE)، متوسط الخطأ المطلق (MAE) الجذر التربيعي لمتوسط الخطأ (RMSE)، ودليل التوافق (d).

– معامل التحديد (R2) Coefficient of Determination: هو مقياس يستخدم في التحليل الإحصائي يقيم مدى جودة نموذج ما في شرح النتائج المستقبلية والتنبؤ بها. وهو يدل على مستوى التباين في مجموعة البيانات يستخدم لشرح مقدار التباين في عامل واحد الذي يمكن أن ينتج عن علاقته بعامل آخر كما أشار [22]، تأخذ R^2 قيما بين 0 و1 كلما كانت القيمة أقرب إلى الواحد كانت العلاقة بين العاملين أفضل حيث تشير القيمة (1) إلى التطابق التام، و (0) تشير إلى عدم وجود توافق على الإطلاق

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} (Oi - Si)^2}{\sum_{i=1}^{n} (Oi - Oavg)^2} \dots\dots\dots (6)$$

Oi= القيم الحقلية. ، و Si القيم المحاكاة. ، و n عدد القيم المستخدمة في المقارنة . و Oavg متوسط القيم المرصودة .

– متوسط خطأ التحيز Error Bias Mean: (MBE) وهو مقياس معدل الخطأ في التقدير بمعنى عدم المبالغة أو التقليل من القيم المتنبئ بها عن طريق نموذج المحاكاة وذلك بحساب خطأ التحيز الكلي بين قيم المعاملات الحقلية وقيم معاملات المحاكاة كما أشار [23] ويتم حسابه وفق المعادلة:

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^{n} (Si - Oi)}{n} \dots\dots\dots (7)$$

– متوسط الخطأ المطلق Error Absolute Mean: (MAE)

وهو يقيس متوسط حجم الأخطاء في البيانات المعايرة والتحقق من صحتها عن طريق قياس التباين المطلق بين مجموعة البيانات الحقيقية والبيانات المتنبئ بها، وذلك لتجاوز أخطاء التنبؤ بالمحاكاة الناتجة عن إزالة القيم الموجبة للقيم السالبة للفروقات بين القراءات الحقلية وقراءات نموذج المحاكاة (دون الأخذ بالحسبان فيما إذا كان هناك مبالغة أو تحفظ في عملية التقدير) بحسب [24]

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{n} |(Oi - Si)|}{n} \dots\dots\dots (8)$$

– الجذر التربيعي لمتوسط الخطأ RMSE) Error Square Mean Root):

وهو مقياس يستخدم بشكل متكرر للفرق بين القيم التي تنبأ بها النموذج وتلك التي ستلاحظ فعليا من التجربة يمكن استخدام قيم RMSE لتمييز أداء النموذج في فترة المعايرة مع فترة التحقق كما أشار [24] من المعادلة التالية.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (Si - Oi)^2}{n}} \dots\dots\dots (9)$$

إن قدرة النموذج على التنبؤ تكون بالشكل الأمثل عندما يكون الخطأ الذي تم حسابه من خلال المقاييس السابقة مساوياً للصفر أو قريبا من ذلك، وكلما زاد الخطأ قلت فاعلية أسلوب التنبؤ وأهمية استقراء النتائج من خلال النموذج.

– دليل التوافق حسب مؤشر ويلموت Willmott Index of (d) Agreement:

وهو مقياس موحد لدرجة خطأ تنبؤ النموذج بحسب [25] ويتراوح بين 0 و1 حيث تشير القيمة (1) إلى تطابق تام، والقيمة (0) تشير إلى عدم وجود اتفاق على الإطلاق.

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} (Oi - Si)^2}{\sum_{i=1}^{n} [(|Si - Oi| + |Oi - Oavg|)^2]} \dots\dots (10)$$

3. النتائج والمناقشة:

3.1 الإنتاجية الحبية وكفاءة إنتاجيه المياه:

3.1.1 الإنتاجية الحبية والكتلة الحيوية:

خلال الموسم الزراعي الأول 2023 والثاني 2024م تشير النتائج في الجدولين (6)، (7) بأن معاملة الري الكامل (I_1) حققت أعلى معدل للاستهلاك المائي خلال الموسمين بمتوسط معنوية تراوح بين (401.44 ، 372.03 مم) على التوالي. مع تقديم (9) ريات صافية في كل موسم بمعدل إجمالي (382 مم) للموسم الواحد. وتراوح متوسط الإنتاجية الحبية لمحصول القمح وللكتلة الحيوية لهذه المعاملة خلال الموسمين بين (2.52،2.27 طن/هـ) ، و (6.50 ، 5.94 طن/هـ) على التوالي.

بينما أظهرت معاملة الري الناقص (I_2) انخفاضًا في الاستهلاك المائي تراوح بين (300.3، 276.83مم) على التوالي. ومع تقديم (9) ريات بمعدل إجمالي (290 مم) للموسم الواحد، مما أدى إلى انخفاض معنوي في الإنتاجية الحبية وللكتلة الحيوية خلال الموسمين تراوح بين (2.15 ، 1.90 طن/هـ) ، و (5.7 ، 5.11 طن/هـ) على التوالي.

