



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة الشهيد حمه لخضر الوادي
كلية العلوم الطبيعية والحياة
قسم البيولوجيا
مذكرة تخرج
لنيل شهادة ماستر أكاديمي
ميدان: علوم الطبيعة وحياة
شعبة: علوم بيولوجية
تخصص: التنوع الحيوي وفيزيولوجيا النبات
الموضوع

دور البرولين في ظل البيئات المتغيرة دراسة مقارنة ومراجعة

من إعداد:

❖ بوهني إسلام

❖ نصرات نور

❖ قويدري ساره

تحت إشراف:

أ.د. شويخ عاطف أستاذ التعليم العالي مؤطرا جامعة الشهيد حمه لخضر بالوادي

د. عليه فاطمة أستاذ محاضر.ب رئيسا جامعة الشهيد حمه لخضر بالوادي

د. بن الحبيب عبد الحميد أستاذ محاضر.ب مناقشا جامعة الشهيد حمه لخضر بالوادي

الموسم الجامعي: 2024-2025

شكر وتقدير

أتقدم بخالص الشكر والتقدير إلى كل من ساهم في إنجاز هذه المذكرة، وأخص بالذكر:

أستاذنا الفاضل شويخ عاطف، نعجز عن الإيفاء بحقه مهما سطرنا من كلمات الشكر و التقدير، فقد كان لنا قدوة في الأخلاق و العلم و العطاء لم نرى منه إلا سعة الصدر، و طيب المعاملة و دعمه المتواصل و توجيهاته السديدة التي كان لها الأثر الكبير في إنجاز هذا العمل. لقد كانت خبرته العلمية، و حرصه الدائم على دفعنا نحو الأفضل، مصدر إلهام و تحفيز طوال فترة الدراسة. فله كل الشكر و الإمتنان و التقدير و الاحترام على ما قدمه لنا. نسأل الله أن يكتب كل ما قدمه في موازين حسناته و أن يبارك في عمله و جهده، وينفع به أجيالا من الطلبة و العلماء.

كما أتوجه بالشكر إلى أعضاء هيئة التدريس في قسم البيولوجيا كلية علوم الطبيعة والحياة، على ما قدموه لنا من علم ومعرفة طوال فترة دراستنا.

و لا يفوتني أن أشكر زملائي وأصدقائي على تعاونهم وتشجيعهم الدائم.

وأخص بالشكر عائلتي الكريمة، التي كانت الداعم الأول لي، معنويًا وماديًا، طوال مسيرتي الجامعية.

لكم جميعًا كل الامتنان والتقدير.

الإهداء

أشكر الله العلي القدير الذي أنعم علي بنعمة العقل والدين القائل في محكم التنزيل "وفوق كل ذي علم عليم"
سورة يوسف آية 76.... صدق الله العظيم.

من قال أنا لها نالها وإن أبت رغما عنها أتيت بها لم تكن رحلة قصيرة ولا ينبغي لها أن تكون لم يكن
الحلم قريبا ولا الطريق كانت محفوفًا بالتسهيلات ولكنني فعلتها ونلتها.

إلى الذي زين أسمى بأجمل الألقاب، من دعمني بلا حدود وأعطاني بلا مقابل إلى من علمني أن الدنيا
كفاح وسلاحها العلم والمعرفة، إلى من غرس في روحي مكارم الأخلاق الداعم الأول في مسيرتي وسندي
وقوتي وملأني بعد اللهالي فخري واعتزازي (والدي).

إلى من جعل الله الجنة تحت أقدامها واحتضني قلبها قبل يدها لتناسب لي بدعائها إلى القلب الحنون
والشمعة التي كانت لي في الليالي المظلمات سر قوتي ونجاحي ومصباح دربي إلى وهج حياتي (والدتي
).

إلى أمان أيامي إلى خير أيامي وصفوها إلى قرّة عيني (إخوتي وأخواتي).

إلى الذين تمتعوا بالأخوة وتميزوا بالولاء والعطاء، ولمن رافقهم في دروب الحياة السعيدة والحزينة. ،
ولمن كان معي على طريق النجاح والخير (عزيزتي صديقاتي).

وإلى أستاذنا الذي قدم لنا يد العون وساعدنا في هذا العمل .

واخيرا، لم يتبق سوى خطوات قليلة لإكمال مسيرتي الجامعية، الشكر موصول لنفسي على الصبر والتي
كانت أهلاً للمصاعب ها انا اختم كل ما مررت به الحمد لله من قبل ومن بعد راجية من الله تعالى أن
ينفعني بما علمني وأن يعلمني ما أجهل ويجعله حجةً لي لا علي.

الطالبات:

✚ نصرات نور

✚ بوهني إسلام

✚ قويدري ساره

الملخص

Abstract

المخلص:

تهدف هذه الدراسة إلى فهم دور البرولين في ظل البيئات المتغيرة، وتحديد مدى فعاليته في التخفيف من أضرار الإجهادات البيئية مثل الحرارة، الملوحة والجفاف. أظهرت نتائج العديد من الدراسات أن البرولين يلعب دوراً حيوياً في مساعدة النباتات على التكيف مع الإجهادات البيئية غير الحيوية. يعمل البرولين كأوسموليت وقائي، حيث يساعد في تحسين التوازن الأسموزي ومنع فقدان الماء، مما يعزز قدرة النبات على مقاومة الظروف القاسية تحت تأثير الإجهاد الحراري والملحي، يظهر البرولين تراكمًا ملحوظًا في الجذور والأوراق، حيث يساهم في تقوية الخلايا و حمايتها من الأضرار التأكسدية، كما يعزز كفاءة التمثيل الضوئي. في حالات إجهاد الجفاف، يساعد البرولين في الحفاظ على التوازن المائي وتقليل الضرر الناتج عن انخفاض محتوى الماء في النبات. إضافة إلى ذلك، يتفاعل البرولين مع المركبات الأخرى مثل كبريتات الكوبالت لتحسين الاستجابة البيولوجية وتقليل التأثيرات السلبية للإجهاد التأكسدي وتعزيز امتصاص المغذيات والتوازن الأسموزي. بشكل عام، يعد البرولين مؤشراً حيوياً مهماً في تقييم قدرة النباتات على التكيف مع الإجهادات المختلفة، ويعزز من استعادة النبات لحيويته بعد الإجهاد ودعمه في الظروف البيئية القاسية.

الكلمات المفتاحية: البرولين؛ البيئات المتغيرة؛ الإجهادات البيئية؛ دراسة مقارنة و مراجعة.

Abstract

This study aims to understand the role of proline under changing environmental conditions and to determine its effectiveness in mitigating the damage caused by abiotic stresses such as heat, salinity, and drought. Numerous studies have shown that proline plays a vital role in helping plants adapt to various environmental stresses. Proline functions as a protective osmolyte by enhancing osmotic balance and preventing water loss, thereby strengthening the plant's ability to withstand harsh conditions. Under heat and salt stress, proline accumulates significantly in roots and leaves, contributing to cellular protection against oxidative damage and improving photosynthetic efficiency. During drought stress, proline supports water balance and reduces the damage resulting from decreased cellular water content. Additionally, proline interacts with other compounds, such as cobalt sulfate, to enhance biological responses, reduce oxidative stress, and promote nutrient uptake and osmotic adjustment. Overall, proline serves as a crucial biomarker for assessing plant tolerance to various stresses and plays an important role in supporting plant recovery and resilience under adverse environmental conditions.

Keywords: Proline, Changing environments, Abiotic stresses, Comparative and Review Study.

فهرس المحتويات

شكر وتقدير

الاهداء

الملخص

Abstract

فهرس المحتويات

فهرس الأشكال

فهرس الجداول

قائمة الاختصارات

2..... المقدمة

الجزء النظري

الفصل الأول

6..... الإجهاد البيئي

7..... I-الإجهاد البيئي:

7..... II-الإجهاد اللاحيوي:

8..... III- أنواع الإجهاد اللاحيوي في النباتات:

8..... 1-الإجهاد المائي:

8..... 1-1تعريف الإجهاد المائي:

8..... 1-2-أنواع الإجهاد المائي:

8..... 1-2-1-الجفاف:

9..... 1-1-2-1-التغيرات الفيزيولوجية والمورفولوجية والبيوكيميائية على مستوى النبات :

10..... 1-2-1-2-آليات التكيف:

11..... 1-2-1-2-1-التكيفات الفيزيولوجية:

- 11:التكيف المورفولوجي: 1-2-1-2-2-2
- 12:التكيف البيوكيميائي: 1-2-1-2-3
- 13: الغمر: 1-2-2-2
- 13:تغيرات على مستوى النبات: 1-2-2-1
- 14: آليات التكيف: 1-2-2-2
- 15:الإجهاد الحراري: 2-2
- 15:تعريف الإجهاد الحراري: 1-2
- 15:أنواع الإجهاد الحراري: 2-2
- 15: الحرارة المرتفعة (الحر): 1-2-2
- 15: التغيرات الفيزيولوجية والمورفولوجية والبيوكيميائية على مستوى النبات : 1-2-2-1
- 17: آليات التكيف : 2-1-2-2
- 18:الحرارة المنخفضة (البرودة): 2-2-2
- 18: التغيرات الفيزيولوجية والمورفولوجية والبيوكيميائية على مستوى النبات : 1-2-2-2
- 19: آليات التكيف : 2-2-2-2
- 20:الإجهاد الملحي : 3-3
- 20:تعريف الملوحة : 1-3
- 21:تعريف الإجهاد الملحي : 2-3
- 21:العوامل المسببة للإجهاد الملحي : 3-3
- 22:التغيرات الفيزيولوجية والمورفولوجية والبيوكيميائية على مستوى النبات: 4-3
- 23:تأثير الملوحة على مرحلة الإنبات والنمو: 1-4-3
- 23:تأثير الملوحة على المحتوى الكيميائي والفيزيولوجي للنبات: 2-4-3
- 25:آليات التكيف النبات مع الإجهاد الملحي : 5-3
- 26:إجهاد التلوث : 4-4
- 27:أسبابه: 1-4
- 27:المعادن الثقيلة: 1-4-1

- 271-1-4-1 تصنيف المعادن الثقيلة:
- 282-1-1-4-1 مصادر المعادن الثقيلة:
- 283-1-1-4-1 التغيرات على مستوى الفيزيولوجية والمورفولوجية والبيوكيميائية النبات :
- 304-1-1-4 آليات التكيف:
- 302-1-4-2 المبيدات :
- 301-2-1-4-1 تعريف المبيدات:
- 302-2-1-4-2 تأثير المبيدات على النبات :
- 313-1-4-3 التسميد:
- 311-3-1-4-1 تعريف السماد:
- 312-3-1-4-2 تأثير التسميد على النبات:
- 324-1-4-4 الغازات السامة:
- 321-4-1-4-1 تأثيرها على النبات :

الفصل الثاني

البرولين

- 351-تعريف البرولين :
- 352 - البنية الكيميائية للبرولين :
- 363- التكوين الفراغي للبرولين :
- 364- خصائص البرولين :
- 375- تخليق البرولين :
- 416 - تراكم البرولين في النبات :
- 427- دور البرولين في النبات :
- 458- استخدامات البرولين في الجانب الزراعي :

الجانب التطبيقي

مقارنة و مراجعة حول دور البرولين في ظل البيئات المتغيرة

- 491- المقال الأول :

49	المؤلفون :
49	الهدف :
49	المواد و الطرق :
50	النتائج :
53	المناقشة:
55	2- المقال الثاني :
55	المؤلفون:
55	الهدف :
55	المواد والطرق :
56	النتائج :
58	المناقشة :
59	3- المقال الثالث:
60	المؤلفون:
60	الهدف:
60	الطرق و المواد:
63	النتائج:
65	المناقشة:
71	4- المقال الرابع:
71	المؤلفون:
71	الهدف:
71	الطرق و المواد:
74	النتائج:
81	المناقشة:
84	5- المقال الخامس:
84	المؤلفون:

84	الهدف:
85	الطرق و المواد:
88	النتائج:
93	المناقشة :
95	6- المقال السادس:
96	المؤلفون:
96	الهدف:
96	الطرق و المواد:
97	النتائج:
99	المناقشة:
100	7- المقال السابع:
100	المؤلفون:
101	الهدف:
101	المواد والطرق:
103	النتائج:
109	المناقشة :
	مقارنة بين نتائج المقالات :
113	
116	الخاتمة:
118	قائمة المصادر والمراجع

فهرس الأشكال

الصفحة	العنوان	الرقم
07	بعض عوامل الاجهاد اللاحيوي الشائعة التي تؤثر على النبات	الشكل (01)
10	إغلاق الثغور	الشكل (02)
12	آليات المضادة للأكسدة الأنزيمية والغير إنزيمية	الشكل (03)
17	تأثير درجة الحرارة المنخفضة على تصلب الجدار الخلوي وتكون الجليد	الشكل (04)
18	نبات القمح تحت تأثير الصقيع	الشكل (05)
20	تملح التربة	الشكل (06)
23	الوظائف المتعددة للبرولين في ظروف الاجهاد	الشكل (07)
25	مخطط حركة الصوديوم في النباتات الطاردة والمدمجة	الشكل (08)
25	مختلف مصادر تلوث التربة	الشكل (09)
28	الاعراض الشائعة لنقص عنصر البوتاسيوم عند نبات الفول السوداني	الشكل (10)
32	تأثير فلوريد الهيدروجين على نبات	الشكل (11)
34	بنية البرولين في شكلها الزويتيري	الشكل (12)
35	البنية ثلاثية الابعاد لجزيء للبرولين	الشكل (13)
35	الهياكل العامة للـ L-برولين و D-برولين	الشكل

		(14)
38	تمثيل تخطيطي لتخليق البرولين	الشكل (15)
39	تخليق وتحلل البرولين في النباتات	الشكل (16)
43	تداخلات البرولين مع الاشارات الايضية و الهرمونية في مواجهة الاجهاد الحراري	الشكل (17)
44	تأثيرات البرولين الخارجي في تحمل النبات للملوحة	الشكل (18)
50	a, b, c, d, e - تأثير البرولين على الصفات المورفولوجية (طول الساق، طول الجذر، عدد الأوراق لكل نبات، الوزن الطازج، والوزن الجاف، على التوالي) في أصناف الفلفل الحار تحت ظروف الإجهاد الحراري. f, g, h, i, j - تأثير البرولين على الصفات الفيزيولوجية (معدل التمثيل الضوئي، معدل النتح، التوصيل الثغري، كفاءة استخدام الماء، ومحتوى الكلوروفيل، على التوالي).	الشكل (19)
56	A. شتلات نخيل التمر المزروعة في التربة تحت ظروف الاجهاد العادية (التحكم) و ظروف الاجهاد بتركيز ملحي مرتفع (اجهاد NaCl). B. تاثير المعاملة بالملوحة الممتدة على نظام الجذور مقارنة بالتحكم .	الشكل (20)
57	A. تراكم البرولين في جذور و اوراق شتلات نخيل التمر المزروعة تحت ضغوط بيئية غير حيوية مختلفة. B. تراكم البرولين النسبي (مضاعف التحكم) في الجذور و الاوراق .	الشكل (21)
60	العلاقات المفترضة للصفات الفزيولوجية والكيميائية الحيوية لشتلات <i>S. superba</i> خلال فترة الجفاف وبعد إعادة الري في هذه الدراسة. افترضنا أن الأصول النباتية القادمة من مناطق أكثر جفافاً ستظهر مقاومة أعلى للجفاف مقارنة بالأصول من المناطق الأكثر رطوبة، وذلك بالترافق مع انخفاض أبطأ في المحتوى المائي النسبي (RWC) والتمثيل الضوئي، ولكن مع تعديلات كيميائية حيوية أعلى. وعند إعادة الري، كانت عملية تعافي هذه المعايير أبطأ في الأصول القادمة من المناطق الجافة. تشير الأسهم الحمراء إلى الارتفاع، بينما تمثل الأسهم الزرقاء الانخفاض.	الشكل (22)
65	الصفات الفوق تركيبية لأوراق شتلات <i>S. superba</i> من جميع الأصول	الشكل

	الجغرافية في مرحلة ما قبل الجفاف. تشير الرموز AH، JX، HN، GX إلى أنهوي، جيانغشي، هونان وقوانغشي على التوالي. CW = جدار خلوي، Chl = بلاستيده خضراء، M = ميتوكونديريا، Pb = حبيبة بلاستيديه، SG = حبة نشاء، V = فجوة. تشير الأشربة الأفقية إلى مقياس الرسم (10 ميكرومتر).	(23)
66	نشاط إنزيم سوبر أوكسيد ديسميوتاز (SOD) وتركيز البرولين (Pro) لجميع أصول شتلات <i>S. superba</i> عند مستويات فقدان التوصيل الهيدروليكي (PLC) المستهدفة وبعد إعادة الري	الشكل (24)
67	العلاقة بين نشاط إنزيم السوبر أوكسيد ديسميوتاز (SOD) ومحتوى الماء النسبي في الأوراق (a-d) (RWC)، وتركيز البرولين (Pro) ومحتوى الماء النسبي في الأوراق (e-h) (RWC) لأربعة مصادر جغرافية (provenances) من شتلات <i>S. superba</i>	الشكل (25)
69	العلاقة بين التمثيل الضوئي للأوراق تحت إضاءة مشبعة (Asat) ونشاط إنزيم سوبر أوكسيد ديسميوتاز (a-d) (SOD)، وبين Asat وتركيز البرولين (Pro) ((e-h) لأربعة مصادر وراثية (provenances) لشتلات <i>S. superba</i>	الشكل (26)
69	يوضح العمليات البيوكيميائية التي تحدث في نبات <i>S. superba</i> خلال فترات الجفاف وبعد إعادة الري، بالإضافة إلى تسلسل تعافي الصفات الفيزيولوجية.	الشكل (27)
75	تأثير المستويات المختلفة من $CoSO_4$ (10، 15، و20 ملغم/لتر) على الكلوروفيل (a)، الكلوروفيل (b)، الكلوروفيل الكلي (c)، والكاروتينات (d) في نبات الفجل مع وبدون استخدام البرولين.	الشكل (28)
76	تأثير المستويات المختلفة من $CoSO_4$ (10، 15، و20 ملغم/لتر) على المحتوى النسبي للماء (a)، تسرب الإلكتروليتات (b)، بيروكسيد الهيدروجين (c)، والمالوندي ألدهيد (d) (MDA) في نبات الفجل مع وبدون استخدام البرولين.	الشكل (29)
77	تأثير المستويات المختلفة من $CoSO_4$ (10، 15، و20 ملغم/لتر) على نشاط إنزيم (a) SOD، (b) POD، (c) APX، و (d) CAT في نبات الفجل مع وبدون استخدام البرولين.	الشكل (30)
78	تأثير المستويات المختلفة من $CoSO_4$ (10، 15، و20 ملغم/لتر) على ((a)، البرولين (b، c) (GSH)، و (d) (ASA) في نبات الفجل مع وبدون استخدام البرولين.	الشكل (31)
80	مخططات تجميعية باستخدام الغلاف المحدب (Convex Hull) للمعاملات (A)، والبرولين (B)، ومخططات التجميع الهرمي (Hierarchical Cluster) للصفات	الشكل (32)

