



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة الشهيد حمه لخضر - الوادي
كلية علوم الطبيعة والحياة
قسم البيولوجيا
مذكرة تخرج



لنيل شهادة ماستر أكاديمي
ميدان : علوم الطبيعة والحياة
شعبة : علوم بيولوجية
تخصص: التنوع الحيوي وفزيولوجيا النبات

الموضوع

تأثير الرقم الهيدروجيني (pH) على إنبات ونمو نباتي
القمح (*Triticum durum*) صنف Vitron
والشعير (*Hordeum vulgare*) صنف Orge Soufi

من إعداد الطالبين :

- غربي صلاح الدين
- بوغنامة اسماعيل

نوقشت يوم 2026/06/13 من طرف لجنة المناقشة

د- بالحبيب عبد الحميد	استاذ محاضر قسم أ	رئيسا	جامعة الشهيد حمه لخضر- الوادي
د- حسن لعوج	استاذ محاضر قسم أ	مؤطرا	جامعة الشهيد حمه لخضر- الوادي
د- بن قدور عبد الحميد	استاذ محاضر قسم أ	ممتحننا	جامعة الشهيد حمه لخضر- الوادي

الموسم الجامعي: 2026/2025

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

مَثَلُ الَّذِينَ يُنْفِقُونَ أَمْوَالَهُمْ فِي
سَبِيلِ اللَّهِ كَمَثَلِ حَبَّةٍ أَنْبَتَتْ سَبْعَ
سَنَابِلَ فِي كُلِّ سُنبُلَةٍ مِائَةٌ
حَبَّةٌ وَاللَّهُ يُضَاعِفُ لِمَنْ يَشَاءُ
وَاللَّهُ وَاسِعٌ عَلِيمٌ

إهداء

تتسابق الكلمات على أبواب الشفاه وتتزاحم العبارات على عتبات الجفون لتبدأ رحلة الذكريات تشق عباب
السنين الماضية لتبعثر أوراق المحبة في أرجاء القلوب...

ففي البداية، الشكر والحمد لله فالإله ينسب الفضل كله والصلاة والسلام على اشرف خلق الله...

يسرني أن أقدم نجاحي هذا ونتاج بحثي المتواضع كهمسة حب وعنوان وفاء...

إلى الذي بذل جهد السنين سخيا وصاغ من الأيام سلاالم العلى لأرتقي بها، إلى من علمني العطاء دون انتظار

إلى مناحل اسمه بكل افتخار إلى روح والديالطاهرة

إلى ملاكي في الحياة ..إلى بسمه دربي وشمس حياتي التي لا تغيب إلى من كان دعاؤها سر نجاحي .. إلى من

ضحت لأكون في قمة المرتجى إليك والدتي الغالية ..

إلى النفوس الرقيقة البريئة ورفقاء دربي إلى من أرى التفاؤل بأعينهم والسعادة في ضحكتهم ..إلى حزام ظهري

ورياحين حياتي الى زوجتي الغالية والى ابنائي وفلذات كبدي رعاهم الله .

..إلى إخواني وأخواتي إلى من شملوني بالعطف، وأمدوني بالعون وحفزوني للتقدم .. إلى من كانوا لي نبراسا

يضيء فكري بالنصح والتوجيه، إلى قلوب كانت ترتقب نجاحي بصبر إلى من شاركوني عبء دراستي

وشجعوني..إلى ينباع الصدق الصافي إلى من علمني حرفا واخذ بيدي في سبيل تحصيل العلم والمعرفة أساتذتي

الأفاضل لكم مني عبارات الثناء والامتنان لقاء مجهوداتكم الرائعة..

إلى الذين زرعوا في نفوسنا بذور الصبر حتى استقامت سنابل أحلامنا..

إلى من علمونا أن العطاء لا ينقص من صاحبه شيئا، بل يضاعفه الله أضعافاً كثيرة..

أهدي هذا العمل المتواضع، راجياً من الله أن يتقبله بقبول حسن، وأن يجعل ثمرة هذا الجهد صدقة جارية تليق

بمقام من أحببت، وعوناً لمن اهتدى بنور العلم."

"الحمد لله الذي جعل العلم نوراً، والعمل الصالح تجارةً لن تبور. انطلاقاً من قوله تعالى: ﴿كَمَثَلِ حَبَّةٍ أَنْبَتَتْ سَبْعَ

سَنَابِلَ﴾، نضع بين أيديكم هذا البحث الذي سعينا فيه غاية السعي لتكون كل كلمة فيه بذرة حق، نرجو أن تثمر

نفعاً للمجتمع وعوناً للباحثين، سائلين المولى أن يبارك في القليل ليغدو كثيراً، وفي الجهد ليصبح أثراً باقياً..."

إهداء

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات، وبفضله تتحقق الغايات، أحمده سبحانه وتعالى على ما أنعم به عليّ من توفيق وعون حتى أتممت هذا العمل، بعد رحلة حافلة بالاجتهاد والصبر والمثابرة، لم تكن لتكتمل لولا فضله أولاً، ثم دعم كل من أحاطني بالمساندة والتشجيع.

إلى والديّ العزيزين، أهدي ثمرة هذا الجهد المتواضع بكل حب وامتنان. إلى أبي الكريم، الذي غرس في نفسي قيمة الاجتهاد، وعلمني أن النجاح لا يتحقق إلا بالإصرار والعمل، وكان لي مثلاً في التضحية والعطاء. وإلى أمي الغالية، التي أحاطتني بدعواتها الصادقة، وحنانها اللامحدود، فكانت مصدر الطمأنينة والقوة في كل مراحل حياتي. إليكما أهدي هذا الإنجاز، وفاءً لما قدمتماه من حب ورعاية وتضحيات لا يمكن أن توفيهما الكلمات حقها، وإلى إخوتي وأخواتي، شركاء العمر وسند الحياة، أتقدم إليكم بخالص الشكر والتقدير على محبتكم الصادقة، وتشجيعكم المستمر، ووقوفكم إلى جانبي في مختلف مراحل هذه الرحلة، فكان دعمكم دافعاً لمواصلة الطريق بثبات وعزيمة.

وإلى روح قائدي ومربيّ، المرحوم عبد الرحمان غربي، أهدي هذا العمل وفاءً وعرفاناً لما غرسته في نفسي من قيم الإيمان، وحب العلم، والإخلاص في العمل، وحسن الخلق. لقد كنت قدوةً ومربياً ترك أثراً طيباً في نفسي، وستظل سيرتك العطرة ومواقفك النبيلة نبراساً يضيء دربي. أسأل الله تعالى أن يتغمذك بواسع رحمته، وأن يجعل هذا العمل في ميزان حسناتك، وأن يرفع درجتك في الفردوس الأعلى، وأن يجزيك عني وعن كل من تعلم منك خير الجزاء.

كما أتوجه بجزيل الشكر والامتنان إلى الأخوين خالد عقاب و يوسف حبي، اللذين لم يدخرا جهداً في تقديم المساعدة وتوفير جميع الظروف الملائمة لإنجاز الجانب التطبيقي من هذا العمل داخل مخبر محطة تصفية المياه، فكان لتعاونهما الكريم ودعمهما المتواصل أثر بالغ في إنجاح هذه الدراسة.

كما لا يفوتني أن أتوجه بالشكر إلى أصدقائي وزملائي، الذين تقاسموا معي سنوات الدراسة بما حملته من تحديات وآمال، فشكراً لكم على صدق المودة، وحسن الصحبة، والدعم الذي جعل مشقة الطريق أخف، وتكريات هذه المرحلة أجمل وأبقى.

وفي الختام، أهدي هذا العمل إلى كل من وقف إلى جانبي، وآمن بقدرتي على تحقيق هذا الإنجاز، وأسأل الله تعالى أن يجعله علماً نافعاً، وأن يكون بدايةً لمسيرة علمية حافلة بالعطاء والنجاح، وأن يجزي كل من كان له

صلاح الدين

فضل عليّ خير الجزاء، وأن يبارك فيهم جميعاً، إنه ولي ذلك والقادر عليه.

التشكرات

الحمد لله العلي القدير الذي وفقنا وأعاننا على إنجاز هذا العمل، ونسأله سبحانه أن يجعله عملاً نافعاً خالصاً لوجهه الكريم. والصلاة والسلام على سيدنا محمد ﷺ، خاتم الأنبياء والمرسلين، وعلى آله وصحبه ومن تبعهم بإحسان إلى يوم الدين.

نتقدم بخالص الشكر والتقدير إلى الأستاذ الدكتور حسن لعوج، المشرف على هذا البحث، على ما أولانا من رعاية علمية وتوجيهات سديدة، وما قدمه لنا من نصائح قيمة وملاحظات بناءة، كان لها بالغ الأثر في إنجاز هذا العمل وإخراجه في صورته الحالية.

كما نتوجه بجزيل الشكر والعرفان إلى الأستاذ غمام الجيلاني، على دعمه المتواصل وتوجيهاته القيمة، فله منا خالص التقدير والامتنان.

كما نتقدم بجزيل الشكر إلى جميع عمال وإطارات محطة تصفية المياه بالوادي، على ما قدموه من تعاون وتسهيلات أسهمت في إنجاز الجانب التطبيقي من هذه الدراسة.

ونتوجه كذلك بخالص الشكر والتقدير إلى جميع أساتذة كلية علوم الطبيعة والحياة، الذين كان لهم الفضل، بعد الله تعالى، في تكويننا العلمي والأكاديمي، بما قدموه من علم نافع، وتوجيهات قيّمة، ونصائح مخلصّة، فسيظل فضلهم محل تقدير وامتنان، وستبقى بصمتهم راسخة في مسيرتنا العلمية.

وفي الختام، نتقدم بجزيل الشكر والامتنان إلى كل من ساهم، من قريب أو بعيد، في إنجاز هذا العمل، ولو بكلمة طيبة أو دعوة صادقة، سائلين الله تعالى أن يجزي الجميع خير الجزاء، وأن يجعل هذا العمل خالصاً لوجهه الكريم، ونافعاً لكل من يطلع عليه.

المخلص :

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم تأثير مستويات مختلفة من الحموضة (pH) لمياه الري على إنبات ونمو وإنتاجية القمح الصلب (*Triticum durum Desf.*) والشعير (*Hordeum vulgare L.*)، وتحديد المجال الأمثل للحموضة لتحقيق أفضل استجابة فسيولوجية ومورفولوجية للنبات. أُجريت الدراسة بولاية الوادي خلال الموسم الجامعي 2025-2026، وشملت تجربة إنبات مخبرية وأخرى للنمو والإنتاج في الأصص.

تم خلال الدراسة تقييم مجموعة من المعايير المدروسة، شملت مؤشرات الإنبات (سرعة الإنبات، طول الجذر، طول السويقة، الكتلة الحيوية الغضة والجافة للبادرات)، ومعايير النمو الخضري (طول النبات، عدد الأوراق، عدد الأشرطة، عدد السلاميات، سمك الساق، وطول السلامة الثالثة)، إضافة إلى المؤشرات الفينولوجية (تاريخ الإشتاء وظهور السنابل)، ومكونات الغلة (عدد البذور في السنبل، وزن البذور/السنبل، ووزن ألف حبة).

أظهرت النتائج أن مستويات الحموضة أثرت بوضوح في إنبات ونمو وإنتاجية القمح والشعير. وقد سُجلت أفضل الاستجابات عند المجال القريب من التعادل (pH 6.0-6.5)، حيث تحسنت سرعة الإنبات ونمو البادرات، إلى جانب ارتفاع مؤشرات النمو الخضري ومكونات الغلة، نتيجة تحسن امتصاص العناصر الغذائية وكفاءة العمليات الفسيولوجية. في المقابل، أدى الوسط الحامضي الشديد (pH 5.0) إلى انخفاض واضح في جميع المؤشرات المدروسة بسبب ضعف نمو الجذور واضطراب امتصاص العناصر المعدنية. كما أظهر القمح قدرة أكبر على تحمل الوسط المائل للقلوية (pH 7.7) مقارنة بالشعير. وتؤكد النتائج أن المجال pH 6.0-6.5 يمثل المستوى الأمثل لضمان إنبات جيد ونمو قوي وإنتاجية مرتفعة لمحصولي القمح والشعير تحت الظروف المحلية.

الكلمات المفتاحية : القمح الصلب *Triticum durum Desf* ، الشعير *Hordeum vulgare L* ، PH,

النمو ، الإنبات

Abstract

This study aimed to evaluate the effect of different irrigation water pH levels on germination, growth, and productivity of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) and barley (*Hordeum vulgare* L.), and to identify the optimal pH range ensuring the best physiological and morphological plant responses. The experiment was conducted in El Oued (Algeria) during the 2025–2026 academic year and included both a laboratory germination trial and a pot growth experiment.

The studied parameters included germination traits (germination rate, radicle length, plumule length, fresh and dry biomass of seedlings), vegetative growth traits (plant height, leaf number, tiller number, internode number, stem thickness, and third internode length), phenological traits (tillering date and heading date), and yield components (number of grains per spike, grain weight per spike, and 1000-grain weight).

Results showed that irrigation water pH significantly affected germination, growth, and yield performance in both wheat and barley. The best responses were recorded under near-neutral conditions (pH 6.0–6.5), where germination rate, seedling growth, vegetative development, and yield components were markedly improved due to enhanced nutrient availability and improved physiological activity. In contrast, strongly acidic conditions (pH 5.0) led to a significant reduction in all studied traits, mainly due to impaired root development and reduced nutrient uptake. Wheat showed a higher tolerance to slightly alkaline conditions (pH 7.7) compared to barley. Overall, the results indicate that a pH range of 6.0–6.5 is optimal for achieving high germination, vigorous growth, and improved productivity of both crops under local conditions.

Key words: durum wheat (*Triticum durum* Desf.), barley (*Hordeum vulgare* L.), pH, growth, germination.

قائمة الوثائق :

الوثائق	عنوان الوثائق	رقم الصفحة
الوثيقة 1	مركز تدجين الحبوب الهلال الخصيب 2005 mackey	05
الوثيقة 2	التصنيف النباتي للقمح كيال 1979	05
الوثيقة 3	التصنيف النباتي لنبات الشعير APGIII 2009	06
الوثيقة 4	اجزاء نبات القمح زكرياء 2015	07
الوثيقة 5	مرحلة الزرع والانبات	08
الوثيقة 6	مرحلة بداية الاشطاء	09
الوثيقة 7	مرحلة بداية الاشطاء بداية الصعود	09
الوثيقة 8	الطور التكاثري	09
الوثيقة 9	مراحل تشكل الحبة والنضج	10
الوثيقة 10	تصنيف درجة الحموضة	13
الوثيقة 11	درجات الحموضة بعض المواد الشائعة حسب (Skoog et al., 2014)	14
الوثيقة 12	أبرز الفروق بين استجابة المحصولين حسب (Nevo), (Brady & Weil, 2008), (Kochian et al., 2004), (Delhaize & Ryan, 1995), (& Chen, 2010)	21
الوثيقة 13	صورة للقمح والشعير	25
الوثيقة 14	المخطط التجريبي لتوزيع المعاملات (T) بتكراراتها (R) للقمح (TRI-DUR) والشعير (HOR-VUL)	25
الوثيقة 15	التوصيف الكيميائي النهائي للمعاملات الخمس المعتمدة، والحجوم الدقيقة المضافة من حمض النتريك لضبط كل مستوى مستهدف	26
الوثيقة 16	تعديل حموضة ماء السقي بحمض النتريك باستعمال جهاز ph metre	26
الوثيقة 17	تحضير بذور القمح والشعير وتعقيمهما	27
الوثيقة 18	تتبع عملية انتاش البذور خلال فترة الانبات مع القياس للمعايير المرفولوجية	28
الوثيقة 19	نمو البادرات الشعير	28
الوثيقة 20	نمو البادرات القمح	28
الوثيقة 21	عملية قياس طول الجذير والسويقة لبادرات القمح والشعير	29

30	قياس وزن البادرات قبل التجفيف وبعد التجفيف للقمح والشعير	الوثيقة 22
31	نتائج قياس الناقلية الكهربائية و الملوحة لكل مستوى PH	الوثيقة 23
32	تحضير بيئة النمو والأصص المستعملة	الوثيقة 24
33	التسميد العضوي باستخدام مخلفات حيوانية (بقايا الغنم) لتحسين خصوبة التربة	الوثيقة 25
34	التصميم تجريبي و ترُتبت الأصص في مساحة التجربة	الوثيقة 26
35	عملية قياس طول النبات القمح والشعير	الوثيقة 27
36	عدد الأفرع لنبات القمح والشعير	الوثيقة 28
36	عملية قياس سمك الساق باستخدام القدم القنوية الورنية	الوثيقة 29
37	عملية قياس طول السلامة الثالثة باستخدام القدم القنوية الورنية	الوثيقة 30
38	ظهور الإشتاء للقمح	الوثيقة 31
38	رصد وتوثيق تاريخ بدء مرحلة ظهور السنابل	الوثيقة 32
39	تحديد الكثافة العددية للسنابل	الوثيقة 33
39	تحديد عدد البذور في كل سنبله	الوثيقة 34
40	تحديد الكتلة الوزنية الكلية لحبوب السنبله (وزن البذور/السنبله)	الوثيقة 35
42	سرعة الانبات للقمح	الوثيقة 36
43	سرعة الانبات للشعير	الوثيقة 37
45	طول الجذير للقمح	الوثيقة 38
46	طول الجذير للشعير	الوثيقة 39
48	أطوال السوقية للقمح	الوثيقة 40
49	أطوال السوقية للشعير	الوثيقة 41
50	وزن نبات بادرات القمح قبل التجفيف	الوثيقة 42
51	وزن نبات بادرات الشعير قبل التجفيف	الوثيقة 43
53	وزن بادرات القمح بعد التجفيف	الوثيقة 44
54	وزن بادرات الشعير بعد التجفيف	الوثيقة 45
55	متوسط طول نبات القمح عند درجات الحموضة المختلفة	الوثيقة 46
56	متوسط طول نبات الشعير عند درجات الحموضة المختلفة	الوثيقة 47

الوثيقة 48	متوسط عدد الأوراق نبات القمح عند درجات الحموضة المختلفة	58
الوثيقة 49	متوسط عدد الأوراق نبات الشعير عند درجات الحموضة المختلفة	59
الوثيقة 50	متوسط عدد الأفرع نبات القمح عند درجات الحموضة المختلفة	61
الوثيقة 51	متوسط عدد الأفرع نبات الشعير عند درجات الحموضة المختلفة	62
الوثيقة 52	متوسط سمك الساق لنبات القمح عند درجات الحموضة المختلفة	64
الوثيقة 53	متوسط سمك الساق لنبات الشعير عند درجات الحموضة المختلفة	65
الوثيقة 54	متوسط عدد السلاميات لنبات القمح عند درجات الحموضة المختلفة	67
الوثيقة 55	متوسط عدد السلاميات لنبات الشعير عند درجات الحموضة المختلفة	68
الوثيقة 56	متوسط طول السلامة الثالثة لنبات القمح عند درجات الحموضة المختلفة	70
الوثيقة 57	متوسط طول السلامة الثالثة لنبات الشعير عند درجات الحموضة المختلفة	71
الوثيقة 58	متوسط تاريخ الإشتاء لنبات القمح عند درجات الحموضة المختلفة	73
الوثيقة 59	متوسط تاريخ الإشتاء لنبات الشعير عند درجات الحموضة المختلفة	74
الوثيقة 60	متوسط تاريخ ظهور السنابل لنبات القمح عند درجات الحموضة المختلفة	76
الوثيقة 61	متوسط تاريخ ظهور السنابل لنبات الشعير عند درجات الحموضة المختلفة	77
الوثيقة 62	متوسط عدد السنابل لنبات القمح عند درجات الحموضة المختلفة	79
الوثيقة 63	متوسط عدد السنابل لنبات الشعير عند درجات الحموضة المختلفة	80
الوثيقة 64	متوسط عدد البذور في كل سنبل لنبات القمح عند درجات الحموضة المختلفة	82
الوثيقة 65	متوسط عدد البذور في كل سنبل لنبات الشعير عند درجات الحموضة المختلفة	83
الوثيقة 66	متوسط وزن البذور لنبات القمح عند درجات الحموضة المختلفة	85
الوثيقة 67	متوسط وزن البذور لنبات الشعير عند درجات الحموضة المختلفة	86
الوثيقة 68	متوسط وزن ألف حبة لنبات القمح عند درجات الحموضة المختلفة	88
الوثيقة 69	متوسط وزن ألف حبة لنبات الشعير عند درجات الحموضة المختلفة	89

قائمة الاختصارات

الرمز	معناه
<i>Tri-dur</i>	نبات القمح (<i>Triticum durum</i>)
<i>Hor-vul</i>	نبات الشعير (<i>Hordeum vulgare</i>)
R	تكرارات
PH	الحموضة
TO	الشاهد يسقى بماء حموضته تساوي 7.7 ما الحنفية
T1	تكرار يسقى بماء حموضته تساوي 5
T2	تكرار يسقى بماء حموضته تساوي 5.5
T3	تكرار يسقى بماء حموضته تساوي 6
T4	تكرار يسقى بماء حموضته تساوي 6.5
WHO	World Health Organization
CCLS	تعاونية الحبوب والبقول الجافة
EC	الناقلية الكهربائية
TGW	الوزن المكافئ لألف حبة مقدراً بالغرام
G	الغرام
Wg	الوزن الصافي الكلي للحبوب المستخدمة في القياس
Ng	العدد الفعلي لتلك الحبوب الموزونة
ABA	حمض الأبسيسيك
SAM	Shoot Apical Meristem
Rubisco	ibulose-1,5-bisphosphate carboxylase

فهرس المحتويات	
الإهداء	
الشكر والتقدير	
الملخص	
قائمة الوثائق	
قائمة الاختصارات.....	
المقدمة	

الجزء النظري

الفصل الأول: دراسة بيولوجية وزراعية لنباتي القمح والشعير

1. عموميات حول القمح والشعير	03
2. الأصل الجغرافي والوراثي للقمح والشعير	04
3. التصنيف النباتي للقمح والشعير	05
4. الوصف النباتي للقمح والشعير	06
5. أهمية نبات القمح والشعير.....	07
6. دورة الحياة القمح والشعير	08
7. الظروف البيئية الملائمة لنمو القمح والشعير	10
8. الآفات والأمراض.....	11

الفصل الثاني: الحموضة والإجهادات اللاحيوية وتأثيرها على النبات

1 - مفهوم الحموضة والرقم الهيدروجيني PH	13
1-1 تعريف الحموضة	13
2-1 طرق قياس درجة الحموضة	13
أ- ورق دوار الشمس	13
ب- مؤشرات الحموضة	13
ت- أجهزة قياس إلكترونية	14
1-3 المواد الحمضية والقلوية - أمثلة تطبيقية	14
1-4 درجة الحموضة في الماء	14

14	5-1 أهمية درجة الحموضة في جسم الإنسان.....
15	6-1 درجة الحموضة في البيئة
15	أ - في المياه
15	ب - في التربة
15	7-1 استخدامات درجة الحموضة في الصناعة والزراعة.....
16	8-1 علاقة درجة الحموضة بالصحة والغذاء.....
16	9-1 كيفية ضبط درجة الحموضة
16	10-1 أهمية فهم درجة الحموضة في حياتنا
17	2 - الحموضة كإجهاد لا حيوي على النبات
17	1-2 تعريف الإجهاد النباتي
17	2-2 تصنيف الإجهادات اللاحيوية.....
17	3-2 الإجهاد الحمضي (Acid Stress) وآثاره على النبات.....
17	4-2 تأثير الحموضة على خصائص التربة وتوفر العناصر
18	5-2 تأثير الحموضة على العمليات الفسيولوجية
18	6-2 تأثير الحموضة على إنبات البذور والنمو الخضري والجذري
18	7-2 آليات التكيف والإدارة
18	8-2 آليات الإدارة والمعالجة الزراعية
19	3 - تأثير الحموضة على القمح.....
19	1-3 النطاق المثالي لدرجة الحموضة لنمو القمح
19	2-3 تأثير الحموضة المرتفعة على القمح.....
19	3-3 تأثير القلوية المرتفعة على القمح
19	4-3 الأصناف المقاومة للحموضة في القمح
20	4- تأثير الحموضة على الشعير (Hordeum vulgare)
20	1-4 الحموضة المثالية لنمو الشعير
20	2-4 تأثيرات الحموضة المرتفعة على الشعير
20	3-4 تأثيرات القلوية على الشعير

- 4-4 مقارنة بين استجابة القمح والشعير للحموضة 21
- 5- تأثير الحموضة على النباتات بشكل عام 21

الجزء التطبيقي

الفصل الثالث: المواد وطرق البحث

1. مكان وزمان إجراء التجربة للنمو والنبات 24
2. المادة النباتية المستعملة 24
3. المواد والأجهزة المستعملة 25
4. التصميم التجريبي 25
5. بروتوكول تحضير معاملات الحموضة وضبط الرقم الهيدروجيني 25
6. تجربة الإنبات 27
- 6-1 تحضير البذور وتعقيمها 27
- 6-2 توزيع البذور في الأطباق 27
- 6-3 المعايير المورفولوجية المدروسة 28
- أ- سرعة الإنبات 28
- ب- حساب طول الجذير والسويقة 29
- ت- قياس وزن البادرات قبل التجفيف وبعد التجفيف للقمح والشعير 29
- 7- تجربة النمو 31
- 7-1 المياه الري المستعملة وخصائصها 31
- 7-2 طريقة الزرع 32
- 7-2-1 تحضير بيئة النمو والأصص المستعملة 32
- 7-2-2 التسميد 32
- 7-2-3 التصميم التجريبي 33
- 7-2-4 السقي 34
- 7-3 المعايير المورفولوجية المدروسة 35
- 7-3-1 طول النبات 35
- 7-3-2 عدد الأوراق 35

35	3-3-7 عدد الأفرع (الأشطاء)
36	4-3-7 سمك الساق
37	5-3-7 عدد السلميات.....
37	6-3-7 طول السلامية الثالثة
37	7-3-7 تاريخ الإشطاء
38	8-3-7 تاريخ ظهور السنابل
39	9-3-7 عدد السنابل
39	10-3-7 عدد البذور في كل سنبله
40	11-3-7 وزن البذور
40	12-3-7 وزن 1000 حبة

الفصل الرابع : النتائج والمناقشة

42	1- نتائج تجربة الإنبات
42	1-1 سرعة الإنبات
42	- نبات القمح
43	- نبات الشعير
45	2-1 أطوال الجذير للقمح والشعير
45	- نبات القمح
46	- نبات الشعير
48	3-1 أطوال السوقية للقمح والشعير
48	- نبات القمح
49	- نبات الشعير
50	4-1 حساب الوزن قبل التجفيف للقمح والشعير
50	- نبات القمح
51	- نبات الشعير
53	5-1 حساب الوزن بعد التجفيف للقمح والشعير
53	- نبات القمح

54	- نبات الشعير
55	2 - نتائج تجربة النمو في التربة
55	1-2 طول النبات
55	- نبات القمح
56	- نبات الشعير
58	2-2 عدد الأوراق
58	- نبات القمح
59	- نبات الشعير
61	3-2 عدد الافرع
61	- نبات القمح
62	- نبات الشعير
64	4-2 سمك الساق
64	- نبات القمح
65	- نبات الشعير
67	5-2 عدد السلاميات
67	- نبات القمح
68	- نبات الشعير
70	6-2 طول السلمية الثالثة
70	- نبات القمح
71	- نبات الشعير
73	7-2 تاريخ الإشطاء
73	- نبات القمح
74	- نبات الشعير
76	8-2 تاريخ ظهور السنابل
76	- نبات القمح
77	- نبات الشعير

79	9-2 عدد السنابل
79	- نبات القمح
80	- نبات الشعير
82	10-2 عدد البذور في كل سنبله
82	- نبات القمح
83	- نبات الشعير
85	11-2 وزن البذور
85	- نبات القمح
86	- نبات الشعير
88	12-2 وزن 1000 حبة
88	- نبات القمح
89	- نبات الشعير
92	الخلاصة والخاتمة
94	قائمة المراجع
98	الملاحق

المقدمة

المقدمة

تعدّ الحبوب من أهمّ الدعائم الأساسية للأمن الغذائي العالمي، إذ لعبت دورًا محوريًا في تغذية الإنسان عبر مختلف الحقب التاريخية، ولا سيما في دول العالم الثالث، حيث تمثل الحبوب ومشتقاتها المصدر الرئيس للغذاء. وقد شكّلت هذه المحاصيل، منذ أقدم العصور، أساس النظام الغذائي للأمم، كما ارتبطت زراعتها بنشأة الحضارات الإنسانية وتطورها (وصفي زكريا، 2015).