أما معاملة الري الناقص (I_3) فسجلت أقل قيمة للاستهلاك المائي (202.14، 188.53مم) على التوالي. أيضا مع تقديم (9) ريات بمعدل إجمالي (191مم) للموسم. مصحوبة بانخفاض معنوي واضح في متوسط الإنتاجية الحبية والكتلة الحيوية تراوح بين (1.00 ، 1.02 طن/هـ) ، و (2.70 ، 2.97 طن/هـ) على التوالي . يلاحظ انخفاض الحاصل في الإنتاجية الحبية والكتلة الحيوية في معاملات الري الناقص (I_2)، (I_3) مقارنة بمعاملة الري الكامل (I_1) في الموسمين الأول والثاني ويعزى ذلك الى أن أي انخفاض في كمية الماء المضاف للمحصول يقابله انخفاض في حاصل الإنتاجية الحبية والكتلة الحيوية (الحبوب والقش). بسبب قلة عدد الحبوب في السنابل والقش في النبات. وتعرضها للإجهاد المائي. وهذا يتوافق مع نتائج دراسة الدريعي وآخرون [11] كما يلاحظ انخفاض في الإنتاجية الحبية والكتلة الحيوية في الموسم الثاني 2024م، مقارنة بالموسم الزراعي الأول 2023م. في معاملتي الري الكامل (I_1) والناقص (I_2) نظرا لاختلاف البيانات المناخية بين الموسمين (انخفاض التبخر–نتح المرجعي والتبخر–نتح الفعلي وزيادة فترة النمو للمحصول في الموسم الثاني وزيادة الهطول المطري وزيادة الرطوبة النسبية وارتفاع درجة الحرارة مقارنة بالموسم الأول) والزراعة في الموسم الأول والموسم الثاني بنفس القطعة من الأرض وهو ما أدى الى فقدان التربة لعناصرها الغذائية في هذا الموسم 2024م عن الموسم السابق 2023م. هذه تتفق مع ما أشارت إليه دراسات Hassan et al [12] ، والسعدي [5] ، وحلاوه [4] ، و Tirfi& Oyekale [6] ، و Aghajanloo & Nikbakht [7] ، و Bouras et al [15] و Asseng et al [16].

بينما معاملة الري الناقص (I_3) أظهرت زيادة في الموسم الثاني عما كانت عليه في الموسم الأول ويرجع ذلك لثبات كميات المياه المضافة وزيادة الهطول المطري وانخفاض الإجهاد المائي في الموسم الثاني مقارنة بالموسم الأول ما أدى الى زيادة إنتاجية هذه المعاملة في هذا الموسم وهذه النتائج تتفق مع توصل إليه [18,4]

3.1.2 كفاءة إنتاجية المياه:

بالنسبة لكفاءة إنتاجية المياه خلال الموسم الزراعي الأول 2023 م والثاني 2024 تظهر النتائج في الجدولين (6) (7)، بأن معاملة الري الناقص (I_2) خلال الموسمين حققت أعلى قيمة لإنتاجية للمياه (WP_{ET}) تراوحت بين (0.72 ، 0.70 طن/م^3) على التوالي. في حين أن كفاءة الري (WP_I) تراوحت بين (0.74، 0.67 طن/م^3) على التوالي.

وأظهرت هذه المعاملة أفضل استجابة للري الناقص وتراوح معامل استجابة القمح العربي للإجهاد المائي (Ky) بين (0.58 ، 0.55) للموسمين على التوالي. وهو يشير إلى أن الانخفاض النسبي في الإنتاج كان أقل من الانخفاض في كميات الري، مما يدل على كفاءة هذه الاستراتيجية في تحسين إنتاجية المياه، وفي المقابل ، سجلت معاملة الري الناقص (I_3) أدنى قيمة لإنتاجية مياه الري (WP_I) خلال الموسمين تراوحت بين (0.52، 0.53 طن/م^3) على التوالي. يلاحظ انخفاض كفاءة إنتاجية المياه (WP_{ET}) وكفاءة مياه الري (WP_I) في معاملات الري الناقص (I_2)، (I_3) مقارنة بزيادتها في معاملة الري الكامل (I_1) في الموسمين. كما يلاحظ انخفاض في كفاءة إنتاجية المياه (WP_{ET}) وكفاءة مياه الري (WP_I) في الموسم الثاني 2024م، مقارنة بالموسم الزراعي الأول 2023م. في معاملتي الري الكامل (I_1) والناقص (I_2) ويرجع ذلك لتأثير التقلبات في المناخ بين الموسمين ما أدى الى انخفاض في الإنتاجية الحبية وبالتالي نقصان في كفاءة إنتاجية المياه (WP_{ET}) وكفاءة مياه الري (WP_I) بينما معاملة الري (I_3) أظهرت زيادة في كفاءة إنتاجية المياه (WP_{ET}) وكفاءة مياه الري (WP_I) في الموسم الثاني عما كانت عليه في الموسم الأول نتيجة ثبات معدل الري المضاف في الموسمين وانخفاض الإجهاد المائي وزيادة الهطول المطري في الموسم الثاني وهذه النتائج تتفق مع دراسة [4] و [18].

جدول (6) يبين نتائج مقاييس الاختلاف للقيم المتوقعة مع القيم المقاسة لصفتي الإنتاجية الحبية (طن/هـ) والكتلة الحيوية (طن/هـ) ومتوسط إنتاجية المياه (WP_{ET}) وإنتاجيه مياه الري (WP_I) لمحصول القمح العربي المحسن لموسم 2023م.

معاملات الري	الاستهلاك المائي والريات		الإنتاجية الحبية المقاسة (y)	الإنتاجية الحبية المحاكاة (y)	الكتلة الحيوية المقاسة (B)	الكتلة الحيوية المحاكاة (B)	إنتاجية المياه (WP_{ET})	إنتاجية مياه الري (wp_r)	معامل استجابة المحصول للإجهاد المائي (Ky)
	الاستهلاك المائي	مجموع الريات	(طن/هـ)	(طن/هـ)	(طن/هـ)	(طن/هـ)	(طن/م3)	(طن/م3)	
	(مم)								
I_1	401.44	382	2.52 a	2.50	6.5 a	6.59	0.63	0.66	
I_2	300.3	290	2.15 b	2.22	5.7 b	5.85	0.72	0.74	0.58
I_3	202.14	191	1.00 c	1.09	2.7 c	2.86	0.50	0.52	1.64
متوسط قيمة اقل المربعات عند 0.05			0.009		0.007		L.S. D 0.05		
معامل الاختلاف			0.88		0.24		C.V		
معامل التحديد			0.99		0.99		R^2		
خطا متوسط التحيز			-0.02		−0.04		MBE		
متوسط الخطأ في القيمة المطلقة			0.02		0.04		MAE		
الجذر التربيعي لمتوسط الخطأ			0.04		0.08		RMSE		
دليل التوافق			0.99		0.99		d		