	المدروسة (C).	
85	رسم توضيحي لترتيب التجربة (المعالجات) وإجراءات/تواريخ أخذ العينات في الدراساتتين 1 و 2 على <i>Prunus persica</i> صنف "Daewol". تشير الحرف S (باللون الأحمر) إلى تاريخ أخذ العينة (سوق مأخوذة من 5 أشجار). تمثل درجات الحرارة (نهار/ليل) المتوسطات خلال فترة المعالجة التي استمرت 4 أيام.	الشكل (33)
88	التغيرات في محتوى البرولين في السوق ذات السكون البيئي لأشجار الخوخ من صنف "Daewol" خلال المعالجات الحرارية المتكررة (HT1 و HT2) والمعالجة الباردة البيئية (CT) (الدراسة 1، فبراير 2015).	الشكل (34)
89	التغيرات في محتوى البرولين في السوق الخاصة بأشجار الخوخ من صنف "Daewol" بعد المعالجة الحرارية (HT) أو المعالجة الباردة (CT) خلال فترة النمو (الدراسة 2، مايو 2015)	الشكل (35)
90	(A) التغيرات في التآلق الكلوروفيلي (Fv/Fm) لأوراق شجرة الخوخ من صنف "Daewol" أثناء المعالجة الحرارية (HT) والمعالجة الباردة (CT) ضمن الدراسة الثانية (مايو 2015).	الشكل (36)
91	التغيرات في التعبير الجيني لكل من (A) P5CS، (B)، و (C) P5CR، (D)، و (E) OAT، (F) بالنسبة إلى "BT" الذي اعتُبر القيمة المرجعية (1) في السوق التابعة لأشجار الخوخ من صنف "Daewol" خلال معالجتين حراريتين متكررتين (HT1 و HT2) ومعالجة باردة بينهما (CT) أثناء حالة السكون البيئي (الدراسة الأولى، فبراير 2015).	الشكل (37)
92	التغيرات في مستويات التعبير الجيني لكل من (A) P5CS، (B)، و (C) P5CR، (D)، و (E) OAT، (F) بالنسبة إلى "BT" الذي اعتُبر القيمة المرجعية (1) في السوق التابعة لأشجار الخوخ من صنف "Daewol" بعد المعالجة الحرارية (HT) والمعالجة الباردة (CT) خلال فترة النمو (الدراسة الثانية، مايو 2015).	الشكل (38)
97	تغير معدل البرولين لدى نباتات <i>Solanum lycopersicum</i> صنف <i>Microtom</i> المعرضة لإجهاد ملحي تحت تراكيز مختلفة: 1 ملي مول (شاهد)، 25 ملي مول، 50 ملي مول، 100 ملي مول، 150 ملي مول، و 200 ملي مول.	الشكل (39)
98	تغير معدل الجلایسین بیتاين لدى نباتات <i>Solanum lycopersicum</i> صنف <i>Microtom</i> المعرضة لإجهاد ملحي تحت تراكيز مختلفة: 1 ملي مول (شاهد)،	الشكل (40)

	25 ملي مول، 50 ملي مول، 100 ملي مول، 150 ملي مول، و 200 ملي مول	
99	تغير تركيز أيونات K^+ ، Mg^{2+} ، N^+ و Cl^- في أوراق <i>Microtom</i> . تم توضيح أشرطة الخطأ. وتشير المعايير إلى وجود تأثيرات معنوية لأيونات Mg^{2+} ، K^+ و Na^+ و Cl^- وتفاعلاتها وفقاً لاختبار ANOVA.	الشكل (41)
104	تأثير تطبيق البرولين على تعزيز مؤشرات نمو نبات الذرة تحت إجهاد الجفاف. (A) طول الساق، (B) الوزن الطازج للساق، (C) الوزن الجاف للساق، (D) طول الجذر، (E) الوزن الطازج للجذر، (F) الوزن الجاف للجذر	الشكل (42)
105	تطبيق البرولين يعزز المعايير الفيزيولوجية في الذرة تحت إجهاد الجفاف. (A) تسرب الإلكترونات، (B) محتوى الماء النسبي، (C) مساحة الورقة، (D) قطر الساق، و (E) محتوى الكلوروفيل (قيمة SPAD).	الشكل (43)
106	تأثيرات تطبيق البرولين على مؤشرات الإجهاد التأكسدي وأنشطة إنزيمات المضادات الأوكسدة في الذرة تحت إجهاد الجفاف (A) تركيز H_2O_2 ، (B) تركيز المالوندايالدهيد (MDA)، (C) نشاط الكاتالاز (CAT)، (D) نشاط البيروكسيداز (POD) و (E) نشاط سوبر أوكسيد ديسموتاز (SOD)	الشكل (44)
107	تطبيق البرولين يعزز تركيزات البروتين والمغذيات في نباتات الذرة تحت إجهاد الجفاف. (A) البروتين، (B) النيتروجين، (C) البوتاسيوم و (D) الفسفور. أدى إجهاد الجفاف إلى انخفاض كبير في مستويات البروتين والنيتروجين والبوتاسيوم والفسفور. ومع ذلك، ساهم تطبيق البرولين تحت إجهاد الجفاف في زيادة هذه المستويات، مما يشير إلى تأثير مهدئ على استنزاف المغذيات بسبب الجفاف	الشكل (45)
108	التطبيق الخارجي للبرولين يعزز مستويات البرولين والسكريات الذاتية في نباتات الذرة تحت إجهاد الجفاف. (A) تركيز البرولين في الأجزاء الخضرية، (B) تركيز البرولين في الجذور، و (C) إجمالي السكريات القابلة للذوبان.	الشكل (46)
109	يوضح هذا الشكل استجابة نمو الذرة تحت إجهاد الجفاف مع وبدون مكملات البرولين. تُظهر اللوحة اليسرى نبات ذرة تم معالجته بإجهاد الجفاف والبرولين الخارجي، مع تحسن في معايير النمو. بالمقابل، تُظهر اللوحة اليمنى نبات ذرة تم تعريضه لإجهاد الجفاف فقط، مع تقليل في النمو ومحتوى الكلوروفيل. الجزء المركزي يعرض التغيرات الفيزيولوجية والكيميائية الحيوية التي لوحظت تحت هذه الظروف.	الشكل (47)

فهرس الجداول

الصفحة	العنوان	الرقم
27	تركيزات المعادن الثقيلة (HM) في الصخور النارية والرسوبية، مقاسة بجزء في المليون	الجدول (01)
36	بعض الخصائص الأساسية للبرولين	الجدول (02)
51	مربعات المتوسط من تحليل التباين لخصائص اربعة اصناف من الفلفل الحار تحت ظروف التحكم و ظروف البرولين المضافة.	الجدول (03)
62	خصائص الماء في الأوراق لشتلات <i>S. superba</i> من أربع أصول جغرافية قبل التعرض للجفاف. حيث تشير الرموز: AH، JX، HN، GX إلى أنهوي، جيانغشي، هونان و قوانغشي على التوالي.	الجدول (04)
63	الصفات الفوق مجهرية (فوق تركيبية) لأوراق شتلات <i>S. superba</i> من الأصول الجغرافية الأربعة.	الجدول (05)
71	الخصائص الأولية للتربة والري قبل التجربة.	الجدول (06)
74	تأثيرات المستويات المختلفة من كبريتات الكوبالت (10، 15، 20 ملغم/لتر) بدون و/أو مع البرولين على طول الساق والجذر، الوزن الطازج والجاف للنبات، محتوى البروتين، ومحتوى الكربونيل في فجل مزروع تحت إجهاد الملوحة	الجدول (07)
87	البودائ (Primers) المستخدمة في تحليل تفاعل البوليميراز المتسلسل الكمي بالزمن الحقيقي (RT-qPCR) لجينات P5CS و P5CR و OAT في السوق التابعة لأشجار الخوخ من صنف "Daewol".	الجدول (08)
97	القيم المتوسطة للوزن الجاف لأوراق نباتات <i>Solanum lycopersicum</i> صنف <i>Microtom</i> المعرضة لإجهاد ملحي تحت تراكيز مختلفة: 1 ملي مول (شاهد)، 25 ملي مول، 50 ملي مول، 100 ملي مول، 150 ملي مول، و 200 ملي مول.	الجدول (09)

قائمة الاختصارات:

بيروكسيداز الاسكوربات : APX

كاتالاز : CAT

اوksيداز الفينولات المتعددة : PPO

النظام الضوئي الثاني : PS II

بيروكسيد الهيدروجين : H_2O_2

الايوكسجين الاحادي : 1O_2

جذر الايون فائق الاوكسجين: O_2^-

ادينوسين-5'-ثلاثي الفوسفات : ATP

بيروكسيداز : POD

ثاني اوكسيد الكبريت : SO_2

اوزون : O_3

كيلودالتون : kDa

الرموز الجينية التي تشفر الحمض الأميني برولين : (CCU، CCC، CCA، CCG)

الصيغة الجزيئية للبرولين : $C_5H_9NO_2$

بزوايا الالتواء الخاصة بالعمود الفقري للبيتيد: ψ و ϕ بزوايا

ذرة الكربون بيتا في السلسلة الجانبية للحمض الأميني: β -Carbon

المنعطفات بيتا، وهي عناصر من البنية الثانوية للبروتين: B-turns

الحلزونات ألفا والصفائح بيتا - مكونات البنية الثانوية للبروتين: α -helix and β -sheet

ذرة النيتروجين في المجموعة الأمينية المرتبطة بذرة الكربون ألفا: α -N (α -amino nitrogen)

CRD: التصميم العشوائي الكامل

NaCl: كلوريد الصوديوم

ABA: حمض الأبسيسيك

ROS: جذور الأوكسجين التفاعلية

Asat: معدل التمثيل الضوئي المشبع بالضوء

RWC: المحتوى النسبي للماء

SOD: سيبروكسيداز ديسموتاز

PLC: النسبة المئوية لفقدان التوصيلية

CoSO₄: كبريتات الكوبالت الثنائية

MDA: مالونديهايد

GR: جلوتاثيون ريدوكسيداز

GSH: جلوتاثيون مخفض

AsA: حمض الازوسكريك

HT: معالجات حرارية

CT: معالجات باردة

المقدمة

نظراً لكونها كائنات حية غير متحركة، تواجه النباتات مجموعة واسعة من الضغوط البيئية. وقد ورد قدر هائل من الأبحاث حول تأثيرات الضغوط الحيوية وغير الحيوية المختلفة على نمو النباتات (Ali et al., 2019). تشمل الضغوط غير الحيوية الملوحة، الغمر بالماء، الجفاف، الاجهاد الحراري، الإجهاد الناتج عن المعادن الثقيلة، مخلفات المبيدات، نقص العناصر الغذائية وأضرار الأشعة فوق البنفسجية (UV-B) (Dikilitas et al., 2020). مما يؤدي إلى أضرار قد تؤثر سلباً على نموها الخضري والتكاثري وتضعف إنتاجيتها (Kido et al., 2019).

ومن النتائج الشائعة لمعظم الإجهادات غير الحيوية، بما في ذلك الملوحة، هو زيادة إنتاج أنواع الأوكسجين التفاعلية (ROS) مثل الجذور الحرة (O_2^-)، وبيروكسيد الهيدروجين (H_2O_2)، الجذور الهيدروكسيلية (HO^\bullet) والتي تُعدّ سامة للغاية للنباتات، وتسبب أضراراً في الحمض النووي، البروتينات، الدهون والكلوروفيل (Abdelhamid et al., 2013). يعرف الإنتاج المرتفع لهذه الأنواع التفاعلية بالإجهاد التأكسدي، الذي يلحق الضرر بالجزيئات الحيوية المهمة ويؤدي إلى تلف الخلايا وموتها، طورت النباتات العديد من الآليات التي تساعد على التكيف. من أبرز هذه الآليات زيادة إنتاج مضادات الأكسدة (الإنزيمية وغير الإنزيمية) (Zulfiqar et Ashraf, 2023) مثل الكاتالاز، بيروكسيدازا لأسكورات، سوبر أوكسيد ديسموتاز، ريدوكتاز الجلوتاثيون وغيرها (Ahmad et al., 2014).

إلا أن النباتات تمتلك استجابات متعددة حسب نوع الاجهاد التي تتعرض له، تشمل مظاهر مورفولوجية كصغر مساحة الأوراق، قصر الساق، النفاف الأوراق، محتوى الشمع، فيزيولوجية مثل التبخر، كفاءة استخدام المياه، نشاط الثغور، التكيف الأسموزي، كيميائية حيوية مثل تراكم البرولين وتخزين الكربوهيدرات على المستوى الخلوي (Kumar et al., 2018).

استجابةً لهذه الضغوط، تقوم النباتات بنقل أو تصنيع مركبات عالية الذوبانية ومنخفضة الوزن الجزيئي تُعرف باسم "الأسموليتات" أو "العوامل الواقية أسموزياً"، والتي تُمكن الكائن الحي من امتصاص الماء والاحتفاظ به داخل الخلية واستئناف أو مواصلة العمليات الخلوية الطبيعية (Xiong and Ishitani, 2006). مثل تراكم الأسموليتات المتوافقة وأبرزها البرولين، والذي يتراكم في ظروف نقص الماء والملوحة و درجات الحرارة المنخفضة والإشعاعات فوق البنفسجية. (Singh et al., 2017).

البرولين (Pyrrolidine-2-carboxylic acid) هو أحد الأحماض الأمينية البروتينية، ويلعب دوراً بالغ الأهمية في النباتات المعرضة لظروف الإجهاد المختلفة. يؤدي البرولين مجموعة متنوعة من الوظائف في الأنظمة البيولوجية (Mundada et al., 2021).

يؤدي البرولين أدواراً متعددة أثناء الإجهاد، مثل تثبيت البروتينات والأغشية والهياكل تحت الخلوية، وحماية الوظائف الخلوية من خلال التخلص من أنواع الأوكسجين التفاعلية (ROS). كما أن إنتاج وتحلل

البرولين في مواقع مختلفة مثل السيتوسول، والبلاستيدات الخضراء، والميتوكوندريا يعكس تنوع وظائفه في البلاستيدات الخضراء (Kaur et Asthir, 2015).

في هذا السياق، كان علينا طرح مجموعة من التساؤلات؟ من بينها ما تأثيره على الخصائص الفيزيولوجية و المرفولوجية خاصة تحت ظروف الاجهاد البيئي؟ وهل هو مجرد مؤشر للاجهاد أم أنه يلعب دورا نشطا في مقاومته؟ و كيف يتغير تركيزه في النباتات تحت هذه الظروف؟. وتهدف هذه الدراسة إلى معرفة دور البرولين في ظل البيئات المتغيرة، وذلك بالتعمق في فهم الدور الحيوي الذي يلعبه الحمض الأميني برولين في استجابة النباتات للظروف البيئية المتغيرة. كما تسعى إلى تحليل آليات عمل البرولين في تعزيز مقاومة النباتات للإجهادات البيئية المختلفة مثل الحرارة المرتفعة، الملوحة ونقص المياه. وتسعى الدراسة أيضاً إلى استكشاف إمكانات توظيف البرولين في تحسين مقاومة النباتات للظروف المناخية القاسية.

تم تقسيم هذا العمل إلى جزأين رئيسيين: جزء نظري وآخر تطبيقي.تضمن الجزء النظري فصلين: تناول الفصل الأول الإجهادات غير الحيوية، بينما ركز الفصل الثاني على التعرف على حمض البرولين. أما الجزء التطبيقي، فقد تمثل في دراسة مقارنة ومراجعة لأهم الدراسات السابقة التي تناولت دور البرولين في ظل البيئات المتغيرة، وقد تم مناقشة أبرز النتائج المتوصل إليها ومقارنتها فيما بينها. و في الختام، تم تقديم خاتمة مدعمة بتوصيات مستقبلية يمكن أن تسهم في توجيه الأبحاث القادمة.