وتكمن أهمية الحبوب في جملة من الخصائص الغذائية والبيئية التي أسهمت في تعزيز مكانتها كمصدر غذائي استراتيجي. فمن الناحية الغذائية، تتميز الحبوب باحتوائها على مكونات أساسية متكاملة، تشمل البروتينات (كالغلوتين والألبومين)، والكربوهيدرات (مثل النشاء والسكريات البسيطة والمعقدة)، إضافة إلى الدهون وبعض الزيوت الطيارة، فضلًا عن احتوائها على عناصر معدنية مهمة كفوسفات الكالسيوم والمنغنيز وأملاح البوتاسيوم. كما تتصف محاصيل الحبوب بقدرتها العالية على التكيف مع ظروف بيئية ومناخية متنوعة، الأمر الذي يفسّر انتشار زراعتها في مناطق جغرافية واسعة، مثل زراعة القمح في كلّ من أوروبا وإفريقيا. علاوة على ذلك، تمتاز الحبوب بكثافة غذائية مرتفعة مقارنة بحجمها، مما يجعلها مصدرًا فعالًا للطاقة والعناصر الضرورية للإنسان (الراوي، 2018).

ويُعدّ القمح، بنوعيه الصلب واللين، إلى جانب الشعير، من أقدم محاصيل الحبوب التي عرفها الإنسان، خاصة في منطقة حوض البحر الأبيض المتوسط، حيث يحتل القمح الصلب مكانة متقدمة من حيث الأهمية الاقتصادية والغذائية. وقد حظي القمح بأهمية خاصة منذ العصور القديمة، إذ استُخدم كغذاء رئيسي، كما أضفى عليه قدماء المصريين طابعًا رمزيًا، فاحتفظوا به ضمن مقتنياتهم الجنائزية، في دلالة على قيمته الحيوية. ولا يزال القمح إلى يومنا هذا يشكّل ركيزة أساسية في التغذية البشرية، نظرًا لاحتوائه على مزيج متكامل من العناصر الغذائية، بما في ذلك البروتينات والكربوهيدرات والألياف الغذائية والأملاح المعدنية، مما يجعله عنصرًا أساسيًا في التغذية الصحية ومجالات الطب البديل (وصفي زكريا، 2015).

وفي هذا السياق، تبرز عشبة القمح كأحد المصادر النباتية ذات القيمة الغذائية العالية، إذ تحتوي على تركيزات مرتفعة من الفيتامينات، خاصة فيتامين (C)، بالإضافة إلى الأحماض الأمينية الأساسية التي يعجز الجسم عن تصنيعها. كما تتميز بغناها بمضادات الأكسدة التي تؤدي دورًا مهمًا في حماية الخلايا من الإجهاد التأكسدي، وتعزيز وظائف الجهاز العصبي، والحفاظ على صحة الجلد والشرابين. وتشير الدراسات إلى أن تركيز العناصر الغذائية في عشبة القمح يفوق ما هو موجود في حبة القمح الناضجة، فضلًا عن احتوائها على مركبات حيوية أخرى تساهم في دعم النمو الحيوي للنبات (جميل، 2003).

المقدمة

بناءً على المعطيات السابقة، ونظراً للتحديات البيئية التي تواجه إنتاجية هذه المحاصيل الاستراتيجية وخاصة ما يتعلق منها بجودة مياه الري وخصائصها الكيميائية، تتحدد أهداف هذه الدراسة في النقاط الأساسية التالية:

- دراسة كفاءة تعديل الـ pH: تحديد مدى تأثير تغيير درجة حموضة مياه الري على "تيسر" العناصر الغذائية في التربة والمحلول، وتقليل الأثر السلبي للأملح وعسرة المياه في المحلول المائي.
 - قياس الاستجابة الفسيولوجية للحبوب: مراقبة وتحليل تأثير المياه المعالجة (المعدلة حموضتها) على مؤشرات الإنبات، وطول البادرة، والكتلة الحيوية لمحصول الحبوب المختار (القمح والشعير).
 - تحديد الدرجة المثلى للحموضة: الوصول إلى أفضل مدى لدرجة الحموضة (pH) الذي يحقق توازناً مثالياً بين جودة المياه وأقصى كفاءة لنمو النبات وتطوره تحت ظروف إجهاد الحموضة.
- ولتحقيق هذه الأهداف والإحاطة بكافة جوانب الموضوع، تم تقسيم هذه المذكرة إلى أربعة فصول أساسية وفق الهيكلية التالية:

- الفصل الأول : دراسة بيولوجية وزراعية لنباتي القمح والشعير (استعراض الخصائص النباتية والأهمية الزراعية للمحصولين المستهدفين).
- الفصل الثاني: الحموضة والإجهادات اللاحيوية وتأثيرها على النبات (الخلفية النظرية حول تأثير الـ pH والإجهادات البيئية على نمو المحاصيل).
- الفصل الثالث: المواد وطرق البحث (الجانب التطبيقي والتجريبي الذي يوضح الأدوات، المعاملات، وطرق القياس المتبعة).
- الفصل الرابع: النتائج والمناقشة (عرض النتائج التي تم التوصل إليها وتحليلها علمياً ومقارنتها بالدراسات السابقة).

إشكالية البحث :

تتمثل المشكلة البحثية في التناقض القائم بين الاحتياجات المائية المتزايدة لمحاصيل الحبوب الاستراتيجية (كالقمح والشعير)، وبين التدهور النوعي لمصادر المياه المتاحة في المناطق الجافة وشبه الجافة. حيث يضطر المزارعون لاستخدام مياه الآبار الجوفية التي تتميز بملوحة مرتفعة ، بالإضافة إلى ارتفاع درجة حموضتها وقلويتها ($pH > 7.5$)؛ مما يؤدي إلى تعقيد العناصر الغذائية الأساسية واحتباسها في التربة، ويعيق البذور عن امتصاص الماء بكفاءة محدثاً إجهاداً أسموزياً يؤثر سلباً على مرحلتي الإنبات وتكوين البادرات. وفي ظل الارتفاع الباهظ لتكاليف تقنيات التحلية التقليدية، تبرز الحاجة إلى حلول كيميائية وفيزيائية بديلة، ميسورة التكلفة، مثل تعديل درجة حموضة المياه لتخفيف الأثر السمي للأملاح. (Shabala, 2017)

ومن هذا المنطلق، تتبلور مشكلة الدراسة في طرح السؤال الجوهرى التالي:

إلى أي مدى يمكن لعملية تعديل درجة حموضة مياه الري أن تساهم في تحسين الخصائص الكيميائية للمياه، وهل ينعكس ذلك إيجاباً وبشكل معنوي على مؤشرات الإنبات والنمو الخضري لمحاصيل الحبوب كالقمح والشعير؟

فرضيات البحث :

1. الفرضية المتعلقة بجودة المياه:

"يُتوقع أن يؤدي خفض درجة حموضة مياه الري (pH) إلى زيادة ذوبان العناصر الصغرى والكبرى المرتبطة بمركبات العسرة، مما يقلل من ترسيب الأملاح في شبكة الري وفي محيط الجذور."

2. الفرضية المتعلقة بالإنبات والنمو الأولي:

"هناك علاقة طردية بين ضبط حموضة المياه وتحسن معدلات سرعة ونسبة إنبات بذور الحبوب، حيث تسهم المياه المعدلة في اختراق غلاف البذرة وتنشيط الإنزيمات الهاضمة للمدخرات الغذائية بشكل أفضل من المياه القلوية العسرة."

3. الفرضية المتعلقة بالامتصاص والعناصر الغذائية:

"يؤدي الري بمياه ذات pH مائل للحموضة (بين 5.5 و 6.5) إلى تحسين كفاءة امتصاص الجذور للعناصر الغذائية (مثل الفسفور والحديد)، مما ينعكس إيجاباً على المحتوى الكلوروفيلي والكتلة الخضريّة للنبات."

الجزء النظري

الفصل الأول :

نبات القمح و

الشعير

1 - عموميات حول نباتي القمح والشعير :

القمح نبات عشبي سنوي من الفصيلة النجيلية، يستعمل حب كغذاء للبشر، وسوقه الجافة أي تبنة لعلف الحيوانات. وهو من أهم المحاصيل الزراعية في العالم وأقدمها. ويرجح بأنه نشأ في العراق ثم إنتشرفي بقية أنحاء العالم. وعثر على حبوبه في بعض أهرامات مصر التي بنيت قبل الميلاد ب 3360 سنة (الحسن، 2019)

يعتبر القمح *Triticums Spp* المحصول الأكثر أهمية من الناحية الاقتصادية والمحصول الاستراتيجي الأول لمعظم سكان العالم. فهو يزود العالم ب 55% من إجمالي الكربوهيدرات 3% من السعرات الحرارية الغذائية المستهلكة كما يحتل 71% من المساحة المزروعة. مؤمنا الغذاء لأكثر من بليون نسمة أي حوالي 3% من عدد السكان (منظمة الأغذية والزراعة [الفاو]، 2022) .

للقمح أسماء مختلفة في البلاد العربية، ففي مصر و دمشق وبقية بلاد الشام (لبنان وفلسطين والأردن) قمح وفي شمال بلاد الشام و العراق حنطة، وفي الحجاز واليمن بر و طعام، وبالفرنسية Blé والإنجليزية Wheat واللاتينية *Triticum* (وصفي زكريا، 2015) .

الشعير هو نبات سنوي ينتمي إلى فصيلة الحبوب النجيلية أو أحاديات الفلقة، حيث ينتمي إلى الفصيلة العشبية والجنس *Hordeum* الذي يضم 31 نوعا مختلفًا. ومن بين هذه الأنواع، نجد *Hordeum vulgare* L الأكثر شيوعًا، حيث يُزرع على نطاق واسع.

يتميز الشعير الشائع بكونه نوعا ذاتي التلقيح ويُعتبر من بين أوائل المحاصيل التي تم ترويجها للإستزراع، حيث تعود تاريخ زراعته إلى ما يقرب من 10000 عام في منطقة الهلال الخصيب في الشرق الأوسط (Baik et al., 2008) ويحتل المرتبة الرابعة عالميا من حيث المساحة المزروعة والإنتاج بعد القمح والأرز والذرة (Rosemary et al., 2008) يتم زراعته في مناطق متنوعة تمتد من إثيوبيا إلى النرويج، ومن الأرجنتين إلى كندا، ومن اليابان إلى نيوزيلندا. وفقا لتقديرات منظمة الأغذية والزراعة العالمية يقدر انتاجه حوالي 141 مليون طن (Faostat, 2018)، وذلك لإستخدامه في العديد من الصناعات، وفي التغذية الحيوانية والبشرية في بعض البلدان . (Newton et al. 2011).

2- الأصل الجغرافي والوراثي للقمح والشعير:

تشير الدراسات إلى أن منطقة الشرق الأدنى، وخاصة الهلال الخصيب (فلسطين، الأردن، سوريا، العراق، تركيا، وإيران)، تُعد الموطن التاريخي الأول لتدجين القمح والشعير، حيث وُجدت أقدم البقايا الأثرية لهذه المحاصيل. ويؤكد التنوع الكبير للأقارب البرية، إلى جانب المعطيات الجزيئية وتحليل الحمض النووي، أن هذه المنطقة تمثل المركز الأساسي لنشوء الحبوب من قبيلة Triticaceae منذ حوالي 10,000 سنة (Feuillet et al., 2008). كما أشار Hillman et al. (2001) إلى أن تدجين القمح تم في مواقع رئيسية ضمن الهلال الخصيب، منها تل أبو هريرة في سوريا، أريحا في فلسطين، وتشاينونو في تركيا، مع ترجيح أن منطقة أبو هريرة تُعد من أهم المراكز الأصلية لقمحي الإينكورن والإيمر.

كما اقترح Mackay (2005) وجود عدة مراكز محتملة لأصل القمح وتوزعه تشمل الشرق الأوسط، الشرق الأدنى وشمال إفريقيا، في حين يُلاحظ أن الشعير البري ينتشر أساساً في نطاق الهلال الخصيب مع امتدادات أقل نحو مناطق أخرى.

من الناحية الوراثية، ينتمي القمح إلى جنس *Triticum L* ويتميز بتنوع وراثي معقد، ويُصنف إلى ثلاث مجموعات كروموزومية رئيسية: ثنائية الصيغة (diploïdes) وتشمل الأنواع البدائية مثل *T. monococcum* ، ورباعية الصيغة (tetraploïdes) الناتجة عن تهجين طبيعي بين أنواع ثنائية الصيغة مثل *T. durum* و *T. dicoccoides*، وسداسية الصيغة (hexaploïdes) وهي الأكثر تطوراً مثل *T. aestivum* والتي نشأت من تهجين بين مجموعات ثنائية ورباعية الصيغة الصبغية

أما الشعير *Hordeum vulgare L* فينتمي إلى قبيلة Triticaceae ضمن عائلة Poaceae ، وهو نبات ثنائي الصيغة الصبغية ($2n=14$) ذاتي التزاوج، رغم وجود أنواع أخرى من نفس الجنس بتراكيب صبغية مختلفة. ويتميز الشعير بجينوم كبير ومنظم جيداً من الناحية الوراثية، مع وجود تماثل كروموسومي مع أنواع أخرى من نفس العائلة، حيث تقابل كروموسوماته السبعة (1H-7H) نظيراتها في باقي أنواع Triticaceae (Arumuganathan & Earle, 1991; Von Wettstein-Knowles, 1992; Linde-Laursen et al., 1997).



الوثيقة 1 مركز تدجين الحبوب الهلال الخصيب (MacKey, 2005)

3- التصنيف النباتي للقمح و الشعير:

حسب Kihal (1979)، يُصنّف القمح (*Triticum* L.) وراثياً إلى ثلاث مجموعات حسب الصيغة الصبغية: قمح ثنائي ($n=142$ ، مثل *T. monococcum*)، قمح رباعي ($n=282$ ، مثل *T. durum*)، وقلح سداسي ($n=422$ ، مثل *T. aestivum*)، ويعتمد هذا التصنيف على عدد المجموعات الكروموزومية وتطورها الوراثي.

Embranchement: spermaphytes	شعبة : النباتات الزهرية
Sous embranchement:Angiospermes	تحت شعبة: كاسيات البذور
Classes: Monocotylédones	صف: أحاديات الفلقة
Ordre: Glumiflorales	رتبة: القنبليات
Famille : Graminacées	عائلة: النجيليات
Sous Famille: Poacées	تحت العائلة: الكلثيات
Genre: Triticum	جنس: القمح

الوثيقة 02 التصنيف النباتي للقمح (كيال, 1979)

ينتمي نبات الشعير إلى النباتات الزهرية ، مغطاة البذور ، العائلة النجيلية ، من أحاديات الفلقة ويصنف الشعير حسب (APG III , 2009) كما يلي:

Clade	Spermatophytae
Sub/Div	Angiospermeae
Classe	Monocotyledoneae
S/ Classe	Monocotyledoneae basal
Ordre	Poales
famille	Poaceae
Genre	Hordeum
Espèce	Hordeum vulgare L
variété	orge soufi

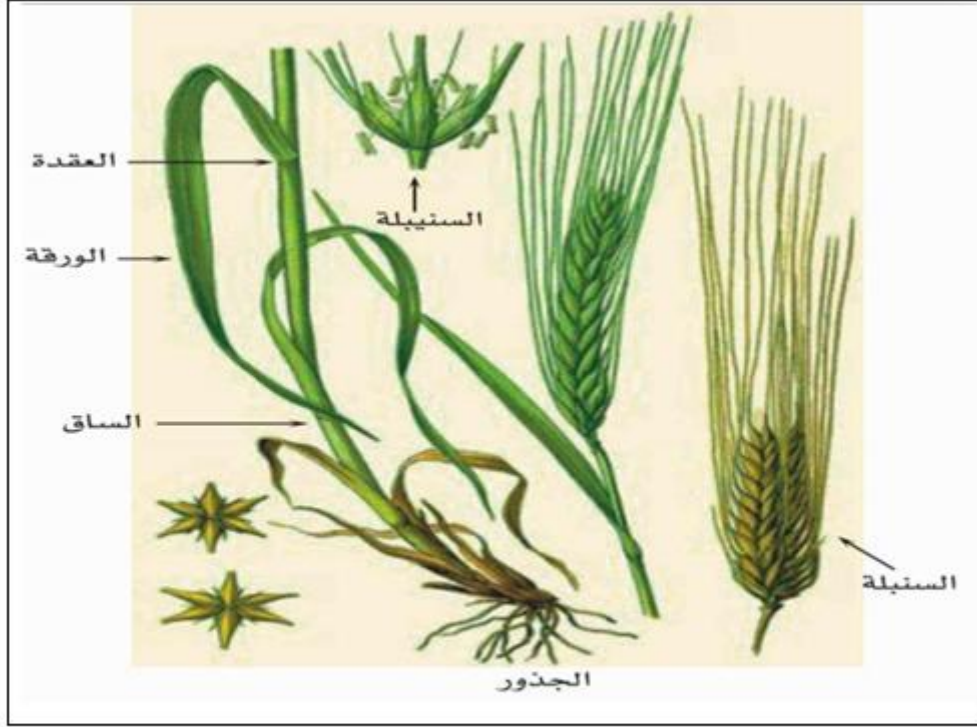
الوثيقة 03 التصنيف النباتي لنبات الشعير (APG III, 2009)

4- الوصف النباتي للقمح والشعير:

يتشابه القمح والشعير في البنية المورفولوجية لكونهما من النجيليات، ويتميز الشعير كنبات سنوي ذاتي التلقيح بأوراق خضراء فاتحة، ووجود لسين متطور وأذينات واضحة، مع تفرعات عشبية كثيفة (Boulal et al., 2007). يتكون الجهاز الخضري من جذور أولية تظهر عند الإنبات ثم تتحول إلى جذور عرضية تاجية أكثر تطوراً وانتشاراً حسب ظروف التربة (BENLARIBI et al., 1990; Kadi, 2007). أما الساق فهي أسطوانية مجوفة تتكون من عقد وسلاميات، ويختلف ارتفاعها وتفرعها حسب الصنف، بينما تتكون الورقة من نصل وغمد ولسين وأذينات، وتعد الأذينات واللسين من أهم الصفات التمييزية بين القمح والشعير، إذ تكون أذينات الشعير كبيرة وملساء مقارنة بالقمح.

أما الجهاز التكاثري فيتمثل في نورة سنبلية مركبة تحمل سنبيلات مرتبة على محور رئيسي، وتختلف حسب الأصناف من حيث عدد الحبوب والسنبيلات. الزهرة تتكون من عصافيتين وأعضاء التذكير والتأنيث، بينما تتكون الحبة من الغلاف والسويداء والجنين، حيث تمثل السويداء الجزء الأكبر التخزيني، ويُعد الجنين الجزء الحيوي الغني بالمواد الغذائية (Deepak et al., 2013; Guiga, 2006).

أما القمح، فيتشابه في البنية العامة مع الشعير، حيث يتكون من جهازين: خضري وجذري. الجذور تشمل جنينية مؤقتة وتاجية دائمة، بينما الساق قائمة مجوفة ذات سلاميات وعقد، والأوراق خضراء مرتبة في صفين وتتكون من نصل وغمد ولسين وأذينات. النورة سنبلية تختلف في الشكل والامتلاء، أما الحبة فهي بيضاوية تتكون من سويداء وغلاف وجنين يختلف نسبياً حسب الأصناف (Soltner, 1980; Feillet, 2000).



الوثيقة 04 أجزاء نبات القمح (زكريا, 2015)

5- أهمية نبات القمح والشعير:

يُعد القمح من أهم المحاصيل الاستراتيجية عالمياً، نظراً لدوره الأساسي في الأمن الغذائي واعتماده كمصدر رئيسي للطاقة والبروتينات، إضافة إلى دخوله في صناعات غذائية وغير غذائية مثل الخبز والعجائن والوقود الحيوي، مما يمنحه قيمة اقتصادية وسياسية كبيرة ترتبط بإدارة الأمن الغذائي والسيادة الوطنية (FAO, 2024; Timmer, 2010). كما يتميز بقيمته الصحية والغذائية لاحتوائه على الكربوهيدرات والبروتينات والألياف

والفيتامينات والمعادن، خاصة عند استهلاك الحبوب الكاملة (Shewry & Hey, 2015).

أما الشعير، فيُعتبر محصولاً مهماً اقتصادياً وغذائياً، حيث يُستخدم أساساً في تغذية الحيوانات وصناعة المالت وبعض المنتجات الغذائية، كما يتميز بقدرته على النمو في البيئات القاسية، مما يجعله مناسباً للمناطق الهامشية ويسهم في استقرار الإنتاج الزراعي (Baik and Ullrich, 2008). ويكتسب أهمية سياسية لارتباطه بالأمن الغذائي ودعم الثروة الحيوانية، خاصة في ظل التغيرات المناخية. كما يتميز بقيمة صحية عالية لاحتوائه على البيتا-جلوكان والألياف ومضادات الأكسدة التي تساعد في خفض الكوليسترول وتنظيم السكر وتحسين صحة الجهاز الهضمي (Newman & Newman, 2006; Ceccarelli et al., 2007).

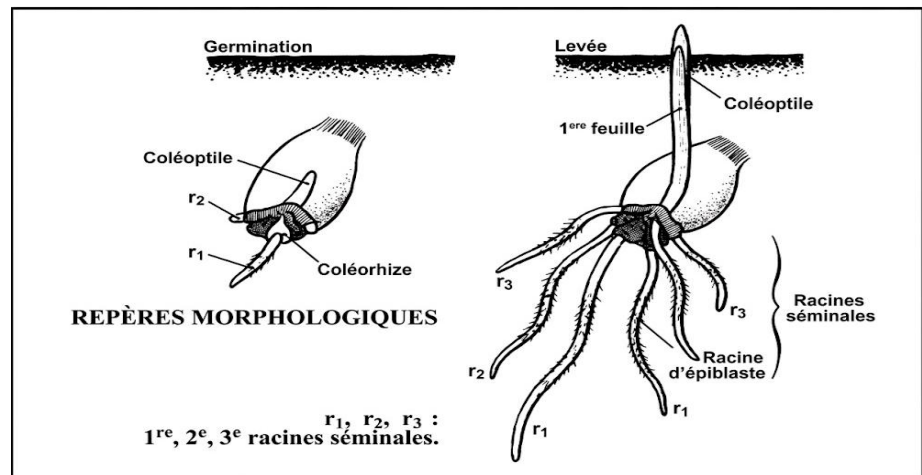
وبشكل عام، يشكل القمح والشعير محاصيل أساسية تجمع بين الأهمية الغذائية والاقتصادية والصحية، مما يجعلها عناصر محورية في الأمن الغذائي العالمي.

6- دورة حياة القمح والشعير :

تمر دورة حياة القمح والشعير بثلاثة أطوار رئيسية: الطور الخضري، الطور التكاثري، وطور النضج. يبدأ الطور الخضري بمرحلة الزرع والإنبات حيث تنتقل البذرة من السكون إلى النشاط بامتصاص الماء، فينمو الجذير أولاً مكوناً الجذور الأولية (الوثيقة 05)، بينما تنمو الريشة داخل غمد الكوليوبتيل (Coléoptile) لحماية الورقة الأولى عند اختراق التربة. (Zaghoulane & Boufenar-Zaghoulane, 2006) تليها مرحلة البروز وبداية الإشتاء حيث تظهر الأوراق تدريجياً ويبدأ تكوين الأشطاء من براعم قاعدية (الوثيقة 06)، مما يرفع من عدد السيقان وبالتالي المردود الزراعي (كيل، 1979). ثم مرحلة الإشتاء إلى بداية الصعود (الوثيقة 07) حيث يتحدد عدد الأشطاء حسب الصنف والظروف البيئية والتغذية. (Soltner, 1990)

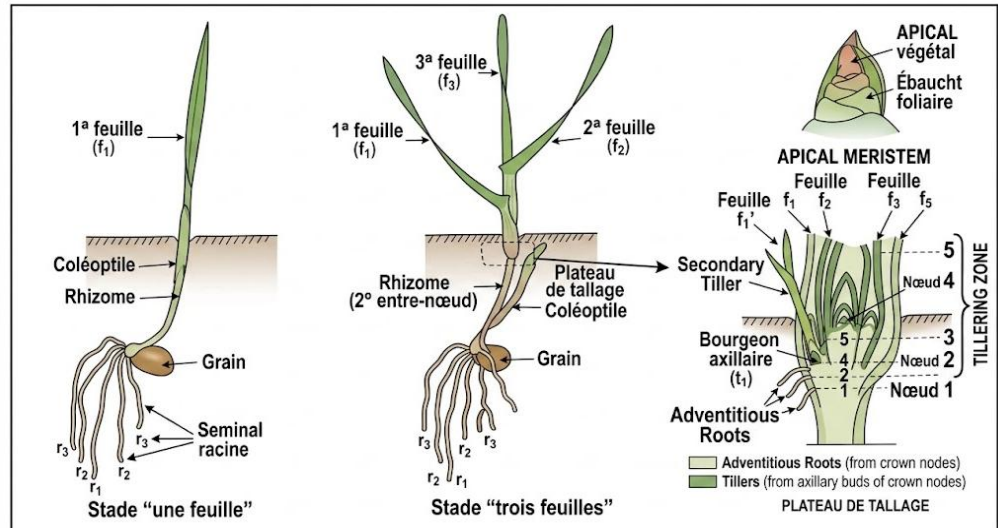
أما الطور التكاثري (الوثيقة 08) فيبدأ بمرحلة الصعود-الانتفاخ التي تتميز باستطالة السلاميات وتكوين السنبلة، وتعد حساسة جداً للإجهادات البيئية وتأثيرها على عدد السنابل. (Soltner, 1980; Fisher et al., 1998) تليها مرحلة الإسبال-الإزهار حيث يظهر السنبلة وتكتمل عملية الإخصاب خلال مدة تقارب 30 يوماً (Bahloul et al., 2005).

ويبدأ طور النضج بعد الإخصاب، حيث تنتقل المواد الغذائية إلى الحبوب. وينقسم حسب Zadoks et al. (1974) إلى النضج اللبني (مرحلة امتلاء الحبوب مع انخفاض تدريجي في الماء من نحو 85% إلى 38%)، ثم النضج العجيني بمراحله الثلاث (الطري، الطري الصلب، الصلب) مع انخفاض الرطوبة تدريجياً، وأخيراً النضج التام حيث تصل نسبة الماء إلى 12-15% وتتوقف عملية الامتلاء وتصبح الحبة صلبة، وتستغرق الفترة من الإزهار إلى النضج التام حوالي 30-40 يوماً في المناطق الجافة (الوثيقة 09).

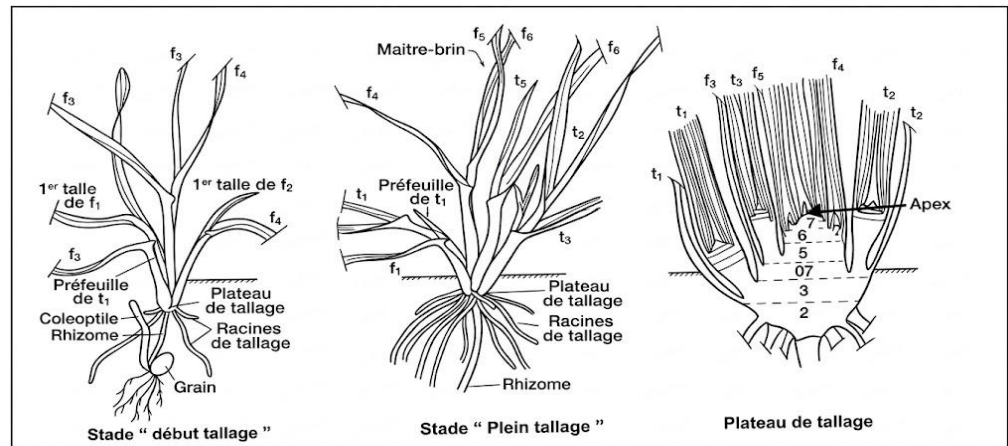


الوثيقة 05 مرحلة الزرع والإنبات

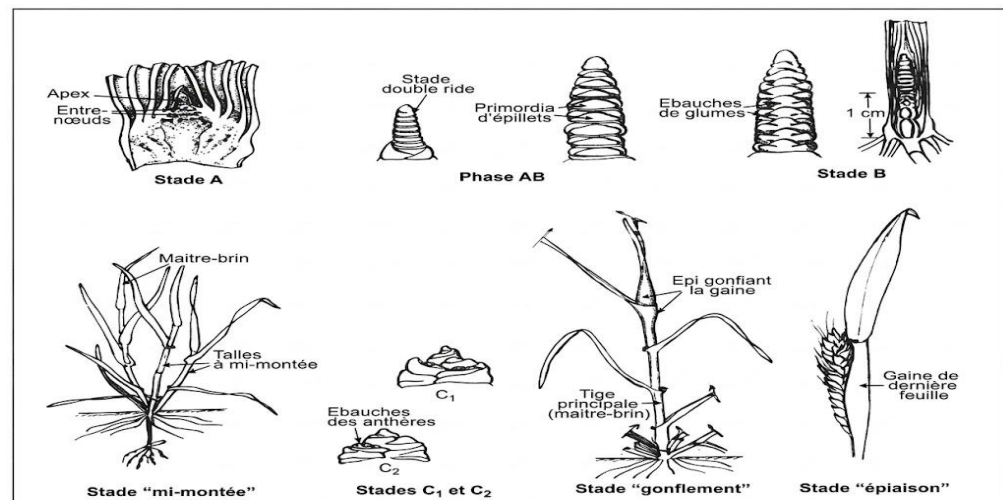
الفصل الأول : نبات القمح والشعير



الوثيقة 06: مرحلة بداية الإشتاء .