- **الأحرف المختلفة تشير لوجود فرق معنوي عند مستوى معنوية 0.05 بين المعاملات لصفتي الإنتاجية الحبية والكتلة الحيوية.**

جدول (7) يبين نتائج مقاييس الاختلاف للقيم المتوقعة مع القيم المقاسة لصفتي الإنتاجية الحبية (طن/هـ) والكتلة الحيوية (طن/هـ) ومتوسط إنتاجية المياه(WP_{ET}) وإنتاجيه مياه الري (WP_I) لمحصول القمح العربي المحسن لموسم 2024م.

معاملات الري	الاستهلاك المائى والريات		الإنتاجية الحبية المقاسة (y)	الإنتاجية الحبية المحاكاة (y)	الكتلة الحيوية المقاسة (B)	الكتلة الحيوية المحاكاة (B)	إنتاجية المياه (WP_{ET})	إنتاجية مياه الري (wp_r)	معامل استجابة المحصول للإجهاد المائي (Ky)
	الاستهلاك المائي	مجموع الريات	(طن/هـ)	(طن/هـ)	(طن/هـ)	(طن/هـ)	(طن/م3)	(طن/م3)	
	(مم)								
I_1	372.03	382	2.27 a	2.275	5.94 a	5.987	0.61	0.59	
I_2	276.83	290	1.95 b	2.003	5.11 b	5.287	0.70	0.67	0.55
I_3	188.53	191	1.02 c	1.248	2.97 c	3.406	0.54	0.53	1.11
متوسط قيمة اقل المربعات عند 0.05			0.005		0.004			L.S. D $_{0.05}$	
معامل الاختلاف			0.51		0.14			C.V	
معامل التحديد			0.93		0.95			R^2	
خطا متوسط التحيز			-0.03		-0.07			MBE	
متوسط الخطأ في القيمة المطلقة			0.03		0.07			MAE	
الجذر التربيعي لمتوسط الخطأ			0.08		0.16			RMSE	
دليل التوافق			0.96		0.97			d	

- الأحرف المختلفة تشير لوجود فرق معنوي عند مستوى معنوية 0.05 بين المعاملات لصفتي الإنتاجية الحبية والكتلة الحيوية.

3.2 دقة النموذج Aqua Crop في المحاكاة:

3.2.1 المحاكاة ببيانات الموسم الزراعي 2023م:

للتأكد من دقة نموذج Aqua Crop عند مقارنة القيم المحاكاة (المتوقعة) مع القيم الحقلية(المقاسة) لصفتي الإنتاجية الحبية والكتلة الحيوية بالبيانات المتحصل عليها من الموسم الزراعي الأول 2023م والظاهرة في الجدول (6) فقد أظهر النموذج بعد المعايرة بهذه البيانات دقة عالية في محاكاة الإنتاجية الحبية والكتلة الحيوية، حيث تراوحت قيم معامل التحديد (R^2) بين (99.99%) لكلا المتغيرين. وكانت قيم أخطاء التحيز (MBE) وأخطاء القيمة المطلقة (MAE) لهما منخفضة، تتراوح بين (−0.02 إلى −0.04) و(0.02 −إلى 0.04) على التوالي. وبلغت نسبة الجذر التربيعي لمتوسط الخطأ RMSE للإنتاجية الحبية (4%) وللكتلة الحيوية (8%)، مع توافق عالٍ بين القيم المقاسة والمتوقعة حسب مؤشر ويلموت (d) الذي سجل (99%) لكلا المؤشرين، هذه النتائج تتوافق مع نتائج دراسة [4، 5, 10].

3.2.2 المحاكاة ببيانات الموسم الزراعي 2024م:

عند التحقق من صحة نموذج Aqua Crop في المحاكاة بين القيم المتوقعة مع القيم المقاسة لصفتي الإنتاجية الحبية والكتلة الحيوية باستخدام بيانات الموسم الزراعي الثاني 2024 م والموضحة في الجدول (7) تشير القيم إلى أن النموذج أظهر دقة عالية في محاكاة الإنتاجية الحبية والكتلة الحيوية، حيث تراوحت قيم معامل التحديد (R^2) بين (95.93%) لكلا المتغيرين. وكانت قيم أخطاء التحيز (MBE) وأخطاء القيمة المطلقة (MAE) منخفضة، تتراوح بين (−0.03 إلى −0.07) و(0.03 إلى 0.07) على التوالي. وبلغت نسبة الجذر التربيعي لمتوسط الخطأ RMSE للإنتاجية الحبية (8%) وللكتلة الحيوية (16%)، مع توافق عالٍ بين القيم المقاسة والمتوقعة حسب مؤشر ويلموت (d) الذي سجل لكلا المؤشرين (97.96%) على التوالي. يلاحظ انخفاض قيم معامل التحديد للإنتاجية والكتلة الحيوية إضافة الى ارتفاع قيم أخطاء التحيز (MBE) وأخطاء القيمة المطلقة (MAE) والجذر التربيعي لمتوسط

الخطأ RMSE في الموسم 2024م، عما كانت عليه في الموسم الزراعي الأول 2023م.

ويعزى ذلك لانخفاض قيم الإنتاجية الحبية والكتلة الحيوية في العام 2024م، وارتفاعها في العام 2023م. وهذا يتفق مع النتائج التي توصلا إليها [10,4].