الجزء النظري

الفصل الأول

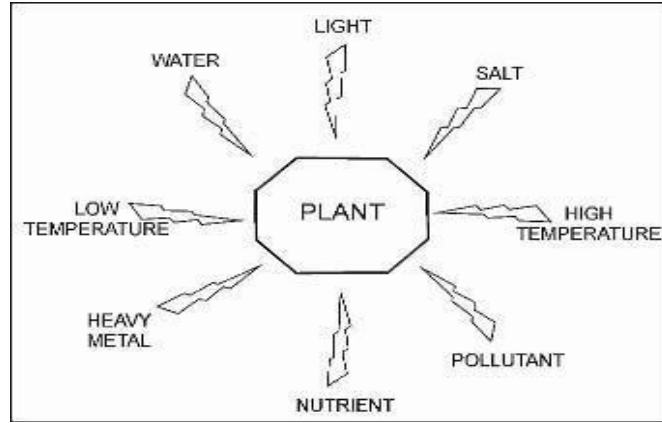
الإجهاد البيئي

I- الإجهاد البيئي:

تعرض النباتات غالباً لظروف بيئية غير مواتية يمكن أن تعرف باسم الإجهاد (Babasidli et Kac, 2010). يشير مصطلح "الإجهاد" إلى جميع الاضطرابات البيولوجية الناتجة عن أي اعتداء على الكائن الحي. وهو عملية تؤدي إلى فرض قيود قد تكون ضاره على الكائن الحي ومع ذلك عندما يستخدم هذا المصطلح في علم الأحياء النباتي يكسب دلالات خاصة حيث يمثل الإجهاد البيئي العوامل المسؤولة عن الاضطرابات والتغيرات التي تطرأ بدرجات متفاوتة على الظروف الطبيعية التي تتعرض لها النباتات خلال نموها (Tammed et Harrat, 2022). وفي الواقع يشير إلى الانحراف في النمو والوظائف الطبيعية لفيزيولوجيا النبات حيث يتم استشعاره على المستوى الخلوي ثم ينتقل إلى النبات بالكامل يؤدي التغير في تعبير الجينات الناتج عن ذلك إلى تعديل النمو والتطور ويؤثر على القدرات التكاثرية للنبات مما يسبب أضراراً للنبات (Benkoli et Bouzeghaïa, 2016). عندما تخرج العوامل الخارجية عن الظروف المثلى لنمو النبات فإنها تسبب له إجهاداً (Darilila, 2012). حيث تنقسم الإجهادات البيئية إلى نوعين: الإجهادات الحيوية، وهي الناجمة عن الكائنات الحية مثل البكتيريا والفطريات والفيروسات والديدان الأسطوانية والحشرات والكائنات حقيقية النواة الأعلى (مثل الأعشاب والحيوانات العاشبة)، والإجهادات الغير الحيوية، التي تسببها العوامل غير الحية، مثل الضغوط الفيزيائية أو الكيميائية (Kido et al., 2019). وتتناسب درجة تأثير مظاهر الحياة المختلفة للنبات مع شدة الإجهاد ومدته. فالإجهاد البسيط يؤدي إلى آثار طفيفة تستطيع غالبية النباتات تحملها، خاصة إذا كان الإجهاد مؤقتاً، بل يمكن أن تتلاشى تلك الآثار بزوال الإجهاد. ومع زيادة الإجهاد يزداد حيود النبات عن الظروف الطبيعية من حيث النمو والتطور والإنتاجية فينخفض معدل النمو وقد يتوقف مع اشتداد الإجهاد. وعند تجاوز الإجهاد الحدود التي تمكن للنبات تحملها يدخل النبات في حالة كمون أو يشيخ مبكراً ويموت (أبو جاد الله، 2010).

II- الإجهاد اللاحيوي:

يعرف الإجهاد اللاحيوي بأنه الإجهاد الناتج عن خلل أو زيادة في العوامل الكيميائية والفيزيائية للبيئة (Mouhoubi et Hamadou, 2020). والتي تنتج عادة عن الجفاف، الملوحة، درجات الحرارة المرتفعة أو المنخفضة، الضوء، نقص أو زياده العناصر الغذائية، المعادن الثقيلة والملوثات سواء بشكل فردي أو مشترك كما هو موضح في (شكل 1) تؤدي إلى تغيير عملية الأيض في النبات مما يؤثر سلباً على النمو والتطور والإنتاجية (Rao et al., 2006).



الشكل(1): بعض عوامل الاجهاد اللاحيوي الشائعة التي تؤثر على النبات (Rao et al.,2006)

III- أنواع الإجهاد اللاحيوي في النباتات:

1- الإجهاد المائي:

1-1 تعريف الإجهاد المائي:

يُعد الإجهاد المائي Stress Water أحد أنواع الإجهاد البيئي غير الحيوي Abiotic الذي يشير إلى قلة أو زيادة الماء في محيط النبات (الحجيري، 2013)، وعلى وجه التحديد، هو "الحالة التي يكون فيها معدل فقد الماء بالنتح أو البخر أعلى من معدل امتصاص الماء من التربة مما قد يتسبب في نقص المحتوى المائي لأنسجة النبات عن المستوى الطبيعي" (أبو جاد الله، 2010).

1-2-1 أنواع الإجهاد المائي:

1-2-1-1 الجفاف:

يُعد إجهاد الجفاف من أبرز أنواع الإجهادات غير الحيوية التي تؤثر بشكل كبير على نمو وإنتاجية النبات، متجاوزاً في تأثيره العديد من الإجهادات الأخرى. وفقاً لما ذكره Shao و زملاؤه (2008)، فإن تعرض النباتات لإجهاد الجفاف ينجم إما عن صعوبة امتصاص الجذور للماء، أو نتيجة لارتفاع معدلات النتح بشكل يفوق قدرة النبات على تعويض المياه المفقودة (الربيعي، 2022).

وأشار الحجيري (2013) بأنه النقص في الماء المتيسر في التربة والذي ينتج عنه نقص في الماء الذي يحتاجه النبات بشكل يؤثر في نموه الطبيعي. يؤثر إجهاد الجفاف، سواء بشكل مباشر أو غير مباشر، على العديد من عمليات النمو في النبات. وغالباً ما تترافق تأثيراته مع ارتفاع درجات الحرارة، مما يؤثر على العديد من الأنشطة الحيوية التي تتم ضمن نطاق حراري يتراوح بين 0 إلى 40 درجة مئوية. ومع ذلك، فإن هذا النطاق المثالي يختلف باختلاف نوع النبات والظروف البيئية التي ينمو فيها (الربيعي، 2022).

1-1-2-1- التغيرات الفيزيولوجية و المورفولوجية و البيوكيميائية على مستوى النبات :

*الإجهاد التأكسدي:

أظهرت العديد من الدراسات أن إجهاد الجفاف يؤدي إلى زيادة إنتاج أنواع الأوكسجين التفاعلية (ROS)، مثل الأنيون الفائق، بيروكسيد الهيدروجين و جذور الهيدروكسيل بالإضافة إلى ذلك، تعمل الجذور الحرة للأوكسجين كمحفزات لنمو النبات وتطوره، لكنها تسبب الشيخوخة وموت الخلايا عندما تصبح معدلاتها عالية. وبالتالي، يتم تحديد شدة الضغط بناءً على كمية ROS على المستوى الخلوي. الشكل المخفض للأوكسجين هو نتيجة إضافة إلكترون واحد أو إلكترونين أو ثلاثة إلكترونات لتشكيل هذه الجذور (Benaissa et Djebbar, 2022). فيؤدي تراكم هذه الأنواع داخل الخلايا إلى أكسدة الدهون في الأغشية، وتلف البروتينات والأحماض النووية، وانخفاض قدرة النبات على القيام بعملية التمثيل الضوئي (Jabari, 2024).

*على المستوى الخلوي:

تُعد تركيبة الأغشية وخصائصها حساسة للغاية تجاه الجفاف. فقد أظهرت الدراسات أنه في حالات الجفاف المعتدل، ينخفض محتوى الدهون في الأغشية. ويرتبط هذا الانخفاض ارتباطاً وثيقاً بتنشيط المسارات الحيوية لتخليق الدهون، بالإضافة إلى تحفيز الأنشطة الليبوليتية (تحلل الدهون) والأكسدية (Merewit et Huang, 2007).

*تأثيرات على عملية التركيب الضوئي:

توجد علاقة خطية بين محتوى الورقة من الماء والاستجابة التركيبية الضوئية. ويمكن أن يعزى انخفاض النشاط التركيبي الضوئي إلى عوامل مرتبطة بالثغور (مثل إغلاق الثغور)، أو إلى عوامل غير مرتبطة بها (مثل انخفاض انتشار ثاني أكسيد الكربون إلى مواقع الاختزال أو تعطيل الإنزيمات المسؤولة عن تثبيت ثاني أكسيد الكربون)، وكذلك إلى عوامل تتعلق بإعادة توزيع المركبات الناتجة حديثاً عن التركيب الضوئي تؤدي التأثيرات المباشرة للجهد المائي المنخفض على البلاستيدات الخضراء إلى انخفاض في الطلب على ثاني أكسيد الكربون، رغم بقائه بتركيز مرتفع نسبياً داخل الورقة. كما تتخفف أنشطة نقل الإلكترون والفوتوفوسفوريلات داخل البلاستيدات الخضراء، وهو ما يعكس حدوث أضرار في أغشية التايلاكويد وفي بروتين ATP synthase. وتُعزى هذه التأثيرات المثبطة الناتجة عن انخفاض الجهد المائي بتركيزات مرتفعة من المغنيسيوم، والتي تظهر في الأوراق المصابة بالجفاف (Amenas, 2007).

*على مستوى النمو:

تُعدّ انخفاضات النمو من أوائل علامات نقص المياه وتحدث هذه الانخفاضات إما بشكل مباشر من خلال تباطؤ معدل النمو نتيجة تثبيط انقسام الخلية وتقليل مساحة الأوراق مما يؤدي إلى انخفاض وتقليل في إنتاج الكتلة الحيوية الكلية، أو بشكل غير مباشر عن طريق تقليل عدد السيقان حيث يتحكم نقص المياه في التربة بشكل مباشر في نمو النباتات، حيث يؤدي إلى تقليل نمو البراعم الجديدة و نقص في التغذية

المعدنية (النيتروجين والفوسفور)، ويرجع ذلك أساساً إلى انخفاض تدفق العناصر الغذائية نحو الجذور، مما يؤدي إلى انخفاض نمو الشتلات (Bekka, 2019).

1-2-1-2-آليات التكيف:

لمواجهة نقص المياه، تطوّر النباتات عدة استراتيجيات تكيفية تختلف حسب النوع النباتي وظروف البيئة (التجنب، التهرب، والتحمل).

أ. استراتيجية التهرب (Esquive):

تعتمد هذه الاستراتيجية على تجنب التعرض للإجهاد المائي من خلال إتمام دورة النمو خلال الفترات المطيرة. وبهذا، يتم تقليل خطر فقدان الغلة، وإن كان ذلك على حساب خفض الإنتاجية القصوى الممكنة

ويُعتبر تقديم دورة المحصول من فترات ذات طلب مناخي مرتفع إلى فترات ذات خطر أقل هو أساس استراتيجية المحاصيل الشتوية، حيث تُتجزّ هذه المحاصيل دورتها خلال فترة يقل فيها احتمال حدوث الإجهاد المائي، وتعوّض انخفاض شدة الإشعاع الشمسي في هذا الموسم من خلال طول مدة الدورة (Aatoui et Fergati, 2019).

ب. استراتيجية التجنب (Evitement):

يتعلق في قدرة النبات على الحفاظ على جهد مائي مرتفع من خلال تقليل فقدان الماء، خاصة عن طريق خفض عملية النتج. تظهر هذه الاستراتيجية عند بعض النباتات التي تدخل في حالة "حياة بطيئة" خلال الجفاف، مما يسمح لها بالبقاء حتى تعود الظروف الملائمة، كما هو الحال عند الأشنيات، الحزازيات، والسرخسيات. لكنها لا تستطيع تقليل المحتوى المائي إلى أقل من 96%، لأن ذلك يؤدي إلى توقف النشاط الحيوي بشكل لا يمكن عكسه. و تعد فعالية استخدام الماء من أهم خصائص التجنب، إذ تعبر عن قدرة النبات على إنتاج كمية كبيرة من المادة الحية باستخدام كمية محدودة من الماء. وتُعزّز عن طريق تقليل فقد المائي مثل غلق الثغور، زيادة سمك الكيوتيكل، وصغر حجم خلايا الورقة. (داب الله، 2018).

ج. إستراتيجية التحمل (Tolérantes):

تستخدم النباتات آليات تساعد على تحمل الإجهاد. من خلال خفض القدرة المائية، تحافظ هذه النباتات على التوتر الخلوي عبر تعديل القدرة الأسموزية، والتي يتم الحصول عليها من خلال تراكم الأيونات المعدنية و/أو المركبات العضوية.

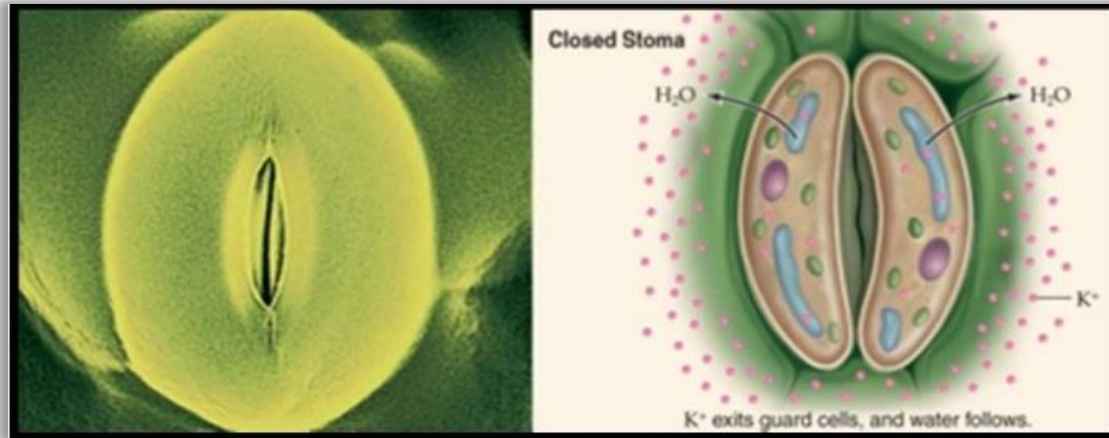
لا تتمتع جميع الأنواع بنفس مرونة الاستجابة للإجهاد. بعض السمات تكون موروثية وراثياً سواء كان هناك إجهاد أم لا، مثل وجود نظام جذري عميق، أو أوراق على شكل إبر، أو وظيفة التمثيل الضوئي من النوع CAM. مقاومة النبات للإجهاد ستكون مزيجاً من خصائص النوع والمرونة الخاصة

به. لذا يمكن تصنيف النبات على أنه ينتمي إلى نوع متجنب مثل: الشكل الهيكلي الثابت ولكن من نوع متحمل مثل: القدرة المستحثة على تعديل القدرة الأسموزية (Drai, 2012).

1-2-1-2-1 التكيفات الفيزيولوجية:

إغلاق الثغور:

في حالات العجز المائي، تفقد النباتات كميات كبيرة من الماء عن طريق النتح، حيث تفقد الماء في شكل بخار. كرد فعل مباشر على هذا الإجهاد المائي، تستجيب النباتات بإغلاق الثغور كما مبينة في (الشكل 2). في الواقع، عندما يحدث نقص في الماء، تقوم الجذور بإفراز هرمون "حمض الأبسيسيك" (ABA) الذي ينتقل عبر العصارة إلى الأوراق وهناك يُحفز إغلاق الثغور، يساهم هذا التنظيم في توازن الماء داخل النبات، استعادة تورم الخلايا، نمو الأوراق الحساسة تجاه نقص الماء. لكن من جهة أخرى، فإن هذه الاستراتيجية تؤدي إلى ارتفاع درجة حرارة الأوراق وانخفاض امتصاص ثاني أكسيد الكربون، مما يسبب انخفاضاً في النشاط التمثيلي الضوئي. (Amrouche et Mesbah, 2017).



الشكل(2):إغلاق الثغور (Amrouche et Mesbah, 2017)

1-2-1-2-1-2-2 التكيف المورفولوجي:

يمكن أن يترجم تأثير الجفاف، حسب استراتيجية التكيف الخاصة بكل نوع أو صنف نباتي، إلى تعديلات مورفولوجية تهدف إلى زيادة امتصاص الماء و/أو تقليل فقدانه عبر النتح، إضافة إلى تقليل التنافس بين الأعضاء على المواد المخزنة. وتشمل هذه التعديلات الأجزاء الهوائية و تحت الأرضية للنبات. ومن بين هذه التغيرات، يُعتبر تقليل مساحة الأوراق وعدد الأشطاء استجابة شائعة لنقص المياه، حيث تُعد وسيلة فعالة للتحكم في فقدان الماء، مما يجعل النباتات النجيلية (كالحبوب) تُوصَف بأنها نباتات مقتصدّة في استهلاك المياه. كما أن النفاث الأوراق يُعد أحد أشكال التكيف الورقي التي تطورها النباتات على المدى الطويل لمواجهة الجفاف. أما على مستوى الجذور، فتُعد كفاءة امتصاص الماء من التربة إحدى الوسائل التي تُمكن النبات من تجنب أو تأخير الجفاف، ويُعزى ذلك إلى امتداد الجذور سواء في

العمق أو على السطح، إضافة إلى زيادة سرعة نموها وتفرّعها. ويُعتبر الاستثمار الكبير في نمو الجذور آلية فعالة لتعظيم امتصاص الماء وتحسين قدرة النبات على التكيف مع ظروف الجفاف (Nabti, 2020).