الوثيقة 07 : مرحلة بداية الإشتاء – بداية الصعود .



الوثيقة 08 : الطور التكاثري .



الوثيقة 09 تبين مراحل تشكل الحبة والنضج

7 - الظروف البيئية الملائمة لنمو القمح والشعير :

تتأثر زراعة القمح بمجموعة من العوامل البيئية أهمها الحرارة، حيث تبلغ الدرجة المثلى لنموه حوالي 25°م، بينما يؤدي ارتفاعها فوق 28-32°م إلى إجهاد حراري قد يضر بمراحل النمو خاصة الإنبات والإزهار. كما يحتاج القمح إلى توفر الرطوبة بشكل منتظم، إذ يُعد الماء عاملاً محدداً لنموه خاصة في المناطق الجافة (Soltner, 1988). وتُفضل زراعته في الترب الطينية الخصبة جيدة الصرف والغنية بالعناصر الغذائية، بينما يتأثر سلباً بالترب المالحة أو الرديئة الصرف (Kribaa et al., 2001) كما تلعب الإضاءة دوراً مهماً في تعزيز التقريع وزيادة المادة الجافة، في حين يؤدي التظليل إلى انخفاض النمو وامتصاص العناصر الغذائية، إضافة إلى تأثر فترة الإزهار بطول النهار. كما يتعرض القمح لعدة آفات، أبرزها الأمراض الفطرية مثل الأصداء، والتي تُعد من أخطر الأمراض وتُكافح غالباً باستعمال الأصناف المقاومة (بوجنية، 2009). أما الشعير، فيتميز بقدرته على التكيف مع ظروف بيئية متنوعة، إذ ينمو بشكل أفضل في الأجواء الباردة والجافة، مع إمكانية تحمله للحرارة والبرودة الشديدة (Hockett, 1990; Moule, 1980) وتبدأ عملية إنباته عند حوالي 5°م، بينما تتراوح درجات الحرارة المثلى للنمو بين 15 و20°م. ويُعد الماء ضرورياً لعمليات البناء الضوئي ونقل العناصر المعدنية (Soltner, 1990) كما يحتاج إلى إضاءة كافية لأنه من نباتات النهار الطويل التي تتطلب حوالي 14 ساعة ضوء للوصول إلى الإزهار وتكوين البذور (كذلك، 2000). أما من حيث التربة، فينجح الشعير في الأراضي المتوسطة الخصوبة ويتحمل الملوحة والقلوية بدرجة أكبر من القمح، لكنه يتأثر في الترب الثقيلة والحامضية، مع أفضل نمو عند pH يتراوح بين 7 و8 (أزهار، 2017).

8 - الآفات والأمراض :

يتعرض الشعير لعدة أمراض فطرية وبكتيرية وفيروسية وحشرية، من أهمها الأمراض الفطرية مثل صدأ الأوراق الذي يسببه *Puccinia hordei* ويظهر على شكل بثرات صفراء إلى برتقالية، والبياض الدقيقي الناتج عن *Erysiphe graminis* الذي يبدأ على السطح العلوي للأوراق. كما يصاب بالتفحم السائب (*Ustilago nuda*) الذي يؤدي إلى تحول السنبله إلى مسحوق أسود عند الطرد، والتفحم المغطى (*Tilletia spp.*) الذي يحول الحبوب إلى كتل سوداء ذات رائحة كريهة تشبه السمك المتعفن. إضافة إلى ذلك، يتعرض القمح والشعير لآفات حشرية مثل كريبوسار الحبوب وبقة الحبوب والمن والدودة البيضاء (INPV, 2013). وتعتمد مكافحة هذه الأمراض على مجموعة من الإجراءات الوقائية والعلاجية، أهمها استخدام المبيدات الكيميائية، إزالة وحرق النباتات المصابة، تحسين التسميد، ومعالجة وتعقيم البذور قبل الزراعة باستعمال مبيدات مرخصة (بغريز، 2019).

الفصل الثاني :

الحموضة والإجهادات

اللاحيوية وتأثيرها على النبات

1- مفهوم الحموضة أو الرقم الهيدروجيني (pH)

تُعدّ درجة الحموضة من المفاهيم الأساسية في الكيمياء والعلوم الحياتية، إذ تُستخدم لتحديد مدى حموضة أو قلوية مادة معينة. وعلى الرغم من أن المصطلح يبدو علميًا بحثًا، فإنه يلعب دورًا محوريًا في حياتنا اليومية في مجالات الغذاء والزراعة والصناعة والطب (Atkins & de Paula, 2014).

1-1: تعريف درجة الحموضة :

درجة الحموضة أو الأس الهيدروجيني (pH) هي مقياس يستخدم لتحديد تركيز أيونات الهيدروجين (H^+) في محلول ما. ببساطة، هي وسيلة لمعرفة إن كانت المادة حمضية، متعادلة، أو قلوية (قاعدية) .

يصنف الـ PH عادة من 0 إلى 14 : (Atkins & de Paula, 2014)

التصنيف	درجة الحموضة PH
المادة حمضية	0 ~ 6.9
المادة معتدلة	7
المادة قلوية (قاعدية)	7.1 ~ 14

الوثيقة 10 تصنيف درجة الحموضة

كل درجة على مقياس pH تمثل فرقًا بعشرة أضعاف في تركيز أيونات الهيدروجين، أي أن محلولًا بدرجة حموضة 5 أكثر حموضة عشر مرات من محلول بدرجة 6 (Skoog et al., 2014) .

1-2: طرق قياس درجة الحموضة :

هناك عدة طرق لقياس درجة الحموضة، تختلف في الدقة حسب المجال والاستخدام:

أ- ورق دوار الشمس: (Litmus Paper)

طريقة بسيطة وشائعة، حيث يتغير لون الورق عند وضعه في محلول ما. اللون الأحمر يدل على

الحموضة، بينما الأزرق يدل على القلوية. (Silberberg & Amateis, 2018)

مؤشرات الحموضة: (pH Indicators)

وهي مواد كيميائية يتغير لونها حسب درجة الحموضة ، مثل الفينولفثالين أو الميثيل أورانج

(Silberberg & Amateis, 2018)

ب- أجهزة قياس إلكترونية: (PHmeters)

تُستخدم في المختبرات والمصانع، وتعطي قراءة دقيقة جدًا. الجهاز يحتوي على قطب حساس لأيونات

الهيدروجين يقيس فرق الجهد الكهربائي في المحلول، ثم يحولها إلى قيمة pH (Skoog et al., 2014) .

1-3 المواد الحمضية والقلوية – أمثلة تطبيقية :

توضح الوثيقة 11 درجات الحموضة لبعض المواد الشائعة حسب (Skoog et al., 2014) ,

(Silberberg & Amateis, 2018) :

المادة	درجة الحموضة PH	التصنيف
حمض المعدة	1.0 – 2.0	حمضي جداً
عصير الليمون	≈ 2.0	حمضي جداً
الخل	≈ 3.0	حمضي
القهوة	≈ 5.0	حمضي خفيف
الماء النقي	7.0	متعادل
دم الإنسان	7.35 – 7.45	قلوي خفيف
بيكربونات الصوديوم	≈ 8.0	قلوي خفيف
الأمونيا	≈ 11.0	قلوي قوي

1-4: درجة الحموضة في الماء :

يعتبر الماء النقي متعادلاً تقريباً عند $pH = 7$ ، أي لا هو حمضي ولا قاعدي.

لكن مياه الشرب العادية قد تختلف قليلاً حسب مصدرها:

*المياه الجوفية تميل لأن تكون قلوية بسبب مرورها عبر الصخور الكلسية.

*المياه المعبأة أو المعدنية تحتوي على معادن تؤثر على درجة الحموضة.

*المياه الفوارة قد تكون أكثر حموضة قليلاً (pH بين 5 و 6) بسبب ذوبان ثاني أكسيد الكربون وتكوّن حمض الكربونيك.

تحافظ منظمة الصحة العالمية (WHO) على أن يكون pH مياه الشرب بين 6.5 و 8.5 لضمان السلامة والطعم

الجيد (World Health Organization [WHO], 2017)

1-5: أهمية درجة الحموضة في جسم الإنسان :

يُعد توازن درجة الحموضة داخل الجسم أمراً حيوياً للحفاظ على الصحة.

*الدم البشري يجب أن يبقى بين 7.35 و 7.45. أي انحراف عن هذا المجال قد يسبب مشاكل صحية خطيرة.

*المعدة تتميز ببيئة شديدة الحموضة لهضم الطعام وقتل البكتيريا (pH يقارب 2) .

*الجلد له درجة حموضة حمضية خفيفة (حوالي 5.5) تساعد على حماية البشرة من الجراثيم.

تؤدي زيادة الحموضة أو القلوية في الجسم إلى اضطراب يسمى (اختلال توازن الأس الهيدروجيني pH Imbalance)، والذي قد يسبب تعبًا أو مشكلات في الكلى أو الجهاز التنفسي. (Silberberg & Amateis, 2018)

1-6: درجة الحموضة في البيئة :

تؤثر درجة الحموضة بشكل كبير على الأنظمة البيئية، خصوصًا المياه والتربة (Brady & Weil, 2008) ، (Doney et al., 2009) :

1 - في المياه:

الكائنات الحية المائية مثل الأسماك والطحالب حساسة جدًا لتغير pH (Brady & Weil, 2008)

*إذا أصبحت المياه أكثر حموضة (مثل مياه الأمطار الحمضية)، فقد يؤدي ذلك إلى موت الكائنات المائية.

*القلوية الزائدة أيضًا قد تعيق امتصاص المعادن الضرورية للنباتات المائية.

2. - في التربة:

*التربة الحمضية تعيق امتصاص النباتات للعناصر الغذائية مثل الكالسيوم والمغنيسيوم.

*التربة القلوية قد تمنع امتصاص الحديد والزنك.

*لهذا السبب يهتم المزارعون بقياس pH التربة بانتظام للحفاظ على نمو صحي للمحاصيل.

1-7: استخدامات درجة الحموضة في الصناعة والزراعة :

درجة الحموضة ليست مفهوماً علمياً فحسب، بل أداة تحكم صناعية دقيقة في العديد من المجالات:

*الصناعات الغذائية : تحديد pH يساعد في حفظ الأطعمة، مثل الزبادي والمخللات والعصائر. (Atkins & de Paula, 2014)

*الأدوية والمستحضرات الطبية : لضمان فعالية واستقرار الأدوية والمحاليل الوريدية. (Silberberg & Amateis, 2018)

*منتجات العناية بالبشرة : يتم ضبط pH لتناسب مع درجة حموضة الجلد الطبيعية. (Ali & Yosipovitch, 2013)

*المسابح: يجب الحفاظ على pH متوازن (بين 7.2 و 7.8) لتجنب تهيج الجلد والعينين. (World Health Organization, 2006)

*المشروبات الغازية : تعتمد في نكهتها وثباتها على التحكم بدرجة الحموضة بدقة. (Ashurst, 2016; Boulton, 2021)

الزراعة: ضبط pH التربة ومياه الري لضمان استيعاب النبات للعناصر الغذائية. (Fageria & Baligar, 2008)

معالجة مياه الصرف: تحتاج إلى ضبط pH قبل الصرف لتجنب الإضرار بالبيئة. (Doney et al., 2009)

1-8: علاقة درجة الحموضة بالصحة والغذاء :

يعتقد بعض الناس أن الأطعمة القلوية تساعد على "توازن حموضة الجسم" وتحسن الصحة، لكن علمياً، الجسم ينظم pH تلقائياً من خلال الكلى والرئتين.

ومع ذلك، تناول أطعمة غنية بالخضروات والفواكه (التي تميل لأن تكون قلوية) يبقى مفيداً للصحة العامة. أما الأطعمة الحمضية مثل اللحوم المصنعة والمشروبات الغازية فقد ترفع الحموضة في البول مؤقتاً، لكنها لا تغير pH الدم فعلياً.

1-9: كيفية ضبط درجة الحموضة :

يمكن تعديل درجة الحموضة في السوائل أو التربة بإضافة مواد معينة حسب (Fageria & Baligar, 2008) :

* **لزيادة الحموضة:** تُضاف مواد مثل حمض الخليك أو الكبريتيك أو الكبريت الزراعي .

* **لزيادة القلوية:** تُضاف مواد مثل بيكربونات الصوديوم أو هيدروكسيد الصوديوم في المنزل، يمكن مثلاً استخدام الخل الأبيض لتنظيف الأسطح الحمضية أو صودا الخبز لمعادلة الروائح القلوية.

1-10: أهمية فهم درجة الحموضة في حياتنا :

من الماء الذي نشربه إلى الطعام الذي نأكله، ومن الجلد إلى البيئة، درجة الحموضة تلعب دوراً خفياً لكنه حاسم. معرفة قيمتها تساعدنا على:

* اختيار منتجات مناسبة للبشرة والمعدة.

* الحفاظ على صحة النباتات والمياه.

* فهم أسباب التلف أو التغيرات في الطعم والرائحة.

* تحسين جودة الصناعات الغذائية والتجميلية.

- إن درجة الحموضة (pH) ليست مجرد رقم، بل مؤشر دقيق على التوازن الكيميائي في كل ما يحيط بنا.

فهي التي تحدد إن كان السائل الذي نشربه صحياً، أو إن كانت التربة صالحة للزراعة، أو إن كانت البشرة متوازنة ومحمية. لذلك، يمكن القول إن فهم مبدأ الحموضة والقلوية يساعد الإنسان على العيش بتناغم مع بيئته، وعلى اتخاذ قرارات صحية وعملية أكثر وعياً. (WHO, 2017)

2 - الحموضة كعامل إجهاد لحيوي على النبات:

يعتبر الإجهاد النباتي من أهم العوامل المحددة للإنتاجية الزراعية على المستوى العالمي. وفي ظل التغيرات المناخية المتسارعة والمتزايدة، أصبح فهم آليات تفاعل النبات مع الظروف البيئية القاسية ضرورة حتمية وملحة لضمان الأمن الغذائي المستدام. (Hasanuzzaman et al., 2013)

2-1. تعريف الإجهاد النباتي (Definition of Plant Stress)

يُعرف الإجهاد النباتي بأنه أي عامل خارجي (حيوي أو لا حيوي) يؤثر سلباً على العمليات الفسيولوجية والكيميائية الحيوية للنبات، مما يؤدي إلى انحراف عن النمو المثالي. (Larcher, W. (20030)

2-2. تصنيف الإجهادات اللاحيوية (Classification of Abiotic Stresses)

تنشأ الإجهادات اللاحيوية من عوامل فيزيائية أو كيميائية في البيئة غير الحية، وتُصنّف كالتالي :

- **الإجهادات الفيزيائية:** تشمل درجة الحرارة المرتفعة أو المنخفضة، الإشعاع الشمسي، الرياح القوية، والجفاف.
- **الإجهادات الكيميائية:** تشمل الملوحة الزائدة، درجة الحموضة المنخفضة أو المرتفعة، والعناصر الغذائية الناقصة أو الزائدة (Larcher, W. (20030)

2-3 الإجهاد الحمضي (Acid Stress) وآثاره على النبات :

يحدث عندما تنخفض درجة حموضة التربة (pH) عن 5.5.

تحرر الألمنيوم السام: عند انخفاض الـ pH، يصبح الألمنيوم (Al^{3+}) ذائباً، مما يوقف استطالة الجذور فوراً.

نقص الكالسيوم والمغنيسيوم: التربة الحمضية غالباً ما تكون فقيرة في العناصر القاعدية الضرورية لبناء الجدر الخلوية والكلوروفيل. (Hasanuzzaman, M., et al. (2013))

2-4. تأثير الحموضة على خصائص التربة وتوفر العناصر :

تتحكم درجة الحموضة في "كيمياء الحياة" تحت الأرض:

تيسر العناصر: الفوسفور يكون في أقصى درجات توفره عند pH يتراوح بين 6.0-7.0. في الوسط الحمضي، يترسب مع الحديد والألمنيوم. (Zhu, J. K 2016).

النشاط الميكروبي: الحموضة العالية تثبط نشاط بكتيريا "الرايزوبيوم" المسؤولة عن تثبيت النيتروجين في البقوليات. (Taiz & Zeiger, 2010).

2-5 . تأثير الحموضة على العمليات الفسيولوجية :

التمثيل الضوئي: تؤدي الحموضة إلى تحلل أصباغ الكلوروفيل وتقليل كفاءة نقل الإلكترونات.

التنفس الخلوي: يضطر النبات لاستهلاك طاقة أكبر (ATP) لضخ أيونات الهيدروجين (H^+) الزائدة خارج الخلايا للحفاظ على التوازن الداخلي (Farooq, M., et al. (2009))

2-6 . تأثير الحموضة على إنبات البذور والنمو الخضري والجذري :

- إنبات البذور: الحموضة العالية قد تؤدي إلى تآكل غلاف البذرة أو تثبيط الإنزيمات الهاضمة للمواد المخزنة (مثل الأميليز) (Kochian, L. V., et al. (2004))
- المجموع الجذري: يظهر "التقرم الجذري"؛ حيث تصبح الجذور قصيرة، سميكة، وبنية اللون، مما يقلل مساحة امتصاص الماء والسماذ. (Brady, N. C., & Weil, R. R. (2008))
- النمو الخضري: يظهر على شكل اصفرار الأوراق القديمة وتوقف القمة النامية عن التطور.

2-7 آليات التكيف والإدارة (Management Strategy) :

الإضافة الكيميائية: استخدام الحجر الجيري (Liming) لرفع الـ pH أو الجبس الزراعي لتحسين التربة الملحية الصودية. (Fageria, N. K., & Baligar, V. C. (2008))

المكافحة البيولوجية: استنباط أصناف مقاومة للألمنيوم (تفرز أحماضاً عضوية من الجذور لمعادلته).

(Marschner, H. (2012))

2-8: آليات الإدارة والمعالجة الزراعية :

يمكن مكافحة أضرار الحموضة من خلال استراتيجيات متكاملة: (Fageria & Baligar, 2008) (Marschner, 2012)

- التكليل (Liming): استخدام الحجر الجيري ($CaCO_3$) أو الجير الحي (CaO) لرفع الـ pH للتربة.
- الجبس الزراعي ($CaSO_4$): لتحسين التربة الحمضية الغنية بالألومنيوم وتحسين بنيتها.
- إضافة المادة العضوية والكومبوست: تساعد في تنشيط الأحياء الدقيقة المفيدة وتلطيف تقلبات الـ pH.
- استنباط الأصناف المقاومة: عبر التهجين والهندسة الوراثية لإنتاج أصناف تتحمل الألومنيوم السام. (Sasaki et al., 2004)

3- تأثير الحموضة على القمح (*Triticum aestivum*) :

يُعدّ القمح من أهم المحاصيل الغذائية العالمية، إذ يُشكّل العمود الفقري للأمن الغذائي لمليارات البشر. ويتأثر القمح بشدة بتقلبات درجة الحموضة في التربة ومياه الري، مما يُنعكس مباشرةً على الإنتاجية والجودة. (Kochian et al., 2004), (Rengel & Damon, 2008)

3-1: النطاق المثالي لدرجة الحموضة لنمو القمح :

يُفضّل القمح التربة ذات درجة الحموضة بين 6.0 و7.5، وهي النطاق الذي تتوفر فيه معظم العناصر الغذائية بصورة ميسرة. وعند انخفاض pH عن 5.5 أو ارتفاعه عن 8.5 تبدأ تأثيرات سلبية واضحة. (Brady & Weil, 2008), (Kochian et al., 2004)

3-2: تأثير الحموضة المرتفعة على القمح :

تتمثل أبرز آثار الحموضة المرتفعة (pH منخفض) على القمح حسب (Kochian et al., 2004), (Taiz & Zeiger, 2010) في :

- سمية الألومنيوم: يوقف Al^{3+} استطالة الجذور ويُقلل تفرّعها، مما يُضعف امتصاص الماء والمعادن
 - سمية المنغنيز: تتراكم تركيزات عالية في أوراق القمح مما يُسبب بقعاً بنية وتشوهات في الأنسجة
 - نقص الفوسفور: يُشكّل أحد أكبر قيود الإنتاج في الأتربة الحمضية إذ يترسب مع الحديد والألومنيوم
 - ضعف الإنبات وتأخره: تُثبّط الحموضة نشاط إنزيمات الإنبات وتؤدي إلى انبثاق غير منتظم.
 - انخفاض الإنتاجية: قد تُقلّل الحموضة الشديدة الإنتاجية بنسبة 20-50% مقارنةً بالظروف المثالية
- #### 3-3: تأثير القلوية المرتفعة على القمح :

لا تقل التربة القلوية ($pH > 8.0$) ضرراً على القمح حسب (Brady & Weil, 2008), (Nevo & Chen, 2010) في :

- نقص الحديد والزنك: يُسبب الكلوروز الحديدي (اصفرار الأوراق الفتية). [6]
- نقص البورون: يُؤثر على التكاثر والعقد وتكوين الحبوب. [17]
- تأثر نشاط الجذور: في التربة القلوية الغنية بالكربونات تُعاني جذور القمح من صعوبة امتصاص

الأيونات

3-4: الأصناف المقاومة للحموضة في القمح :

استثمر علماء التحسين الوراثي الاختلافات الطبيعية في مقاومة القمح للحموضة حسب (Sasaki et al., 2004), (Rengel & Damon, 2008)

- الأصناف المحملة للألومنيوم: كأصناف البرازيل وأستراليا التي تعتمد على جين TaALMT1 لإفراز حمض

الماليك

- القمح القاسي (Durum wheat): أكثر حساسيةً للألومنيوم من القمح اللين مما يستوجب اهتمامًا بـ pH.
- أدوات التحرير الجيني (CRISPR): تُستخدم حديثًا لتعزيز مقاومة القمح للحموضة.

4- تأثير الحموضة على الشعير (Hordeum vulgare) :

يُعدّ الشعير من أقدم المحاصيل التي زرعها الإنسان وأكثرها تكيّفًا مع البيئات القاسية. ويُستخدم في التغذية البشرية والحيوانية وصناعة البيرة والمالت، ويُزرع في مناطق تتباين درجات حموضة تربتها تباينًا ملحوظًا. (Nevo & Chen, 2010)

4-1: الحموضة المثالية لنمو الشعير :

يتحمل الشعير نطاقًا واسعًا من درجات الحموضة، لكن الأمثل هو بين 6.0 و 7.8. ويُعدّ الشعير أكثر حساسيةً لحموضة التربة مقارنةً بالقمح، وهو من أكثر الحبوب تأثرًا بسمية الألومنيوم. (Delhaize & Ryan, 1995)

4-2: تأثيرات الحموضة المرتفعة على الشعير :

يُعاني الشعير في التربة الحمضية ($\text{pH} < 5.5$) من عدة مشكلات حسب (Delhaize & Ryan, 1995) , (Nevo & Chen, 2010) منها :

- حساسية شديدة لسمية الألومنيوم: تُشير الأبحاث إلى أن الشعير يفتقر إلى آليات إفراز الأحماض العضوية الكافية لمعادلة الألومنيوم في منطقة الجذور، مما يجعله أكثر تضررًا من القمح.
 - تقزم الجذور وموت القمة الجذرية: يؤدي تراكم الألومنيوم والمنغنيز إلى توقف نمو الجذور الأولية وتشوّه البنية الجذرية.
 - اضطراب التغذية المعدنية: نقص الفوسفور والكالسيوم والمغنيسيوم يُضعف نمو الأوراق والسيقان ويُقلل إنتاج الحبوب.
 - انخفاض جودة الحبوب: تؤدي الحموضة الشديدة إلى تراجع محتوى البروتين والكربوهيدرات في الحبوب، مما يُقلل من قيمتها الغذائية والتجارية.
 - زيادة الإصابة بالأمراض الفطرية: تُساعد التربة الحمضية الرطبة على انتشار مسببات أمراض جذور الشعير كـ *Fusarium* و *Rhizoctonia*.
- #### 4-3: تأثيرات القلوية على الشعير :
- رغم تحمّل الشعير للتربة شبه الجافة والملحية نسبيًا، تُؤثر عليه التربة القلوية من خلال:
- ظاهرة الكلوروز القلوي: يُعاني الشعير في التربة القلوية من نقص الحديد والزنك والمنغنيز مما يُسبب اصفرارًا تدريجيًا يبدأ من الأوراق الفتية. (Brady & Weil, 2008)

- انخفاض كفاءة امتصاص البوتاسيوم: يؤثر ذلك على ضغط الخلايا الحراسة وانفتاح الثغور ومن ثمَّ كفاءة التمثيل الضوئي. (Farooq et al., 2009)

4-4: مقارنة بين استجابة القمح والشعير للحموضة

توضح الوثيقة 12 أبرز الفروق بين استجابة المحصولين حسب (Brady & Weil, 2008) , (Nevo & Chen, 2010) , (Delhaize & Ryan, 1995), (Kochian et al., 2004)

المعيار	القمح	الشعير
الأمثل للنمو pH	6.0 – 7.5	6.0 – 7.8
الحساسية للألومنيوم	متوسطة (مع آليات مقاومة)	عالية جداً
التحمل للقلوية	متوسط	متوسط إلى جيد
تأثر النباتات بالحموضة	متوسط	عالٍ
آليات مقاومة طبيعية	إفراز حمض الماليك (TaALMT1)	محدودة
تأثر الجودة الغذائية	انخفاض البروتين والغلوتين	انخفاض البروتين والمالت

5- تأثير الحموضة على النباتات بشكل عام :

- تتباين النباتات في تفاعلها مع درجات الحموضة المختلفة، وهو ما يُعرف بـ"تفضيل (pH Preference) pH". وتُصنَّف النباتات من هذه الناحية حسب (Farooq et al., 2009) , (Larcher, 2003) إلى:
- نباتات محبة للحموضة (Acidophiles): كالتوت الأزرق والكاميليا والأزاليا، تنمو أفضل عند pH بين 4.0 و6.0.
 - نباتات محبة للحيدة (Neutrophiles): كمعظم المحاصيل الغذائية كالقمح والذرة وفول الصويا .
 - نباتات محبة للقلوية (Basiphiles): كالإسبرجس والملفوف والبنجر، تتحمل pH حتى 8.0.

الجزء التطبيقي

الفصل الثالث:

المواد وطرق البحث

1- مكان وزمان إجراء التجربة للنمو والإنبات :

تضمن الشق العملي من هذه الدراسة الفسيولوجية مسارين تجريبيين مستقلين (تجربة النمو وتجربة الإنبات) جرى تنفيذهما في دائرة 'الزّباح' التابعة لولاية الوادي خلال السنة الجامعية 2025 / 2026 وفق التوزيع الزمكاني التالي:

أولاً: تجربة النمو (في الأصص):

ثانياً: تجربة الإنبات (المخبرية)

2- المادة النباتية المستعملة :

أُجريت هذه الدراسة الفسيولوجية المقارنة على صنفين من المحاصيل الإستراتيجية التابعة للفصيلة النجيلية (Poaceae)؛ حيث شملت الدراسة صنفاً من القمح وصنفاً محلياً من الشعير (*Hordeum vulgare L*). وفي يوم 01 / 03 / 2026، جرى إنتقاء البذور المستهدفة بعناية فائقة وفق معايير فيزيائية صارمة، حيث اعتمدت البذور السليمة ظاهرياً والخالية من أي إصابات ميكانيكية أو حشرية، ذات الحجم الكبير والمتجانس لضمان احتفاظها بمخزون غذائي كافٍ يحفز حيوية الجنين وطاقة الإنبات. وجُلِبَت كافة العينات النباتية من مصدرها الرسمي المعتمد.



الوثيقة 13 صورة للقمح والشعير

3- المواد والأجهزة المستعملة :

- حمض فوسفوريك

- قدم قنوية

- ميزان إلكتروني حساس

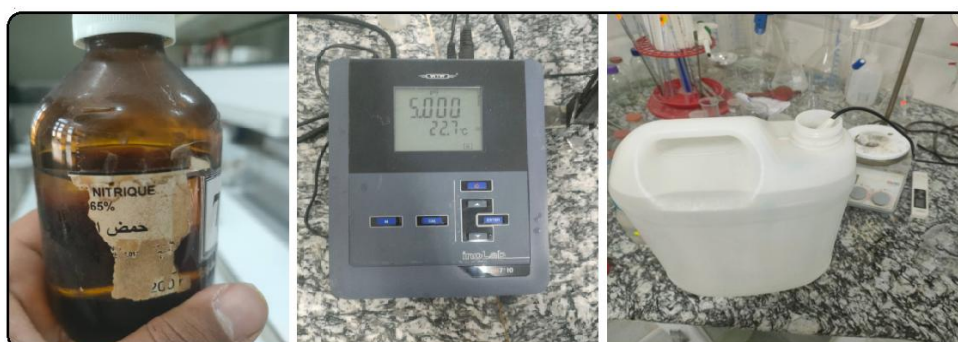
- جهاز PH metre

5- بروتوكول تحضير معاملات مياه الري وضبط الرقم الهيدروجيني :

لغرض تخليق بيئات الإجهاد الحمضي المتدرجة والمطبقة طيلة فترتي الإنبات المخبري والنمو الحقل، أُجريت عملية عيارية حجمية منضبطة لعينات مياه الري المجلوبة. اعتمد حمض النتريك (HNO_3) كمعايير كيميائي أساسي لخفض قيم الرقم الهيدروجيني، حيث أُضيفت حجوم دقيقة ومُقاسة بوحدة المليلتر (mL) لكل لتر من مياه المحطة الأصلية الساخنة (بعد تبريدها).