3.3 سيناريوهات ونماذج التغيرات المناخية:

تشير نتائج التوقعات الظاهرة في الجدولين (8)، (9) إلى أن منطقة الدراسة ستشهد ارتفاعا في درجات الحرارة الكبرى لجميع النماذج والسيناريوهات، حيث تصل الزيادة إلى 1.82°م وفقًا لسيناريو RCP4.5، و 2.47°م طبقا للسيناريو RCP8.5 خلال الفترة (2040–2059) حسب النموذج EC–Earth. كما من المتوقع أن ترتفع درجات الحرارة الصغرى أيضًا، لتصل إلى 0.85°م للسيناريو RCP4.5 و1.34°م للسيناريو RCP8.5 في نفس الفترة وفقًا للنموذج نفسه. بينما يُتوقع أن تبلغ الزيادة 0.91°م للسيناريو RCP8.5 خلال الفترة (2040–2059) حسب النموذج GFDL–ESM2M.

أما فيما يخص الهطولات المطرية، فمن المرجح أن تشهد منطقة الدراسة انخفاضًا على المدى المتوسط (2040–2059) لجميع النماذج والسيناريوهات، حيث يُتوقع أن تنخفض كمية الأمطار لتصل إلى 16.18مم في النموذج GFDL–ESM2M وفقا للسيناريو RCP8.5، وإلى 15.56مم خلال المدى القريب (2020 –2039) طبقا للسيناريو RCP4.5 حسب النموذج نفسه. كما يُتوقع انخفاض متوسط الهطول السنوي إلى 12.97 مم في النموذج CNRM–CM5 خلال الفترة (2040–2059) للسيناريو RCP4.5. على الجانب الآخر من المتوقع ارتفاع كمية الهطولات المطرية على المدى القريب (2020 – 2039) في النموذج CNRM–CM5، حيث تتراوح الزيادة بين 16.91مم و 19.79 مم للسيناريوهين RCP4.5 وRCP8.5 على التوالي. كما يُتوقع زيادة في الهطول المطري بمقدار 1.12 خلال الفترة نفسها في النموذج EC–Earth للسيناريو RCP8.5. وهذا يتفق مع ما توصل إليه [13].

جدول (8) التغيرات المتوقعة للهطول المطري والحرارة الصغرى والحرارة الكبرى للفترتين (2020–2039) و(2040–2059) مقارنة بالفترة التاريخية (1986–2005) في منطقة الدراسة حوض صنعاء وفقا للسيناريو RCP 4.5 وللنماذج GFDL–ESM2M، CNRM–CM5، EC–Earth

العوامل المتغيرة	النموذج	المعدل الوسطي للسنوات التاريخية	التغيرات المتوقعة	
			المستقبل القريب	المستقبل المتوسط
		2005–1986	2039–2020	2059–2040
الأمطار (مم)	CNRM–CM5	148.38	+16.91	– 12.97
درجة الحرارة الكبرى(مº)		23.95	+ 0.97	+ 1.67
درجة الحرارة الصغرى(مº)		12.68	+ 0.53	+ 0.76
الأمطار (مم)	GFDL–ESM2M	135.10	– 15.56	– 5.95
درجة الحرارة الكبرى(مº)		24.02	+ 1.17	+ 1.65
درجة الحرارة الصغرى(مº)		12.68	+ 0.63	+ 0.91
الأمطار (مم)	EC–Earth	148.46	– 9.68	– 10.10
درجة الحرارة الكبرى(مº)		24.0	+ 1.01	+ 1.82
درجة الحرارة الصغرى(مº)		12.69	+ 0.50	+ 0.85

جدول (9) التغيرات المتوقعة للهطول المطري والحرارة الصغرى والحرارة الكبرى للفترتين (2020–2039) و(2040–2059) مقارنة بالفترة التاريخية (1986–2005) في منطقة الدراسة حوض صنعاء وفقا للسيناريو RCP 8.5 وللنماذج GFDL–ESM2M، CNRM–CM5، EC–Earth

العوامل المتغيرة	النموذج	المعدل الوسطي للسنوات التاريخية	التغيرات المتوقعة	
			المستقبل القريب	المستقبل المتوسط
		2005–1986	2039–2020	2059–2040
الأمطار(مم)	CNRM-CM5	151.28	+ 19.79	- 11.04
درجة الحرارة الكبرى(مº)		23.98	+ 1.17	+ 2.10
درجة الحرارة الصغرى(مº)		12.67	+ 0.59	+ 1.01
الأمطار(مم)	GFDL-ESM2M	122.54	- 6.94	- 16.18
درجة الحرارة الكبرى(مº)		24.07	+ 1.30	+ 2.36
درجة الحرارة الصغرى(مº)		12.70	+ 0.66	+ 1.22
الأمطار(مم)	EC-Earth	145.65	+ 1.12	- 1.79
درجة الحرارة الكبرى(مº)		24.0	+ 1.39	+ 2.47
درجة الحرارة الصغرى(مº)		12.69	+ 0.65	+ 1.34

3.4 مناقشة أثر التغيرات المناخية على القمح:

تم دراسة تأثير تغيّر المناخ بأخذ متوسط البيانات المناخية للنماذج الثلاثة (CNRM–CM5 ، GFDL–ESM2M ، EC –EARTH) وعند سيناريوهين لكل نموذج (RCP8.5, RCP4.5)، مع الأخذ بالحسبان دراسة حالتي زيادة تركيز ثاني أكسيد الكربون(CO_2) وثباته عند (ppm350) للفترتين المستقبل القريب والمتوسط (2020–2039 و 2040–2059) والمقارنة بفترة الأساس(2024، 2023 م). ويمكن مناقشة اهم أثر التغيرات المناخية على الإنتاجية الحبية والتبخر – نتح الفعلي كالتالي:

3.4.1 أثر التغيرات المناخية على الإنتاجية الحبية:

تظهر النتائج الواردة في الجدول (10) إلى توقع زيادة في إنتاجية (Y) القمح العربي المحسن بمنطقة الدراسة مع ارتفاع تركيز ثاني أكسيد الكربون تحت السيناريو (RCP8.5) و(RCP4.5) للفترتين خلال المستقبل القريب والمتوسط (2020–2039 و 2040–2059) . بينما من المتوقع انخفاضها في حال ثبات تركيز CO2 في الغلاف الجوي تحت السيناريو (RCP8.5) و(RCP4.5) للفترتين نفسها. ويرجع ذلك إلى تأثير ارتفاع ثاني أكسيد الكربون في تسريع العمليات الفسيولوجية ونمو المحصول أما ثبات تركيزة CO2 يقابله انخفاض في الإنتاجية بسبب بطء العمليات الفسيولوجية ونمو المحصول. وهذه النتائج تتفق مع ما أشارت إليه دراسات سيف وآخرون [13]، والإسكوا، [14] وعلى العكس انخفاض الإنتاجية مع ارتفاع درجات الحرارة بحسب ما أظهرت دراسة Bouras et al [15] وAsseng et al [16] بينما في معاملة الري الكامل (I_1) بلغت أعلى قيمة للإنتاجية (3.24 طن/ه) بنسبة زيادة (28.57%) تحت السيناريو (RCP8.5) و (3.19 طن/ه) وبنسبة (26.59%) تحت السيناريو (RCP4.5) للفترة (2040–2059) مقارنة بفترة الأساس (2.52طن/ه). أما أدنى قيمة للإنتاجية فكانت (2.15 طن/ه) بنسبة انخفاض (14.68%–) تحت السيناريو (RCP4.5) و(2.20 طن/ه) وبنسبة انخفاض (12.70%–) تحت السيناريو (RCP8.5) عند ثبات (CO2) للفترتين (2020–2039 و 2040–2059) على التوالي. أما في معاملة الري الناقص (I_2) فكانت أعلى قيمة للإنتاجية (2.91طن/ه) بنسبة زيادة (35.35%) تحت السيناريو (RCP8.5) للفترة (2020–2039) و(2.45طن/ه) وبنسبة زيادة (13.95%) تحت السيناريو (RCP4.5) للفترة (2040–2059) مقارنة بفترة الأساس (2.15طن/ه). بينما أدنى قيمة للإنتاجية(1.65طن/ه) بنسبة

انخفاض (23.26%−) تحت السيناريو (RCP4.5) و (1.45طن/هـ) وبنسبة انخفاض (32.56%−) تحت السيناريو (RCP8.5) في حال ثبات (CO_2) للفترتين (2020−2039 و 2040−2059) على التوالي. ولكن في معاملة الري الناقص (I_3) كانت أعلى قيمة للإنتاجية (1.88طن/هـ) بنسبة زيادة (88.0%) تحت السيناريو (RCP8.5) للفترة (2020−2039) و (1.25طن/هـ) وبنسبة زيادة (25.0%) تحت السيناريو (RCP4.5) للفترة (2040 − 2059) مقارنة بفترة الأساس (1.0طن/هـ). أما أدنى قيمة للإنتاجية فبلغت (0.82 طن/هـ) بنسبة انخفاض (18.0%−) تحت السيناريو (RCP4.5) و(0.83 طن/هـ) وبنسبة انخفاض (17.0%−) تحت السيناريو (RCP8.5) في حال ثبات (CO_2) للفترتين (2020−2039 و 2040−2059) على التوالي. يلاحظ انخفاض الحاصل في الإنتاجية الحبية في معاملات الري الناقص (I_2)، (I_3) مقارنة بمعاملة الري الكامل (I_1) بسبب قلة عدد الحبوب في السنابل والقش النبات وتعرضها للإجهاد المائي.

هذه النتائج تتفق مع ما أشار إليه كل [4 , 5 , 11 , 12].

جدول (10) يبين متوسط الإنتاجية الحبية للقمح العربي المحسن خلال فترة الأساس (2023−2024) والتغير المتوقع خلال الفترات (2020−2039 : 2040−2059) ومن اجل السيناريوهين RCP4.5، RCP8.5 وعند مختلف معاملات الري.

السيناريو المناخي		RCP4.5				RCP8.5			
حالة تركيز ثاني أكسيد الكربون CO_2		ثبات	زيادة	ثبات	زيادة	ثبات	زيادة	ثبات	زيادة
المعلمة	معاملات الري	سنوات الأساس	التغيرات المتوقعة						
			المستقبل القريب		المستقبل المتوسط		المستقبل القريب		المستقبل المتوسط
		2024-2023	2039-2020		2059-2040		2039-2020		2059-2040
الإنتاجية الحبية (طن/هـ)	I_1	2.52	2.15	2.51	3.19	2.58	2.75	3.24	2.20	2.82
التغير النسبي (%)			-14.68	-0.40	26.59	2.38	9.13	28.57	-12.70	11.90
التغير المطلق(طن/هـ)			-0.37	-0.01	0.67	0.06	0.23	0.72	-0.32	0.30
الإنتاجية الحبية (طن/هـ)	I_2	2.15	1.65	1.92	2.45	1.99	2.47	2.91	1.45	1.87
التغير النسبي (%)			-23.26	-10.70	13.95	-7.44	14.88	35.35	-32.56	-13.02
التغير المطلق(طن/هـ)			-0.50	-0.23	0.30	-0.16	0.32	0.76	-0.70	-0.28
الإنتاجية الحبية (طن/هـ)	I_3	1.00	0.82	0.95	1.25	1.01	1.59	1.88	0.83	1.06
التغير النسبي (%)			-18.00	-5.00	25.00	1.00	59.00	88.00	-17.00	6.00
التغير المطلق(طن/هـ)			-0.18	-0.05	0.25	0.01	0.59	0.88	-0.17	0.06

3.4.2 أثر التغيرات المناخية على التبخر− نتح الفعلي:

تظهر النتائج الواردة في الجدول (11) إلى توقع انخفاض في التبخر−نتح الفعلي (ET_c) للقمح العربي بمنطقة الدراسة مع ارتفاع تركيز ثاني أكسيد الكربون تحت السيناريو (RCP8.5) و (RCP4.5) للفترتين (2020−2039 و 2040−2059). مقارنة بفترة الأساس(2023،2024م).