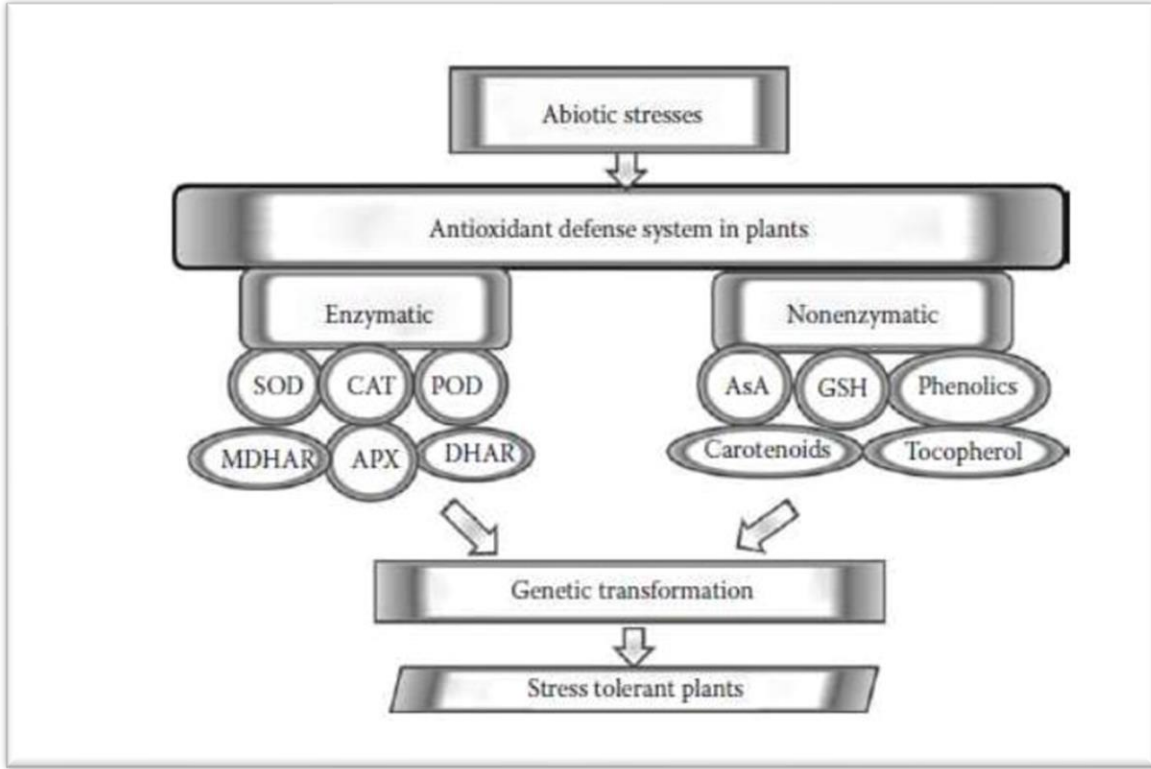
1-2-1-2-3-التكيف البيوكيميائي:

*التعديل الأسموزي:

يمكن للنبات الحفاظ على توازنه الأسموزي في حالات الإجهاد الخفيف إلى المتوسط عبر التعديل الأسموزي، باستخدام مركبات ذائبة مثل السكريات، البرولين، الجليسين-بيتاين، أو البينيتول كما أن السكريات (الجلوكوز، الفركتوز، السكروز) أقل فعالية من البرولين في هذا التوازن لكنها وتُعد من أبرز المركبات المستخدمة في التعديل الأسموزي (Aidaoui et al, 2013). حيث تلعب وظيفة وقائية على مستوى الأغشية، خاصة أغشية الميتوكوندريا كما أنها تسهم في حماية العمليات الحيوية المسؤولة عن تركيب الإنزيمات، مما يعزز قدرة النبات على تحمل الجفاف. وقد أظهرت دراسة أن تراكم السكريات في القمح الصلب كان أقل وضوحاً مقارنة بتراكم البرولين، وبلغت هذه التغيرات ذروتها بعد اليوم الثاني عشر من بداية الإجهاد. ولقد لوحظ أن أصناف القمح الصلب الخمسة التي درسها أظهرت تراكمًا ضعيفاً للسكريات. تسهم كل من السكريات والبرولين إلى جانب مركبات أخرى في التعديل الحلولي، مما يساعد في حماية الأغشية والأنظمة الإنزيمية من خلال خفض الكمون الأسموزي لتعويض انخفاض الكمون المائي في الأوراق، وبذلك تحافظ الخلايا على نشاطها الحيوي. (خباري و مقلاتي، 2016).

*مضادات الأكسدة :

تميل النباتات إلى تقليل ROS المنتجة عبر آليات مضادة للأكسدة إنزيمية (مثل PPO، وCAT، وAPX)، وغير إنزيمية كما مبينة في (الشكل 3) (Benaissa et Djebbar, 2022)، من خلال زيادة المركبات مثل الفينولات، والكاروتينات، والتوكوفيرول، وحمض الأسكوربيك (Jabari, 2024) ، التي تتواجد في عضيات الخلية المختلفة مثل البلاستيدات الخضراء، وذلك بهدف منع تراكم أنواع الأوكسجين التفاعلية (ROS) والحد من أثارها الضارة على الخلية. وتُعد عملية بيروكسدة الدهون واحدة من نتائج إجهاد الجفاف في النبات، يمتلك النبات منظومة دفاع ذاتية تشمل مضادات الأكسدة الإنزيمية وغير الإنزيمية، والتي تساهم في إزالة الـ ROS، والتي تُسبب بدورها عملية البيروكسدة والتسرب الإلكتروني (Electrolyte Leakage). وبالتالي، تعمل مضادات الأكسدة على حماية الأغشية الخلوية والعضيات. (الربيعي، 2022).



الشكل (3): آليات المضادة للأكسدة الأنزيمية والغير إنزيمية (Benaiss et Djebbar, 2022)

1-2-2-1-2 الغمر:

يُعد الإجهاد الناتج عن الجفاف والغمر بالمياه من أكبر المشاكل العالمية التي تواجه الزراعة. يحدث الغمر بالمياه عندما يتوفر الماء بكميات أكبر من الحاجة الأمثل للنباتات، في التربة المغمورة بالمياه، يتم ملء المسام بالماء، مما يؤدي إلى انخفاض تركيز الأوكسجين في التربة. يؤدي نقص الأوكسجين إلى انخفاض نمو النباتات وقدرتها على البقاء (Aakhtar et Nazir, 2013).

1-2-2-1-1-1 تغيرات على مستوى النبات:

* تأثير الغمر المائي على النبات:

الغمر في ظروف مالحة يُثبِّط قدرة الجذور على مقاومة الأملاح عند السطح، مما يؤدي إلى زيادة تركيزها في الأجزاء الهوائية. كما أن انخفاض تنفس الجذور في غياب الأوكسجين يُعد من أوائل استجابات النبات، ويؤدي إلى انخفاض كبير في الطاقة في خلايا الجذور (Akhtar et Nazir, 2013).

كما يؤثر على العمليات المرتبطة بانتقال المواد المذابة عبر الأغشية، مثل امتصاص العناصر الغذائية غير العضوية وتنظيم الرقم الهيدروجيني لل سيتوبلازم، وجهد الغشاء الخلوي وخروج مكونات الخلية مثل K^+ ، Cl^- ، الأحماض العضوية والأمينية، إضافة إلى ذلك، يؤدي إلى انخفاض التوصيل الشعري و/أو جهد الماء في الأوراق (Barrett et Lennard, 2003).

*تأثير الغمر بالمياه على تركيب المغذيات :

يؤدي الغمر بالمياه إلى تقليص مستويات المغذيات الداخلية في أجزاء مختلفة من النباتات إن نقص الأوكسجين في منطقة الجذور يسبب انخفاضاً كبيراً في انتقائية امتصاص أيونات K^+/Na^+ ، كما يعوق نقل أيونات K^+ إلى الأجزاء الهوائية للنبات وقد أظهرت الدراسات أن الظروف اللاهوائية تؤدي إلى تقليل نفاذية أغشية الجذور للأيونات Na^+ .

بشكل عام، يسبب الغمر بالمياه نقصاً حاداً في المغذيات الأساسية مثل النيتروجين، الفوسفور، البوتاسيوم، المغنيسيوم والكالسيوم في هذا الصدد، أفاد بوم وآخرون (1996) نقص كبير في امتصاص النيتروجين (N)، الفوسفور (P)، البوتاسيوم (K) والكالسيوم (Ca) في نباتات اللفت عندما تعرضت لإجهاد الغمر بالمياه لفترة قصيرة. كما تم الإبلاغ عن انخفاض مماثل في مستويات N، P، K في الذرة وعندما تعرض نبات *Medicago sativa* لإجهاد الغمر، تم ملاحظة انخفاض كبير في تركيب المغذيات في الأوراق والجذور، بما في ذلك الفوسفور (P)، البوتاسيوم (K) والكالسيوم (Ca) (Ashraf, 2012) .

*الأضرار التأكسدية الناتجة عن الأنواع التفاعلية للأوكسجين (ROS) :

على الرغم من أن الأوكسجين ضروري للحياة على الأرض، فإن تقليله بأي وسيلة قد يؤدي إلى إنتاج الأنواع التفاعلية للأوكسجين (ROS) التي تؤثر على العديد من العمليات الأيضية الخلوية في النباتات. يتم إنتاج ROS في النباتات تحت الظروف الطبيعية أو غير المجهدة ولكن بتركيز منخفض جداً. ومع ذلك، عندما تواجه النباتات إجهاداً بيئياً مثل إجهاد الغمر بالمياه، يرتفع تركيز ROS إلى مستوى يصبح ضاراً للعديد من التفاعلات الأيضية الخلوية في النباتات مثل التمثيل الضوئي وكفاءة PS II (أشرف، 2009). على سبيل المثال، تؤدي مستويات بيروكسيد الهيدروجين المرتفعة إلى تثبيط دورة كالفن (Ashraf, 2012).

1-2-2-2 آليات التكيف :

تظهر النباتات المتحملة للتغرق بعض التكيفات مثل تكوين أنسجة التهوية والجذور العرضية. وبفعل التفاعل بين الهرمونات النباتية مثل الأوكسين والإيثيلين، يتم تحفيز تكوين الجذور العرضية. يُعتبر الأرز من المحاصيل المتحملة للغمر، حيث يستطيع الإنبات والنمو في غياب كامل للأوكسجين، إلى جانب بعض الأعشاب مثل "عشب الحنطة السوداء" (*Echinochloa spp*).

يُعد تكوين أنسجة التهوية (aerenchyma) والجذور العرضية مؤشراً على وجود آليات تكيف لدى العديد من النباتات المتحملة للغمر. كما يتطور نسيج التهوية، الذي يُعتقد أنه يساهم في تحمل ظروف الغمر، في قشرة الجذور الجديدة في بعض النباتات، مثل الأرز الذي يُظهر تطوراً جيداً لهذا النسيج ويتكيف مع الغمر. تستجيب بعض النباتات مثل (*Paspalum dilatatum*) للغمر بزيادة في نسيج التهوية في الجذور وأعماد الأوراق، بينما تستجيب للجفاف بتقليل سمك أوعية metaxylem . على العكس، يزداد عدد الشعيرات الجذرية تحت الجفاف مقارنة بالغمر. (Akhtar et Nazir, 2013).

2- الإجهاد الحراري:

2-1- تعريف الإجهاد الحراري:

يؤدي تغير درجة الحرارة إلى اضطراب في نمو الكائنات النباتية ، فعادةً ما تكون النباتات حساسة للتغيرات الطفيفة في درجات الحرارة، سواء بالزيادة أو النقصان، عن درجة الحرارة التي تنمو فيها بشكل طبيعي وبالتالي تعتبر شكلاً من أشكال الإجهاد الحراري، حيث تمتلك كل فصيلة أو نوع نباتي درجة حرارة دنيا لا يمكن أن تنمو تحتها، ودرجة حرارة مثلى تُعد الأنسب لنموها، ودرجة حرارة قصوى يتوقف عندها النمو وقد تؤدي حتى إلى موت النبات (Miller, 1993).

يُعرف الإجهاد الحراري عند النباتات عادةً على أنه ارتفاع في درجة الحرارة يتجاوز عتبة معينة ولمدة كافية تؤدي إلى التأثير سلباً على نمو النبات وتطوره (Almeida, 2022). هناك شكلان رئيسيان للإجهاد الحراري الذي يصيب المحاصيل الزراعية: الأول، وهو الأكثر شيوعاً، ناجم عن ارتفاع درجات الحرارة (الحر) سواء بسبب ارتفاع درجات حرارة النهار أو الليل، أو بسبب الهواء الساخن، أو بسبب درجات الحرارة العالية للتربة. (Oukarroum, 2007) والثاني، وهو أقل حدوثاً، ناجم عن انخفاض درجات الحرارة (البرودة) (Laala, 2009).

وحسب Sahi و Nedil (2022) هو مجموعة التعديلات التي تحدث في فيزيولوجيا النباتات عندما ترتفع أو تنخفض درجات الحرارة عن الحدود المعتادة. يختلف هذا الإجهاد حسب الأنواع والشكل ودرجة التغير في درجة الحرارة، يؤثر الإجهاد الحراري عادة على النشاط التمثيلي الضوئي و يؤدي إلى تقليص محتوى المياه في النبات، كما يؤثر سلباً على انقسام الخلايا ونموها، علاوة على ذلك، قد يؤدي اضطراب العمليات الأساسية مثل تمثيل الكربون، التنفس أو التعرق إلى عيوب في النمو النباتي مثل الأعضاء الأقل عدداً، والأصغر حجماً و/أو المشوهة.

2-2- أنواع الإجهاد الحراري:

2-2-1- الحرارة المرتفعة (الحر):

الإجهاد الحراري الناتج عن درجات الحرارة المرتفعة يشكل تهديداً خطيراً للإنتاج الزراعي على مستوى العالم، حيث يؤدي إلى سلسلة من التغيرات المورفولوجية والأناتومية والفيزيولوجية والبيوكيميائية في النباتات (Benmerad, 2022). وتُعدّ الإجهادات الناتجة عن الحرارة وظيفة معقدة تختلف باختلاف الشدة (درجة الحرارة)، المدة ومعدل ارتفاع درجة الحرارة (Oukarroum, 2007).

2-2-1-1- التغيرات الفيزيولوجية و المورفولوجية و البيوكيميائية على مستوى النبات :

*تأثير على مستوى مراحل النمو المختلفة :

يؤدي الإجهاد الحراري إلى أضرار على مراحل مختلفة من النمو مثل ظهور ما يُعرف بـ "ضربات الشمس" على الأوراق، والفروع، والسيقان، تثبيط نمو البراعم والجذور (مما يؤثر على الدعم الفيزيائي وامتصاص الماء والمواد المغذية)، اختلال التوازن المائي، وتراجع جودة المحصول وكذلك انخفاض معدل الإنبات وفقدان القوة الحيوية أثناء النمو الخضري لنبات الفول أن الحرارة تؤدي إلى انخفاض تدريجي في طول النباتات، الوزن الجاف، الطازج للسويقة والمساحة الورقية بسبب فقدان الأوراق للامتلاء المائي، أما خلال فترة الإزهار تؤدي إلى عقم حبوب اللقاح، إجهاد الأعضاء التناسلية وانخفاض عدد البذور المتكونة، كما تبين وجود تأثيرات مورفولوجية أخرى مثل عقم الأزهار الناتج عن انخفاض انتشار حبوب اللقاح، ضعف إنباتها على الميسم، وتراجع نمو الأنابيب اللقاحية، كما هو ملاحظ في الأرز (Almeida, 2022).

*تأثير على مستوى الأغشية :

يسبب ارتفاع درجة حرارة الأغشية زيادة في الطاقة الحركية المتوسطة للجزيئات، وانكسار الروابط الهيدروجينية، وتحول من الحالة البلورية الشبيهة بالجل إلى حالة غير منظمة (سائلة) في سلاسل الألياف، بالإضافة إلى تعزيز الروابط الكارهة للماء. ولحسن الحظ، فإن الأغشية البيولوجية لا تحتوي على نوع واحد فقط من الدهون (أو الفسفوليبيدات)، بل تتكون من عدة أنواع مختلفة من الدهون التي تختلف في رؤوسها القطبية وسلاسلها الأليفاتية، مما يسمح بالحفاظ على سلامة هذه الأغشية (Miller, 1993).

*تأثير على مستوى عملية التركيب الضوئي:

يسبب الإجهاد الحراري العديد من التغيرات الخلوية المعقدة. وتعد عملية التمثيل الضوئي من أكثر العمليات حساسية تجاه ارتفاع درجات الحرارة. خاصة في نظام PSII. في نباتات C3 و C4، تؤدي الحرارة المرتفعة إلى تقليل نشاط إنزيم روبيسكو من خلال تعطيل العامل المنشط له. عند درجات حرارة معتدلة (30-40)، تتفكك معقدات هذا العامل، أما عند درجات أعلى من 42، فيتعرض لتشوه غير قابل للعكس، كما تؤدي الطاقة الزائدة الناتجة عن ضعف نقل الإلكترونات إلى تراكم طاقة الإثارة، تُفرغ باختزال الأوكسجين الجزيئي، مما ينتج أنواع الأوكسجين التفاعلية (ROS) مثل O_2^- ، H_2O_2 ، $OH\cdot$ ، و 1O_2 ، والتي تسبب تحلل الدهون الغشائية وتسهم في شيخوخة الأوراق (Merewitz et Huang, 2007).

*تأثير على عملية التنفس :

يشبه تأثير درجة الحرارة على عملية التنفس تأثيرها على باقي الظواهر الأيضية، حيث تزداد تدريجياً وفقاً لقانون أرهنيوس (Arrhenius) حتى 40 أو 50 درجة مئوية، ثم تتخفض فجأة نتيجة تدهور البروتينات، وقد أظهرت الدراسات أن الزيادة في معدل التنفس عند ارتفاع درجة الحرارة ليست سوى استجابة مؤقتة للتغير؛ إذ إن النباتات بعد التكيف، تعود إلى معدل تنفس مماثل لما كانت عليه قبل ارتفاع الحرارة (Laala, 2009).

* استجابة الثغور لدرجات الحرارة القصوى:

تستجيب الثغور لدرجات الحرارة القصوى بتنظيم تبادل الغازات، ويعتمد النتج على عوامل مثل مساحة الورقة، سمك الكيوتكيلول، وعدد الثغور. تؤثر الحرارة على الغازات ومقاومة انتشارها، مما يحد من دخول CO₂. في الرطوبة العالية، تفتح الثغور بسبب تبخر الماء من الخلايا السطحية، بينما في الرطوبة المنخفضة تُغلق بسبب تبخره من الخلايا الحارسة. درجات الحرارة القصوى تسبب إغلاق الثغور لتقليل فقد الماء، لكنها تعيق أيضاً عملية التمثيل الضوئي (Abdessemed,2009).