رمز المعاملة	طبيعة المحلول المائي	الرقم الهيدروجيني المستهدف PH	حجم حمض النتريك المضاف (mL/L)
T0	الشاهد المرجعي	7.7	دون تعديل كيميائي
T1	إجهاد حمضي حاد	5.0	2.3
T2	إجهاد حمضي متوسط	5.5	2.1
T3	إجهاد حمضي خفيف	6.0	1.8
T4	إجهاد حمضي محاذاً للاعتدال	6.5	1.5

توضح الوثيقة 15 أدناه التوصيف الكيميائي النهائي للمعاملات الخمس المعتمدة، والحجوم الدقيقة المضافة من حمض النتريك لضبط كل مستوى مستهدف:



الوثيقة 16 توضح تعديل حموضة ماء السقي بحمض النتريك باستعمال جهاز ph metre

6- تجربة الإنبات

6-1 تحضير البذور وتعقيمها :

بهدف تهيئة مهد إنبات خاوٍ من الممرضات، جرى انتقاء 100 بذرة سليمة ومتجانسة من كلا المحصولين (القمح والشعير)، حيث أُخضعت لعملية فرك ميكانيكي يدوي جاف للتخلص من الشوائب العالقة بالأغلفة الخارجية، تلاها غسيل أولي مكثف باستخدام الماء الجاري.

وعقب ذلك، نُفّذت عملية التعقيم السطحي الكيميائي عبر غمر البذور في محلول هيبوكلوريت الصوديوم (Sodium hypochlorite - ماء جافيل) بتركيز ممدد يعادل 5%، واستمر الغمر لمدة 5 دقائق متواصلة مع التحريك المستمر. ولإزالة الآثار الكيميائية المتبقية للمُعقم وضمان عدم تأثيرها السمي على حيوية الأجنة، غُسلت البذور تتابعاً ولعدة مرات بالماء المقطر المعقم (Distilled water)، ثم تُركت لفترة زمنية محددة لتجف هوائياً في ظروف معقمة قبل البدء في توزيعها على أطباق بيتري لتنفيذ تجربة الإنبات.



الوثيقة 17 توضح تحضير بذور القمح والشعير وتعقيمها

6-2 توزيع البذور في الأطباق :

أُجريت تجربة الإنبات المخبرية على محصولي القمح والشعير باستخدام 20 طبق بيتري، بواقع 10 طبقاً لكل نوع نباتي. شملت التجربة خمس معاملات للحموضة 6.5 ومعاملة شاهد =مع أربعة مكررات لكل معاملة. احتوى كل طبق على 25 بذرة موزعة بانتظام فوق مناديل ورقية معقمة، وحُفظت الأطباق في ظروف مخبرية محكمة عند درجة حرارة 20°م. وتمت متابعة الإنبات يومياً لمدة تسعة أيام مع المحافظة على رطوبة الوسط بواسطة محاليل المعاملات المختلفة، بهدف تقييم تأثير الإجهاد الحمضي في حركية ونسبة الإنبات لدى القمح والشعير.



الوثيقة 18 تمثل تتبع عملية انتاش البذور خلال فترة الانبات مع القياس للمعايير المورفولوجية

3-6 المعايير المورفولوجية المدروسة :

أ- سرعة الإنبات :

تم تقدير سرعة الإنبات (Germination Speed / Rate) عبر تتبع ومراقبة الحركية الزمنية لظهور الجذر الابتدائي؛ حيث بدأت عمليات الرصد والمتابعة الدورية بعد مرور 24 ساعة كاملة من وضع البذور في مهد الإنبات (بداية التحفيز المائي)، واستمرت القراءات اليومية المنتظمة بذات التوقيت حتى الوصول إلى مرحلة الثبات المورفولوجي ونهاية الإنبات الكامل للتجربة، وجرى تدوين البيانات العددية المستحصلة يومياً فوراً في سجل التجربة لحساب المؤشر رياضياً.



صورة 20 لنمو البادرات للقمح

صورة 19 لنمو البادرات للشعير

أ- حساب طول الجذير والسويقة :

تمت متابعة التطور المورفولوجي الأولي للبادرات من خلال اختيار انتقائي لثلاث عينات ممتازة ومتجانسة النمو من كل طبق بيتري (Petri dish)؛ لضمان تمثيل القياسات للنمو النموذجي تحت ظروف المعاملة. وجرى قياس الارتفاع الطولي لكل من الجذير الابتدائي (Radicle length) والسويقة فوق الفلقية (Coleoptile/Plumule length) بشكل منفصل لكل بادرة باستخدام القدم القنوية الورنية (Vernier Caliper)، وقُدرت الأطوال المستحصلة بوحدة المليمتر (mm)، ثم دُوّنت القيم الناتجة فوراً في سجل التجربة.



الوثيقة 21 توضح عملية قياس طول الجذير والسويقة لبادرات القمح والشعير

ب- قياس وزن البادرات قبل التجفيف وبعد التجفيف للقمح والشعير :

عند نهاية تجربة الإنبات التي استمرت لمدة عشرة أيام متواصلة، جرى اختيار انتقائي لثلاث نباتات متجانسة النمو من كل طبق بيتري (Petri dish)، حيث وُزنت فوراً باستخدام ميزان تحليلي حساس لتقدير الكتلة الغضة الابتدائية (الوزن الرطب). عقب ذلك، نُقلت العينات إلى الفرن الحراري عند درجة حرارة 70° م بهدف تبخير المياه؛ ولضمان كفاءة التجفيف التام، أُجريت عملية التجفيف على مرحلتين متتاليتين يفصل بينهما إعادة الوزن، وذلك للتحقق من ثبات الكتلة الحيوية الجافة (Constant dry weight) وخلوها تماماً من أي رطوبة متبقية، وبعد مرور 24 ساعة من الدورة الثانية للتجفيف، دُوّنت القيم الكتليّة النهائية فوراً في سجل التجربة.



الوثيقة 22 قياس وزن البادرات قبل التجفيف وبعد التجفيف للقمح والشعير

7- تجربة النمو(الزراع):

7-1 المياه الري المستعملة وخصائصها :

جُمعت عينات مياه الري الساخنة، التي بلغت درجة حرارتها عند الجمع نحو 6 محطة نزع المعادن وتصفية المياه "المجاهد قديري عثمان" الكائنة بحي 19 مارس ببلدية الوادي، وذلك باستخدام أربعة دلاء بلاستيكية خاملة كيميائياً، سعة كل منها 20 لتراً. وبعد نقل العينات إلى المختبر، تُركت لتبرد تدريجياً حتى بلغت درجة حرارة الغرفة، بهدف ضمان استقرار خصائصها الفيزيائية قبل الشروع في المعالجات التجريبية.

إثر ذلك، أُخضعت العينات لعملية تعديل كيميائي لدرجة الحموضة عبر الإضافة التدريجية المنضبطة بحمض النتريك الممدد (HNO_3) لتخليق أربعة مستويات متدرجة من الإجهاد الحمضي المستهدف مع الإبقاء على عينة مياه المحطة الأصلية كمعاملة شاهد مرجعية (Control) عند قيمتها الطبيعية البالغة 7.7 دون أي تعديل كيميائي. وبالتوازي مع حركية التعديل الهيدروجيني، تم رصد وقياس قيم الناقلية الكهربائية (EC) ومعدلات الملوحة الكلية الموافقة لكل مستوى حموضة (pH) باستخدام أجهزة القياس المخبرية الرقمية لتوصيف الخصائص الهيدروكيميائية النهائية لمياه الري.

7-2 طريقة الزراع :

7-2-1 تحضير بيئة النمو والأصص المستعملة:

نُفذت تجربة الزراعة في أصص بلاستيكية (أوعية نمو) ذات أبعاد هندسية منتظمة؛ حيث جرى تجهيزها بعناية عبر قصها وتغليفها داخلياً وخارجياً بغلاف بلاستيكي عازل ذو لون أسود لمنع نفاذ الضوء وتطور الطحالب، كما أُحدثت ثقبون منتظمة في قاع الأوعية لضمان كفاءة الصرف المائي الحر وتجنب حدوث اختناق للجذور (Root asphyxia).

عُبئت الأصص بتربة زراعية نموذجية جُلِبَت حَقْلِيّاً من منطقة 'الرّباح' (دائرة الرّباح، ولاية الوادي)، حيث أُخضعت التربة مسبقاً لعملية غربلة ميكانيكية وتنقية فيزيائية دقيقة للتخلص تماماً من الحجارة العالقة، الحصى، وبقايا الأعشاب الضارة والمخلفات العضوية السابقة. ولضمان التجانس الفيزيائي والكيميائي التام لبيئة النمو داخل جميع الأصص المستعملة واستبعاد أي تباين في قوام التربة، خُلِطَت الكتلة الترابية الكلية بعناية فائقة قبل بدء عملية التعبئة متساوية الأوزان. وعقب التعبئة، سُقيَت الأصص رِيّاً ابتدائية مشبعة (رية غسيل واستقرار) لتأمين الرطوبة الحجمية اللازمة لاستقرار حبيبات التربة وتأهيلها التام لعملية السوّ (الزراعة).



الوثيقة 24 توضح تحضير بيئة النمو والأصص المستعملة

2-2-7 التسميد :

بهدف الرفع من الخصوبة الحيوية والفيزيائية للتربة وتأمين الإمداد المستدام بالعناصر الغذائية الأساسية اللازمة للنمو، تم الاعتماد على التسميد العضوي الأساسي باستخدام مخلفات حيوانية طبيعية ومتحللة (بقايا الأغنام)؛ حيث جرى تقنين الكمية المضافة بدقة متناهية وفق نسبة وزنية معيارية ثابتة بلغت 10 غرامات من السماد العضوي لكل 1 كيلوغرام من التربة الزراعية (10g/kg).

وجرت عملية الدمج عبر سحق وتنعيم الكتلة السمادية ثم خلطها ميكانيكياً وتوزيعها بشكل متجانس ومتكافئ الأوزان مع الكتلة الترابية الكلية لكل أصيص على حدة بناءً على هذه النسبة المحددة مسبقاً، وذلك قبل المباشرة بعملية الزراعة (السوّ)، لضمان تماثل الخصائص الخصوبية لبيئة النمو وتجنب حدوث أي تباين في التغذية المعدنية بين المكررات.



الوثيقة 25 تمثل التسميد العضوي باستخدام مخلفات حيوانية (بقايا الغنم) لتحسين خصوبة التربة

7-2-3. التصميم التجريبي :

في يوم 03 فيفري 2026، نُفذت عملية الزراعة (السَّو)؛ حيث زُرعت في كل أصيص 15 بذرة وُزعت بآلية منتظمة لضمان تكافؤ المساحات البينية، وعلى عمق غرس ثابت وموحد قدره 1 سم لضمان تجانس حركية البزوغ الحلقي (Field emergence).

أُقيمت التجربة بالاعتماد على تصميم تجريبي يتضمن خمسة مكررات مستقلة (Replicates 5) لكل معاملة من معاملات محصولي القمح والشعير المدروسة؛ وذلك بهدف رفع الكفاءة الإحصائية وتقليل الخطأ التجريبي. ولتسهيل المراقبة الحقلية الدقيقة وضمان انتظام المعاملات، رُتبت الأصص في مساحة التجربة على هيئة مصفوفة هندسية متكاملة تتكون من 4 صفوف رئيسية تمثل المكررات، و 5 أعمدة متوازية تمثل مستويات التراكيز (درجات الحموضة) المطبقة.



الوثيقة 26 توضح التصميم تجريبي و ترتبت الأصص في مساحة التجربة

7-2-4. السقي :

خضعت النباتات لنظام ري منتظم خلال فترة التجربة، حيث تم توفير الري اليومي خلال مرحلة الإنبات لضمان رطوبة مناسبة وتحفيز نمو البادرات. وبعد استقرار النباتات، عُدلت وتيرة الري وفقاً للظروف المناخية والاحتياجات المائية للنبات؛ فتم تقليل عدد الريات في الأيام الباردة وزيادتها في الأيام الحارة. ولضمان دقة النتائج وتقليل تأثير التباين الرطوبي، سُقيت جميع الأصص في التوقيت نفسه وبكميات متساوية من المياه، مع المحافظة على مستويات الحموضة (pH) الخاصة بكل معاملة طوال مدة التجربة.

7-3 المعايير المرفولوجية المدروسة :

7-3-1 طول النبات:

تم إجراء القياسات المورفومترية لتحديد الارتفاع الرأسي لنباتات القمح والشعير باستخدام شريط قياس متري. حيث تُبَتَّ نقطة الصفر للأداة عند سطح التربة وامتد القياس طولياً حتى القمة النامية (أو أعلى نقطة في المجموع الخضري)، لندون القراءات الناتجة مباشرة في سجل البيانات لضمان دقة التوثيق.

الوثيقة 27 توضح عملية قياس طول النبات القمح والشعير



تم قياس القطر العرضي لسلاميات الساق (سُمك الساق) باستخدام أداة القياس القدم القنوية الورنية (Vernier Caliper) لضمان أعلى درجات الدقة؛ حيث أُخذت القراءات عند منتصف السلامة الثانية النامية فوق سطح التربة لتوحيد معيار القياس بين العينات، وجرى تدوين القيم الناتجة فوراً في سجل التجربة. الوثيقة 29 توضح عملية قياس سمك الساق باستخدام القدم القنوية الورنية

3-3-7 عدد السلامةيات :

تم تحديد العدد الإجمالي لسلاميات الساق عن طريق الفحص البصري والمورفولوجي المباشر؛ حيث جرى حصر وفحص العقد الساقية النامية متتاليةً من قاعدة الساق وحتى القمة النامية لكل نبتة، ودُوّنت البيانات المستحصلة فوراً في سجل التجربة.

4-3-7 طول السلامة الثالثة :

"تم قياس الارتفاع الطولي للسلامية الثالثة المقاسة من القمة النامية (أسفل حامل السنبله مباشرة تتابعاً نحو الأسفل) باستخدام القدم القنوية الورنية (Vernier Caliper)؛ حيث حُدِدَت المسافة الفاصلة بين العقدتين بدقة لتأكيد المؤشر المورفولوجي لنمو الساق، وجرى تدوين القيمة الناتجة فوراً في سجل التجربة."



الوثيقة 30 توضح عملية قياس طول السلامة الثالثة باستخدام القدم القنوية الورنية

7-3-5 تاريخ الإشطاء :

تم تحديد وتوثيق تاريخ بدء مرحلة الإشطاء (Tillering stage) عبر عمليات الرصد والمراقبة الحقلية المستمرة والدورية للنباتات؛ حيث سُجِّل التاريخ الفعلي لأول ظهور مرئي للأشطاء النامية من العقد التاجية لعينات القمح والشعير، وجرى تدوين هذا المؤشر الفينولوجي فوراً في سجل التجربة.



الوثيقة 31 توضح ظهور الإشطاء للقمح

7-3-8 تاريخ ظهور السنابل :

تم رصد وتوثيق تاريخ بدء مرحلة طرد السنابل (Inflorescence emergence / Heading stage) عبر المتابعة الميدانية المستمرة؛ حيث سُجِّل التاريخ الفعلي لأول ظهور مرئي لأجزاء السنبل وخروجها من غمد ورقة العلم (Flag leaf sheath) لعينات القمح والشعير، وجرى تدوين هذا المؤشر الفينولوجي الهام فوراً في سجل التجربة.

7-3-9 عدد السنابل:

تم تحديد الكثافة العددية للسنابل من خلال إجراء حصر ومسح مورفولوجي شامل ومباشر لجميع النباتات المستهدفة عند مرحلة النضج الحركي؛ حيث اعتمدت آلية الحساب على عدّ السنابل المتطورة الناتجة لكل نبتة على حدة، وقد تبين من خلال هذا الحصر المنهجي اقتصار الإنتاجية على سنبل واحد لكل نبتة، وجرى تدوين القراءات المستحصلة فوراً في سجل التجربة كمؤشر دالٍ على كفاءة مكونات الغلة.

7-3-10 عدد البذور في كل سنبل:

تم تحديد الكثافة العددية لحبوب السنبل (عدد البذور/السنبل) من خلال عملية فرك السنايل وعدّ كافة البذور المستخلصة يدوياً وبشكل مباشر؛ حيث شمل الحساب جميع الحبوب الناتجة في السنبل لكل نبتة على حدة دون استثناء، وجرى تدوين القراءات العددية فوراً في سجل التجربة.



الوثيقة 34 تمثل تحديد عدد

البذور في كل سنبل

7-3-11 وزن البذور:

تم تحديد الكتلة الوزنية الكلية لحبوب السنبل (وزن البذور/السنبل) باستخدام ميزان تحليلي حساس ذو دقة رقمية عالية؛ حيث جُمعت كافة البذور التي تم حصرها عددياً في الخطوة السابقة لكل سنبل على حدة ووضعت على كفة الميزان لتوثيق وزنها الصافي بدقة، ثم دُوّنت القيم الكتليّة الناتجة فوراً في سجل التجربة كمؤشر فيزيولوجي لتقدير كفاءة امتلاء الحبوب (Grain filling efficiency).

الوثيقة 35 تمثل تحديد الكتلة الوزنية الكلية لحبوب السنبله (وزن البذور/السنبله)

7-3-12 وزن 1000 حبة :

نظراً للتفاوت في الكثافة العددية الإجمالية للحبوب المستخلصة، تم تقدير الكتلة الوزنية القياسية لألف حبة (Thousand Grain Weight) حسابياً بالاعتماد على العلاقة النسبية بين الوزن الصافي للحبوب المتاحة وعددها الفعلي؛ حيث طُبقت المعادلة الرياضية الفيزيولوجية التالية لتوحيد معيار المقارنة:

$$TGW=(Wg / Ng)\times 1000$$

حيث يمثل (TGW) الوزن المكافئ لألف حبة مقدراً بالغرام (g)، ويمثل (Wg) الوزن الصافي الكلي للحبوب المستخدمة في القياس، بينما يمثل (Ng) العدد الفعلي لتلك الحبوب الموزونة. وجرى تدوين القيم المستنتجة حسابياً فوراً في سجل التجربة لضمان دقة التحليل الإحصائي للغة (ISO, 2010) .

الفصل الرابع :

النتائج والمناقشة

1- نتائج تجربة الإنبات :

1-1 سرعة الإنبات :

- نبات القمح :

وتشير هذه المحصلة التجريبية إلى أن سرعة تمايز البادرات قد تأثرت بدرجات متباينة تبعاً للحالة الهيدروجينية لوسط الإنبات؛ حيث حقق النطاق الحامضي الضعيف إلى المعتدل (pH 5.5–6.0) الاستجابة الحيوية الفضلى، مما يثبت توفر الظروف الكيميائية الحيوية المثلى لتنشيط المسارات الفسيولوجية المقترنة ببدء الإنبات،

وتحديداً حركية الامتصاص الوعائي للماء (Imbibition) وتفعيل المنظومات الإنزيمية المسؤولة عن الميوعة المادية وتعبئة المواد الادخارية المخزنة في الإندوسبيرم—مثل إنزيم الألفا-أميلاز (α -amylase)—. يسهم هذا التنشيط الإنزيمي في تسريع هدم النشاء وتحويله إلى سكريات بسيطة قابلة للنقل لتوفير الطاقة الكيميائية الكامنة (ATP) اللازمة لانقسام واستطالة خلايا المحور الجنيني. وفي المقابل، فإن التراجع الطفيف المسجل عند قيمة القلوية الخفيفة (pH 7.7) أو النطاق (pH 6.5) يعكس كبحاً كيميائياً محدوداً أدى إلى تباطؤ نسبي في معدل خروج الجذير وظهور البادرات فوق سطح التربة (Bewley et al., 2013).

كما يوضح الضيق النسبي في المدى العددي للفروق بين المعاملات احتفاظ بذور القمح بحيوية جنينية مرتفعة وقدرة فسيولوجية عالية على التكيف وتدشين مرحلة الإنبات تحت مختلف الظروف الهيدروجينية التجريبية المطبقة. وتتطابق هذه النتائج بنيوياً مع الطروحات الفسيولوجية لكل من (Bewley et al., 2013) و (Taiz & Zeiger, 2015) في أن سرعة الإنبات تمثل مؤشراً حيوياً مباشراً يقيس الكفاءة الأيضية للميرستيم الجنيني وقدرته التنافسية على استغلال الاحتياطات الغذائية وحظر التنشيط الخلوي خلال الأطوار الأولى من التطور الخصري؛ وبناءً على ذلك، يتضح أن النطاق الهيدروجيني الحامضي الضعيف (pH 6.0) يمثل البيئة الأمثل لتعجيل الكفاءة الإنباتية وحركية نمو بادرات القمح دون الإخلال بسلامة العمليات الأيضية العامة.

- نبات الشعير :

وتشير هذه المحصلة التجريبية إلى أن سرعة تمايز البادرات قد تأثرت بدرجات متباينة تبعاً للحالة الهيدروجينية لوسط الإنبات؛ حيث حقق النطاق الحامضي الضعيف (pH 6.0) الاستجابة الحيوية الفضلى، مما يثبت توفر الظروف الكيميائية الحيوية المثلى لتنشيط المسارات الفسيولوجية المقترنة ببداية الإنبات، وتحديدًا حركية الامتصاص الوعائي للماء (Imbibition) وتفعيل المنظومات الإنزيمية المسؤولة عن الميوعة المادية وتعبئة المواد الادخارية المخزنة في الإندوسبيرم—مثل إنزيم الألفا-أميلاز (α -amylase)—. يسهم هذا التنشيط الإنزيمي في تسريع هدم النشاء وتحويله إلى سكريات بسيطة قابلة للنقل لتوفير الطاقة الكيميائية الكامنة (ATP) اللازمة لانقسام واستطالة خلايا المحور الجنيني وخروج الجذير. وفي المقابل، فإن التذني المسجل عند النطاق الهيدروجيني (pH 5.5) يعكس كبحاً كيميائياً نسبياً ناجماً عن الإجهاد البروتوني الذي أدى إلى إبطاء النشاط الأيضي الداخلي داخل البذور وتأخير تمايز البادرات فوق سطح التربة (Bewley et al., 2013).

ومع ذلك، فإن الضيق النسبي في المدى العددي للفروق بين المعاملات يوضح احتفاظ بذور الشعير بمستوى جيد من الحيوية الجنينية والقدرة الفسيولوجية على التكيف والمحافظة على النشاط الأيضي تحت مختلف الظروف

الهيدروجينية التجريبية المطبقة. وتتطابق هذه النتائج بنيوياً مع الطروحات الفسيولوجية لكل من (Bewley et al., 2013) و (Taiz & Zeiger, 2015) في أن سرعة الإنبات ترتبط ارتباطاً وثيقاً بالكفاءة الأيضية للميرستيم الجنيني وقدرته على تعبئة واستغلال الاحتياطات الغذائية خلال الأطوار الأولى من النمو، وهو ما ينعكس إيجاباً على تجانس البادرات وقوة نموها المورفولوجي في المراحل اللاحقة؛ وبناءً على ذلك، يتضح أن المعاملة ذات الرقم الهيدروجيني (pH 6.0) حققت الأداء الحركي الأمثل لتعجيل الكفاءة الإنباتية، في حين يمثل النطاق (pH 5.5) المدى الأكثر تبيطاً للنشاط الفسيولوجي الأولي للمحصول.

2-1 أطوال الجذير للقمح والشعير:

- نبات القمح :

وتشير هذه المحصلة التجريبية إلى أن معدل استكشاف المجموع الجذري الأولي قد تأثر فسيولوجياً وعملياً بالحالة الهيدروجينية لوسط النمو؛ حيث وفر النطاق الهيدروجيني المائل للقلوية الخفيفة (pH 7.7) والنطاق القريب من التعادل (pH 6.0–6.5) البيئة الكيميائية الحيوية الأكثر ملاءمة لدعم نمو واستطالة المحور الجذري؛ ويُعد طول الجذير من أهم المحددات الفسيولوجية الحاكمة لقدرة البادرة على اختراق واستكشاف الحيز الأرضي، وامتصاص الماء، والنقل النشط للكاتيونات المعدنية، مما يثبت أن استقرار النطاق الهيدروجيني يحفز الكفاءة الهيدروليكية والتغذوية للبادرات خلال المراحل الأولى التلو-إنباتية، وعلى العكس من ذلك، فإن الكبح الحاد المسجل عند قيم الـ pH المنخفضة (pH 5.0–5.5) يُعزى فسيولوجياً وخلوياً إلى الآثار التثبيطية والسمية الناجمة عن الإجهاد البروتوني (ارتفاع تركيز أيونات الهيدروجين H^+ وإتاحة الألومنيوم السام Al^{3+}) في المحلول المحيط بالجذور؛ حيث يؤدي هذا الإجهاد الكيميائي إلى تصلب الجدر الخلوية وتدمير الأنابيب الدقيقة، مما يكبح النشاط الميتوزي للخلايا المرستيمية في القمة النامية ويعطل الاستطالة الخلوية (Cell elongation) في منطقة التمايز، وينعكس بالتالي على شكل قصر وتثبيط في طول الجذير الكلي. في حين يُفسر الانتعاش المورفولوجي المسجل مجدداً عند النطاق (pH 6.0–6.5) باستعادة الخلايا المرستيمية لسلامتها الهيكلية وتوازنها الأسموزي وقدرتها الحركية على الانقسام والتمدد الخلوي (Taiz & Zeiger, 2015).

وتتقاطع هذه النتائج تماماً مع الأطروحات الفسيولوجية لـ (Taiz & Zeiger, 2015) في أن الكشف الجذري يمثل المجس الحيوي الأكثر حساسية للاضطرابات البيئية والكيميائية، حيث يتأثر مباشرة بالتوازن الأيوني للوسط وكفاءة التمثيل الغذائي؛ كما تتوافق مع ما أورده (Bewley et al., 2013) من أن تسريع استطالة الجذير خلال الأطوار الجنينية الأولى يعزز السعة الامتصاصية للبادرة لتأمين الاحتياجات المائية والمعدنية، مما يدعم القوة الحيوية للنمو المورفولوجي اللاحق؛ وبناءً على ذلك، يتضح مخبرياً أن كفاءة الاستطالة الخلوية لجذير القمح

بلغت ذروتها الفسيولوجية في الأوساط المائلة للقلوية والتعادل، بينما تراجعت السعة الحركية للنمو تحت وطأة الإجهاد الحامضي المتطرف.