بينما من المتوقع الارتفاع في التبخر−نتح الفعلي في حال ثبات تركيز CO2 في الغلاف الجوي تحت السيناريو (RCP8.5) و (RCP4.5) للفترتين نفسها. ويعزى ذلك الى أن الارتفاع في تركيز CO2 يعمل على أغلاق ثغور المحصول جزئيا أو كليا وهو ما يؤدي الى انخفاض في عملية النتح من الأوراق. أما انخفاض تركيزه فلا يحدث

إغلاقا للثغور CO_2 وهو ما أكدا عليه في دراستهما [17] Ainsworth & Long. وأن التبخر–نتح الفعلي للقمح العربي المحسن من المتوقع أن ينخفض تحت معاملة الري الكامل (I_1) حيث بلغت أعلى قيمة للتبخر–نتح الفعلي 384.60 مم (بنسبة انخفاض 4.19%) تحت السيناريو RCP8.5 للفترة (2020–2039) عند ثبات تركيز CO_2. و382.40 مم (بنسبة انخفاض 4.74%) وفقا للسيناريو RCP4.5 للفترة (2040–2059) مقارنة بفترة الأساس (401.44 مم) في حالة زيادة تركيز ثاني أكسيد الكربون. أما أدنى قيمة للتبخر–نتح الفعلي كانت 351.60 مم (بنسبة انخفاض 12.42%) تحت السيناريو RCP8.5 للفترة (2040–2059) عند زيادة تركيز CO_2. و369.00 مم (بنسبة انخفاض 8.08%) وفقا للسيناريو RCP4.5 للفترة (2020–2039) عند زيادة وثبات CO_2 مقارنة بفترة الأساس (401.44 مم). يعزى ذلك إلى عدم استجابة المحصول للإجهاد المائي.

بينما في معاملة الري الناقص (I_2): سجل ارتفاع طفيف في التبخر–نتح الفعلي حيث بلغت اعلى القيم 365.60 مم (بنسبة زيادة 21.74%) تحت السيناريو RCP8.5 للفترة (2020–2039) عند ثبات CO_2. و341.70 مم (بنسبة زيادة 13.79%) تحت السيناريو RCP4.5 للفترة (2040–2059) عند ثبات CO_2 مقارنة بفترة الأساس (300.30 مم). في المقابل كانت أدنى القيم 314.70 مم (بنسبة زيادة 4.8%) تحت السيناريو RCP8.5 للفترة (2040–2059) عند زيادة CO_2. و332.70 مم (بنسبة زيادة 10.79%) وفقا للسيناريو RCP4.5 للفترة (2020–2039) عند زيادة CO_2 مقارنة بفترة الأساس (300.30 مم). ويعود هذا التفاوت إلى استجابة المحصول للإجهاد المائي.

أما في معاملة الري الناقص (I_3) لوحظ ارتفاع كبير في التبخر–نتح الفعلي، حيث وصلت القيمة القصوى إلى 306.20 مم (بنسبة زيادة 51.48%) وفقا للسيناريو RCP8.5 للفترة (2020–2039) عند ثبات CO_2. و277.00 مم (بنسبة زيادة 37.03%) وفقا للسيناريو RCP4.5 لنفس الفترة عند ثبات CO_2 مقارنة بفترة الأساس (202.14 مم).

في حين كانت القيمة الدنيا 266.00 مم (بنسبة زيادة 31.59%) وفقا للسيناريو RCP8.5 للفترة (2040–2059) عند زيادة CO_2. و273.00 مم (بنسبة زيادة 35.05%) تحت السيناريو RCP4.5 لنفس الفترة.

ويرجع هذا الارتفاع الكبير إلى زيادة استجابة المحصول للإجهاد المائي مقارنةً بمعاملة الري الناقص (I_2).

عموما يلاحظ انخفاض في قيم التبخر – نتح الفعلي في معاملة الري الكامل (I_1) خلال الفترات المتوقعة (2020–2039: 2040 – 2059) في جميع السيناريوهات المناخية وعند زيادة تركيز ثاني أكسيد الكربون وثباته في المستقبل القريب والمتوسط في حين أظهرت معاملتي الري الناقص (I_2)، (I_3) ارتفاعا ملحوظا في قيم التبخر– نتح الفعلي مقارنة بفترة الأساس (2023–2024).

يعزى ذلك إلى عدم استجابة المحصول للإجهاد المائي في معاملة الري الكامل (I_1) واستجابة المحصول للإجهاد المائي في معاملتي الري الناقص (I_2)، (I_3) وهذا يتفق مع ما توصل إليه كل من [4 , 5, 7, 11, 12, 18, 21].

جدول (11) يبين التبخر–نتح الفعلي للقمح العربي المحسن خلال فترة الأساس (2023–2024) والتغير المتوقع خلال الفترات (2020–2039) و(2040–2059) ومن اجل السيناريوهين RCP4.5،RCP8.5 وعند مختلف معاملات الري.