2-2-1-2 آليات التكيف :

*التكيفات المورفولوجية :

تتجنب العديد من النباتات ارتفاع الحرارة من خلال اتخاذ الأوراق وضعية أكثر عمودية، كما هو الحال في النباتات العشبية، أو من خلال التفاف الأوراق حول محورها الطولي. تشمل التكيفات المورفولوجية الأخرى إنتاج شعيرات على الأوراق (الزغب) أو أسطح شمعية تعكس الضوء، مما يقلل من امتصاص الطاقة، أو إنتاج أوراق أصغر وأكثر تقطيعاً لتقليل سمك طبقة الهواء الساكنة، مما يسمح بفقدان الحرارة بشكل أكبر عن طريق الحمل (convexion) أو التوصيل (Conduction) (Abdessemed,2009).

*تغيرات في تركيبة الأغشية :

تستجيب النباتات للإجهاد الحراري من خلال تعديل مسارات إنتاج الدهون، خاصة عبر إنزيمات الديساتوراز (Desaturases) التي تنظم درجة تشبع الأحماض الدهنية. مسؤولة عن إدخال الروابط الثنائية في سلاسل الأحماض الدهنية، وبالتالي في ظروف الحرارة، تزداد الدهون المشبعة (مثل حمضي اللينوليك والبالمتيك) وتخفض الدهون غير المشبعة مثل (حمض اللينولينيك)، مما يقلل من سيولة الأغشية. كما تشير دراسات لاحقة إلى أن أغشية التايلاكويد هي المسؤولة عن استشعار الصدمة الحرارية، حيث تسبب تغيرات الدهون فيها تحفيز التعبير عن جينات الصدمة الحرارية و تلعب هذه التغيرات دوراً مهماً في استشعار الإجهاد الحراري ونقل الإشارات الخلوية المرتبطة به (Merewitz et Huang, 2007).

*تخليق بروتينات الصدمة الحرارية :

في عام 1962، اكتشف Ritossa من خلال دراسته على ذبابة الفاكهة (Drosophila) أن التعرض للحرارة يؤدي إلى تنشيط مجموعة من الجينات، مما يساهم في تكوين عدة بروتينات جديدة. وفي عام 1974، قام Tissières و زملاؤه بمواصلة البحث على ذبابة الفاكهة وأثبتوا للمرة الأولى تكون بروتينات ناتجة عن الصدمة الحرارية، والتي أُطلق عليها لاحقاً اسم بروتينات الصدمة الحرارية (HSP) (Miller, 1993).

تُعد بروتينات الصدمة الحرارية (HSPs) من أبرز البروتينات التي تُنتج استجابةً للإجهاد الحراري، حيث تعمل على حماية مكونات الخلية من التلف ودعم عملية التعافي تُصنّف HSPs حسب وزنها الجزيئي

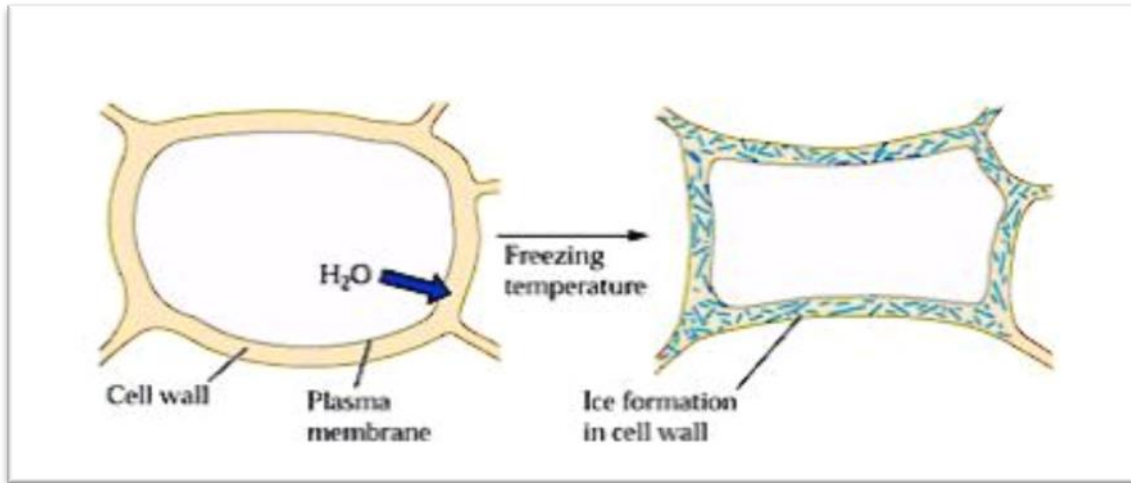
(kDa)، ومن الأنواع الكبيرة: Hsp60، Hsp70، Hsp90، Hsp104، Hsp110. أما البروتينات الصغيرة (sHSPs) والتي تتراوح بين 12 و43 kDa، فوظيفتها الأساسية هي منع تكسّس البروتينات المتضررة من الحرارة، دون الحاجة للطاقة. وعندما تعود الظروف الحرارية إلى الوضع الطبيعي، تتعاون sHSPs مع Hsp70 لإعادة طي البروتينات عبر آلية تعتمد على الـATP. وتُعدّ sHSPs من أكثر البروتينات وفرة في النباتات تحت الإجهاد الحراري، حيث قد تشكل حوالي 2% من إجمالي البروتين. ويتم تنظيم تعبير HSPs من خلال عوامل نسخ خاصة تُعرف بـ"عوامل الصدمة الحرارية" (Hsfs)، والتي تبقى غير نشطة حتى تتلقى إشارات الإجهاد مثل تلف الخلية أو تراكم الهرمونات، لتنتقل بعد ذلك إلى المكان المناسب داخل الخلية وتُفعّل التعبير الجيني للبروتينات الدفاعية (Merewitz et Huang, 2007).

2-2-2 الحرارة المنخفضة (البرودة):

تُعدّ درجة الحرارة من العوامل البيئية التي تؤثر بشكل كبير على نمو وتطور النباتات. فالبرودة، بما في ذلك التبريد (0-15) والصقيع (> 0)، تُعدّ من أنواع الإجهادات الغير حيوية التي تُعطل نمو النباتات وتؤثر سلباً على إنتاجيتها. غالباً ما تؤدي التقلبات الحرارية أو حدوث صقيع غير متوقع إلى أضرار جسيمة للنباتات، مثل تباطؤ النمو أو حتى تدمير كلي للنباتات المعرضة (Sahi et Nedil, 2022).

2-2-2-1 التغيرات الفيزيولوجية و المرفولوجية و البيوكيميائية على مستوى النبات :

- انخفاض درجة الحرارة المفاجئ يؤثر على صلابة الغشاء الخلوي، مما يضعف من بنيته ووظيفته كما هو موضح في (الشكل4).



الشكل(4): تأثير درجة الحرارة المنخفضة على تصلب الجدار الخلوي وتكون الجليد (Labgaa et Fakroun, 2018).

- يسبب انخفاضاً في نشاط الإنزيمات الحيوية، مما يعيق العمليات الحيوية الأساسية (Sahi et Nedil, 2022)

- تتأثر حركة المواد المذابة داخل الأنسجة المتخصصة مثل الخشب (الناقل للعصارة الخام) واللحاء (الناقل للعصارة المصنعة) أو على طول الأعضاء المتخصصة في النقل مثل الساق والعنق بانخفاض درجات الحرارة بالتالي، فإن نقل المُستقلبات من عضو إلى آخر يصبح أكثر صعوبة تحت تأثير البرودة، مما يؤدي إلى تراكم بعض المركبات مثل السكريات الذائبة والأحماض الأمينية الحرة (Laala, 2009).
- أما درجات الحرارة التي تصل إلى الصقيع، فإنها تسبب إجهاداً مشابهاً لما تسببه الجفاف حيث أن درجات الحرارة المنخفضة تحت الصفر تؤدي إلى جفاف الخلايا بفعل تكون بلورات الجليد في الفراغات بين الخلايا، وهي عملية تُعرف باسم "التبلور" أو النواة الجليدية تجذب نواة الجليد جزيئات الماء التي تتبلور من حولها مما يزيد من حجم الجليد، فيتم سحب الماء من السيتوبلازم نحو الفضاء خارج الخلية، مسبباً جفاف الخلايا بلورات الجليد قد تتلف الأغشية الخلوية، مما يؤدي إلى فقدان وظيفتها وتوقف النشاط الخلوي. ويمكن للخلايا السليمة استعادة نشاطها فقط إذا لم يكن الضرر البيئي كبيراً، من خلال إعادة امتصاص الماء (Sahi et Nedil 2022).



الشكل (5): نبات القمح تحت تأثير الصقيع (Sahi et Nedil, 2022).

2-2-2-2 آليات التكيف :

* تختلف استجابة النباتات للحرارة حسب شدة ومدة الإجهاد وخصائص النبات نفسه وتُصنّف النباتات حسب تحملها للتجمد إلى ثلاث فئات:

1. مقاومة للتجمد تتحمل درجات حرارة تحت 0 (مثل شجرة الأرز).
2. مقاومة للبرودة لكن حساسة للتجمد: تتحمل حتى -12 ، لكن لا تصمد أمام التجمد.

3. حساسة للبرودة: تتضرر عند درجات أقل من 12، حتى دون التجمد (Abdessemed, 2009).

* المقاومة لدرجات الحرارة المتجمدة:

تجنّب تكوّن الجليد لدى النباتات يُعد ارتفاع تركيز المواد الذائبة في الخلايا من وسائل الحماية المهمة، ويُمارس هذا التأثير عبر ثلاثة آليات رئيسية

- التأثير الأسموزي: زيادة تركيز المواد الذائبة يؤدي إلى خفض درجة تجمد الماء، مما يحد من الجفاف الناتج عن تكوّن الجليد.

- التأثير الأيضي: هذه المواد الذائبة تُعد مصدراً محتملاً للمواد الأولية اللازمة للعديد من المسارات الأيضية، خاصةً عندما تكون عملية التمثيل الضوئي (Photosynthèse) منخفضة جداً.

- التأثير الحامي من التجمد (Cryoprotectant): يتمثل في حماية الخلايا والعضيات والأغشية والجزيئات الحيوية من خلال الحفاظ على غلاف الترطيب أو تعويضه. تُساهم في ذلك مركبات مختلفة مثل السكريات الذائبة، الأحماض العضوية، الأحماض الأمينية، الدهون أو البروتينات (Labгаа et Fakroun, 2018).

3- الإجهاد الملحي :

3-1- تعريف الملوحة :

تُعدّ الملوحة مشكلةً رئيسيةً تؤثر بشكل مباشرٍ على التوازن البيئي وتطور الزراعة (Boualemet *et al.*, 2019). ومن بين 230 مليون هكتار من الأراضي المروية في العالم، أصبحت 45 مليون هكتار منها تحتوي على تربة مالحة نتيجة تراكم الأملاح. وبسبب نقص المياه عالية الجودة، أصبحت الحاجة ملحة لاستخدام المياه المالحة في الري (Ayman *et al.*, 2024). حيث تعرف بأنها زيادة تركيز الاملاح في منطقة جذور النبات إلى الحد الذي يتأثر به النبات و المحصول (Fetthissa *et al.*, 2022). وتتسبب الملوحة التربة من وجود تركيز متزايد من الأملاح الذائبة في رطوبة التربة، مما يعيق نمو النبات. الأسباب الرئيسية لملوحة التربة هي كبريتات و كلوريدات الكالسيوم والصوديوم والمغنيسيوم. ومع ذلك، فقد أُفيد بأن أملاح الصوديوم لها آثار ضارة واضحة على النباتات مقارنةً بأملاح الكالسيوم (Mehboob *et al.*, 2024). وتُعتبر هذه الظاهرة من أهم العوامل غير الحيوية التي تُحدّ من نمو المحاصيل وإنتاجيتها، وتؤدي إلى تدهور التربة وتلويثها في المناطق القاحلة وشبه القاحلة (Boualemet *et al.*, 2019).



الشكل(6):تملح التربة (Lejdel et Ben Saasi,2021).

3-2-تعريف الإجهاد الملحي :

يُعزى الإجهاد الملحي في الغالب إلى تراكم كلوريد الصوديوم (NaCl) في التربة، حيث تكمن سميته للنباتات في تأثيره الكاوي الناتج عن أيونات الصوديوم والكلور، إضافة إلى تأثيره الأسموزي العالي الذي يُخلّ بالتوازن المائي داخل الخلايا النباتية.

وتتباين تراكيز الأملاح في البيئة المحيطة بالنباتات ما بين مستويات منخفضة إلى مرتفعة، غير أن مصطلح "الإجهاد الملحي" يُستخدم تحديداً للإشارة إلى حالات التراكم المفرط للأيونات في الوسط الجذري. (Boukraâ, 2008) وفي مياه الري ويتسبب في حدوث كل من الإجهاد الأسموزي والإجهاد الأيوني في آن واحد (Amenas, 2007).

وأشار Hoffman و Mass (1977) بأنه أحد أشكال الضغوط البيئية التي تؤثر سلباً على نمو النباتات وتطورها، وهو حالة بيئية تتميز بارتفاع تركيز الأملاح الذائبة (Soluble salts) في التربة أو المحلول الغذائي (زناتي وسلمي، 2021). هذا التراكم للأملاح يؤثر سلباً على إنتاجية المحاصيل من خلال تأثيرها على العمليات الفيزيولوجية والكيميائية الحيوية في النباتات مما يوقف نموها (Aymanet al., 2024). ويُنظر إلى وجود هذه الأملاح من قِبل بعض الباحثين كعامل مسبب للإجهاد، لذلك يُطلق على هذه الحالة اسم "الإجهاد الملحي" (saline stress) (زناتي وسلمي، 2021).

3-3-العوامل المسببة للإجهاد الملحي :

"صنّف عدد من الباحثين، من بينهما أحمد (1984) مصادر ملوحة إلى :

*التربة الأم :

تحتوي بعض أنواع الترب على تركيزات مرتفعة من الأيونات الذائبة مثل Ca^{2+} ، Na^+ و Cl^- ويعزى ذلك إلى طبيعة الصخرة الأم التي نشأت منها هذه الترب، حيث أسهمت عمليات التجوية والتعرية في تحرير هذه الأيونات إلى الوسط الترابي، أشارت الدراسات إلى أن العديد من العناصر، مثل الكالسيوم والمغنيسيوم، تتواجد بشكل طبيعي في مختلف أنواع الصخور الثلاثة: النارية، الرسوبية والمتحولة (ميسه وكامط، 2021).

* الري :

معظم مياه الري في العالم مهما كانت تحتوي على بعض الأيونات الذائبة، وتندرج حتى تصل إلى أقصى مستوى لها في المجمعات المائية، فعند الري يتبخر الماء وتبقى هناك الأملاح فتتراكم سنوياً بدون حدوث عملية الغسل تبقى هذه الكمية في التربة وتتضاعف باستمرار .

*حركة الماء :

- تحرك الماء المالح إلى السطح في المناطق الداخلية .
- تحرك الماء المالح في جوف الأرض ليظهر في المناطق الساحلية والوديان، أو قد تنتقل مياه البحر على شكل رذاذ تحمله الرياح .
- انتقال الأملاح مع مياه الأنهار من داخل القارات إلى دلتا هذه الأنهار حيث تختلط مع الأملاح المنقولة .

* إضافة الأسمدة :

يسبب إضافة الأسمدة باستمرار إلى ارتفاع تركيز أيونات الأملاح لمحلول التربة مما يؤدي إلى تملحها. (حساسة وسويد، 2019).

ولقد أشار فلاح (2003) إلى وجود مصادر أخرى للملوحة والتي يمكن تلخيصها في ما يلي :

- البحيرات المالحة بعد جفافها.
- تسهم البحار والمحيطات في تملح الصخور والترب، خاصة في السهول الساحلية، ويمكن أن يمتد تأثيرها إلى داخل القارات نتيجة تسرب المياه أو رذاذها.
- تنقل الرياح حبيبات التربة المالحة وتترسب على أراضٍ عادية، وقد تصل كمية الأملاح المترسبة إلى 2-20 طناً لكل كيلومتر مربع سنوياً في بعض المناطق.
- تطلق البراكين غازات غنية بالكلور والكبريت، مما يساهم في ملوحة البحار والمحيطات بالكلوريدات والسلفات.

- النباتات المقاومة للملوحة أو الجفاف تمتص الأملاح من التربة العميقة، ثم تترسب هذه الأملاح على السطح بعد تحلل بقايا النباتات، وقد يصل محتوى الرماد في بعضها إلى حوالي 30% من وزنها.

3-4-التغيرات الفيزيولوجية و المرفولوجية و البيوكيميائية على مستوى النبات:

3-4-1- تأثير الملوحة على مرحلة الإنبات و النمو:

*مرحلة الإنبات:

تؤثر الأملاح الموجودة في التربة أو في مياه الري على عملية الإنبات بطريقتين الأولى من خلال خلق جهد أسموزي منخفض خارج البذرة يمنع امتصاص وتوفير الماء والثانية بسبب التأثيرات السامة لأيونات Na^+ و Cl^- ، التي تحدث أضراراً محددة في العمليات الأيضية للبذرة (Casasni, 2022).

يرجع انخفاض القوة الإنباتية إلى ارتفاع الضغط الأسموزي لمحلول التربة، مما يؤدي إلى تباطؤ عملية الامتصاص الأولى (الانتفاخ) ويحد من امتصاص الماء الضروري لانطلاق العمليات الأيضية المرتبطة بعملية الإنبات. كما أن الملوحة تؤثر على الأنظمة الإنزيمية المسؤولة عن مختلف الوظائف الفيزيولوجية في البذرة أثناء الإنبات، ويُعتبر طور البادرة من أكثر المراحل هشاشة في دورة حياة النبات، وتعد عملية الإنبات هي التي تحدد توقيت ومكان بداية نمو البادرة. وغالباً ما يكون هذا الطور مقيداً بملوحة التربة ويظهر حساسية أعلى مقارنة بالمراحل الأخرى (Bouchene et Dahmani, 2019).