. نبات الشعير :

بمعدل 5.4 سم، تلتها مباشرة المعاملة ذات الحموضة المعتدلة T3 عند (pH 6.0) بقيمة 5.0 س. ويُعزى هذا التفوق المورفولوجي فسيولوجياً إلى استقرار طاقة الضغط التناضحي الخلوي وكفاءة النقل النشط للماء والكاتيونات المعدنية عبر الأغشية، مما يحفز الكفاءة الهيدروليكية والتغذية للبادة خلال المراحل التلو-إنباتية الأولى. وفي المقابل، انحرف المنحنى نحو التراجع المطرد مع انخفاض قيم الـ pH في المعاملة T2 عند (pH 5.5) ليصل إلى 4.1 سم، وصولاً إلى الحد الأدنى للاستطالة في المعاملة ذات الحموضة الحرجة T1 عند (pH 5.0) بواقع 3.1 سم؛ حيث يعود هذا الكبح الحاد خلويًا وبيوكيميائيًا إلى الآثار التثبيطية للإجهاد البروتوني، إذ يتسبب ارتفاع تركيز أيونات الهيدروجين (H^+) وزيادة إتاحة الألومنيوم السام (Al^{3+}) في تصلب الجدر الخلوية وتدمير الهيكل الخلوي للأنابيب الدقيقة، مما يعطل النشاط الميتوزي للخلايا المرستيمية في القمة النامية ويكبح آليات الاستطالة الخلوية (Cell elongation). ومن جهة أخرى، يلاحظ أن معاملة الشاهد المائلة للقلوية الخفيفة (T0, pH 7.7) سجلت قيمة متدنية ومكبوحة بالمثل لم تتجاوز 3.2 سم، وهو ما يُفسر فسيولوجياً بانخفاض الإتاحة الحيوية وذوبانية العناصر الصغرى والمعدنية الأساسية في منطقة المحيط الجذري (Rhizosphere) تحت ظروف الـ pH المرتفع. وتتقاطع هذه النتائج نسقياً مع الطروحات الفسيولوجية لـ (Bewley et al., 2013) و (Taiz & Zeiger, 2015) في أن الكشف المورفولوجي للجذور يمثل المجس الأكثر استجابة للاضطرابات الكيميائية البيئية، مما يثبت وقوع المحور الجذري للشعير تحت وطأة كبح حيوي مزدوج عند الانحراف عن النطاق الهيدروجيني الأمثل القريب من التعادل

3-1 أطوال السويقة :

- نبات القمح :

وفي المقابل، انحرف المنحنى نحو التراجع المطرد مع انخفاض قيم الـ pH وزيادة شدة الحموضة في المعاملة T2 عند (pH 5.5) ليصل إلى حوالي 6.6 سم، وصولاً إلى الحد الأدنى لطول السويقة في المعاملة ذات الحموضة الحرجة T1 عند (pH 5.0) بواقع 6.0 سم؛ حيث يُعزى هذا الكبح الحاد خلويًا وبيوكيميائيًا إلى الآثار التثبيطية الكلاسيكية للإجهاد البروتوني، إذ يتسبب الارتفاع المفرط لتركيز أيونات الهيدروجين (H^+) وزيادة إتاحة وسمية الألومنيوم السام (Al^{3+}) في اضطراب الخصائص الميكانيكية للجدر الخلوية وكبح نفاذية الأغشية، فضلاً

عن تحفيز الإجهاد التأكسدي وتثبيت كفاءة النقل الوعائي للمذابات المغذية نحو الأجزاء الهوائية النامية. وتتقاطع هذه النتائج نسقياً مع الطروحات الفسيولوجية لـ (Bewley et al., 2013) و (Taiz & Zeiger, 2015) في أن معدلات تكشف واستطالة الأعضاء الخضرية الطرفية تعكس الكفاءة الأيضية العامة وتكامل التوازن الوظيفي بين المجموعين الجذري والخيالي تحت وطأة التغيرات الكيميائية للبيئة المحيطة، مما يثبت تأثر الكفاءة الحركية لنمو سويقة القمح سلباً بالانحراف نحو الوسط الحامضي الحرج.

- نبات الشعير :

وفي المقابل، انحرف المنحنى نحو التراجع الحاد مع زيادة شدة الحموضة لتسجل المعاملة ذات الحموضة الحرجة T1 عند (pH 5.0) الحد الأدنى لطول السويقة بواقع 7.4 سم؛ ويُعزى هذا الكبح خلوياً وبيوكيميائياً إلى التأثيرات التثبيطية للإجهاد البروتوني الناجم عن ارتفاع تركيز أيونات الهيدروجين (H^+) والمصحوب غالباً بسمية الألومنيوم السام (Al^{3+})، مما يؤدي إلى تغيير الخصائص الميكانيكية للجدر الخلوية وكبح كفاءة النقل الوعائي للمياه والمذابات من المجموع الجذري المجهّد نحو الأعضاء الهوائية النامية. ومن جهة أخرى، يلاحظ أن معاملة الشاهد المائلة للقلوية الخفيفة (T_0 , pH 7.7) قد أظهرت كبحاً مماثلاً حيث تراجع الطول إلى حوالي 8.4 سم، وهو ما يُفسر فسيولوجياً بانخفاض الاتاحية الحيوية وذوبانية بعض الكاتيونات والعناصر المعدنية الأساسية في منطقة المحيط الجذري (Rhizosphere) تحت ظروف الـ pH المرتفع. وتتقاطع هذه النتائج نسقياً مع الطروحات الفسيولوجية لـ (Bewley et al., 2013) و (Taiz & Zeiger, 2015) في أن معدلات استطالة وتكشف الأعضاء الخضرية الطرفية تعكس الكفاءة الأيضية العامة وتكامل التوازن الوظيفي بين المصدر والمصب تحت وطأة الاضطرابات الكيميائية للبيئة، مما يثبت وقوع نمو سويقة الشعير تحت كبح حيوي مزدوج عند الانحراف عن نقطة التعادل الهيدروجيني.

4-1 حساب الوزن قبل التجفيف :

- نبات القمح :

توضح البيانات الإحصائية (الوثيقة 42) استجابة مورفومترية واضحة في صفة وزن النبات قبل التجفيف (الوزن الرطب الكلي) لبادرات نبات القمح لتغير مستويات الرقم الهيدروجيني (pH) لمياه الري عبر المعاملات من T_0 إلى T_4 . حيث سجلت معاملة الشاهد المائلة للقلوية الخفيفة (T_0 , pH 7.7) القيمة القصوى للمؤشر الوزني بمعدل بلغ حوالي 0.75 غرام، تلتها المعاملة ذات الحموضة الضعيفة T_2 عند (pH 5.5) بقيمة بلغت 0.70

غرام، ثم المعاملة ذات الحموضة الحرجة T1 عند (pH 5.0) بمتوسط قارب 0.60 غرام، بينما أظهرت المعاملتان ذات الحموضة المعتدلة والقريبة من التعادل T3 عند (pH 6.0) و T4 عند (pH 6.5) تراجعاً ملحوظاً لتسجلاً حوالي 0.50 غرام و 0.39 غرام على التوالي.

ويُعزى هذا السلوك الوزني فسيولوجياً وعملياً إلى كفاءة الامتصاص الهيدروليكي والمحتوى المائي النسبي داخل الأنسجة الخلوية للبادة؛ حيث يبدو أن ظروف الـ pH المائلة للقلوية الخفيفة (pH 7.7) والنطاق الحامضي المعتدل (pH 5.5) قد وفرت جهداً أسموزياً ملائماً في بيئة الجذور، مما عزز من نفاذية الأغشية الخلوية وحفز معدل تدفق الماء والمذابات الأيونية عبر أوعية الخشب نحو المجموع الخضري، وهو ما ينعكس طردياً على طاقة الانتاج الخلوي والوزن الرطب الإجمالي للبادرات (Bewley et al., 2013).

وفي المقابل، فإن الانخفاض الملحوظ المسجل في المعاملتين T3 و T4 يشير مخبرياً إلى وجود تأثير تثبيطي نسبي في حركية امتصاص الماء تحت ظروف الأوساط القريبة من التعادل لهذا المؤشر تحديداً، مما قد يرتبط باختلال مؤقت في التوازن الأسموزي أو كفاءة الجهد المائي بين خلايا البشرة الجذرية ومحلول الري. وتتقاطع هذه النتائج نسقياً مع المقاربات الفسيولوجية لـ (Bewley et al., 2013) و (Taiz & Zeiger, 2015) في أن صفة الوزن الرطب الأولي تعد انعكاساً مباشراً لدرجة حيوية البذور وكفاءة السعة الامتصاصية الهيدروليكية للأنسجة النامية خلال المراحل التلو-إنباتية الأولى، مما يثبت استجابة المحتوى المائي لبادرات القمح بشكل مرن وغير خطي للتغيرات الكيميائية الهيدروجينية في الوسط المحيط.

- نبات الشعير

الوثيقة 43 وزن بادرات الشعير قبل التجفيف

توضح الوثيقة (43) البيانات الإحصائية استجابة مورفومترية واضحة في صفة وزن النبات قبل التجفيف (الوزن الرطب الكلي) لبادرات نبات الشعير لتغير مستويات الرقم الهيدروجيني (pH) لمياه الري عبر المعاملات. حيث حققت المعاملة ذات الحموضة المعتدلة H T3 عند (pH 6.0) الذروة المورفولوجية للمؤشر الوزني بمعدل بلغ حوالي 0.83 غرام، تلتها المعاملة القريبة من التعادل T4 عند (pH 6.5) بقيمة بلغت 0.72 غرام، ثم المعاملة ذات الحموضة الضعيفة T2 عند (pH 5.5) بمتوسط قارب 0.65 غرام. في المقابل، انخفض المنحنى الوزني بشكل ملحوظ عند المعاملة ذات الحموضة الحرجة T1 عند (pH 5.0) لتسجل 0.57 غرام، وهي قيمة متدنية شابته النمط المسجل في معاملة الشاهد المائلة للقلوية الخفيفة (T0, pH 7.7) والتي بلغت حوالي 0.58 غرام.

ويعزى هذا التباين المورفوميترى فسيولوجياً وعملياً إلى كفاءة الامتصاص الهيدروليكي والمحتوى المائي النسبي داخل الأنسجة الخلوية لبادرات الشعير؛ حيث يمثل النطاق الهيدروجيني المعتدل إلى القريب من التعادل (pH 6.0–6.5) المدى الفسيولوجي الأمثل لتوفير جهد أسموزي متوازن في الريزوسفير، مما يدعم نفاذية الأغشية الخلوية ويحفز التدفق الحركي للماء والمذابات المعدنية عبر أوعية الخشب نحو المجموع الخضري، الأمر الذي ينعكس طردياً على طاقة الانتاج الخلوي والوزن الرطب الإجمالي للبادرة (Bewley et al., 2013). وعلى العكس من ذلك، فإن الكبح المسجل عند المعاملة الحامضية الحرجة (pH 5.0) يعود بيوكيميائياً وخليوياً إلى الإجهاد البروتوني المانع للاستكشاف الجذري، والمخفّض لسلامة الأغشية الخلوية تحت وطأة زيادة تركيز أيونات الهيدروجين (H^+)، مما يحد من السعة الهيدروليكية لامتصاص الماء. ومن جهة أخرى، يُفسر التراجع الملاحظ في معاملة الشاهد (pH 7.7) بانخفاض الاتاحة الحيوية للعديد من الأيونات المغذية في الأوساط المائية للقلوية، مما يؤثر سلباً على الجهد الأسموزي الداخلي للخلايا وقدرتها على الاحتفاظ بالماء. وتتقاطع هذه النتائج نسقياً مع الطروحات الفسيولوجية لـ (Bewley et al., 2013) و (Taiz & Zeiger, 2015) في أن صفة الوزن الرطب الأولي تعكس كفاءة المنظومة الامتصاصية والتكامل الوظيفي للبادرة في مواجهة التغيرات الكيميائية للوسط، مما يثبت وقوع المحتوى المائي لبادرات الشعير تحت وطأة كبح حيوي مزدوج عند الانحراف عن النطاق الهيدروجيني المعتدل.

5-1 حساب الوزن بعد التجفيف :

- نبات القمح :

الوثيقة 44 وزن بادرات القمح بعد التجفيف

توضح نتائج الوثيقة (44) أن الوزن الجاف الكلي لبادرات القمح تأثر بوضوح بمستويات الرقم الهيدروجيني (pH)، حيث سجلت المعاملتان T4 عند (pH 6.5) و T2 عند (pH 5.5) أعلى قيمة متساوية بلغت نحو 0.160 غ، تلتها المعاملة T3 عند (pH 6.0) بمتوسط 0.150 غ. في المقابل، سُجلت أدنى القيم في المعاملتين T T1 عند (pH 5.0) ومعاملة الشاهد T0 عند (pH 7.7) بمعدل 0.140 غ. ويتوافق هذا النمط مع استجابة طول جذير الشعير (الشكل 4)، الذي بلغ أعلى قيمة عند (pH 6.5) T4 بمعدل 5.4 سم، مما يشير إلى وجود علاقة إيجابية بين كفاءة نمو الجذور وتراكم المادة الجافة. ويُعزى تفوق المعاملة (pH 6.5) إلى تحسن نفاذية الأغشية الخلوية وزيادة إتاحة العناصر الغذائية، الأمر الذي يرفع كفاءة البناء الضوئي وتراكم الكتلة الحيوية (Taiz & Zeiger, 2015).

أما الانخفاض المسجل عند (pH 5.0)، والمتزامن مع تراجع طول جذير الشعير إلى 3.1 سم، فيُفسر بتأثير الإجهاد البروتوني الناتج عن ارتفاع تركيز H^+ ، مما يضعف النمو الجذري ويحد من امتصاص العناصر ونقل نواتج البناء الضوئي، وبالتالي يقلل تراكم المادة الجافة. كما يُعزى التراجع عند (pH 7.7) إلى انخفاض ذوبانية الفوسفور والعناصر الصغرى مثل الحديد والزنك، وهو ما ينعكس سلبًا على النمو الجذري والعمليات الأيضية للنبات. وتتفق هذه النتائج مع ما أشار إليه (Bewley et al., 2013) و (Taiz & Zeiger, 2015) من أن الوزن الجاف ونمو الجذور يعدان مؤشرين حيويين لكفاءة استغلال الموارد النباتية تحت تأثير الإجهادات الكيميائية المختلفة.

- نبات الشعير :

الوثيقة 45 وزن بارادات الشعير بعد تجفيف

توضح نتائج الوثيقة (45) تأثير الوزن الجاف الكلي لبادرات الشعير بمستويات الرقم الهيدروجيني (pH)، حيث سجلت المعاملتان T0 (pH 7.7) و T0 (pH 6.0) أعلى قيمة متساوية بلغت 0.120 غ، في حين انخفض الوزن الجاف إلى 0.110 غ في المعاملات T1 (pH 5.0) و T2 (pH 5.5) و T4 (pH 6.5). وبمقارنة هذه النتائج مع طول جذير الشعير الذي بلغ أقصى قيمة عند (pH 6.5) بمعدل 5.4 سم، يتضح وجود اختلاف جزئي بين استجابة النمو الطولي والتراكم الكتلي. ويُعزى تفوق المعاملة T3 (pH 6.0) في الوزن الجاف إلى كفاءة نموها الجذري (5.0 سم)، مما عزز امتصاص الماء والعناصر الغذائية ورفع كفاءة البناء الضوئي وتراكم المادة الجافة (Bewley et al., 2013).

أما انخفاض الوزن الجاف عند (pH 5.0–5.5)، والمتزامن مع تراجع طول الجذير إلى 3.1 و 4.1 سم على التوالي، فيُفسر بتأثير الإجهاد البروتوني الناتج عن ارتفاع تركيز H^+ ، والذي يحد من النمو الجذري وكفاءة النقل والتمثيل الغذائي. كما أن انخفاض الوزن الجاف عند (pH 6.5) رغم تسجيل أطول جذير قد يعكس توجيه جزء أكبر من الموارد والطاقة نحو استطالة الجذور على حساب تراكم الكتلة الحيوية . في المقابل، حافظت معاملة الشاهد (pH 7.7) T0 على أعلى وزن جاف رغم قصر الجذير (3.2 سم)، مما يدل على قدرة الشعير على التكيف مع الأوساط المائلة للقلوية والحفاظ على كفاءة عملياته الأيضية. وتتفق هذه النتائج مع ما أورده (Bewley et al., 2013) و (Taiz & Zeiger, 2015)، حيث يعد كل من الوزن الجاف ونمو الجذور مؤشرين متكاملين لتقييم الكفاءة الأيضية وصافي الكسب الكربوني للنبات تحت تأثير الإجهادات البيئية المختلفة.

2- نتائج تجربة النمو :

2-1 طول النبات :

- نبات القمح :

الوثيقة 46 متوسط طول نبات القمح عند درجات الحموضة المختلفة

توضح الأعمدة البيانية (الوثيقة 46) استجابة طول نبات القمح لتغير قيم درجة الحموضة (pH) لمياه الري عبر المعاملات من T0 إلى T4؛ حيث تُظهر النتائج منحنى استجابة غير خطي سجلت فيه معاملة الشاهد ذات درجة الحموضة المائلة للقلوية (T0, pH 7.7) متوسط طول بلغ 23 سم. وعند خفض درجة الحموضة نحو المجال الحامضي المعتدل، ارتفعت القيم تدريجياً لتصل إلى أعلى معدل نمو في المعاملتين T4 عند درجة حموضة (pH 6.5) و T3 عند درجة حموضة (pH 6.0) بمتوسطات بلغت 26 سم و 24 سم على التوالي، في حين انخفضت تلك المعدلات معنوياً عند زيادة حدة الحموضة لتسجل المعاملة T2 عند درجة حموضة (pH 5.5) والمعاملة T1 عند درجة حموضة (pH 5.0) أدنى متوسطات بلغت 18 سم و 17 سم على التوالي.

ويُعزى هذا النمط من الاستجابة إلى تأثير درجة الحموضة (pH) المباشر على نمو المجموع الجذري وكفاءة الامتصاص؛ إذ يؤدي ارتفاع تركيز أيونات الهيدروجين (H^+) في وسط التربة عند درجات الحموضة الشديدة (pH 5.0–5.5) إلى خفض كفاءة امتصاص الكاتيونات الأساسية (K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}) نتيجة التنافس الأيوني، وهي عناصر ضرورية للانقسام الخلوي والأنشطة الأيضية. فضلاً عما تسببه مستويات درجة الحموضة المنخفضة (pH 5.0–5.5) من اضطراب في نفاذية الأغشية الخلوية وتثبيط لنشاط الخلايا المرستيمية في القمة

النامية للجذر، مما يحد فسيولوجياً من استطالة الخلايا بفعل سمية الـ H^+ وتأثيرها السلبي على النقل النشط عند هذه القيم الحامضية الحرجة (Kochian et al., 2004).

وفي المقابل، فإن تحفيز نمو النبات في مجال درجة الحموضة المعتدلة (pH 6.0–6.5) يُفسر بيوكيميائياً بزيادة جاهزية وامتصاص العناصر المغذية الكبرى (خاصة النيتروجين والفوسفور) التي يبلغ إتاحتها الذروة عند هذا المدى. كما يساهم الحفاظ على توازن درجة الحموضة في هذا المجال (pH 6.0–6.5) في توفير التدرج البروتوني اللازم لتنشيط مضخات البروتون غشائية المنشأ ($H^+-ATPase$)، مما يدعم مرونة الجدار الخلوي المسؤول عن التمدد الفسيولوجي والاستطالة الخلوية؛ وهو ما يؤكد مخبرياً وبشكل مباشر وجود علاقة ارتباطية واضحة بين قيم درجة الحموضة (pH) وكفاءة المؤشرات الفسيولوجية ومعدلات النمو الخضري في محاصيل الحبوب، متوافقة تماماً مع الاستنتاجات المحورية التي توصل إليها كل من (Fageria & Baligar, 2008)، و (Hasanuzzaman et al., 2013)، و (Taiz & Zeiger, 2014) حول تأثير البيئة الهيدروجينية على الأداء الحيوي للنبات.

- نبات الشعير :

الوثيقة 47 متوسط طول نبات الشعير عند درجات الحموضة المختلفة

توضح الأعمدة البيانية (الوثيقة 47) استجابة متوسط طول نبات الشعير لتغيرات قيمة درجة الحموضة (pH) لمياه السقي عبر المعاملات من T0 إلى T4؛ حيث تُظهر النتائج منحنى استجابة تدريجي غير خطي سجلت فيه معاملة الشاهد ذات درجة الحموضة المائلة للقلوية (T0, pH 7.7) أعلى متوسط للطول بلغ نحو 21.5 سم. ومع انخفاض قيمة درجة الحموضة (pH) نحو المجال الحمضي المعتدل، لوحظ تراجع تدريجي في متوسط النمو الطولي؛ حيث سجلت المعاملة T3 عند درجة حموضة (pH 6.0) متوسطاً بلغ 20 سم، تلتها المعاملة T4 عند درجة حموضة (pH 6.5) بمتوسط قدره 17 سم، في حين انخفضت القيم بشكل معنوي وأكثر وضوحاً عند الانتقال إلى الأوساط الأكثر حموضة، لتسجل المعاملة T2 عند درجة حموضة (pH 5.5) والمعاملة T1 عند درجة حموضة (pH 5.0) أدنى المتوسطات بواقع 15.5 سم و 15 سم على التوالي.

ويُعزى هذا السلوك المنحني في الاستجابة إلى الحساسية الفسيولوجية النسبية التي يمتلكها نبات الشعير تجاه الإجهاد الحمضي؛ إذ يؤدي انخفاض درجة الحموضة (pH) عن حد التعادل إلى اضطراب التوازن الأيوني في منطقة الجذور، مما ينعكس مباشرة على العمليات المرتبطة بالنمو الخضري. ويُفسر التراجع الحاد المسجل في المتوسطات تحت ظروف المعاملات الحامضية الحرجة (pH 5.0–5.5) بالتأثير المباشر لارتفاع تركيز أيونات

الهيدروجين ($+H$) في الوسط الجذري، وما يترتب عنه من اختلال في النفاذية الاختيارية للأغشية الخلوية وانخفاض كفاءة امتصاص الكاتيونات المعدنية الأساسية كالسيوم ($+Ca2$) والمغنيسيوم ($+Mg2$)، فضلاً عما تحفزه مستويات درجة الحموضة المنخفضة هذه ($pH\ 5.0-5.5$) من زيادة ذوبانية وإتاحة بعض العناصر السامة بتركيزات حرجية كالألومنيوم ($+Al3$) والمنغنيز ($+Mn2$)، مما يعيق نشاط الخلايا المرستيمية ويحد من استطالة الخلايا عبر تثبيط بناء وتمدد مكونات الجدار الخلوي (Kochian et al., 2004).

وتؤكد المؤشرات البيولوجية أن تراجع متوسط الطول لا يقتصر على قيم الحموضة الشديدة فحسب، بل يعكس استجابة فسيولوجية تدريجية ترتبط طردياً بالابتعاد عن مجال درجة الحموضة الأمثل للنمو ($pH\ 7.7$)؛ وهو ما يُعزى بيوكيميائياً وارتباطياً إلى دور درجة الحموضة (pH) في تحديد كفاءة الامتصاص المغذي واختلال التوازن الهرموني الداخلي للنبات، لا سيما الأوكسينات والجبرلينات المسؤولة عن تنظيم معدلات الانقسام والاستطالة الخلوية. وبناءً على ذلك، يتضح مخبرياً أن منحنى الانخفاض في المتوسطات يمثل انعكاساً لتراجع الكفاءة الفسيولوجية العامة وتأثير الإجهاد الحامضي التصاعدي مع انخفاض قيم الـ pH ؛ وهي استنتاجات تتوافق تماماً مع الآليات العلمية الموثقة لدى كل من (Kochian et al., 2004)، و (Fageria & Baligar, 2008)، و (Hasanuzzaman et al., 2013) بشأن الحساسية النوعية للمحاصيل النجيلية تجاه التغيرات الهيدروجينية في الوسط الجذري.

1-2 - عدد الأوراق :

- نبات القمح :

الوثيقة 48 متوسط عدد الأوراق نبات القمح عند درجات الحموضة المختلفة

توضح الأعمدة البيانية (الوثيقة 48) استجابة متوسط عدد أوراق نبات القمح لتغير مستويات الإجهاد الحامضي عبر المعاملات من $T0$ إلى $T4$ ؛ حيث تُظهر النتائج نمطاً استجابياً غير خطي يتميز بثبات جزئي وانخفاض انتقائي، سجلت فيه معاملة الشاهد ذات درجة الحموضة المائلة للقلوية ($T0$, $pH\ 7.7$) أعلى متوسط بلغ 7 أوراق. في حين انخفض هذا المتوسط معنوياً إلى 5 أوراق في المعاملتين الشديديتي الحموضة $T1$ عند pH

(5.0) و T2 عند (pH 5.5)، مما يعكس وجود تأثير تثبيطي واضح في ظروف الحموضة المرتفعة، بالمقابل، عادت القيم إلى الاستقرار عند المستوى المرجعي نفسه (7 أوراق) في المعاملتين ذات الحموضة المعتدلة T3 عند (pH 6.0) و T4 عند (pH 6.5)، مما يشير إلى استعادة النبات لكفاءته الورقية وتكوين الأوراق ضمن نطاق أقل شدة من الإجهاد الهيدروجيني.

ويُعزى هذا السلوك الحيوي إلى تأثير عملية التخليق الورقي في نبات القمح بدرجة الإجهاد الحمضي وفق عتبة فسيولوجية محددة؛ حيث يُفسر التراجع الملحوظ في المتوسطات تحت ظروف قيم الحموضة الشديدة (pH 5.0–5.5) بالتأثير المباشر لارتفاع تركيز أيونات الهيدروجين (H^+) وما يرافقه من زيادة ذوبانية وسمية الألومنيوم (Al^{3+}) في الوسط الجذري، الأمر الذي يؤدي إلى تراجع كفاءة الامتصاص واختلال التوازن الأيوني العام في النبات. وينعكس هذا الاضطراب البيئي عند مستويات درجة الحموضة المنخفضة (pH 5.0–5.5) سلباً على التوازن الهرموني الداخلي، خصوصاً عبر خفض تخليق ونقل الساييتوكاينينات من المجموع الجذري نحو القمم النامية، وهي الهرمونات المسؤولة أساساً عن تنشيط الانقسام الخلوي وتكوين مبادئ الأوراق في المرستيم القمي الساق، بالتوازي مع تحفيز ارتفاع مستويات حمض الأبسيسيك (ABA) المرتبط بالإجهاد والذي يعمل على إبطاء النشاط المرستيمي وزيادة الفترة الزمنية الفاصلة بين ظهور الأوراق المتتالية (Taiz & Zeiger, 2014). وفي المقابل، فإن عودة المتوسط إلى مستوياته المرجعية في مجال درجة الحموضة المعتدلة (pH 6.0–6.5) تشير إلى أن شدة البروتونات الحرة في هذين المستويين لم تتجاوز العتبة الفسيولوجية الحرجة التي تعيق التخليق الورقي، مما سمح فسيولوجياً بالحفاظ على النفاذية الاختيارية للأغشية الخلوية وكفاءة الامتصاص المعدني، لا سيما لعنصري النيتروجين والفوسفور الضروريين لبناء المادة الجافة والنمو الخضري. ويعكس هذا النمط الاستجابي دور المدى الهيدروجيني القريب من التعادل (pH 6.0–6.5) في تمكين نبات القمح من الحفاظ على الاستقرار الهيكلي والوظيفي للصفة الورقية، وحصر التأثيرات المورفولوجية التثبيطية بوضوح في المستويات الحامضية الأكثر شدة (Brady & Weil, 2016).

- نبات الشعير :

الوثيقة 49 متوسط عدد الأوراق نبات الشعير عند درجات الحموضة المختلفة

توضح الأعمدة البيانية (الوثيقة 49) استجابة متوسط عدد أوراق نبات الشعير لتغير مستويات الإجهاد الحمضي عبر المعاملات من T0 إلى T4؛ حيث تُظهر النتائج نمطاً استجابياً ثابتاً تماماً يتمثل في استقرار المتوسط عند قيمة واحدة عبر جميع المعاملات، إذ سجلت معاملة الشاهد ذات درجة الحموضة المائلة للقلوية (pH T0،

(7.7)، والمعاملات ذات الحموضة المعتدلة T4 عند (pH 6.5) و T3 عند (pH 6.0)، وصولاً إلى المعاملات الشديدة الحموضة T2 عند (pH 5.5) و T1 عند (pH 5.0)، متوسطاً موحداً بلغ 7 أوراق دون أي تباين يُذكر بين هذه البيئات الهيدروجينية المختلفة.

ويُعزى هذا الثبات المطلق إلى أن متوسط عدد الأوراق في نبات الشعير يُعد صفة ذات استقرار فينولوجي مرتفع خلال المرحلة المدروسة، مما يجعله أقل حساسية نسبياً لتغيرات الوسط الهيدروجيني مقارنة بالصفات المورفولوجية الأخرى؛ ويُفسر هذا السلوك بيولوجياً بأن عملية تكوين الأوراق وتمايزها في هذه المرحلة تخضع لضبط وراثي وفسيولوجي صارم يضمن استمرارية ظهور الأوراق وفق برنامج نمائي محدد سلفاً لا يتأثر بشكل مباشر ضمن حدود مستويات درجة الحموضة المطبقة (pH 5.0–7.7). ومن الناحية الفسيولوجية، يعكس هذا الاستقرار اختلاف حساسية العمليات النمائية الداخلية تجاه الإجهاد البيئي، إذ إن التأثيرات السلبية لدرجات الحموضة المرتفعة تظهر عادة بشكل أوضح على عمليات الاستطالة الخلوية ونمو الأنسجة الحجمي نتيجة اضطراب امتصاص العناصر الغذائية وظهور سمية الألومنيوم (Al^{3+})، في حين يظل نشاط التخليق الأورجانونغرافي (تكوين الأعضاء) معزولاً نسبياً عن هذه المؤثرات لاعتماده على نشاط مرستيمي محمي ومنظم داخل القمة النامية، لا على كفاءة التمدد الخلوي اللاحق (Brady & Weil, 2016).