السيناريو المناخي			RCP4.5				RCP8.5			
حالة تركيز ثاني أكسيد الكربون CO_2			ثبات	زيادة	ثبات	زيادة	ثبات	زيادة	ثبات	زيادة
المعلمة	معاملات الري	سنوات الأساس	التغيرات المتوقعة							
			المستقبل القريب		المستقبل المتوسط		المستقبل القريب		المستقبل المتوسط	
		2024–2023	2039–2020		2059–2040		2039–2020		2059–2040	
التبخر–نتح الفعلي (مم)	I_1	401.44	369.00	369.00	382.40	377.10	384.60	381.40	356.70	351.60
التغير النسبي (%)			-8.08	-8.08	-4.74	-6.06	-4.19	-4.99	-11.14	-12.42
التغير المطلق (مم)			-32.44	-32.44	-19.04	-24.34	-16.84	-20.04	-44.74	-49.84
التبخر–نتح الفعلي (مم)	I_2	300.30	332.70	333.90	341.70	338.90	365.60	362.90	316.90	314.70
التغير النسبي (%)			10.79	11.19	13.79	12.85	21.74	20.85	5.53	4.80
التغير المطلق (مم)			32.40	33.60	41.40	38.60	65.30	62.60	16.60	14.40
التبخر–نتح الفعلي (مم)	I_3	202.14	276.20	277.00	273.90	273.00	306.20	305.60	267.10	266.00
التغير النسبي (%)			36.64	37.03	35.50	35.05	51.48	51.18	32.14	31.59
التغير المطلق (مم)			74.06	74.86	71.76	70.86	104.06	103.46	64.96	63.86

4. الاستنتاجات:

- في الموسم الزراعي الأول2023م موسم معايرة نموذج (Aqua Crop) والموسم الزراعي الثاني 2024م موسم التحقق من صحة النموذج تحقق أعلى قيم لإنتاجية المياه (WP_{ET}) للموسمين في معاملة الري الناقص (I_2) تراوحت بين (0.72، 0.70 طن/م^3) على التوالي. وفي حين كانت كفاءة مياه الري (WP_I) تتراوح بين (0.74، 0.67طن/م^3) على التوالي. وأظهرت هذه المعاملة أفضل استجابة للري الناقص حيث بلغ معامل الاستجابة للإجهاد المائي (Ky) (0.58، 0.55) على التوالي. مما يشير إلى أن الانخفاض النسبي في المحصول كان أقل من الانخفاض النسبي في كميات الري. وهذا يدل على أن الاستراتيجية المتبعة في (I_2) كانت الأكثر كفاءةً في تحقيق التوازن بين استخدام مياه الري وإنتاجية القمح العربي المحسن، مع تعزيز إنتاجية المياه (WP_{ET}).
- يتوقع أن يحدث زيادة في قيم الإنتاجية الحبية (Y)، تحت السيناريو (RCP8.5) والسيناريو (RCP4.5) خلال الفترتين (2020–2039 و2040–2059)، وانخفاض في التبخر–نتح الفعلي (ET_C) في نفس الفترتين مع ارتفاع تركيز (CO_2) والعكس مع ثبات تركيز (CO_2) في الغلاف الجوي تحت السيناريو (RCP8.5) والسيناريو (RCP4.5) للفترتين نفسها. بحوض صنعاء وعند مختلف معاملات الري المستخدمة في التجربة (I_1)، (I_2) و(I_3).
- من المتوقع أن تشهد منطقة الدراسة بحوض صنعاء تأثير تغير المناخ على إنتاجية القمح من جانبين، الجانب الإيجابي زيادة في إنتاجية القمح العربي المحسن بسبب ارتفاع تركيز ثاني أكسيد الكربون (CO_2) في الغلاف الجوي وزيادة درجات الحرارة. أما من الجانب السلبي فقد يؤدي إلى انخفاض القيمة الغذائية للمحصول رغم زيادة الإنتاجية المحتملة.

• عند مقارنة القيم المتوقعة مع القيم المقاسة لصفتي الإنتاجية الحبية والكتلة الحيوية للموسمين الزراعيين(2023–2024م) اظهر نموذج Aqua Crop كفاءة ودقة عالية وتطابقًا تامًا بين القيم المحاكاة والمقاسة، حيث تراوحت قيم مؤشر التوافق (d) خلال الموسمين الزراعيين 2023–2024م لصفتي الإنتاجية الحبية والكتلة الحيوية بين (99،99)، (97،96) (%) على التوالي بينما تراوحت القيم لمعامل الارتباط (R^2) بين (99،99)، (95،93) (%) على التوالي وهو ما يعزز موثوقيته في التخطيط لإدارة الري.

5. التوصيات:

أظهرت نتائج البحث أن نموذج Aqua Crop – بعد معايرته – يُعد نموذجًا فعّالًا وواعدًا لتحليل كفاءة إدارة الري وتخطيطه، حيث يجمع بين الدقة والبساطة في التطبيق. وفي ضوء ذلك، تقدم الدراسة التوصيات التالية:

1. تعميم استخدام نموذج Aqua Crop حيث يمكن تطبيقه في بيئات مناخية وزراعية متنوعة، ومع محاصيل وأصناف مختلفة.

2. ترشيد استخدام المياه بتطبيق طريقة الري الناقص (بنسبة 75% من الاحتياج الكامل) ، في المناطق الشحيحة للمياه في اليمن عامة وحوض صنعاء خاصة، حيث أظهرت النتائج أن الانخفاض في الإنتاجية أقل من الانخفاض في كميات الري، مما يزيد من كفاءة إنتاجية المياه (WP_{ET}). مع إمكانية تحقيق توازن بين توفير المياه والمحافظة على الإنتاجية ويمكن لاستراتيجيات الري المدروسة خاصة معاملة الري الناقص(I_2) رفع كفاءة استخدام المياه مع تقليل الخسائر الإنتاجية بشكل مقبول. مما يزيد من العائد لكل متر مكعب من مياه الري.

3. بناء قدرات المزارعين من خلال تدريبهم على التكيف مع تغير المناخ، بتعديل مواعيد الزراعة (مثل الزراعة المبكرة لتجنب الإجهاد الحراري)، واستخدام بذور محسّنة مقاومة للتقلبات المناخية، وإدخال نظم الري الحديثة كالتنقيط وتغطية القنوات لتقليل الفاقد في المياه. هذه التوصيات تهدف إلى تعزيز الإنتاجية الزراعية وضمان الاستدامة المائية، في حوض صنعاء الذي يعاني من ندرة الموارد المائية.