*مرحلة النمو:

تلعب الملوحة دوراً محورياً في التأثير على نمو النبات من خلال إحداث تغيرات مورفولوجية واضحة، تتمثل في تقليص النمو الخضري، والذي يظهر من خلال انخفاض طول الساق، وتراجع عدد الأوراق، وتقلص عدد الفروع الجانبية، إضافة إلى انخفاض أقطار الأعضاء النباتية (ميسه، كامط 2021). وقد أشار عباس (2020) أن سمية الأيونات، الإجهاد التناضحي ونقصاً في العناصر الغذائية الأساسية مثل (N، Ca، K، P، Fe و Zn) إلى جانب تحفيز الإجهاد التأكسدي في النباتات. وتؤدي هذه الظروف إلى انخفاض قدرة التربة على إمداد النبات بالماء، كما أن ملوحة التربة تقلل بشكل كبير من امتصاص الفوسفور، بسبب ترسب أيوناته مع أيونات الكالسيوم، ما يسبب تراكم الأملاح في محلول التربة، وبالتالي يعيق امتصاص الماء والعناصر الغذائية. هذا التراكم يؤدي بدوره إلى إجهاد أسموزي، سمية أيونية واختلال في توازن المغذيات. كما أوضح أن التركيزات العالية من أيونات الأملاح قد تلحق الضرر بالأعضاء النشطة ضوئياً، وتؤدي إلى الإصابة بالكولور والشيخوخة المبكرة للأوراق.

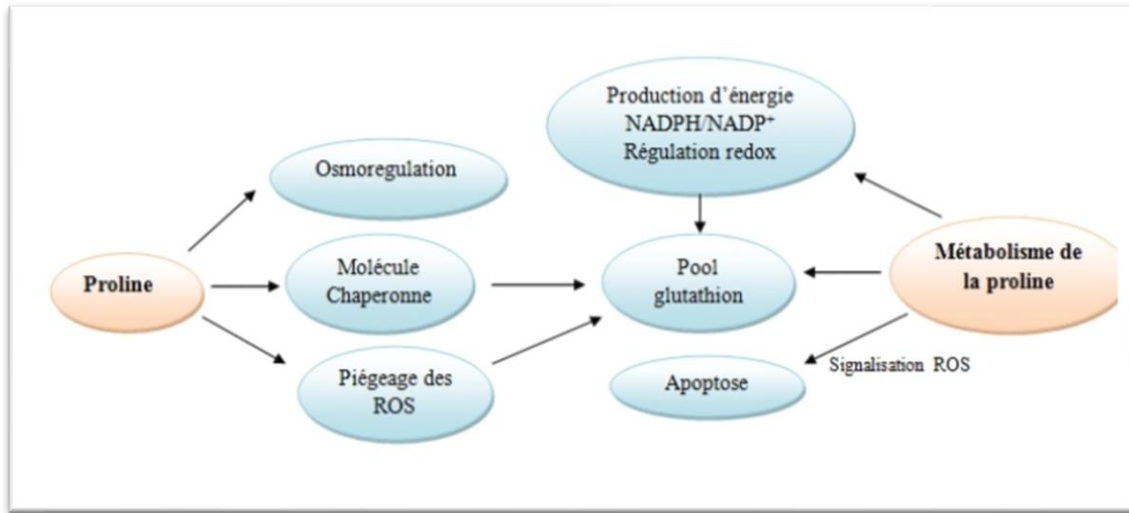
3-4-2- تأثير الملوحة على المحتوى الكيميائي و الفزيولوجي للنبات:

*الأيونات :

تؤدي الملوحة العالية إلى تغيير محتوى النبات من الأيونات، إذ يحصل عدم اتزان واضطراب في امتصاص العناصر المعدنية داخل النبات، حيث يحدث تراكم للأيونات المسببة للملوحة مثل Cl^- و Na^+ في أنسجة النباتات بازدياد مستويات الملوحة في وسط النمو في حين يقل تركيز بعض العناصر الضرورية لاستمرار حياة وفاعلية النبات، مثل K^+ و Ca^{2+} و NO_3^- أكدت الدراسات إلى أن أغلب المشاكل السمية نتيجة لزيادة امتصاص النبات لصوديوم أو لكولور، حيث تتراكم هذه الأيونات في الأوراق بكمية كبيرة فيحدث احتراق للأوراق وموت حوافها خاصة الأوراق المسنة (الشريف، 2022).

* البرولين:

يعد البرولين أحد الأحماض الأمينية التي تدخل في تركيب البروتينات، وهو من أكثر الأحماض الأمينية تأثراً تحت ظروف الإجهاد الملحي أو الجفاف أو البرودة، حيث يحدث له تراكم تحت هذه الظروف، البرولين له دور كبير في ميكانيكية مقاومة النبات لإجهاد، حيث يلعب دور في ضبط الضغط الأسموزي و pH خلايا أنسجة النبات، ويكون مخزناً للمواد الكربوهيدراتية والنيتروجين اللازمين لنمو النبات، أيضاً لو دور في حماية الأنزيمات والأغشية من ملوحة يؤدي تراكم البرولين في النبات إلى منع تكسير البروتينات، وحمائتها كما موضحة في (الشكل 7) فوجوده يقوي الروابط بين الأحماض المكونة للبروتين خاصة في المراحل الأولى من الإنبات، حيث إن انكسار البروتينات في هذه المرحلة الحساسة يعرض النبات إلى الشيخوخة أو الموت، و بالتالي يتم استخدامه من أجل مقاومة النباتات للملوحة أو الجفاف، بشرط ألا يزيد تركيزه عن 30 جزء في المليون (الشريف، 2022). وبالإضافة إلى كونه مركباً تناضحياً، فإن L-برولين يلعب أيضاً دوراً مهماً أثناء التعرض للضغوط كخالب للمعادن وكجزء من آلية الدفاع المضادة للأكسدة والتخلص من أنواع الأكسجين التفاعلية (ROS)، والحفاظ على التوازن التأكسدي في الظروف المعاكسة (Meena *et al.*, 2019).



الشكل(7): الوظائف المتعددة للبرولين في ظروف الاجهاد (Bekka, 2019).

* الصبغات الخضراء:

حسب كثير من الباحثين جميع النباتات النامية في البيئات الملحية تصفر أوراقها نوعاً ما نتيجة قلة كمية الكلوروفيل في الأوراق سببه عدم احتوائها على عنصر الحديد الكافي لدخولها في تركيب الكلوروبلاست المسؤولة عن تخليق وإنتاج البروتينات حيث الملوحة تعيق امتصاص الجذور لهذا العنصر من محلول التربة (معارفية، 2009).

* السكريات:

أوضح الدراسات أنه في وجود الأملاح تكون محصلة النمو الخضري منخفضة في حين معدلات التمثيل ثابتة مما يسبب تراكم الكربوهيدرات المتبقية بتركيز مرتفع لأن النباتات النامية في أوساط عادية يقل المستوى الكربوهيدراتي في أنسجتها بصورة سريعة لاستخدامه في تكوين الخلايا الجديدة والنموات والفروع الخضرية والدخول في عمليات التمثيل الأخرى لتكوين المواد الأولية ذات المسارات الكيميائية المعقدة (معارفية، 2009).

*تأثير على عملية التركيب الضوئي :

يعتمد تأثير الملوحة على عملية التركيب الضوئي على تركيز الأملاح داخل النبات فالملوحة تقلل من تثبيت ثاني أكسيد الكربون عن طريق تقليل مساحة الأوراق وخفض التوصيل الثغري ، بالإضافة إلى تقليل كفاءة الإنزيمات المسؤولة عن التركيب الضوئي واضطراب في عمل النظامين وبشكل عام، يؤدي الإجهاد الملحي إلى انخفاض مستويات الكلوروفيل والكاروتينات في الأوراق. وتبدأ الأوراق الأقدم بتطوير أعراض الاصفرار (الكلوروز)، ثم تسقط نتيجة التأثير المستمر للإجهاد الملحي (Bouzekri 2009).

3-5- آليات التكيف النبات مع الإجهاد الملحي :

تتكيف النباتات مع الملوحة من خلال ثلاثة آليات رئيسية: التحمل، التأقلم و المقاومة.

•التحمل (Tolérance):

تعتمد على مرحلة نمو النبات وقدرته على نقل أيونات الصوديوم (Na^+) إلى الأجزاء الهوائية، وطرده الأملاح الزائدة على سطح الأوراق، مما يسمح بالحفاظ على توازن أيوني ثابت داخل الأنسجة النباتية (Brik et Saadouni, 2021).

•التأقلم (Acclimatation):

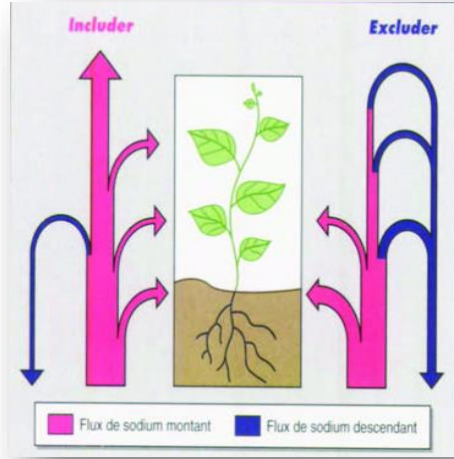
هو قدرة النبات على التكيف مع ظروف البيئة المالحة، وتختلف هذه القدرة حسب نوع النبات يؤدي التمثلح إلى تقليل القدرة الإنتاجية لمعظم المحاصيل الزراعية، كما يؤثر على أيض النيتروجين وللتكيف مع هذه الظروف، يستخدم النبات عدداً من الآليات الفيزيولوجية مثل تقليل امتصاص الأيونات السامة التي تتراكم في فجوات خلايا الجذور تقليل تراكم الأيونات في الأعضاء الفتية نمو قمم الأجزاء الهوائية وطرده الكلور من الأعضاء الهوائية.

لكن وجود الكلور في البيئة المالحة يُعيق امتصاص ونقل الأيونات لمسافات طويلة، وخاصة النترات (NO_3^-) الضرورية للنمو.

أما بالنسبة للنباتات الملحية (halophytes)، والتي تحتوي على نسب عالية من الأملاح، فإن درجة التكيف مع الملوحة تعكس مستوى الطاقة والنشاط الأيضي لديها (Brik et Saadouni, 2021).

•المقاومة (La résistance) :

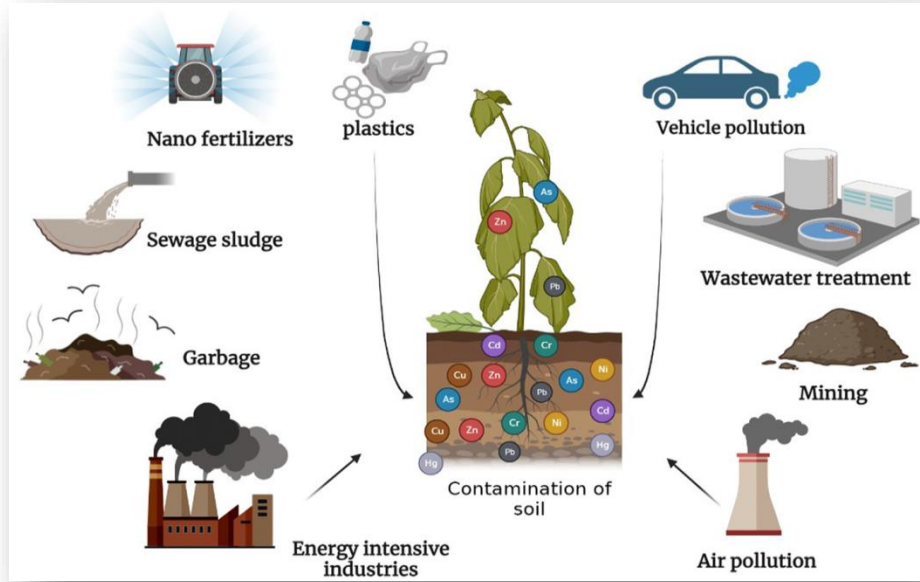
مقاومة النبات للملوحة تعني قدرته على النمو والإنتاج في ظروف الملوحة. وتختلف استراتيجيات المقاومة حسب نوع النبات كما موضحة في (الشكل 8) تنقسم النباتات إلى: نباتات طاردة (Excluders): تمنع تراكم الصوديوم في الأوراق وتحصره في الجذور. نباتات مدمجة (Includers): تسمح بانتقال الصوديوم إلى الأوراق وتخزنه داخل الفجوات لحماية المكونات الحيوية (Baba Sdikkaci, 2010).



الشكل(8):مخطط حركة الصوديوم في النباتات الطاردة والمدمجة (Baba Sdikkaci ,2010).

4-إجهاد التلوث :

الأنشطة البشرية المختلفة جنباً إلى جنب مع التفاعلات البيئية أو التغيرات تساهم في إضافة وتراكم العناصر الضارة في البيئة. والنتيجة اللاحقة لذلك هي التأثيرات السلبية لهذه العوامل على الأنظمة الحية بما في ذلك النباتات. العوامل مثل المعادن الثقيلة، الغازات السامة، الأوزون وثاني أكسيد الكربون لها تأثير كبير على نمو النبات والتمثيل الغذائي للنباتات (Galal, 2016) كما مبين في (الشكل 9).



الشكل(9):مختلف مصادر تلوث التربة (Angonet al., 2024).

4-1-أسبابه:

4-1-1- المعادن الثقيلة:

تُعتبر المعادن الثقيلة من أهم الملوثات البيئية، وتكمن خطورتها المتزايدة بسبب آثارها البيئية والتطورية والغذائية والصحية. تتواجد المعادن الثقيلة بكثرة في التربة والأنظمة المائية، وبنسبة أقل في الغلاف الجوي على شكل جسيمات أو أبخرة، تنتشر هذه المعادن في البيئة نتيجة للأنشطة الطبيعية والبشرية، ويتعرض الإنسان لها عبر عدة مسارات وتختلف قدرة النباتات على امتصاص هذه المعادن تبعاً لنوع النبات وكفاءة امتصاصه (Galal, 2016).

4-1-1-1 تصنيف المعادن الثقيلة:

يوجد صنفان من المعادن الثقيلة يعتمدان على آثارهما الفيزيولوجية والسمية من وجهة نظر بيولوجية هما معادن أساسية وسامة :

*المعادن الأساسية:

المعادن الأساسية ضرورية للعديد من العمليات الخلوية وتوجد بنسب منخفضة جداً في الأنسجة البيولوجية، فهي تلعب دوراً هاماً بالنسبة للنبات في عملية التركيب الضوئي والتخليق الحيوي للكوروفيل والمستقلبات الثانوية (المركبات الفينولية) كعامل مساعدة للأنزيمات كما تساهم في عملية التمثيل الغذائي للكائنات الحية، يمكن أن يصبح بعضها ساماً عندما يتجاوز عتبة معينة هذا هو الحال بالنسبة لنحاس والزنك والنيكل والحديد.

*المعادن السامة :

هي معادن غير أساسية ليس لها أي دور بيولوجي معروف للخلية مثل الرصاص والكاديوم والزنك، لها طبيعة ملوثة مع تأثيرات سامة على الكائنات الحية، حتى في التراكيز المنخفضة تتطور سميتها عن طريق التراكم الإحيائي على طول السلسلة الغذائية (رواص ورواص ، 2022).

4-1-1-2-مصادر المعادن الثقيلة:

*المصادر الطبيعية:

تُعد الصخور النارية والرسوبية من أكثر المصادر الطبيعية شيوعاً وتعد المادة الأصلية للصخور هي المصدر الرئيسي للمعادن الثقيلة في التربة كما هو مدرج في (الجدول 1)، ويتم إطلاق المعادن الثقيلة إلى التربة بفعل عدة عمليات طبيعية، منها: التعرية، الرشح، الثورات البركانية و الرياح السطحية.

جدول(1):تركيزات المعادن الثقيلة (HM) في الصخور النارية والرسوبية ، مقاسة بجزء في المليون (Angonet al., 2024) (ppm)

HMs	Basaltic Igneous	Granite Igneous	Clays and Shales	Black Shales	Sndstone
Cu	48-240	5-140	18-180	34-1500	2-41
Zn	2-18	6-30	16-50	7-150	<1-31
Pb	30-160	4-30	18-120	20-200	-
Cd	0,006-0,6	0,003-0,18	0-11	<0,3-8,4	-

*المصادر البشرية:

تؤدي الأنشطة البشرية مثل صهر المعادن والتعدين، حرق الوقود الأحفوري لتوليد الطاقة، الترسبات الجوية، إلقاء النفايات، الأسمدة، (Aouissi, 2011). استعمال المبيدات الحشرية، والري بمياه الصرف الصحي إلى زيادة تراكيز المعادن الثقيلة في التربة الزراعية .

*الزراعة:

يمتلك القطاع الزراعي العديد من المصادر المحتملة للمعادن الثقيلة، بما في ذلك الأسمدة، المبيدات الحشرية، روث المواشي، والمياه العادمة. تساهم الزراعة والصناعة معاً في تلوث التربة الزراعية والنباتات بالمعادن الثقيلة، خاصةً في المناطق القريبة من شركات الأسمنت والطلاء الكهربائي. بمعنى آخر، تُعدّ الطبقة السطحية للتربة موقعاً مثالياً لتراكم المعادن الثقيلة، حيث يمكن للنبات امتصاصها مع الماء عبر الجذور والنظام الوعائي(Angonet al., 2024).