ويتأكد هذا التفسير الارتباطي عند مقارنة ثبات عدد الأوراق عند القيمة الموحدة عبر جميع مستويات الـ pH مع التراجع التصاعدي المسجل سابقاً في صفات النمو الطولي لنبات الشعير تحت المعاملات الحامضية الحرجة (pH 5.0–5.5)، مما يوضح مخبرياً أن الإجهاد الحمضي يوجه تأثيره التثبيطي نحو عمليات الاستطالة والنمو الكمي بدلاً من التأثير على تحديد عدد الأعضاء النباتية المتكونة؛ وهو ما يتقاطع تماماً مع ما أشار إليه (Kochian et al., 2004) من أن سمية الألومنيوم الناتجة عن انخفاض درجة الحموضة تؤثر أساساً على نشاط الجذور ونمو الخلايا عبر إعاقة الاستطالة الخلوية دون التخليق الأولي، وما أوضحه (Brady & Weil, 2016) من أن اضطراب امتصاص العناصر الغذائية تحت ظروف الحموضة يؤثر بشكل رئيسي على كفاءة الكتلة الحيوية وليس بالضرورة على عدد الأعضاء المتكونة. وبناءً على ذلك، نستنتج أن صفة عدد الأوراق في نبات الشعير تمثل مؤشراً فينوتيبياً مستقراً ومقاوماً لتغيرات البيئة الهيدروجينية ضمن الظروف التجريبية المدروسة.

2-2 - عدد الأفرع :

- نبات القمح :

توضح الأعمدة البيانية (الوثيقة 50) استجابة متوسط عدد الأفرع في نبات القمح لتغير مستويات الإجهاد الحمضي عبر المعاملات من T0 إلى T4؛ حيث تُظهر النتائج نمطاً استجابياً ثابتاً تماماً يتمثل في غياب أي تباين معنوي بين المعاملات، إذ استقر المتوسط في جميع المستويات الهيدروجينية المدروسة—بدءاً من معاملة الشاهد ذات درجة الحموضة المائلة للقلوية (T0, pH 7.7)، والمعاملات المعتدلة الحموضة T4 عند (pH 6.5) و T3 عند (pH 6.0)، وصولاً إلى المعاملات الشديدة الحموضة T2 عند (pH 5.5) و T1 عند (pH 5.0)—عند قيمة واحدة تمثلت في فرع واحد لكل نبات، دون حدوث أي تغير يُذكر عبر المنحنى التجريبي.

ويُعزى هذا الثبات المطلق إلى أن صفة عدد الأفرع في نبات القمح تُعد صفة ذات قناة نمطية وراثية ضيقة (Genetic canalization) وخاضعة لضبط تطوري وفسولوجي صارم خلال المرحلة الفينولوجية المدروسة، مما يجعلها غير قابلة للاستجابة للتغيرات البيئية الناتجة عن اختلاف قيم درجة الحموضة (pH)؛ حيث يعكس هذا التماثل المورفولوجي أن تكوين الأفرع الجانبية لم يتم تفعيله حيوياً خلال هذه المرحلة، وأن النمو ظل موجهاً حصرياً نحو الساق الرئيسية دون حدوث أي تفرع قاعدي. ومن الناحية الفسيولوجية، يشير هذا النمط إلى استمرار حالة السيادة القمية (Apical dominance)؛ حيث يظل نشاط القمة النامية مسيطراً على البراعم الإبطية وكابحاً لها، مما يمنع كسر سكونها وتنشيطها، وهو سلوك يرتبط مباشرة بالتوازن الهرموني الداخلي، لا سيما النسبة بين الأوكسينات المنحدرة من القمة النامية والساييتوكاينينات المسؤولة عن تحفيز انقسام الخلايا في البراعم الجانبية، حيث يتضح أن هذا التوازن الهرموني بقي ثابتاً ولم يتأثر بالبيئة الهيدروجينية للوسط، ولم تصل الإشارات الحيوية في أي من المعاملات إلى الحد الحرجة لتجاوز السكون الإبطي (Taiz & Zeiger, 2014).

ويُفسر غياب التأثير التمايزي لتغيرات الـ pH على هذه الصفة بأن الإجهاد الحمضي—رغم تأثيره المثبط والموثق سابقاً على معدلات استطالة الساق والنمو الحجمي—لم يكن قادراً على تعديل أو اختراق المسارات الجينية المنظمة لتمايز وتطور البراعم الإبطية خلال هذه المرحلة الفتية، مما جعل النبات يستمر

في توجيه نواتج التمثيل الضوئي وموارده الحيوية المتاحة نحو دعم نمو المحور الرئيسي فقط باعتباره النمط البنيوي المسيطر؛ وهي نتائج تؤكد مخبرياً المقاربات الفسيولوجية التي أشار إليها (Taiz & Zeiger, 2014) بخصوص الدور الهرموني المشترك للأوكسينات والساييتوكاينينات في تنظيم النقرع النباتي، وتتواءم تماماً مع الطروحات البيئية لـ (Brady & Weil, 2016) حول محدودية تأثير الإجهادات الخارجية على الصفات المورفولوجية ذات التحكم الوراثي الصارم والمنخفضة التباين اللادني.

- نبات الشعير :

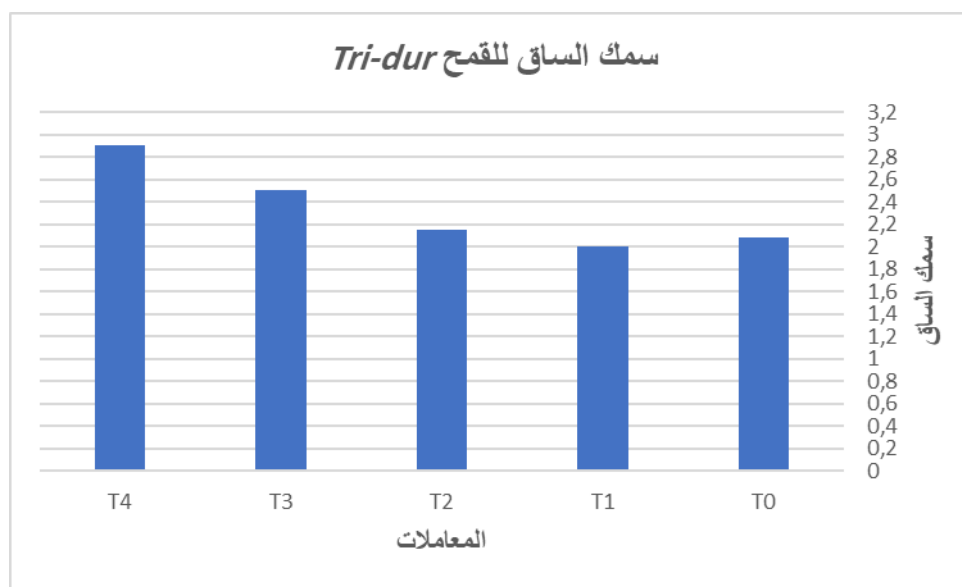
ويُعزى هذا النمط الاستجابي إلى أن صفة التفريع (Tillering) في نبات الشعير—باعتبارها صفة مورفولوجية أساسية ترتبط مباشرة بزيادة الكتلة الخضرية والكفاءة التمثيلية—تمتاز بقدر معتبر من الاستقرار الفسيولوجي ضمن نطاق واسع من الظروف الهيدروجينية، مع بقاء قدرتها على التفاعل مع الإجهاد الحمضي والتراجع حيويًا عند بلوغ حد معين من الشدة الحرجة؛ حيث يرتبط تكوين الأفرع الجانبية ببيوكيميائياً بالتوازن الدقيق بين الساييتوكاينينات المصنعة في المجموع الجذري والأوكسينات المنحدرة من القمة النامية، واللذين يمثلان المحدد الهرموني الرئيسي لنشاط البراعم الجانبية واستجابتها التمايزية للنمو (Taiz & Zeiger, 2014). وبناءً على ذلك، يُفسر الانخفاض المفاجئ المسجل حصرياً تحت ظروف المعاملة الأشد حموضة (pH 5.0) بأن النبات قد وصل إلى العتبة الحرجة للإجهاد الهيدروجيني الكافي لإحداث اضطراب فسيولوجي في الجهاز الجذري، والمتمثل في خفض كفاءة الامتصاص المعدني واختلال التوازن الأيوني نتيجة زيادة تركيز أيونات الهيدروجين (H^+) وسمية الألومنيوم (Al^{3+}) عند هذه القيمة الحامضية الحرجة؛ حيث ينعكس هذا الخلل الجذري سلباً على تخليق ونقل الساييتوكاينينات نحو الأعلى، مما يثبط قدرة البراعم الإبطية على التطور، بالتوازي مع تحفيز الهرمونات المرتبطة بالإجهاد التي تقيد النشاط المرستيمي للبراعم الجانبية (Kochian et al., 2004).

وتوضح هذه المعطيات مجتمعة أن نبات الشعير يمتلك تحملاً نسبياً لظروف الحموضة المعتدلة والشديدة نسبياً (pH 5.5–6.5)، بينما تظهر حساسيته المورفولوجية بوضوح فقط عند المستوى الأكثر حدة (pH 5.0)؛ حيث يعيد النبات فسيولوجياً توزيع نواتج التمثيل الضوئي وموارده الحيوية نحو دعم النمو الأساسي والمحافظة على بنية المحور الرئيسي، بدلاً من الاستثمار في تكوين أفرع جانبية إضافية، وهو ما يتوافق تماماً مع الطروحات البيئية لـ (Brady & Weil, 2016) حول تأثير الإجهادات الحادة في إعادة توجيه

الاستراتيجيات النمائية للنبات وتقليل الاستثمار في الصفات الثانوية عند اشتداد الظروف البيئية غير الملائمة.

3-2 سمك الساق :

- نبات القمح :



الوثيقة 52 متوسط سمك الساق لنبات القمح عند درجات الحموضة المختلفة

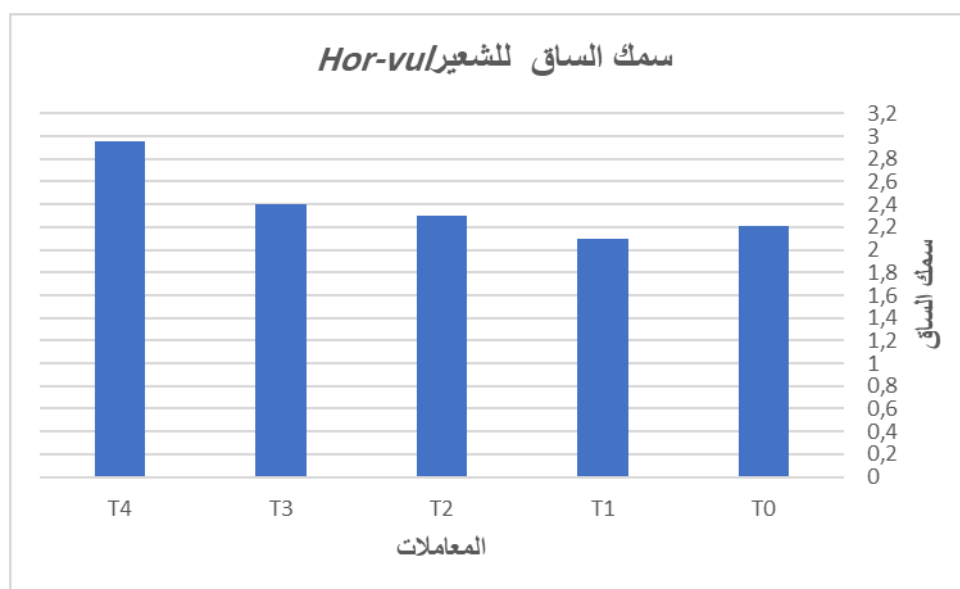
توضح الأعمدة البيانية (الوثيقة 52) استجابة متوسط سمك الساق لدى نبات القمح لتغير مستويات الإجهاد الحمضي عبر المعاملات من T0 إلى T4؛ حيث تُظهر النتائج منحنى استجابة غير خطي ثنائي الاتجاه، يبدأ بانخفاض طفيف ثم يتجه نحو ارتفاع تدريجي ملحوظ؛ إذ سجلت معاملة الشاهد ذات درجة الحموضة المائلة للقلوية (T0, pH 7.7) متوسط سمك ساق بلغ نحو 2.1 ملم، في حين شهدت المعاملة الأكثر حموضة T1 عند درجة حموضة (pH 5.0) تراجعاً طفيفاً لتصل إلى 2.0 ملم. وعقب هذه النقطة الحرجة، اتخذ المنحنى مساراً تصاعدياً تدريجياً مع انخفاض حدة الحموضة والاقتراب من النطاق المعتدل، حيث ارتفع المتوسط إلى 2.2 ملم في المعاملة T2 عند (pH 5.5)، ثم إلى 2.5 ملم في المعاملة T3 عند (pH 6.0)، وصولاً إلى أعلى قيمة نمو عرضي مسجلة في التجربة عند المعاملة T4 ذات درجة الحموضة (pH 6.5) بواقع 2.9 ملم.

ويُعزى هذا السلوك الحيوي إلى أن صفة سمك الساق في نبات القمح تمثل مؤشراً للنمو العرضي والأنسجة الداعمة التي تتأثر استجاباتها الخلوية مباشرة بالوسط الهيدروجيني للجذور؛ حيث يُفسر الانخفاض الطفيف المسجل حصرياً تحت ظروف الحموضة الشديدة (pH 5.0) بالتأثير المباشر لارتفاع تركيز أيونات الهيدروجين (H⁺) وما يرافقه من زيادة ذوبانية وإتاحة الألومنيوم (Al³⁺) بتركيزات سامة، مما يثبط امتصاص الكاتيونات

الثنائية الأساسية وفي مقدمتها الكالسيوم ($+Ca2$) نتيجة التنافس الأيوني الحاد، وهو عنصر محوري لاستقرار الجدر الخلوية وبناء الصفيحة الوسطى والأغشية البلازمية، مما يؤدي في النهاية إلى تقييد الانقسام والاستطالة الخلوية في الأنسجة القشرية والوعائية للساق عند هذه القيمة الحرجة (Brady & Weil, 2016).

وفي المقابل، فإن الاتجاه التصاعدي القوي في سمك الساق عبر بقية المعاملات وصولاً إلى الذروة عند المدى المعتدل (pH 5.5–6.5) يعكس تحسناً تدريجياً في الكفاءة الفسيولوجية العامة وتراجع حدة سمية الـ $+H$ ؛ حيث تزداد جاهزية وامتصاص العناصر المغذية الكبرى كالنيتروجين، البوتاسيوم، والكالسيوم، مما يدعم المسارات الأيضية المرتبطة بتخليق المادة الجافة وبناء الأنسجة الهيكلية. ويتطابق هذا النمو العرضي طردياً مع تحسن معدلات التمثيل الضوئي وتدفق نواتجه الكربونية نحو الأنسجة النامية، مما يحفز نشاط الكامبيوم الوعائي لتكوين أوعية الخشب واللحاء، وزيادة ترسيب المركبات البوليمرية الصلبة كالسليولوز واللجنين في الجدر الخلوية (Taiz & Zeiger, 2014). وبناءً على ذلك، يتضح أن منحنى النمو العرضي لساق القمح محكوم بالتوازن الدقيق بين التأثير التثبيطي الأولي للإجهاد البروتوني عند قيم الحموضة المتطرفة، وتحسن الأداء الوظيفي والحيوي للنبات في النطاق الهيدروجيني الأمثل القريب من التعادل.

- نبات الشعير :



الوثيقة 53 متوسط عدد الأوراق لنبات الشعير عند درجات الحموضة المختلفة

توضح الأعمدة البيانية (الوثيقة 53) استجابة متوسط سمك الساق لدى نبات الشعير لتغير مستويات الإجهاد الحمضي عبر المعاملات من T0 إلى T4؛ حيث تُظهر النتائج منحنى استجابة تدريجياً غير خطي يبدأ بانخفاض طفيف عند أقصى درجات الإجهاد، ثم يتجه نحو ارتفاع منتظم مع تحسن ظروف الوسط الهيدروجيني.

فقد سجلت معاملة الشاهد ذات درجة الحموضة المائية للقلوية (T_0 , pH 7.7) متوسط سمك ساق بلغ نحو 2.2 ملم، قبل أن تنخفض هذه القيمة معنوياً في المعاملة الأكثر حموضة T_1 عند درجة حموضة (pH 5.0) لتصل إلى حوالي 2.0 ملم. وعقب هذا التراجع، اتخذت القيم مساراً تصاعدياً تدريجياً ومنتظماً في بقية المعاملات، حيث ارتفعت إلى 2.3 ملم في المعاملة T_2 عند (pH 5.5)، ثم إلى 2.45 ملم في المعاملة T_3 عند (pH 6.0)، لتبلغ أعلى قيمة نمو عرضي مسجلة في التجربة عند المعاملة T_4 ذات درجة الحموضة المعتدلة (pH 6.5) بحوالي 2.95 ملم.

ويُعزى هذا النمط الاستجابي إلى أن سمك الساق في نبات الشعير يمثل صفة نمو عرضي ترتبط بدرجة عالية بالتوازن الكيميائي والحيوي للوسط الجذري، مع ظهور حساسية واضحة للإجهاد الحمضي عند المستوى الأكثر شدة؛ حيث يُفسر الانخفاض المسجل حصرياً في المعاملة ذات القيمة الحامضية الحرجة (pH 5.0) بالتأثير المباشر لارتفاع تركيز أيونات الهيدروجين (H^+) وما يرافقه من زيادة ذوبانية وإتاحة الألومنيوم السام (Al^{3+}) في محلول التربة، الأمر الذي يؤدي فسيولوجياً إلى اضطراب امتصاص العناصر المعدنية الأساسية، وإعاقة عمليات الانقسام الخلوي وتوسع الأنسجة، مما يحد مباشرة من تطور القطر العرضي وبناء الساق عند هذه القيمة المتطرفة (Brady & Weil, 2016).

وفي المقابل، فإن الزيادة التدريجية المنتظمة في سمك الساق عبر بقية مستويات الـ pH وصولاً إلى ذروتها في النطاق المعتدل (pH 5.5–6.5) تعكس تحسناً تصاعدياً في الظروف الفسيولوجية العامة مع انخفاض حدة الإجهاد البروتوني؛ حيث تتحسن كفاءة امتصاص العناصر الغذائية الأساسية مثل الفوسفور والبوتاسيوم والنيتروجين، مما ينعكس إيجاباً على النشاط الأيضي العام للنبات. كما يؤدي ارتفاع كفاءة التمثيل الضوئي وتزايد معدلات نقل نواتجه الكربونية نحو الأنسجة النامية إلى دعم انقسام خلايا الكامبيوم وتوسع الخلايا القشرية والوعائية، إضافة إلى تعزيز الكفاءة البيوكيميائية لترسيب مكونات الجدار الخلوي الصلبة كالسيلولوز واللجنين، وهو ما يفسر زيادة سمك الساق بشكل تدريجي ومنتظم (Brady & Weil, 2016). وتتقاطع هذه النتائج التجريبية تماماً مع ما أشار إليه (Taiz & Zeiger, 2014) من أن تحسن التوازن الغذائي والظروف الكيميائية المحيطة بالجذور ينعكس مباشرة على كفاءة النمو العرضي وتطور الأنسجة الداعمة؛ وبناءً على ذلك، يُعد سمك الساق في نبات الشعير صفة حساسة ومؤشراً بنيوياً واضحاً للتحول من حالة الإجهاد الحاد عند قيم الحموضة المنخفضة إلى حالة التحفيز النمائي والأداء الوظيفي الأمثل عند قيم الحموضة القريبة من التعادل.

4-2 عدد السلاميات :

- نبات القمح :

ويُعزى هذا الثبات الرقمي القطعي إلى أن صفة عدد السلاميات في هذا الصنف تعد صفة محكومة وراثياً بشكل صارم ومقيدة بآلية التوجيه الجيني الثابت (Strict Genetic Canalization) خلال هذه المرحلة العمرية من حياة البادرة، مما يحول دون تأثيرها اللادني بالعوامل الكيميائية الخارجية. ومن الناحية الفسيولوجية والتطورية، يوضح هذا الثبات الهيكلي أن عملية الكشف وتمايز الأعضاء (Organogenesis) التي تحدث داخل المرستيم القمي الخضري (Shoot Apical Meristem – SAM) تمتلك منظومة حماية خلوية وتوازن حيوي عالي الكفاءة ضد التغيرات الحادثة في قيم الـ pH للوسط المحيط (Taiz & Zeiger, 2014).

ويُفسر هذا الاستقرار البنوي بيوكيميائياً بأن انقسام الخلايا الجنينية في القمة النامية لتوليد مبادئ السلاميات والعقد يخضع لـ "ساعة بيولوجية وراثية" دقيقة تحدد معدل وظهور الأعضاء (Plastochron)؛ وحيث إن الإجهاد الحمضي الشديد المسجل عند قيم الـ pH المنخفضة (5.0–5.5) والناتج عن زيادة تركيز بروتونات الهيدروجين (H^+) وسمية الألومنيوم (Al^{3+}) قد نجح فسيولوجياً في كبح التمدد الحجمي واستطالة الخلايا (طول النبات)، إلا أنه عجز تماماً عن التداخل مع الشفرة الجينية والبرامج التطويرية المسؤولة عن تحديد عدد الأجزاء البنوية المفصلية للنبات. وتتوافق هذه النتائج تماماً مع المبادئ البيولوجية الموثقة لدى (Brady & Weil, 2016) والتي تشير إلى أن إجهادات بيئة الجذور يقتصر تأثيرها الكابح على مؤشرات النمو الكمي وكفاءة الاستثمار الحيوي للطاقة، في حين تظل الصفات المورفولوجية التكوينية ذات السيطرة الجينية المباشرة محصنة وراثياً ضد التغيرات الفينوتيبية المحفزة بيئياً.

- نبات الشعير :

وصولاً إلى المعاملات الشديدة الحموضة T2 عند (pH 5.5) و T1 عند (pH 5.0)، متوسطاً موحداً بدقة بلغ 4 سلاميات، دون ظهور أي فروق ظاهرة أو تباين معنوي بين مستويات الـ pH المختلفة.

وتشير هذه النتائج إلى أن صفة عدد السلاميات لدى نبات الشعير تمتاز باستقرار نمائي مرتفع خلال المرحلة المدروسة، مما يجعلها أقل تأثراً بالإجهاد الحمضي مقارنة بالصفات المورفولوجية الأخرى؛ حيث

استمرت آلية تكوين العقد والسلاميات وفق نمط متقارب ومستقر حيويًا رغم التباين الحاد في الظروف الكيميائية للوسط الجذري. ومن الناحية الفسيولوجية، يرتبط تكوين السلاميات بنشاط المرستيم القمي الساقى (SAM) والبرامج النمائية المنظمة لتخليق الأعضاء النباتية، وتؤكد هذه المؤشرات أن مستويات الـ pH المطبقة لم تؤثر في عدد الوحدات البنوية المتكونة، على الرغم من تأثيرها الموثق سابقاً في أبعاد هذه السلاميات واستطالتها العرضية أو الطولية؛ وهو ما يتطابق مع ما أوضحه (Taiz & Zeiger, 2014) من أن العمليات الحيوية المرتبطة بتكوين الأعضاء وتمايزها الهيكلي تتمتع بدرجة من الاستقرار الجيني الكافي لعزلها عن التأثيرات الخارجية، مقارنة بالعمليات الفسيولوجية المرتبطة باستطالة الخلايا وتوسعها الحجمي والتي تقع مباشرة تحت تأثير الإجهادات البيئية.

ويتأكد هذا التباين الوظيفي عند ملاحظة تزامن ثبات متوسط عدد السلاميات عند الرقم 4 عبر جميع بيئات الـ pH، مع التغيرات والتراجعات المورفولوجية الملحوظة التي سجلتها صفة طول النبات تحت ظروف القيم الحامضية الحرجة (pH 5.0–5.5)؛ مما يثبت مخبرياً أن الإجهاد الحمضي يوجه كبحة الفسيولوجي نحو آليات الاستطالة والنمو الكمي للخلايا بدلاً من التدخل في عدد الوحدات المورفولوجية المتميزة. ويُعزى ذلك بيوكيميائياً إلى أن الحموضة المرتفعة تؤثر سلباً في امتصاص الماء، الكفاءة الأيضية، وجاهزية العناصر المعدنية المرتبطة بالنمو الخضري، مما ينعكس حصرياً على الأبعاد الحجمية للأعضاء وليس على عددها الأولي (Kochian et al., 2004). وبناءً على ذلك، يُعد عدد السلاميات في نبات الشعير مؤشراً مورفولوجياً مستقراً ومقاوماً للتقلبات الهيدروجينية، وتتوافق هذه المحصلة تماماً مع الأطروحات البيئية لـ (Brady & Weil, 2016) بشأن اختلاف حساسية وعتبة استجابة المؤشرات المورفولوجية والفسيولوجية داخل النوع النباتي الواحد تجاه الإجهادات الخارجية.

5-2 طول السلمية الثالثة:

- نبات القمح :

وتشير هذه المحصلة المورفولوجية إلى أن استجابة طول السلمية الثالثة لم تتبع النمط التراجعي التقليدي المسجل بالنسبة للطول الكلي لنبات القمح، مما يثبت مخبرياً اختلاف حساسية وعتبة استجابة الأنسجة المتميزة تجاه التغيرات في قيم الـ pH؛ حيث وفرت مستويات الحموضة المعتدلة والشديدة نسبياً (pH 5.0–5.5) بيئة محفزة لتعزيز الاستطالة الخلوية في هذه السلامة تحديداً، على العكس من تأثيرها المثبط على الصفات المورفولوجية الأخرى. ومن الناحية الفسيولوجية، ترتبط استطالة السلامة بنشاط الانقسام وتمدد الخلايا المحكوم بالتوازن الهرموني الداخلي (الأوكسينات والجبرلينات)، وتأثير الـ pH المباشر في الخصائص الميكانيكية للجدار الخلوي؛ إذ يفسر الارتفاع الملحوظ في الطول عند القيم الحامضية (pH 5.0–5.5) استناداً إلى "فرضية النمو الحمضي" (Acid Growth Hypothesis)، والتي تنص على أن انخفاض الرقم الهيدروجيني في الجدار الخلوي (زيادة بروتونات H^+) يؤدي إلى تنشيط بروتينات الإكسبانسين (Expansins) والإنزيمات المرتبطة بإرخاء الروابط الهيدروجينية لشبكة السيلوز، مما يرفع من مرونة الجدار ويسمح بزيادة استطالة الخلايا تحت تأثير ضغط الامتلاء (Taiz & Zeiger, 2014).

علاوة على ذلك، يُعزى تحسن طول السلمية الثالثة عند مستويات الـ pH المنخفضة (pH 5.0–5.5) إلى تباين استراتيجيات توزيع النواتج التمثيلية والموارد الحيوية بين الأعضاء النباتية النامية تحت ظروف الإجهاد، أو نتيجة تباين الحساسية النسيجية الموضعية؛ وهو ما يتوافق مع ما أشار إليه (Fageria & Baligar, 2008) من أن تأثير الـ pH في نمو النباتات لا يكون متماثلاً بين جميع الصفات المورفولوجية، بل تستجيب الأعضاء بدرجات متفاوتة تتبع شدة الإجهاد والمرحلة الفينولوجية. وبناءً على ذلك، يتضح أن السلمية الثالثة في نبات القمح أبدت استجابة فسيولوجية مميزة وخاصة عبر منحنى الـ pH المدروس، مما يؤكد أن تأثير الحموضة على النمو ليس أحادي الاتجاه، بل محكوم بطبيعة العضو المستهدف والآليات البيوكيميائية المتحكممة في تطوره البنيوي. (Fageria & Baligar, 2008; Taiz & Zeiger, 2014)

- نبات الشعير :

وتشير هذه النتائج إلى أن طول السلمية الثالثة لدى نبات الشعير تأثر بدرجات متفاوتة بتغير قيم الـ pH؛ حيث ارتبطت المؤشرات الأعلى بالمعاملات التي وفرت المدى الهيدروجيني الأكثر ملاءمة للأداء الفسيولوجي، كما يلاحظ أن نمط الاستجابة يتطابق جزئياً مع الاتجاه العام للنمو الطولي الكلي للنبات، مما يثبت مخبرياً وجود ارتباط وثيق بين استطالة السلامة والكفاءة الخضرية العامة. ومن الناحية الفسيولوجية، تعتمد استطالة السلامة على كفاءة الانقسام الخلوي وتوسع الخلايا، وهي عمليات ترتبط مباشرة بالحالة

المائية والتغذية للنبات؛ إذ يعد توفر الكاتيونات المعدنية الأساسية، لا سيما البوتاسيوم والكالسيوم، من المحددات المحورية للمحافظة على ضغط الامتلاء الخلوي (Turgor Pressure) واستقرار الأغشية والأنشطة الإنزيمية للجدر الخلوية، مما يدعم نمو الأنسجة واستطالتها عند قيم الـ pH القريبة من المجال الأمثل لنمو الشعير (Kochian et al., 2004).