قائمة المراجع:

[1] Bank W. Yemen: assessing the impacts of climate change and variability on the water and agricultural sectors and the policy implications. World Bank Washington, DC; 2010.

[2] وزارة الزراعة والثروة السمكية والموارد المائية. كتاب الإحصاء الزراعي السنوي للعام. صنعاء-الجمهورية اليمنية. 2023.

[3] FAO. The water-energy-food nexus: A new approach in support of food security and sustainable agriculture. FAO Rome, Italy; 2014.

[4] ب. ب. حلاوة ، تقييم تأثير تغير المناخ في إنتاجية محصول الذرة باستخدام برنامج Aqua Crop في محطة بحوث المختارية في محافظة حمص [رسالة ماجستير، جامعة البعث/كلية الهندسة المدنية قسم هندسة وإدارة الموارد المائية]. سوريا.2022.

[5] م. أ. السعدي، تقييم النموذج الرياضي Aqua Crop لإدارة الري الناقص لمحصول الذرة الصفراء (*Zea mays* L.) [رسالة ماجستير، جامعة دمشق، كلية الزارعة، قسم الهندسة الريفية]. سوريا. [ملخص الرسالة] .2022.

[6] A.G. Tirfi, and A.S. Oyekale. Impact of climate change on yields of wheat in Ethiopia: An augmented Cobb-Douglas production function approach. *Journal of Agricultural, Food and Environmental Sciences, JAFES*. 2022;76(1):34-47.

[7] M.B. Aghajanloo, and J. Nikbakht. Simulation and Assessment of AquaCrop Model in deficit irrigation management of Winter Wheat in Zanjan Region. *Water and Soil Science*. 2023;33(2):23-34.

[8] S. Kale, and S. Madenoğlu, Evaluating AquaCrop model for winter wheat under various

irrigation conditions in Turkey. *Journal of Agricultural Sciences*. 2018;24(2):205-17.

[9] N. Dercas, N.R. Dalezios, S. Stamatiadis, E. Evangelou, A. Glampedakis, G. Mantonanakis, et al. AquaCrop simulation of winter wheat under different N management practices. *Hydrology*. 2022;9(4):56.

[10] Y.O. Nematallah, and A.A. Kasem, Assessment of Aqua Crop model in simulating wheat crop water use and productivity in Middle Egypt. Middle East *Journal of Applied Sciences,* 2021.11 (3), pp. 500–510 .

[11] ، ر. ز.الدريعي ، أ. ك. جناد. ، ي.م. نمر. تقييم النموذج الرياضي Aqua crop لإدارة الري الناقص لمحصول الذرة البيضاء. *مجلة جامعة دمشق للعلوم الزراعية*، 40(2)،317–330. 2025.

[12] D. Hassan, A. Ati, A. Naima, Evaluation of the performance of the AquaCrop model under different irrigation and cultivation methods and their effect on water consumption. *Iraq Journal of Agricultural Sciences*, 2023.54(2), 4(2), pp. 478–490.

[13] ع. ع.سيف، ، ح. ح.الأشول، ، وع. ع. الخرساني، التغيرات المناخية وأثرها في إنتاجية بعض المحاصيل الاقتصادية في الجمهورية اليمنية. *المجلة السورية للبحوث الزراعية*، 3 (7) 2020، 246–258.

[14] الإسكوا. تقييم تأثير التغيرات في المياه المتاحة على إنتاجية المحاصيل الزراعية. تقرير دراسة الحالة في الأردن، السودان، العراق، المغرب، اليمن، تونس، لبنان وفلسطين. اللجنة الاقتصادية والاجتماعية لغربي آسيا. *الأمم المتحدة*. 2019.

[15] E. Bouras, L. Jarlan, S. Khabba, S. Er-Raki, A. Dezetter, F. Sghir, and Y. Tramblay. Assessing the impact of global climate changes on irrigated wheat yields and water requirements in a semi-arid environment of Morocco. Scientific Reports. 2019;9(1):19142.

[16] S. Asseng, F. Ewert, P. Martre, R.P. Rötter, D.B. Lobell, D. Cammarano, B.A. Kimball, M.J. Ottman, G.W. Wall, J.W. White, M.P. Reynolds, Alderman, P.D., Prasad, P.V.V., Aggarwal, P.K., Anothai, J., Basso, B., Biernath, C., Challinor, A.J., De Sanctis, G., … and Zhu, Y. Rising temperatures reduce global wheat production. *Nature climate change*. 2015;5(2):143-7.

[17] E.A. Ainsworth, and S.P. Long.What have we learned from 15 years of free-air CO2 enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO_2. New phytologist. 2005;165(2):351-72.

[18] P. Steduto, T.C. Hsiao, D. Raes, and E. Fereres, Crop yield response to water: fao Rome, Italy; 2012.

[19] وزارة الزراعة والري. الدليل الزراعي – المرتفعات الوسطى.صنعاء–الجمهورية اليمنية– 2001.

[20] D. Raes, P. Steduto, T.C. Hsiao, and E. Fereres, Reference manual of AquaCrop Version 7.1 Annexes. Rome: Food and Agriculture Organization .2023.

[21] R.G. Allen, L.S. Pereira, D. Raes, and M. Smith, Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Rome: Food and Agriculture Organization .1998.

[22] F. Windmeijer, and A.C. Cameron, An R-squared measure of goodness of fit for some common nonlinear regression models. *Journal of Econometrics*, 1995.77, pp. 329–342.

[23] R.G. Pontius, O. Thontteh, and H. Chen, Components of information for multiple resolution comparison between maps that share a real variable. Environmental and ecological statistics. 2008;15(2):111-42.

[24] T. O. Hodson, Root-mean-square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): when to use them or not. Geoscientific Model Development, 2022.15(14), 5481- .5487.

[25] C.J. Willmott, S.M. Robeson, and K. A. Matsuura, refined index of model performance. *International Journal of Climatology*, 2013. 33 (4), pp. 1053–1056