4-1-1-3-التغيرات على مستوى الفيزيولوجية و المورفولوجية و البيوكيميائية النبات :

قد يؤدي التعرض للمعادن الثقيلة إلى تقليل نمو النباتات وظهور أعراض الاصفرار (الكلوروز) نتيجة فقدان الكلوروفيل ونقص الحديد. ونقص البوتاسيوم. كما موضحة في الشكل 10 (بوعرت وخزندار، 2020). في حالات التسمم الشديدة، قد تظهر أعراض النخر (موت الأنسجة) (Chettouhi, 2020).



الشكل (10): الأعراض الشائعة لنقص عنصر البوتاسيوم عند نبات الفول السوداني (بوعرت وخزندار، 2020).

يمكن لهذه المعادن السامة أن تعيق الأنشطة الأنزيمية الحيوية المرتبطة بالعمليات الأساسية للنبات، بما في ذلك التمثيل الضوئي والتنفس الخلوي. فعلى سبيل المثال، يتداخل الكادميوم مع نشاط إنزيم روبيسكو (Rubisco)، وهو إنزيم رئيسي مسؤول عن تثبيت الكربون خلال عملية التمثيل الضوئي. تؤدي هذه الإعاقة إلى انخفاض كفاءة التمثيل الضوئي ومن ثم إلى تراجع في نمو النبات وتراكم الكتلة الحيوية. وبالمثل، يمكن أن يؤدي الرصاص إلى تعطيل سلاسل نقل الإلكترون في الميتوكوندريا، مما يضعف عملية التنفس الخلوي وإنتاج الطاقة، (Vasilachiet *al.*, 2023).

تؤدي المعادن الثقيلة إلى زيادة إنتاج الجذور الحرة للأوكسجين (ROS)، وهي جزيئات شديدة التفاعل تحتوي على الأوكسجين، مما يسبب الإجهاد التأكسدي في النباتات. يمكن أن تؤدي هذه الجذور إلى أضرار كبيرة في الخلايا (Vasilachiet *al.*, 2023).

أظهرت الدراسات أن إجهاد المعادن الثقيلة يزيد من مستويات ABA في النباتات، مما يؤدي إلى فقدان الماء في خلايا الحارس و بالتالي يعزز غلق الثغور ومع ذلك، أظهرت دراسة أخرى أن غلق الثغور الناتج عن المعادن الثقيلة لا يرتبط بتغيير محتوى ABA، وأن المعادن الثقيلة يمكن أن تسبب اختلالات في الأيونات عن طريق التأثير على قنوات الكالسيوم في خلايا الحارس، مما يغير سلوك الثغور كما أنها قد تنتقل أيضاً عبر امتصاص الجذور للنباتات إلى خلايا الحارس في الثغور للتفاعل المباشر مع الثغور، مما يسبب غلق الثغور (Guoet *al.*, 2023).

4-1-1-4 آليات التكيف:

أوضحت دراسات في نبات الشعير يستعمل عدة استراتيجيات لمقاومة الإجهاد المعدني، بما في ذلك تعزيز التخلّق الكيميائي للمعادن عبر مركبات رابطة للمعادن مثل الفيتوشيليتينات (phytochelatins) والمعدنيات الثقيلة (metallothioneins) تلعب هذه المركبات دوراً رئيسياً في احتجاز المعادن الثقيلة وإزالة سميتها، مما يحمي النبات من الأضرار التأكسدية التي تسببها المعادن (Vasilachi *et al.*, 2023). كما أن إحدى الفئات الرئيسية لمواد خلب المعادن الثقيلة المعروفة في النباتات هي الفيتوكيلاتين (PCs)، التي يتم تصنيعها بشكل غير مترجم من الجلوتاثيون المختزل (GSH) في تفاعل التحويل بواسطة الإنزيم فيتوكيلاتين سينثاز (PCS). لذلك، يعتبر توفر الجلوتاثيون أمراً بالغ الأهمية لتصنيع الفيتوكيلاتين في النباتات، على الأقل أثناء تعرضها للمعادن الثقيلة (Timothy et Williams, 2019). كما يمكن للنباتات عزل المعدن داخل الفجوات الخلوية في خلايا الأوراق أو في الترايكومات (الشعيرات النباتية)، أو التخلص منه عن طريق الطرد النشط أو الإخراج الخارجي. وتؤدي هذه العمليات إلى منع المعادن من التداخل مع التفاعلات الأيضية الحساسة للنبات (Chettouhi, 2020).

لحفاظ على الوظائف الفيزيولوجية والتمثيل الغذائي، يعزز النبات من تحمله للمعادن الثقيلة عن طريق زيادة عدد الثغور، مما يزيد من المساحة السطحية للثغور ويحسن امتصاص ثاني أكسيد الكربون وتوافر الماء. أظهرت العديد من الدراسات أن التعرض للمعادن الثقيلة المختلفة يمكن أن يزيد من عدد الثغور في النبات. على وجه الخصوص، أظهر التعرض للكادميوم زيادة في عدد الثغور في نبات التبغ (Guo *et al.*, 2023).

4-1-2- المبيدات :

4-1-2-1- تعريف المبيدات:

إن استخدام المبيدات قديم قدم الحضارة الإنسانية، إذ بدأ مع ممارسة الأنشطة الزراعية بهدف تحقيق حياة مستدامة. في العصور القديمة (Parween *et al.*, 2016)، تدعى المبيدات عموماً المواد الحامية للنبات phytosanitaires Produits وهي عبارة عن مواد طبيعية مصنعة أو شبه مصنعة تستعمل ضد الكائنات المخبرية، والأمراض والأعشاب الضارة للمحاصيل الزراعية خصوصاً. في التعريف الأوروبي لا يعترف بتسمية المبيدات ولكن يعرف هذا المفهوم بالمواد الصيدلانية الحامية للنبات (Phytopharmaceutiques Produits).

4-1-2-2 تأثير المبيدات على النبات :

أثبتت بعض الدراسات البحثية أن معظم المبيدات المستخدمة لمكافحة الآفات النباتية تسبب تأثيرات عكسية مختلفة، حيث تؤكد تلك الدراسات أن المبيدات تتخلل إلى الأنسجة النباتية، الأمر الذي يترتب عليه حدوث تغيرات في تركيبة النباتات الكيميائية، إلا أن ذلك التأثير يختلف وفقاً لنوع المبيد المستخدم وطبيعته

ونوع النبات، بالإضافة إلى العوامل البيئية السائدة حول النباتات أثناء فترة المعاملة بالمبيد. كما أن نوعية التربة تؤدي دوراً كذلك في تحديد شكل تأثير المبيدات على النبات (عريبي و بوسنة، 2022).

تظهر الدراسات السابقة أن تراكم المبيدات في النبات يؤثر على نمو النبات ويسبب اضطرابات في عمليات الأيض. على سبيل المثال، يعمل كلوروتولورون على حظر نقل الإلكترونات في عملية التمثيل الضوئي في النباتات العليا ويعطل مركز التفاعل. كما أن التيرباسيل، وهو مبيد عشبي، يعيق عملية التمثيل الضوئي في أشجار الفاكهة. كما أن المبيدات الفطرية مثل الكابتان قد تؤدي إلى تقليل محتوى الكلوروفيل أ و ب وكذلك الكلوروفيل الكلي والكاروتينات في أوراق الفلفل.

زيادة محتوى البروتين تحت تأثير المبيدات، تم قياس نشاط إنزيمين مضادين للأكسدة، CAT و POD، بعد معالجة المبيدات. يشترك إنزيم الكاتالاز في التمثيل الغذائي للأعشاب المؤدية إلى الإجهاد التأكسدي ويحمي النباتات من الضغط الناتج عن الجرعات الزائدة من المبيدات. تم الإبلاغ عن زيادة في نشاط CAT في العديد من الأنواع النباتية بعد التعرض للمبيدات (Parween et al., 2016).

4-1-3 التسميد:

كلمة "التسميد" هي لفظة جديدة أدخلت في القرن الـ 20 للتعبير عن مجموعة من التقنيات لضمان خصوبة التربة. ويمكن تعريفها بأنها أيضاً مجموعة التقنيات الزراعية التي تهدف للحفاظ على تحسين إنتاجية الأراضي. والهدف الرئيسي له النمو الجيد للنبات المقاومة للأمراض والحشرات والحصول على منتج غني بالمركبات الغذائية (الزايده، 2020).

4-1-3-1 تعريف السماد:

تطلق كلمة سماد على كل مادة تضاف إلى التربة قصد تحسين قوامها وخصائصها الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية فهي تمد النبات بالعناصر المغذية بشكل مباشر أو غير مباشر بهدف تغذية المحاصيل الزراعية وتحسين الإنتاجية النمو وزيادة الإنتاجية أو تحسين الجودة. يوجد نوعان من الأسمدة: أسمدة كيميائية وأسمدة عضوية وتنتج الأسمدة المعدنية من عناصر معينة أو مواد مصنعة.

أما الأسمدة العضوية فمصدرها النباتات المتحللة والمواد الحيوانية. الأسمدة المعدنية هي الأكثر استخداماً وتزود النبات بثلاثة عناصر رئيسية هي: النيتروجين، الفوسفور و البوتاسيوم (خنفر، 2020).

4-1-3-2 تأثير التسميد على النبات:

يمكن أن يؤدي الإفراط في استخدام الأسمدة والعناصر الغذائية إلى مشكلات بيئية خطيرة تشمل تلوث التربة والمياه، وتراكم المعادن الثقيلة في النباتات وجد أن الكالسيوم الزائد يمكن أن يحفز نمو الشتلات ولكنه قد يعيق النمو إذا زادت الجرعة، ويعتمد التأثير بدرجة أكبر على نوع الأنيون المصاحب للكالسيوم. (Kulkarnia et Goswami, 2019).

يؤدي استخدام مستويات عالية من الأسمدة النيتروجينية إلى إنتاج مواد مسرطنة مثل النيتروزامينات في النباتات، بسبب الإفراط في استخدام الأسمدة الكيميائية، يمكن للنترات أن تتحول إلى نترت (NO_2^-) داخل النبات. هذا النترت يتفاعل مع مركبات تسمى "الأمينات خاصة النباتات التي تؤكل أوراقها مثل الخس والسبانخ، حيث يحدث تراكم ضار للنترات (NO_2) والنترت والنترت (NO_3) (Savci, 2012).

4-1-4 الغازات السامة:

يعد تزايد تلوث الهواء مسألة مقلقة لصحة النباتات بسبب تأثيراته السلبية على الفيزيولوجيا النباتية والكيمياء الحيوية والشكلية. بعض الغازات الجوية، مثل SO_2 و NO_2 و CO_2 والمواد الجسيمية وغيرها. تؤثر هذه الملوثات على النباتات وتسبب انبعاثات متعددة من SO_2 و NO_x و O_3 التي قد تعمل معاً بطرق متنوعة تراكمية، تآزرية ومضادة عندما تتجاوز مستوياتها المثلى، تصبح ملوثات وتثير أنواعاً مختلفة من استجابات النباتات الظاهرة والمخفية التي تؤدي في النهاية إلى انخفاض نمو النباتات وإنتاجيتها (Saxena et Kulshrestha, 2016).

4-1-4-1 تأثيرها على النبات :

تلعب النباتات دوراً مهماً في مراقبة والحفاظ على التوازن البيئي من خلال المشاركة النشطة في دورة العناصر الغذائية والغازات مثل ثاني أكسيد الكربون والأوكسجين، كما توفر أيضاً مساحة كبيرة من الأوراق لامتصاص وتراكم الملوثات الجوية لتقليل مستوى التلوث في البيئة الهوائية (Saxena et Kulshrestha, 2016)

ثاني أكسيد الكبريت هو أحد الملوثات الجوية الرئيسية القادرة على الدخول إلى النظام النباتي عبر الجذور وكذلك من خلال الفتحات الثغرية بواسطة عملية التمثيل الضوئي والتنفس. وبناءً على نوع النبات والعوامل البيئية المختلفة، لوحظت استجابات متفاوتة للنباتات عند التعرض لـ SO_2 . تشمل بعض هذه الاستجابات تلفاً في جهاز التمثيل الضوئي تغييرات في كثافة الثغور واضطرابات في كفاءة تثبيت الكربون

تعد الغازات مثل SO_2 و NO_2 و HF و O_3 شديدة السمية للنباتات. يعتبر التأثير السام لفوريد الهيدروجين (HF) معروفاً لعدة أنواع نباتية مثل النباتات الزهرية أحادية الفلقة يتراكم أيون F^- في أطراف الأوراق وأطرافها ويسبب نخرًا في الأنسجة الورقية، مفصلاً بوضوح عن الأنسجة الخضراء الحية بواسطة منطقة حدودية حمراء كما هو موضح في (الشكل 11) (Saxena et Kulshrestha, 2016).



الشكل (11): تأثير فلوريد الهيدروجين على نبات *Dracaena deremensis*
(Saxena et Kulshrestha, 2016) .

الفصل الثاني

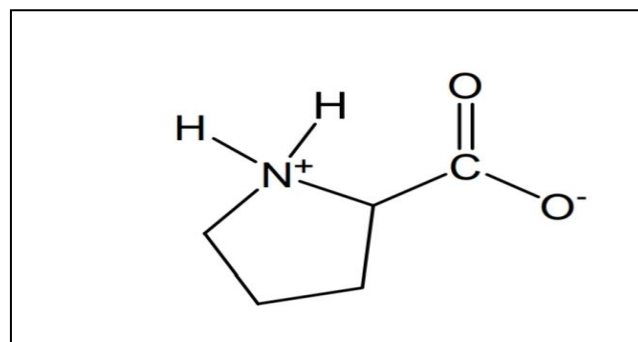
البرولين

1-تعريف البرولين :

البرولين هو حمض أميني من النوع α ، ويُعدّ واحداً من الأحماض الأمينية العشرين المُشفرة في الحمض النووي. يُحدّد هذا الحمض غير النمطي في الشفرة الوراثية بواسطة أربعة شفرات (CCC، CCU، CCA و CCG). و تتمثل صيغته الجزيئية ($C_5H_9NO_2$) (Saibi *et al.*, 2020).

يتميز عن غيره من الأحماض الأمينية بامتلاكه مجموعة أمين ثانوية مرتبطة، على عكس باقي الأحماض الأمينية التي تحتوي على مجموعة أمين حرة، ويتواجد بشكل حر في النبات (الحمودي، 2011).

وهو الحمض الأميني الوحيد من بين الأحماض الأمينية المعروفة الذي يحتوي على وظيفة إيمين وليس على وظيفة أمين كما هو موضح في الشكل (12)، تم اكتشافه من طرف Wilstetter سنة 1900 أثناء تحليل كمي للأحماض الناتجة عن تحلل الكازيين (Mouri (2015). وهو حمض أميني متعدد الوظائف يساهم في تكيف النباتات مع الاجهاد البيئية (شروانة وشروط ، 2019).

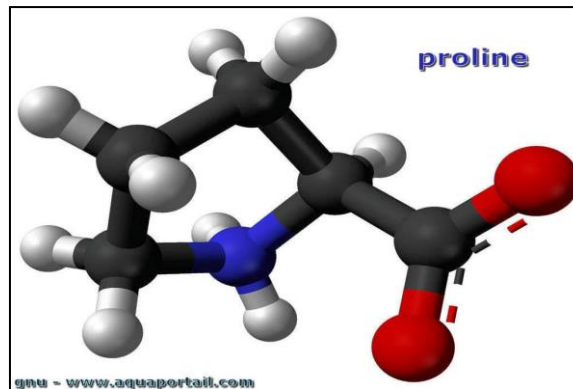


الشكل(12): بنية البرولين في شكلها الزويتيري (zwitterionique) (Carrier, 2006)

2 - البنية الكيميائية للبرولين :

يتميز البرولين بتركيبه الفريد ، إذ يحتوي على مجموعة أمين مرتبطة بمجموعتين ألكيليتين داخل حلقة خماسية، مما يجعله أميناً ثانوياً وليس أولياً كما في باقي الأحماض الأمينية. هذا التكوين الحلقي يرتبط بذرة الكربون β ، ويؤدي إلى تقييد حرية الدوران حول الروابط الببتيدية. نتيجة لذلك، يتمتع البرولين بزوايا ψ و ϕ محدودة، مما يجعله يتبع مخطط Ramachandran غير التقليدي ويؤثر على التوافق الفراغي لسلاسل الببتيد كما هو مبين في الشكل (13) (Saibi *et al.*, 2020).

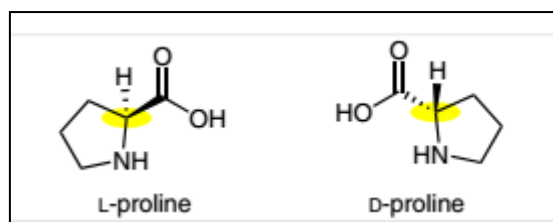
البرولين مادة صلبة بيضاء شديدة الذوبان في الماء والإيثانول، كما أنه يتأكسد بسهولة بواسطة النينهيدرين (ninhydrine) مكونا لونا اصفر برتقاليا مميزا (Maazouz *et al.*, 2021).



الشكل(13): البنية ثلاثية الابعاد لجزيء البرولين (siet web)

3- التكوين الفراغي للبرولين :

توجد معظم الأحماض الأمينية في شكلين متماكبين بصرياً، يُعرفان بـ D و L كما هو موضح في (الشكل14). وتمثل الأحماض الأمينية من النوع L الغالبية العظمى من الأحماض الأمينية المكوّنة للبروتينات. يُعد L-برولين حمضاً أمينياً طبيعياً غير أساسي، في حين يُعد D-برولين حمضاً أمينياً غير طبيعي، ويحتوي كل منهما على مركز حمضي وآخر قاعدي (Fang *et al.*, 2016).



الشكل(14): الهياكل العامة للـ L-برولين و D-برولين (Mandalapu, 2015)

4- خصائص البرولين :

يعد البرولين حمض أمينى (glucoformateur)، حيث يمكن تحويله إلى جلوكوز (glucose) عبر الدورات الأيضية للكائن الحي (Carlier, 2006).