أما الانخفاض المسجل عند قيم الـ pH المنخفضة والمتذبذبة، فيُعزى بيوكيميائياً إلى التأثيرات الكابحة للحموضة المرتفعة على نفاذية الأغشية وجاهزية العناصر الغذائية، فضلاً عما يرافقه من زيادة ذوبانية وامتصاص الكاتيونات السامة كالألومنيوم ($+Al3$) والمنغنيز ($+Mn2$)، مما يثبط النشاط الأيضي للخلايا النامية ويحد من قدرتها على التمدد. وتؤثر هذه الظروف الكيميائية المتطرفة سلباً على التوازن الهرموني الداخلي، وعلى كفاءة ونشاط الأنسجة المرستيمية البينية (Intercalary Meristems) المسؤولة مباشرة عن نمو وتطور السلاميات، الأمر الذي يؤدي إلى تراجع أبعادها المورفولوجية مقارنة بالمعاملات الأكثر ملاءمة للنمو (Kochian et al., 2004).

وتتقاطع هذه النتائج التجريبية مع الاستنتاجات المحورية لـ (Hasanuzzaman et al., 2013) في أن استجابة المحاصيل للإجهادات البيئية، ومنها الإجهاد الحمضي، لا تقتصر على كبح مؤشرات الكتلة الحيوية الكلية فحسب، بل تمتد لتصيب الأعضاء النباتية المختلفة بدرجات متفاوتة تتبع الحساسية الفسيولوجية الموضعية وطبيعة العمليات النمائية المتحكممة في العضو النسيجي المستهدف.

2-6 تاريخ الإشطاء :

- نبات القمح

وتشير هذه الفروق الزمنية إلى أن مستويات الـ pH القريبة من المجال الحمضي المعتدل (pH 6.0–6.5) وفرت ظروفاً حيوية أكثر ملاءمة لتسريع دخول القمح مرحلة الإشطاء مقارنة بالمعاملات المتطرفة أو المائلة للقلوية؛ وهي مرحلة فينولوجية حرجة ترتبط مباشرة بمعدل الانقسام الخلوي، وتكوين الأفرع القاعدية، وزيادة المساحة الورقية والإنتاجية المحتملة للمحصول. ومن الناحية الفسيولوجية، يُفسر التباين المسجل في تاريخ ظهور هذه المرحلة تحت ظروف النطاق الهيدروجيني (pH 6.0–6.5) بتحسين كفاءة الامتصاص الجذري وجاهزية العناصر الغذائية الكبرى، وفي مقدمتها النيتروجين والفوسفور، واللذين يلعبان دوراً محورياً في دعم النمو

الخضري، وتخليق الأحماض النووية والمركبات الطاقة (ATP)؛ مما ينعكس إيجاباً على نشاط الخلايا المرستيمية البينية، والتوازن الهرموني الداخلي المنظم لتكشف وتطور البراعم الجانبية (Taiz & Zeiger, 2014). وعلى النقيض من ذلك، فإن التأخر الفينولوجي الملاحظ عند قيم الـ pH المنخفضة الشديدة، لا سيما في المعاملة الحامضية الحرجة (pH 5.0)، يرجع مباشرة إلى التأثيرات التثبيطية للإجهاد الحمضي والبروتوني على العمليات الأيضية ومعدلات الاستطالة الخلوية؛ إذ يؤدي ارتفاع تركيز أيونات الهيدروجين (H^+) وزيادة ذوبانية وإتاحة الكاتيونات السامة كالألومنيوم (Al^{3+}) في الوسط الجذري إلى تراجع النفاذية الاختيارية للأغشية وإبطاء التطور المورفولوجي العام، مما يتسبب فسيولوجياً في تأخير موعد الإشتاء. وتتقاطع هذه النتائج التجريبية مع المبادئ البيئية التي وثقها (Hasanuzzaman et al., 2013) من أن الإجهادات الخارجية، ومنها الإجهاد الهيدروجيني الحاد، تمتلك القدرة على تعديل وتأخير توقيت المراحل النمائية والزمنية للنباتات عبر كبح المسارات الفسيولوجية والتمثيلية المرتبطة بالنمو الخضري. وبناءً على ذلك، يتضح مخبرياً أن ديناميكية التطور الفينولوجي وتاريخ الإشتاء في نبات القمح يمثلان مؤشراً حساساً للغاية لتغيرات قيم الـ pH، حيث يتم كبح المسار الزمني للكشف تحت ظروف الحموضة الشديدة، مقابل تحفيزه عند اقتراب الوسط من البيئة الهيدروجينية المثلى (Fageria & Baligar, 2008; Taiz & Zeiger, 2014).

- نبات الشعير :

وتشير هذه المحصلة الزمنية إلى أن مستويات الـ pH القريبة من المجال الحمضي المعتدل نسبياً (pH 6.0–6.5) ارتبطت فسيولوجياً بتبكير دخول نبات الشعير إلى مرحلة الإشتاء مقارنة بمعاملة الشاهد، وهو مؤشر فينولوجي يعكس استجابة وتكيف النبات للظروف الكيميائية المحيطة ومدى ملاءمتها للتطور الخضري؛ حيث يُفسر التبكير المسجل تحت ظروف النطاق (pH 6.0–6.5) بتحسّن النشاط الأيضي العام وكفاءة امتصاص العناصر الغذائية، فضلاً عن توازن الإشارات الهرمونية المنظمة لتكشف وتطور البراعم الجانبية، مما سرّع من وصول النبات إلى العتبة النمائية الحرجة اللازمة لبدء ظهور هذه المرحلة (Taiz & Zeiger, 2014).

وعلى النقيض من ذلك، فإن التأخر النسبي الملاحظ في المعاملات الحامضية المتطرفة (pH 5.0–5.5) يرجع فسيولوجياً إلى الأثر الكابح لارتفاع تركيز أيونات الهيدروجين (H^+) وزيادة ذوبانية وإتاحة الألومنيوم السام (Al^{3+}) في الوسط الجذري، وما يترتب عليهما من خفض كفاءة الامتصاص وإبطاء معدلات الانتقال والتكشف بين المراحل النمائية (Kochian et al., 2004).

ومن جهة أخرى، فإن التأخر الطفيف المسجل في معاملة الشاهد (pH 7.7) مقارنة بالنطاق المعتدل يوضح مخبرياً أن الظروف البيئية المثلى لدعم النمو الحجمي أو الاستطالة لا تتطابق بالضرورة مع الظروف التي تعجل المراحل الفينولوجية الزمنية؛ وهو ما يتقاطع مع طروحات (Fageria & Baligar, 2008) في أن استجابة المحاصيل لتغيرات الـ pH تختلف باختلاف الصفة، حيث تستجيب المؤشرات المورفولوجية أو الفينولوجية بصورة متباينة تتبع طبيعة العمليات الفسيولوجية المتحكمة في العضو النباتي. وبناءً على ذلك، نستنتج أن موعد الإشتاء في الشعير أظهر حساسية محدودة تجاه قيم الـ pH المدروسة، مع أفضلية زمنية للنطاق القريب من التعادل، متوافقاً مع الآليات الموثقة لدى كل من (Kochian et al., 2004)، و (Fageria & Baligar, 2008)، و (Taiz & Zeiger, 2014).

2-8 تاريخ ظهور السنابل :

- نبات القمح :

وتشير هذه النتائج إلى أن مستويات الـ pH القريبة من المجال الحمضي المعتدل نسبياً (pH 6.0–6.5) ارتبطت بتبكير نسبي في انتقال نبات القمح إلى مرحلة طرد السنابل مقارنة بالبيئات الهيدروجينية الأخرى، وهو مؤشر فينولوجي محوري يعكس كفاءة استجابة النبات وتفاعله مع الظروف المحيطة لاستكمال مراحل نموه وتطوره؛ حيث يُفسر هذا التوقيت المتقدم تحت ظروف النطاق (pH 6.0–6.5) بتحسين الأداء الفسيولوجي للمجموع الخضري والتوازن الغذائي، لا سيما كفاءة امتصاص العناصر المعدنية الأساسية ودورها في دعم المسارات الأيضية. كما أن توفر البيئة الهيدروجينية المثلى يساهم فسيولوجياً في تسريع الانتقال الحرج من المرحلة الخضرية إلى المرحلة التناسلية، نتيجة تكامل وتناغم الإشارات الكيميائية الداخلية المنظمة للتطور الفينولوجي، بما في ذلك التوازن الحاد بين منظمات النمو النباتية (Taiz & Zeiger, 2014).

وعلى النقيض من ذلك، فإن التأخر الفينولوجي المسجل عند قيم الـ pH المنخفضة المتطرفة، وخاصة في المعاملة الحامضية الحرجة (pH 5.0)، يرجع مباشرة إلى الآثار السلبية للإجهاد الحمضي والبروتوني على كفاءة الجذور في امتصاص الماء والكاتيونات المعدنية، فضلاً عن كبحه للنشاط الأيضي العام؛ إذ يؤدي ارتفاع تركيز أيونات الهيدروجين (H^+) وزيادة ذوبانية وإتاحة الألومنيوم السام (Al^{3+}) في الوسط المحيط بالجذور إلى إبطاء

النمو الخضري وتأخير العمليات الفسيولوجية المرتبطة بالانتقال إلى مرحلتى التزهير وطرء السنابل (Kochian et al., 2004).

كما أن التباين الطفيف وغير الخطي بين المعاملات يوضح مخبرياً أن استجابة القمح لتغيرات الـ pH محكومة بشدة الإجهاد والمرحلة النمائية المستهدفة؛ وهو ما يتقاطع مع طروحات (Hasanuzzaman et al., 2013) في أن الإجهادات البيئية تمتلك القدرة على تعديل التوقيت الفينولوجي للمحاصيل عبر التأثير المباشر على الآليات الفسيولوجية الأساسية المرتبطة بالتمايز والتطور، دون اتباع نمط خطي ثابت عبر جميع الظروف الكيميائية. وبناءً على ذلك، يتضح أن توقيت ظهور السنابل في نبات القمح يُعد مؤشراً فسيولوجياً حساساً لتغيرات البيئة الجذرية، حيث ترتبط مستويات الحموضة المعتدلة بتسريع النضج التناسلي، في حين يتسبب الإجهاد الحامضي الشديد في كبحه وتأخيره (Hasanuzzaman et al., 2013; Taiz & Zeiger, 2014).

- نبات الشعير :

وتشير هذه النتائج التجريبية إلى أن نبات الشعير يُبدي استجابة فينولوجية حساسة ومحكومة طردياً بدرجة حموضة الوسط الجذري؛ حيث ترتبط البيئة الهيدروجينية القريبة من القلوية الخفيفة (pH 7.7) بتبكير معنوي في تكشف الأعضاء التناسلية، ويعكس هذا التدرج الزمني المنتظم وجود علاقة ارتباطية وثيقة بين الظروف الكيميائية في منطقة الجذور والتوقيت الفينولوجي لانتقال النبات من التطور الخضري إلى مرحلتى التزهير وطرء السنابل. ومن الناحية الفسيولوجية، يُفسر هذا التأخر التدريجي في ظهور السنابل بالتزامن مع انخفاض قيم الـ pH بالأثر الكابح للإجهاد الحمضي والبروتوني على كفاءة الامتصاص الجذري للكاتيونات المعدنية الأساسية مثل الكالسيوم ($+Ca2$)، المغنيسيوم ($+Mg2$)، والبوتاسيوم ($+K$)، وهي عناصر محورية لدعم الانقسام الخلوي، والمحافظة على التوازن الأسموزي، وتنشيط الأنظمة الإنزيمية المرتبطة بالتطور الفينولوجي. علاوة على ذلك، فإن زيادة تركيز أيونات الهيدروجين ($+H$) وارتفاع ذوبانية وإتاحة العناصر السامة كالألومنيوم ($+Al3$) في الأوساط الحامضية الشديدة (pH 5.0–5.5) يؤديان فسيولوجياً إلى إحداث اضطراب حاد في المسارات الأيضية وتباطؤ الكفاءة التمثيلية، مما يؤخر بالضرورة الانتقال الهرموني والزمني نحو مرحلة النضج التناسلي (Kochian et al., 2004; Fageria & Baligar, 2008).

كما يوضح التوافق التام والتزامن العام بين هذه النتائج والبيانات المسجلة سابقاً للصفات الخضريّة المورفولوجية (مثل طول النبات الكلي وطول السلية الثالثة) أن الإجهاد الحمضي يؤثر بشكل متكامل ونسقي على منظومتى النمو الخضري والتطور الفينولوجي لنبات الشعير؛ حيث تزداد حدة الكبح الحيوي طردياً مع انخفاض الرقم الهيدروجيني، مما ينعكس على شكل تأخر تدريجي ومنتظم في جميع مراحل الكشف البنيوي للنبات، متوافقاً مع

آليات استجابة محاصيل الحبوب للإجهادات البيئية المتطرفة (Kochian et al., 2004; Fageria & Baligar, 2008)

2-9 عدد السنابل:

- نبات القمح :

وتشير هذه النتائج التجريبية إلى أن عدد السنابل لدى النباتين المدروسين لم يتأثر نهائياً بتغير درجة حموضة الوسط ضمن المجال التجريبي المطبق، مما يثبت أن هذه الصفة المورفولوجية التكاثرية تُعد أكثر استقراراً وحصانة بيولوجية مقارنة بمؤشرات النمو الكمية والفيولوجية الأخرى التي أظهرت استجابات حادة للإجهاد الحمضي. ومن الناحية البنيوية والتطورية، يرتبط تكوين السنبل في محاصيل الحبوب بطبيعة النمو المحدود للنورة الطرفية؛ حيث ينتهي المحور النموي الخضري الرئيسي حتماً بتمايز سنبل واحد لكل ساق رئيسية، وحيث إن النتائج السابقة لصفة عدد الأفرع قد أظهرت سيادة قمية صارمة واستقراراً عند فرع واحد (ساق رئيسية واحدة) لجميع المعاملات، فإن ثبات متوسط عدد السنابل عند القيمة (1.0) يمثل انعكاساً طردياً للطابع البنائي المورفولوجي العام والبرنامج الوراثي المحدد سلفاً للنبات خلال هذه المرحلة، أكثر مما يعكس غياب التأثير الفسيولوجي للعامل الهيدروجيني المدروس.

ويُفسر هذا الثبات الرقمي بأن التغير الحاد في قيم الـ pH وزيادة تركيز بروتونات الهيدروجين (H^+) وسمية الألومنيوم (Al^{3+}) في الأوساط الحامضية (pH 5.0–5.5) لم تمتلك القدرة الحيوية على تعديل أو اختراق المسارات الجينية المنظمة لعدد الوحدات التكاثرية المتكونة؛ بل ينصب تأثير الإجهاد الحمضي فسيولوجياً على الصفات النوعية والكمية المرتبطة بالسنبل نفسها—مثل طول السنبل، عدد السنيبلات، نموها الحجمي، أو توقيت ظهورها وطردها—وهي مؤشرات ترتبط طردياً بكفاءة الامتصاص المعدني والتمثيل الضوئي وتعد أكثر حساسية للظروف البيئية مقارنة بالعدد الكلي التكويني للسنابل. وتتقاطع هذه الاستنتاجات تماماً مع المقاربات العلمية لـ (Fageria & Baligar, 2008) في أن استجابة محاصيل الحبوب للإجهادات البيئية تختلف باختلاف طبيعة الصفة، حيث تكون بعض الصفات الهيكلية محكومة وراثياً وصارمة الاستقرار مقارنة بالصفات المرتبطة بالاستطالة الخلوية والتكوين الوظيفي الحجمي للأعضاء. وبناءً على ذلك، يتضح مخبرياً أن صفة عدد السنابل في القمح والشعير تمثل مؤشراً فينوتيبياً ثابتاً ومستقراً تماماً تحت ظروف الإجهاد الحمضي المدروسة، في حين تظل الآثار التثبيطية للحموضة مقتصرة على مؤشرات التطور الفينولوجي والنمو الكمي الأخرى.

- نبات الشعير :

توضح الأشكال البيانية استقراراً مطلقاً وجامداً في متوسط عدد السنابل لنبات الشعير عند القيمة الموحدة (1.0 سنبله/ نبات) عبر جميع المعاملات المدروسة، بدءاً من المعاملة الأشد حموضة T1 عند (pH 5.0) وصولاً إلى معاملة الشاهد المائلة للقلوية T0 عند (pH 7.7). ويعكس هذا الثبات الرقمي الطابع البنيوي الهيكلي لمحاصيل الحبوب؛ حيث ينتهي المحور النموي الخضري الرئيسي حتماً بتمايز سنبل واحد نتيجة لطبيعة النمو المحدود للنورة الطرفية، مما يجعل هذه الصفة المورفولوجية التكاثرية أقل هبوطاً وقابلية للتغير تحت تأثير العوامل الخارجية مقارنة بمؤشرات النمو الكمية الأخرى.

ومن الناحية الفسيولوجية والتطورية، تشير هذه النتائج المخبرية إلى أن الإجهاد الحمضي والبروتوني المطبق ضمن ظروف التجربة لم يمتلك القدرة الحيوية على إحداث أي تعديل في عدد الوحدات التكاثرية المتكونة، بل إن تأثيره المباشر كان مقتصرًا على مستوى الصفات النوعية والكمية المرتبطة بالسنبل نفسها أو بتوقيت نموها وطردها. ويُعد ذلك متوافقاً تماماً مع آليات التنظيم النمائي الصارم في الميرستيم القمي التكاثري، والذي يحدد البنية التشريحية والعديدية النهائية للسنبل بشكل مبكر جداً خلال مراحل التطور الخضري الأولى قبل تقاوم حدة الإجهاد، كما يُلاحظ فسيولوجياً أن الجمود العددي للسنابل قد تزامن مع التباين والاضطراب الزمني المسجل في صفات أخرى، مثل توقيت طرد السنابل وطول الحامل الزهري، لا سيما تحت ظروف قيم الـ pH المنخفضة والمتطرفة (5.0–5.5 pH)؛ وهو ما يثبت تجريبياً أن الإجهاد الحامضي (الناتج عن زيادة تركيز أيونات H^+ وسمية Al^{3+}) ينصب تأثيره التثبيطي بدرجة أكبر على كفاءة المسارات الأيضية، والنمو الخضري، ومعدلات الاستطالة والانقسام الخلوي، دون أن يمتد بالضرورة إلى تعديل عدد البنى التكاثرية المتكونة. وتتقاطع هذه المحصلة تماماً مع طروحات (Sreenivasulu & Schnurbusch, 2012) من أن استجابة محاصيل الحبوب للإجهادات البيئية المتطرفة تختلف جوهرياً بين الصفات المورفولوجية الهيكلية والصفات التكاثرية الوظيفية، حيث تظهر المحددات البنيوية الوراثية استقراراً وثباتاً عالياً مقارنة بالصفات الديناميكية المرتبطة بالنمو، والاستطالة، والتطور الفينولوجي الزمني. وبناءً على ذلك، يتضح أن عدد السنابل في الشعير يمثل مؤشراً مورفولوجياً ثابتاً ومحصناً بيولوجياً ضد تغيرات درجة حموضة مياه السقي، في حين تظل تأثيرات الإجهاد واضحة المعالم على مؤشرات الاستطالة والتطور الزمني للمحصول.

10-2 عدد البذور في كل سنبله :

- نبات القمح :

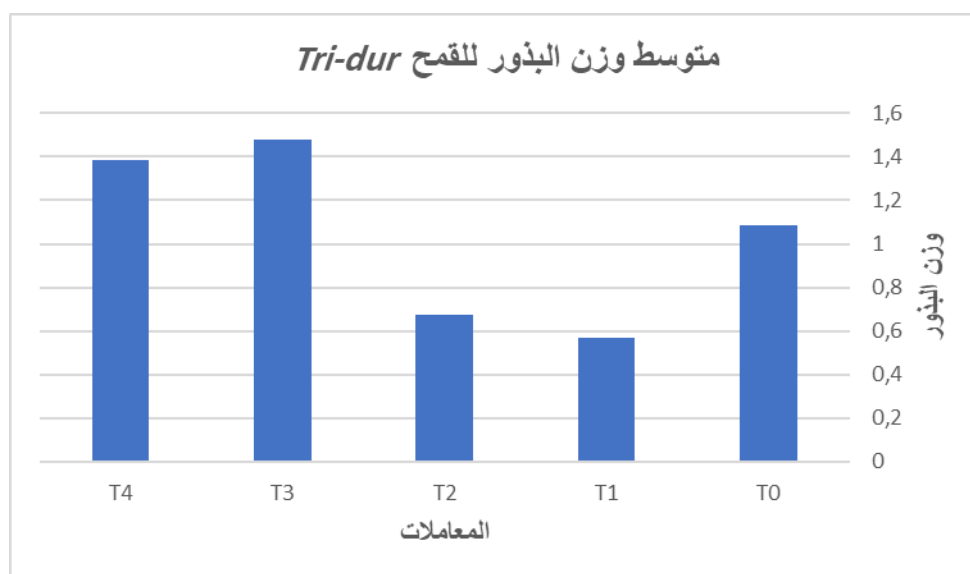
تثبت هذه النتائج المخبرية أن كفاءة التكاثر الجنسي والحمولة البذرية داخل النورة الطرفية ترتبط طردياً بالاستقرار الهيدروجيني للوسط الجذري؛ حيث يمثل النطاق الهيدروجيني (pH 6.0–6.5) المدى الفسيولوجي الأمثل لتحفيز انقسام الميرستيم التكاثري خلال المراحل الفينولوجية الحرجة، وتحديدًا عند نشوء بداءات الأزهار (Floral primordia initiation) ومرحلتي التلقيح والإخصاب الزهري. ويُعزى التباين الكمي في عدد البذور إلى كفاءة الامتصاص الخلوي والاتاحية الحيوية للعناصر الكبرى النيتروجين (N) والفسفور (P)، واللذين يمثلان الركيزة الكيميائية لتخليق الأحماض النووية (DNA & RNA)، ومركبات الطاقة (ATP)، وبروتينات التخزين داخل الأنسجة الزهرية النامية، مما يرفع معدلات نجاح الإخصاب وتثبيت العقد الثمري (Fageria & Baligar, 2008). وعلى العكس من ذلك، فإن التراجع الحاد في السعة البذرية تحت ظروف الإجهاد الحمضي المتطرف (pH 5.0) يعود فسيولوجياً إلى التثبيط الخلوي الناجم عن زيادة تركيز بروتونات الهيدروجين (H^+) وسمية أيونات الألومنيوم الحرة (Al^{3+}) في المحلول الأرضي، مما يتسبب في كبح استطالة الجذور وتعطيل النقل النشط للماء والمذابات. يؤدي هذا الخلل الكيميائي الحيوي إلى حدوث اضطراب وظيفي في العلاقة بين مصدر التمثيل الضوئي (Source) والمصب التكاثري (Sink)، حيث يثبط الإجهاد البروتوني معدل انتقال الكربوهيدرات المصنعة من الأوراق العلمية (لا سيما ورقة العلم) نحو السنبله، مما يتسبب في إجهاض حبوب اللقاح أو كبح تكشف الكيس الجنيني، وينعكس في النهاية على شكل عقم زهري وزيادة في معدلات تساقط الأزهار غير المخصبة. ويتوافق هذا التفسير بنيوياً مع ما أورده (Sreenivasulu & Schnurbusch, 2012) من أن الإجهادات الكيميائية البيئية تحتل على كبح التمايز الزهري وتطوير الأنسجة التناسلية عبر تعطيل المسارات الفسيولوجية المنظمة للانقسام الميتوزي في الأعضاء التكاثرية؛ مما يؤكد مخبرياً أن الحمولة البذرية لسنبله القمح تمثل مؤشراً كمياً حساساً للحالة الهيدروجينية في البيئة الجذرية.

- نبات الشعير :

تثبت هذه النتائج المخبرية أن كفاءة التكاثر الجنسي وتطور الحبوب في نبات الشعير تُعد من المحددات المورفولوجية والإنتاجية شديدة الحساسية للتغيرات في البيئة الهيدروجينية للوسط المحيط بالجذور؛ حيث يمثل النطاق المائل للتعاادل والقلوية الخفيفة المدى الفسيولوجي الأمثل لتحفيز انقسام الخلايا المرستيمية، وتكشف بداءات الأزهار، وإتمام العمليات الحيوية خلال مرحلتي التلقيح والإخصاب. ويُعزى هذا التباين الإنتاجي فسيولوجياً إلى كفاءة الامتصاص الخلوي والاتاحية الحيوية للكاتيونات المعدنية الأساسية كالپوتاسيوم ($+K$)، والكالسيوم ($+Ca2$)، والمغنيسيوم ($+Mg2$)، والتي تلعب دوراً محورياً في الحفاظ على استقرار الأغشية الخلوية والضغط الأسموزي، فضلاً عن تنشيط الأنظمة الإنزيمية التي تدعم كفاءة المحرك المصدري (Source)، عبر تعزيز تدفق ونقل نواتج التمثيل الضوئي والكربوهيدرات المصنعة من الأوراق المصدريّة—لا سيما ورقة العلم (Flag leaf)—نحو المصبب التكاثري التناسلي (Sink) خلال مرحلة امتلاء الحبوب (Kochian et al., 2004). وعلى العكس من ذلك، فإن التراجع الحاد في الحمولة البذرية عند قيمة الحموضة المتطرفة (pH 5.0) يعود بيوكيميائياً إلى التثبيط الوظيفي الناجم عن زيادة تركيز أيونات الهيدروجين ($+H$) وسمية الألومنيوم السام ($+Al3$) في محلول التربة، مما يؤدي إلى كبح نمو المجموع الجذري، وتعطيل النقل النشط للأيونات، وإحداث خلل في التوازن الأيوني الداخلي للنبات. يتسبب هذا الإجهاد البروتوني في إضعاف الآليات الفسيولوجية المنظمة للتكاثر، وحيوية حبوب اللقاح، واستطالة الأنبوب اللقحي داخل المتاع، مما يرفع من معدلات العقم الزهري ويخفض نسب تكوين الحبوب داخل السنبلّة. وتتوافق هذه المحصلة مع المقاربات العلمية الموثقة لدى كل من (Kochian et al., 2004) و (Hasanuzzaman et al., 2013) في أن الإجهادات الكيميائية والبيئية تؤثر بشكل مباشر وغير مباشر في الأداء الإنتاجي للمحاصيل، عبر إحداث اضطرابات نسقية متكاملة تبدأ من كبح الاستكشاف الجذري، مروراً باختلال التوازن الأيوني والأضي، وصولاً إلى خفض كفاءة تمايز البنى التكاثرية النهائية.

11-2 وزن البذور :

- نبات القمح :



الوثيقة 66 متوسط وزن البذور لنبات القمح عند درجات الحموضة المختلفة

توضح البيانات الإحصائية استجابة نمطية غير خطية في صفة متوسط وزن البذور لنبات القمح تبعاً لتغير مستويات الرقم الهيدروجيني (pH) لمياه الري. حيث حققت المعاملة T3 (pH 6.0) أعلى متوسط وزني مسجل، إذ بلغ نحو 1.47 غرام، تلتها المعاملة T4 (pH 6.5) بمتوسط قدره حوالي 1.39 غرام. في المقابل، سجلت معاملة الشاهد T0 (pH 7.7) متوسطاً بلغ نحو 1.08 غرام، بينما انخفض متوسط وزن البذور في المعاملتين T2 (pH 5.5) و T1 (pH 5.0) إلى حوالي 0.67 و 0.57 غرام على التوالي، حيث مثلت المعاملة T1 أدنى قيمة مسجلة لهذه الصفة.

تثبت هذه النتائج المخبرية وجود علاقة ارتباطية طردية بين الحالة الهيدروجينية للوسط الكيميائي الجذري وكفاءة التحميل الأسموزي والامتلاء الحيوي للحبوب؛ حيث يمثل النطاق الهيدروجيني المعتدل المدى الفسيولوجي الأمثل لتحفيز الاستثمار المادي الموجه، مما ينعكس إيجاباً على كفاءة صافي التمثيل الضوئي (Net Photosynthesis)، وتوجيه تدفق الكربون الاختزالي نحو المصبب التكاثري التناسلي خلال المراحل الحرجة لتطور النسيج التخزيني. ويُعزى هذا التباين الوزني فسيولوجياً وعمليةً إلى كفاءة الامتصاص الخلوي والاتاحية الحيوية للعناصر المعدنية الكبرى كالنيتروجين (N)، الفسفور (P)، والبوتاسيوم (K)؛ حيث يمثل الفسفور الركيزة الأساسية لتخليق مركبات نقل الطاقة اللازمة للتحميل الوعائي لحمض اللحم، ويلعب البوتاسيوم دوراً محورياً في التنظيم الأسموزي وتحفيز الإنزيمات الرئيسية المسؤولة عن بناء النشاء (Starch synthase) داخل الإندوسبيرم، مما يسهم بيوكيميائياً في إطالة الفترة الزمنية الحركية لامتلاء الحبوب (Grain filling duration) ورفع كفاءة معدل تراكم المادة الجافة الكربوهيدراتية في المستودعات البذرية (Taiz & Zeiger, 2014).

وعلى العكس من ذلك، فإن التراجع الحاد في الوزن الكلي للحبوب تحت ظروف الإجهاد الحمضي المتطرف (pH 5.0) يعود فسيولوجياً إلى التثبيط الوظيفي للجهاز الجذري الناجم عن زيادة تركيز بروتونات الهيدروجين (H^+) وسمية الألومنيوم السام (Al^{3+}) في المحلول الأرضي، مما يعيق النقل النشط للمذابات والمياه، ويسبب قصوراً حاداً في طاقة الضغط الهيدروليكي داخل أوعية اللحاء. يؤدي هذا الاضطراب الكيميائي الحيوي إلى تقييد الكفاءة المصدرية والمصبية (Source-Sink relationship)، حيث يثبط الإجهاد البروتوني عمليات التمثيل الضوئي في الأوراق، ويعيق آلية إعادة التعبئة والنقل الوظيفي للكربوهيدرات غير الهيكلية المخزنة مؤقتاً في الأنسجة الخضرية (كأغصان الأوراق والسيقان) نحو السنبله خلال مرحلة الامتلاء، مما ينعكس في النهاية على شكل ضمور حيوي في الوزن النهائي للحبوب. وتتطابق هذه المحصلة مع المقاربات الفسيولوجية الموثقة لدى (Fageria & Baligar, 2008) و (Taiz & Zeiger, 2014) في أن الإجهادات الكيميائية البيئية تحت على خفض الإنتاجية التكاثرية للمحاصيل عبر كبح كفاءة الامتلاء الخلوي والإخلال بالتوازن الديناميكي لتوزيع النواتج التمثيلية بين المصدر والمصب.

- نبات الشعير :

تثبت هذه النتائج المخبرية وجود حساسية إنتاجية عالية في آلية تراكم المادة الجافة داخل حبوب الشعير ارتباطاً بالحالة الكيميائية للوسط الهيدروجيني؛ حيث يمثل النطاق المائل للتعاقل والقلوية الخفيفة المدى الفسيولوجي الأمثل لدعم عمليات الاستثمار الحيوي، مما يعكس الأهمية الوظيفية لاستقرار بيئة الجذور في تعزيز الأداء الخضري والإنتاجي للمحصول. ويُعزى هذا التباين الوزني فسيولوجياً وعملياتياً إلى كفاءة الامتصاص المعدني والنقل النشط للأيونات عبر غمد الجذر ومحيطه الحيوي (Rhizosphere)، لا سيما بالنسبة للكاتيونات ثنائية التكافؤ كالسيوم (Ca^{2+}) والمغنيسيوم (Mg^{2+})؛ حيث يمثل المغنيسيوم الذرة المركزية في جزيء الكلوروفيل والمسؤول عن تنشيط إنزيم الروبيسكو (Rubisco)، بينما يلعب الكالسيوم دوراً محورياً في الحفاظ على استقرار الأغشية الخلوية والروابط البكتينية في الجذر، مما ينعكس إيجاباً على كفاءة صافي التمثيل الضوئي ومعدل التحميل الوعائي ونقل السكروز (Sucrose translocation) من الأنسجة المصدرية نحو السنبله خلال مرحلة الامتلاء الحركي للحبوب (Hasanuzzaman et al., 2013).

وعلى العكس من ذلك، فإن التراجع الحاد في الوزن النهائي للحبوب عند قيمة الحموضة المتطرفة (pH 5.0) يعود بيوكيميائياً إلى التثبيط الخلوي للجهاز الجذري الناجم عن زيادة تركيز بروتونات الهيدروجين (H^+) وسمية الألومنيوم السام (Al^{3+}) في محلول التربة، مما يعيق الاستكشاف الجذري ويخفض نفاذية الأغشية الخلوية للأيونات والماء. يتسبب هذا الإجهاد البروتوني في إحداث خلل نسقي متكامل في التوازن الأيوني

والأيضي الداخلي، مما يؤدي إلى تقييد الكفاءة المصدرية والمصبية (Source-Sink relationship) عبر خفض معدل تثبيت الكربون الاختزالي في الأوراق، وعرقلة آليات النقل الوعائي للكربوهيدرات المصنعة، مما يحول دون امتلاء الإندوسبيرم وينعكس على شكل ضمور حاد في الكتلة الحيوية للبذور. وتتقاطع هذه النتائج تماماً مع المقاربات الفسيولوجية لـ (Kochian et al., 2004) و (Hasanuzzaman et al., 2013) في أن الإجهادات الكيميائية والبيئية المتطرفة تكبح الإنتاجية النهائية للمحاصيل من خلال تعطيل كفاءة الامتصاص الجذري، وإضعاف المسارات البيوكيميائية المنظمة للتمثيل الضوئي، وتقييد التراكم الحيوي للمادة الجافة في المستودعات التكاثرية.

2-12 وزن 1000 حبة :

- نبات القمح :

تثبت هذه النتائج المخبرية أن المقدرة التخزينية الفردية للحبوب وكفاءة تراكم المادة الجافة داخل الإندوسبيرم ترتبطان بنيوياً بالاستقرار الهيدروجيني للوسط الجذري؛ حيث يمثل النطاق الهيدروجيني المعتدل المدى الفسيولوجي الأمثل لتنظيم المسارات الأيضية المرتبطة بمرحلة امتلاء الحبوب، وبخاصة تعظيم كفاءة صافي التمثيل الضوئي وتوجيه الكربون الاختزالي نحو المصب التكاثري. ويُعزى هذا التباين التراكمي فسيولوجياً وعملياتياً إلى كفاءة الامتصاص الخلوي والاتاحية الحيوية للكاتيونات المعدنية الأساسية، وفي مقدمتها البوتاسيوم ($+K$)؛ حيث يلعب البوتاسيوم دوراً محورياً في الحفاظ على جهد الماء، وتنظيم الضغط التناضحي الخلوي، وتنشيط مضخات البروتون اللازمة لعملية التحميل الوعائي للسكريات عبر اللحاء (Phloem loading) وتدفق السكرز نحو المستودعات الثمرية. يسهم هذا الاستقرار الكيميائي الحيوي في إطالة الفترة الزمنية الحركية لامتلاء الحبوب (Grain filling duration)، مما يرفع من معدل تراكم الحبيبات الناتجة عن بناء النشاء داخل خلايا الإندوسبيرم (Sreenivasulu & Schnurbusch, 2012).

وعلى العكس من ذلك، فإن التراجع الحاد في وزن 1000 حبة تحت ظروف الإجهاد الحمضي المتطرف (pH 5.0) يعود فسيولوجياً إلى التثبيط الكيميائي للجهاز الجذري والمنظومة الوعائية الناجم عن زيادة تركيز بروتونات الهيدروجين ($+H$) وسمية الألومنيوم السام ($+Al3$) في المحلول الأرضي، مما يحد من النقل النشط للمذابات والمياه. يتسبب هذا الإجهاد البروتوني في تحفيز الهدم الخلوي وتسريع شيخوخة الأوراق (Leaf senescence)، مما يؤدي إلى تثبيط كفاءة التمثيل الضوئي في ورقة العلم وتقييد السعة المصدرية. يترتب على ذلك خفض حاد في تدفق المواد الكربوهيدراتية والسكريات الموجهة نحو الحبوب النامية خلال مرحلة الامتلاء، مما ينتج حبوباً ضامرة ذات وزن حيوي منخفض. وتتطابق هذه المحصلة مع المقاربات الفسيولوجية الموثقة لدى

(Sreenivasulu & Schnurbusch, 2012) و (Taiz & Zeiger, 2014) في أن الإجهادات البيئية المتطرفة تخل بالتوازن الديناميكي الوظيفي بين المصدر والمصب (Source-Sink relationship)، وتكبح آليات النقل الوعائي، مما يحد بشكل مباشر من التراكم المادي النهائي للمادة الجافة داخل البذور.

- نبات الشعير :

تشبت هذه النتائج المخبرية وجود حساسية إنتاجية عالية في آليات تراكم المادة الجافة داخل الإندوسبيرم ارتباطاً بالحالة الكيميائية للوسط الهيدروجيني؛ حيث يمثل النطاق المائل للتعاادل والقلوية الخفيفة المدى الفسيولوجي الأمثل لتنظيم الفعاليات الحيوية المرتبطة بمرحلة امتلاء الحبوب عبر تحسين محددات البيئة الجذرية. ويُعزى هذا التباين التراكمي فسيولوجياً وعمليةً إلى كفاءة الامتصاص الخلوي والاتاحية الحيوية للعناصر المعدنية الصغرى والكبرى في منطقة المحيط الحيوي للجذور (Rhizosphere)، وفي مقدمتها المغنيسيوم (Mg^{2+})؛ حيث يمثل المغنيسيوم النواة المركزية المكونة لجزيء الكلوروفيل والمسؤول المباشر عن اقتناص الطاقة الضوئية وتنشيط إنزيمات الفسفرة، مما يؤثر طردياً في كفاءة صافي التمثيل الضوئي (Net Photosynthesis) داخل الأوراق المصدرية—لا سيما ورقة العلم (Flag leaf)—. يؤدي استقرار هذه المنظومة التخليقية في الأوساط القريبة من التعادل إلى تعظيم إنتاج ونقل السكر (Sucrose translocation) عبر أوعية اللحاء نحو المستودعات الثمرية، مما يرفع من معدل الترسيب المادي للنشاء داخل الإندوسبيرم (Hasanuzzaman et al., 2013).

وعلى العكس من ذلك، فإن التراجع الحاد في وزن 1000 حبة عند قيمة الحموضة المتطرفة (pH 5.0) يعود بيوكيميائياً إلى التثبيط الوظيفي الناجم عن زيادة تركيز بروتونات الهيدروجين (H^{+}) وسمية الألومنيوم السام (Al^{3+}) في محلول التربة، مما يؤدي إلى اختلال نفاذية الأغشية الخلوية وتدمير استقرارها الفسيولوجي. يتسبب هذا الإجهاد البروتوني في خفض السعة التخليقية للمصدر عبر كبح كفاءة البناء الضوئي وتعطيل آليات النقل الوعائي المقترن بالبروتونات، مما يقلل من تدفق الكربون التخليقي القابل للنقل؛ ويترتب على هذا العجز الغذائي كبح وراثي وكيميائي حيوي لنشاط إنزيمات بناء النشاء المحورية مثل (Starch synthase) داخل الحبوب النامية، مما يحد من تراكم المادة الجافة وينتج حبوباً ضامرة ذات كتلة وزنية منخفضة. وتتقاطع هذه النتائج تماماً مع المقاربات الفسيولوجية لـ (Kochian et al., 2004) و (Hasanuzzaman et al., 2013) في أن الإجهادات الكيميائية والبيئية المتطرفة تكبح الإنتاجية النهائية للمحاصيل عبر تعطيل كفاءة الامتصاص الجذري، وإضعاف المسارات البيوكيميائية المنظمة للتمثيل الضوئي، وتقييد التراكم الحيوي للمادة الجافة في المستودعات التكاثرية.

الخلاصة و الخاتمة :

تأسيساً على ما تم التوصل إليه في هذه الدراسة البحثية بشقيها النظري والتجريبي، والتي سعت إلى تتبع وفهم الآليات الفسيولوجية والمورفولوجية الحاكمة لاستجابة بادرات ومحصولي الحبوب الاستراتيجية (القمح والشعير) تحت تأثير الإجهاد الهيدروجيني) تغيرات الرقم الهيدروجيني pH لمياه الري)، فقد أُنجزت الدراسة وفق منهج تجريبي مزدوج اعتمد على شق مخبري تمثل في تجربة الإنبات تحت ظروف مضبوطة، وشق ميداني تمثل في تجربة النمو والإنتاج داخل أصص، وذلك على نوعين من الحبوب هما القمح الصلب (*Triticum durum* Desf.) والشعير (*Hordeum vulgare* L.) ، وقد تم تنفيذ هذه التجارب بولاية الوادي (وادي سوف) خلال الموسم الجامعي 2025-2026، بهدف تتبع الاستجابات الفسيولوجية والمورفولوجية للنبات عبر مختلف مراحل التطور من الإنبات إلى الإنتاج. وقد شملت المعايير المدروسة في مرحلة الإنبات سرعة الإنبات، طول الجذير، طول السويقة، والكتلة الحيوية الغضة والجافة للبادرات، بينما تضمنت معايير النمو الخضري طول النبات، عدد الأوراق، عدد الأشرطة، عدد السلاميات، سمك الساق وطول السلامة الثالثة، إضافة إلى المؤشرات الفينولوجية المتمثلة في تاريخ الإشتاء وظهور السنابل، وفي مرحلة الإنتاج تم تقييم مكونات الغلة من خلال عدد البذور في السنبل، ووزن البذور لكل سنبل، ووزن ألف حبة، وذلك تحت تأثير تدرجات مختلفة من الرقم الهيدروجيني لمياه الري. وقد بينت النتائج أن الرقم الهيدروجيني ليس مجرد عامل كيميائي ثانوي، بل يمثل محركاً فسيولوجياً أساسياً يتحكم في النفاذية الخلوية والتوازن الأيوني وتيسر العناصر الغذائية ونشاط الإنزيمات والمهرمونات المسؤولة عن النمو، كما أظهرت الدراسة وجود تباين وراثي واضح بين القمح والشعير في الاستجابة للإجهاد الحامضي، حيث أبدى القمح مرونة فسيولوجية أفضل وأداءً أعلى في الأوساط القريبة من التعادل والمائلة للحموضة الخفيفة (pH 6.0-6.5)، في حين أظهر الشعير حساسية أكبر مع تفضيل الأوساط المعتدلة والمائلة للقلوية (pH 7.7) ، بينما أدى الوسط الحامضي الشديد (pH 5.0) إلى تراجع واضح في جميع المؤشرات المدروسة نتيجة اضطراب امتصاص العناصر المعدنية وتأثير البروتونات السام وتحرر بعض العناصر السامة مثل الألومنيوم والمنغنيز، مما يؤكد أن الانحراف الحاد في pH يشكل عاملاً محدداً للإنتاج الزراعي واستدامته، وعليه فإن التحكم في الرقم الهيدروجيني لمياه الري يمثل مدخلاً أساسياً لتحسين الإنبات والنمو والإنتاجية لمحصولي القمح والشعير خاصة في البيئات الجافة وشبه الجافة، كما تفتح هذه النتائج آفاقاً بحثية مهمة تتمثل في التوسع في الدراسات الجزيئية والوراثية لتحديد الجينات والبروتينات المسؤولة عن تحمل الإجهاد الهيدروجيني مثل مضخات $H^+-ATPase$ ،

إضافة إلى تعزيز برامج المراقبة الدورية لحموضة التربة ومياه الري وتطبيق تقنيات التعديل الكيميائي مثل التجبير، وتوجيه برامج التحسين الوراثي نحو تطوير أصناف أكثر تحملاً للإجهاد الحامضي، ومع ذلك فإن هذا العمل البحثي لا يزال يمثل خطوة أولى ضمن مسار علمي أوسع، ويحتاج إلى مزيد من التعمق والدقة خاصة على المستويين الجزيئي والحقلي، حيث تبقى العديد من الآليات غير مفهومة بشكل كامل، خصوصاً ما يتعلق بالتداخل بين الإجهاد الحامضي والإجهادات البيئية الأخرى مثل الملوحة والحرارة والجفاف، وهو ما يفتح المجال أمام دراسات مستقبلية أكثر تكاملاً تعتمد على تقنيات حديثة في الفسيولوجيا النباتية والبيولوجيا الجزيئية، وفي الختام فإن هذا العمل يشكل إضافة علمية في مجال فسيولوجيا الإجهاد النباتي ويساهم في تعميق فهم تفاعل النبات مع العوامل البيئية بما يخدم تطوير قطاع الحبوب وتعزيز الاستدامة الزراعية.

المراجع باللغة العربية

- الراوي، أحمد سعيد. (2018). تكنولوجيا الحبوب ومشتقاتها: التركيب الكيميائي والقيمة الغذائية. دار الكتب العلمية للنشر والتوزيع.
- أزهار عبد الحميد رشيد. (2017). محاصيل الحبوب. محاضرات قسم المحاصيل، المرحلة الثالثة، كلية الزراعة، جامعة بغداد.
- أشترس (2008). تقييم بعض الطرز الوراثية من الأقماح السورية (السداسية والرابعة) باستخدام معلومات بيوكيميائية وجزئية مختلفة [أطروحة دكتوراه غير منشورة]. كلية الهندسة الزراعية، جامعة تشرين، سوريا.
- برادي، نيل، ووايل، راي (2016). طبيعة التربة وخصائصها (ترجمة: جلال سالم باجابر، علي محمد العسل، محمد عمر باصم). مركز النشر العلمي، جامعة الملك عبد العزيز.
- بوجنيبة، مسعود. (2007). فيزيولوجيا النبات [محاضرة]. المدرسة العليا للأساتذة بالقبة، الجزائر.
- تاي، لينكولن، وزيجر، إدوارد. (2014). فيزيولوجيا النبات (ترجمة: عبد الله بن سليمان العييري، أحمد بن عبد الله الخالدي، فهد بن ناصر البركة). دار جامعة الملك سعود للنشر.
- جميل قدسي الدويك. (2003). القمح والشعير غذاء ودواء ووقاء مكتبة الملك فهد الوطنية.
- درويش، مصطفى. (2018). في الصحة والغذاء (ط. 1).
- الشيبني، ج. م. (2009). تقنيات زراعة وإنتاج القمح. المكتبة المصرية للطباعة والنشر والتوزيع.
- شفشق، ص.، والدبابي، ع. ح. (2009). إنتاج محاصيل الحقل (ط. 1). دار الفكر العربي.
- شهاب الدين، ت. م. ع.، والشامي، م. س. م. (2003). إنتاج القمح في مصر (نشرة فنية رقم 16). الإدارة العامة للثقافة الزراعية، وزارة الزراعة المصرية.
- عبد الحميد محمد حسنين. (2011). إنتاج محاصيل الحبوب. كلية الزراعة، جامعة الإسكندرية.
- عشاتن. (1985). تأثير نسبة الماء في التربة على إنبات حبوب بعض أصناف القمح الصلب في الجزائر.
- قوادي، كريمة، وحמידو، سمية. (2010). سلوك الأوراق الأخيرة في نبات القمح النامي تحت الإجهاد الملحي والمعامل بالكينيتين رشاً [مذكرة نيل شهادة الدراسات العليا]. جامعة قسنطينة، الجزائر.
- كذلك، م. م. (2000). زراعة القمح منشأة المعارف بالإسكندرية، جلال حزي وشركاؤه.
- كيال، حامد. (1979). نباتات وزراعة المحاصيل الحقلية: محاصيل الحبوب والبقول. مديرية الكتب الجامعية.
- محمد لبيد شريف، عطية حاتم جبار، وجدوع خضير عباس. (2001). تأثير مستويات الملوحة في صفات الحاصل ومكوناته في أربعة تراكيب وراثية من الرز (*Oryza sativa* L.) [أطروحة دكتوراه غير منشورة]. كلية الزراعة، جامعة بغداد، العراق.
- مسعود، إيمان. (2014). أساسيات المحاصيل الحقلية وإنتاجه [المحاضرة الرابعة]. كلية الهندسة الزراعية، جامعة حماه، سوريا.
- منجد، محمد صالح. (2015). كيف عاملهم. زاد للنشر.
- وصف، زكرياء. (2015). زراعة المحاصيل الحقلية. دار ومؤسسة رسلان.

• المراجع باللغة الأجنبية

- Ali, S. M., & Yosipovitch, G. (2013). Skin pH: From basic science to basic skin care. *Acta Dermato-Venereologica*, 93(3), 261–269. <https://doi.org/10.2340/00015555-1531>
- APG III. (2009). An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG III. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 161(2), 105–121.
- Atkins, P., & de Paula, J. (2014). *Physical Chemistry: Quanta, Matter, and Change* (2nd ed.). Oxford University Press.
- Baaziz, M. (2019). *Amélioration des plantes / Phytopathologie [Lecture notes]*. Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, Université de Constantine, Algérie.
- Bahlouli, F., Bouzerzour, H., Benmahammed, A., & Hassous, K. L. (2005). Selection of high yielding of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) under semi-arid conditions. *Journal of Agronomy*, 4(4), 360–365.
- Baik, B.-K., & Ulrich, S. E. (2008). Barley for food: characteristics, improvement and renewed interest. *Journal of Cereal Science*, 48(2), 233–242. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2008.02.002>
- Benabdeljelil, K. (1999). *Utilisation de l'Orge dans les Aliments des Poules Pondeuses (Document technique)*. Institut Agronomique Transfert de Technologie en Agriculture.
- Benlaribi, M. (1990). *Adaptation au déficit hydrique chez le blé dur (Triticum durum Desf.): études des caractères morphologiques et physiologiques [Thèse de doctorat d'état]*. Université de Constantine.
- Boulal, H., Zaghouane, O., El Mourid, M., & Rezgui, L. (2007). *Guide pratique de la conduite des céréales d'automne (blés et orges) dans le Maghreb (Algérie, Maroc, Tunisie)*. Ed. TIGC, INRA, ICARDA.
- Boulton, C. (2021). The role of acidity regulators in the stability and sensory profile of carbonated beverages. *Food Chemistry*, 340, Article 128120. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128120>
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2008). *The Nature and Properties of Soils* (14th ed.). Pearson Prentice Hall (Pearson Education).
- Briggs, D. E. (1978). *Barley*. Chapman & Hall.
- Ceccarelli, S., Grando, S., & Baum, M. (2007). Participatory plant breeding in water-limited environments. *Experimental Agriculture*, 43(4), 411–435. <https://doi.org/10.1017/S0014479707005327>
- Cheftel, J. C., & Cheftel, H. (1992). *Introduction à la biochimie et à la technologie des aliments (Vol. 1)*. Tec & Doc Lavoisier.
- Deepak, K., Sangeeta, G., & Jana, A. K. (2013). Thermal and Morphological properties of chemically treated barley husk fiber. *URMEJ*, 3(2), 153–156.
- Delhaize, E., & Ryan, P. R. (1995). Aluminum Toxicity and Tolerance in Plants. *Plant Physiology*, 107(2), 315–321.

- Doney, S. C., Fabry, V. J., Feely, R. A., & Kleypas, J. A. (2009). Ocean Acidification: The Other CO₂ Problem. *Annual Review of Marine Science*, 1, 169–192.
- Fageria, N. K., & Baligar, V. C. (2008). Ameliorating soil acidity of tropical soils (Oxisols by Liming for Sustainable Crop Production). *Journal of Plant Nutrition / Advances in Agronomy*, 31(6) / 99, 1121-1138 / 345–431.
- FAOSTAT. (2018). Base de données statistiques de l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture. <http://faostat.fao.org> (Consulté le 30 juin 2019).
- Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D., & Basra, S. M. A. (2009). Plant drought stress: effects, mechanisms and management. *Agronomy for Sustainable Development*, 29(1), 185–212.
- Feillet, P. (2000). Le grain de blé: Composition et utilisation. INRA Éditions.
- Fisher, M. J., Paton, R. C., & Matsuno, K. (1998). Intracellular signaling proteins as smart agents in parallel distributed processes. *Bio-Systems*, 50(3), 159–171.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2024). FAOSTAT statistical database. FAO. <https://www.fao.org/faostat>
- Gate, P. (1995). Ecophysiologie du blé. Technique et documentation, Lavoisier.
- Guiga, W. (2006). Identification des inhibiteurs de la germination de l'orge et mise au point d'un procédé de traitement des eaux de trempe en malterie en vue de leur recyclage [Thèse de Doctorat]. Institut National Polytechnique de Lorraine.
- Hasanuzzaman, M., Nahar, K., & Fujita, M. (2013). Plant response to acidic soil stress and al toxicity. In *Molecular Stress Physiology of Plants* (pp. 381-401). Springer, India.
- Hasanuzzaman, M., Nahar, K., Alam, M. M., Roychowdhury, R., & Fujita, M. (2013). Physiological, Biochemical, and Molecular Mechanisms of Heat (High-Temperature) Stress Tolerance in Plants. *International Journal of Molecular Sciences / Biomed Research International*, 14(5), 9643–9684.
- Institut National de la Protection Des Végétaux (INPV), Bouakaz, K., & Oussaid, Y. (2013). Reconnaissance et identification des principales maladies cryptogamiques du blé et de l'orge.
- Irma, N. R., Cintia, G. V., Maria, V. C., Ana, S., Ester, S., & Carla, C. (2017). Identification and expression analysis of 11 subtilase genes during natural and induced senescence of barley plants. *Journal of Plant Physiology*, 211, 70–80.
- International Organization for Standardization [ISO]. (2010). Cereals and pulses Determination of the mass of 1000 grains (ISO Standard No. 520:2010). ISO
- Kochian, L. V., Hoekenga, O. A., & Piñeros, M. A. (2004). How do crop plants tolerate acid soils? Mechanisms of aluminum tolerance and phosphorus efficiency. *Annual Review of Plant Biology*, 55(1), 459–493.
- Larcher, W. (2003). *Physiological Plant Ecology: Ecophysiology and Stress Physiology of Functional Groups* (4th ed.). Springer-Verlag, Berlin.
- Linde-Laursen, I., Heslop-Harrison, J. S., Shepherd, K. W., & Taketa, S. (1997). The barley genome and its relationship with the wheat genomes: A survey with an internationally agreed recommendation for barley chromosome nomenclature. *Hereditas*, 126(1), 1–16.
- Marschner, H. (2012). *Mineral Nutrition of Higher Plants* (3rd ed.). Academic Press, Elsevier.

- Moule, C. (1980). In: Betka, R. & Smaili, Y. (2006). Etude d'induction de la callogenèse d'Orge (*Hordeum vulgare* L.) [Thèse d'ingénieur d'état en Agronomie]. Université de M'sila.
- Newman, R. K., & Newman, C. W. (2006). A review of the health benefits of barley. *Food Science and Technology International*, 12(4), 253–262. <https://doi.org/10.1177/1082013206066967>
- Nevo, E., & Chen, G. (2010). Drought and Salt Tolerances in Wild Relatives for Wheat and Barley Improvement. *Plant, Cell & Environment*, 33(4), 670–685.
- Newton, A. C., Flavell, A. J., George, T. S., Leat, P., Mullholland, B., Ramsay, L., ... & Bingham, I. J. (2011). Crops that feed the world 4. Barley: a resilient crop, Strengths and weaknesses in the context of food security. *Food Security*, 3(2), 141–178.
- Rengel, Z., & Damon, P. M. (2008). Crops and Genotypes Differ in Efficiency of Potassium Uptake and Use. *Physiologia Plantarum*, 133(4), 624–636.
- Rosemary, K., Newman, C., & Walter, N. (2008). *Barley for Food and Health: Science, Technology, and Products*. Wiley-Blackwell Edition.
- Sasaki, T., Yamamoto, Y., Ezaki, B., Katsuhara, M., Ahn, S. J., Ryan, P. R., ... & Matsumoto, H. (2004). A Wheat Gene Encoding an Aluminum-activated Malate Transporter. *The Plant Journal*, 37(5), 645–653.
- Shabala, S. (Ed.). (2017). *Plant abiotic stress tolerance: Agronomic, molecular and biotechnological approaches* (2nd ed.). Elsevier.
- Shewry, P. R., & Hey, S. J. (2015). The contribution of wheat to human diet and health. *Food and Energy Security*, 4(3), 178–202. <https://doi.org/10.1002/fes3.64>
- Silberberg, M. S., & Amateis, P. (2018). *Chemistry: The Molecular Nature of Matter and Change* (8th ed.). McGraw-Hill.
- Skoog, D. A., West, D. M., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (2014). *Fundamentals of Analytical Chemistry* (9th ed.). Cengage Learning.
- Soltner, D. (1980). *Les grandes productions végétales* (11ème Éd.). Masson.
- Soltner, D. (1988). *Les grandes productions végétales* (16ème Éd.). Les collections sciences et techniques agricoles.
- Soltner, D. (1990). *Phytotechnie spéciale: Les grandes productions végétales (Céréales, plantes sarclées, prairies)*. Sciences et Techniques Agricoles.
- Sreenivasulu, N., & Schnurbusch, T. (2012). A genetic playground for enhancing grain number in cereals. *Trends in Plant Science*, 17(2), 91-101.
- Taiz, L., & Zeiger, E. (2010). *Plant Physiology* (5th ed.). Sinauer Associates Inc., Sunderland, Massachusetts.
- Taiz, L., & Zeiger, E. (2014). *Plant Physiology and Development* (6th ed.). Sinauer Associates, Inc.
- Timmer, C. P. (2010). Reflections on food crises past. *Food Policy*, 35(1), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2009.09.002>
- World Health Organization. (2006). *Guidelines for safe recreational water environments: Volume 2: Swimming pools and similar environments*. World Health Organization.
- World Health Organization (WHO). (2017). *Guidelines for Drinking-water Quality* (4th ed., incorporating the 1st addendum). WHO Press, Geneva.

- Zadoks, J. C., Chang, T. T., & Konzak, C. F. (1974). A decimal code for the growth stage of cereals. *Weed Research*, 14(6), 415–421.
- Zhu, J. K. (2016). Abiotic Stress Signaling and Responses in Plants. *Cell*, 167(2), 313–324

الملاحق