ويُعد البرولين أكثر الأحماض الأمينية ذوباناً في الماء، وذلك بفضل خواصه الزويترونية المميزة حيث يلعب دوراً محورياً في البنية الفراغية للبروتينات، إذ تؤدي بنيته الجزيئية الفريدة إلى إحداث تغييرات في اتجاه السلاسل البروتينية.

ترتبط بعض وظائف البرولين بخصائصه كحمض أمينى، بينما تعتمد وظائف أخرى على ما يعرف بـ "دورة البرولين" (proline cycle) التي تمثل التنسيق بين تخليقه وتحلله (Bekka, 2019).

يلعب البرولين دوراً مهماً في استقرار أو اضطراب البنية البروتينية ، حيث إن فقره أو غيابه في التسلسل الأولي للبروتينات قد يؤثر بشكل مباشر على مستوى الاضطراب البنيوي للتركيب البروتيني .وتعزى هذه النتائج إلى وجود البرولين المتكرر في الـ B-turns للبروتينات، حيث إن الإنتروبيا المرتبطة بالبرولين في الحالة غير المطوية ليست كبيرة مقارنةً بباقي الأحماض الأمينية، مما يؤدي إلى أن يكون التغير في الإنتروبيا بين الشكل المطوي وغير المطوي أقل نسبياً.

يلاحظ ندرة وجود البرولين في البنى الثانوية α -helix و β -sheet للبروتينات، نظراً إلى أنه يقلل من استقرار هذه التراكيب، ويرجع ذلك إلى أن مجموعته الجانبية α -N يمكنها تكوين رابطة هيدروجينية واحدة فقط، مما يحد من قدرة البروتين على تشكيل هذه التراكيب المنتظمة (Saibi et al., 2015).

وهناك العديد من الخصائص الأخرى المتواجدة كما هي موضحة في الجدول 2:

جدول(2): بعض الخصائص الأساسية للبرولين (Saibi et al., 2020)

الأسماء, المعرفات, والخصائص	
برولين	الاسم وفق IUPAC
<i>Pro</i>	الاسم النظامي وفق IUPAC
Pro	الاختصارات
609-36-9	رقم CAS
344-25-2	
147-85-3	
$C_5H_9NO_2$	الصيغة الكيميائية
115.132 غ/مول	الكتلة المولية
من 205 إلى 228 درجة مئوية (401 إلى 442°F؛ 478 إلى 501 K)	نقطة الانصهار
1.5 غ/100 غ إيثانول عند 19°C	الذوبانية
1.99 (المجموعة الكربوكسيلية) 10.96 (المجموعة الأمينية)	الحمضية (pKa)

5- تخليق البرولين :

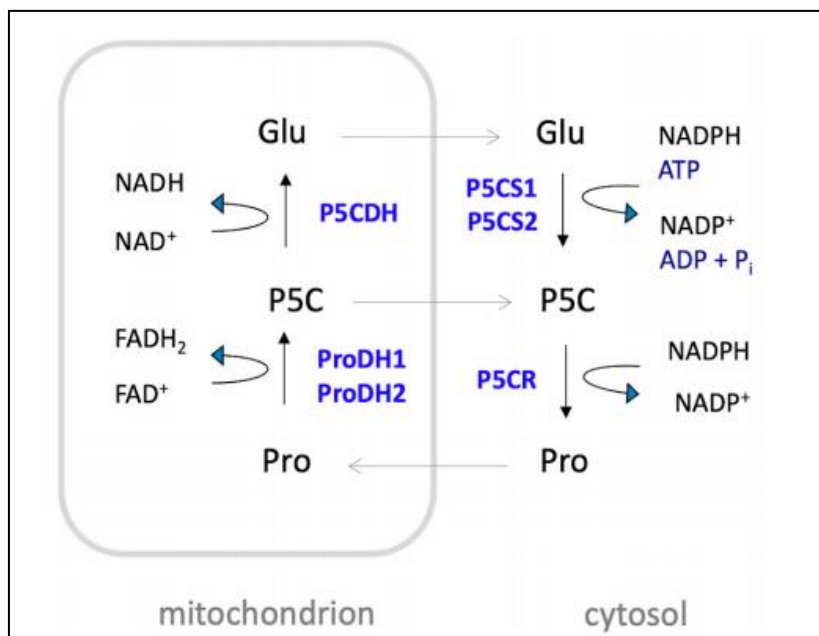
يُعد كل من الجلوتامات والأورنيثين من السلائف الأساسية في تخليق البرولين في النباتات كما هو موضح في (الشكل 15). يرتبط تراكم البرولين في ظل ظروف الإجهاد بتنشيط مسارات تخليقه الحيوية

من جهة، وتثبيط مسارات تحلله من جهة أخرى في الظروف العادية، تقوم الخلية النباتية بتخليق البرولين في السيتوسول، بينما تشير الدراسات إن عملية التخليق ينتقل إلى البلاستيدات الخضراء عند تعرض النباتات للإجهاد (Mundada *et al.*, 2021) أظهرت عدة دراسات أُجريت على النباتات العليا أن نشاط إنزيم (P5CS) Pyrroline-5-carboxylate synthétas يعد خطوة رئيسية ومُحددة في مسار التخليق الحيوي للبرولين. وقد افترضت العديد من الدراسات تموضعاً سيتوبلازمياً لهذا الإنزيم P5CS (Thompson, 1980).

✓ مسار التخليق الحيوي للبرولين انطلاقاً من الغلوتامات :

يُعتبر مسار الغلوتامات هو المسار الرئيسي لتخليق البرولين في النباتات، خاصةً تحت ظروف الإجهاد (Khadi 2006). يبدأ هذا المسار بتفاعل يتم بواسطة إنزيم P5CS (synthetase) ، الذي يستخدم ATP و H^+ (P) NAD^+ لاختزال الغلوتامات إلى GSA (glutamate semialdehyde) ، وهو مركب غير مستقر يتحول تلقائياً إلى P5C . يُختزل بعد ذلك P5C إلى برولين بواسطة إنزيم P5C reductase P5CR باستخدام H^+ $NADPH^+$ كما هو موضح في الشكل (15) (El Moukhtari *et al.*, 2020).

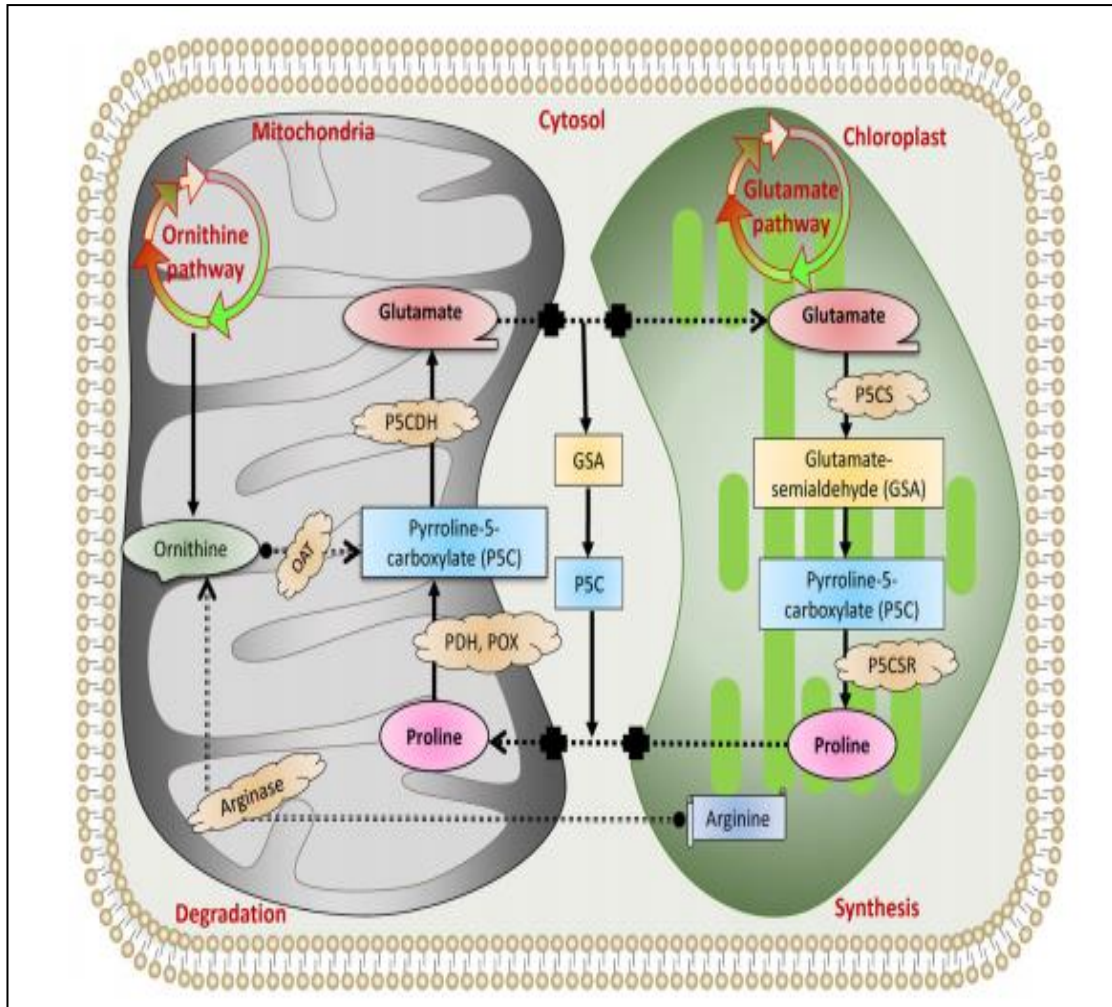
يُشفّر إنزيم P5CS في معظم أنواع النباتات بواسطة جينين هما P5CS1 و P5CS2، في حين يُشفّر P5CR عادةً بواسطة جين واحد. تعمل الصيغتان P5CS1 و P5CS2 في السيتوسول، إلا أن الدراسات تشير إلى إمكانية تحوّل P5CS1 إلى البلاستيدات الخضراء تحت تأثير الإجهاد غير الحيوي. (Mansour *et al.*, 2017). وبناءً عليه، يتم تخليق البرولين في كل من البلاستيدات الخضراء والسيتوبلازم، قبل أن يُنقل لاحقاً لتحلله داخل الميتوكوندري (Ould Said, 2021).



الشكل (15): تمثيل تخطيطي لتخليق البرولين (Renzetti et al., 2024)

✓ مسار التخليق الحيوي للبرولين انطلاقاً من الأورنيثين :

في مسار تخليق البرولين من الأورنيثين، الذي يحدث بشكل رئيسي داخل الميتوكوندري، تبدأ العملية أولاً بتحويل الأرجينين (Arginine) إلى أورنيثين (Ornithine) كما ورد في (Raza et al., 2023). يحول (Ornithine) الأورنيثين بعد ذلك إلى γ -glutamate-semialdehyde (GSA) عبر تفاعل نقل أمين تحفيزه إنزيم الأورنيثين أمينوترانسفيراز (Szepesi et Szepesi, 2018) (Ornithine aminotransferase OAT). ويتحول GSA تلقائياً إلى (Pyrroline-5-carboxylate) (P5C) من خلال تفاعل غير إنزيمي نتيجة لتوازن بنيوي يتم بعد ذلك اختزال P5C إلى (proline) برولين من خلال إنزيم (Trovato et al., 2008) P5C (P5CR) reductase.



الشكل(16): تخليق وتحلل البرولين في النباتات (Raza et al., 2023).

6 - تراكم البرولين في النبات :

البرولين هو حمض أميني بروتينوجيني يتراكم بكثرة في النباتات الراقية، لا سيما تحت ظروف الإجهاد البيئي مثل الجفاف، الملوحة، الضوء العالي، والمعادن الثقيلة (Szabados et Savouré, 2010). يُخزن البرولين في السيتوسول، البلاستيدات الخضراء، إلا أن تراكمه يكون أساساً في السيتوبلازم، حيث يساهم في التوازن الأسموزي، تثبيت البنى الخلوية، وتنظيم حالة الأكسدة والاختزال (Ashraf et Foolad, 2007).

تُحفز عدة عوامل تراكم البرولين في الخلايا النباتية، من بينها تحفيز التخليق الحيوي، تثبيط الأكسدة، اضطراب تخليق البروتينات، وتأثيرات الميتوكوندريا على توازن pH. وقد لوحظ تراكم سريع له في أنواع مثل الشعير، الأوكالبتوس، والطماطم تحت تأثير الإجهاد المائي والملحي، مما يؤكد على دوره الحيوي في التكيف مع البيئات القاسية (Tadrent, 2017).

يرتبط تراكم البرولين أيضاً بتنشيط مسارات المرتبطة تراكم أنواع الأوكسجين التفاعلية (ROS)، خصوصاً H_2O_2 ، كما هو الحال في الذرة والأرز، مما يُشير إلى استجابته الفعالة للإجهاد التأكسدي (Abdelly et Savouré, 2014). وقد تصل نسبته في السيتوبلازم إلى 250 ملي مولار، كما تُسجل تركيزات مرتفعة له في الأوراق خاصةً أثناء نقص المياه (Atoui et Fergati, 2019)، وقد يبلغ مستواه في الحالات القصوى إلى 6.5 مول/لتر في بعض الأنواع ذات القدرة العالية على التراكم (Renzetti et al., 2024).

يختلف تراكم البرولين حسب نوع النبات ودرجة تحمله للإجهاد؛ إذ أظهرت أصناف متحملة للجفاف أو الملوحة، مثل أصناف القمح والخردل، مستويات تراكم أعلى مقارنةً بالأصناف الحساسة (Meena et al., 2019). وتؤكد هذه العلاقة الطردية بين التراكم ومستوى التحمل أن البرولين قد يُستخدم كمؤشر فسيولوجي فعال، كما ثبت ذلك في أنواع مثل الفاصوليا الخضراء، عباد الشمس، والشعير (Heuer, 2010).

وتُظهر العديد من الدراسات أن تراكم البرولين لا يقتصر على الحماية أثناء الإجهاد، بل يُعاد استخدامه بعد انقضاء الظروف الضاغطة كمصدر للطاقة والنيروجين، مما يدعم إنتاج ATP الضروري لعمليات الإصلاح الخلوي (Casasni, 2022). كما أظهرت تجارب على نبات *Arabidopsis*، ومعالجات خارجية بالبرولين، دوره الإيجابي في تحسين الاستجابة للإجهاد، رغم تسجيل بعض التأثيرات السلبية في سياقات معينة (Renzetti et al., 2024).

وأخيراً، يُعد تراكم البرولين استجابة تكيفية محفزة بالعديد من العوامل، من أبرزها الإجهادات المائية والأسموزية، اضطرابات تخليق البروتينات، وارتفاع مستويات حمض الأبسيسيك (ABA)، كما هو موثق

في دراسات أجريت على الشعير والقمح، مما يعزز من أهميته كمؤشر حيوي في استجابة النبات لنقص الماء (Atoui et Fergati, 2019).

7- دور البرولين في النبات :

يُعد البرولين من الأحماض الأمينية الهامة التي تتراكم في أنسجة النبات استجابةً لمختلف أنواع الإجهادات البيئية، خاصة المائي والملحي والتأكسدي. وقد أثبتت العديد من الدراسات أن له أدواراً تنظيمية تتجاوز كونه مجرد ناتج ثانوي، إذ يسهم في حماية البنية الخلوية ودعم العمليات الفسيولوجية. وفيما يلي توضيح لأبرز وظائفه الحيوية في النبات تحت ظروف الإجهاد كما هو موضح في الشكل (17) :

التكيف الأسموزي والحماية الخلوية : يعمل البرولين كـ osmoprotectant (أسموبروتكتنت)، حيث يساهم في تقليل فقدان الماء والحفاظ على ضغط الامتلاء داخل الخلايا، مما يدعم سلامة البنية الخلوية ويبقي النشاط الأيضي فعالاً. (Renzetti et al., 2024)، ويُعد أيضاً مذوباً متوافقاً (compatible osmolyte)، يعزز الأسمولية الخلوية ويساهم في التكيف مع الإجهاد المائي والملحي من خلال تعديل الضغط الأسموزي وسحب الماء للخلية أو تقليل فقدانه (Heuer, 2010).

الحماية من الإجهاد التأكسدي : يسهم البرولين في التخلص من أنواع الأكسجين التفاعلية (ROS) اما مباشرةً من خلال تفاعله مع الجذور الحرة مثل OH^\bullet ، أو بشكل غير مباشر من خلال تحفيز نشاط الإنزيمات المضادة للأكسدة مثل الكاتالاز والبيروكسيداز وبوليفينول أوكسيداز (Kaur et Asthir, 2015).

كما يحافظ على الاتزان التأكسدي داخل الخلية من خلال دعم الأنظمة المختزلة مثل الجلوتاثيون والأسكوربات، و يُشارك في تنظيم الرقم الهيدروجيني للسيتوسول، ويحافظ على نسب $NAD^+/NADH$ و $NADP^+/NADPH$ ، مما يدعم عمليتي التمثيل الضوئي والتنفس (Kishor et al., 2005).

تعزيز النمو والتطور الخلوي : يعدّ البرولين ضرورياً لتطور النبات الطبيعي، حيث يؤدي نقصه إلى تشوهات في الأوراق والنمو وتأخر الإزهار، بينما تؤدي زيادته إلى الإزهار المبكر (Saibi et Brini, 2020).

كما يلعب دوراً محورياً في تمايز الخلايا متعددة القدرات، خصوصاً الخلايا الجنينية إلى خلايا شبيهة بالإكتوديرم البدائي، في حين أن غيابه يمنع هذا التمايز. ويُشارك في تنظيم الخصائص الفيزيائية للبروتينات المنظمة ذاتياً، حيث يمنع تكون الألياف النشوانية المرتبطة بالأمراض ويعزز المرونة كما في بروتين الإيلاستين (Saibi et al., 2020).

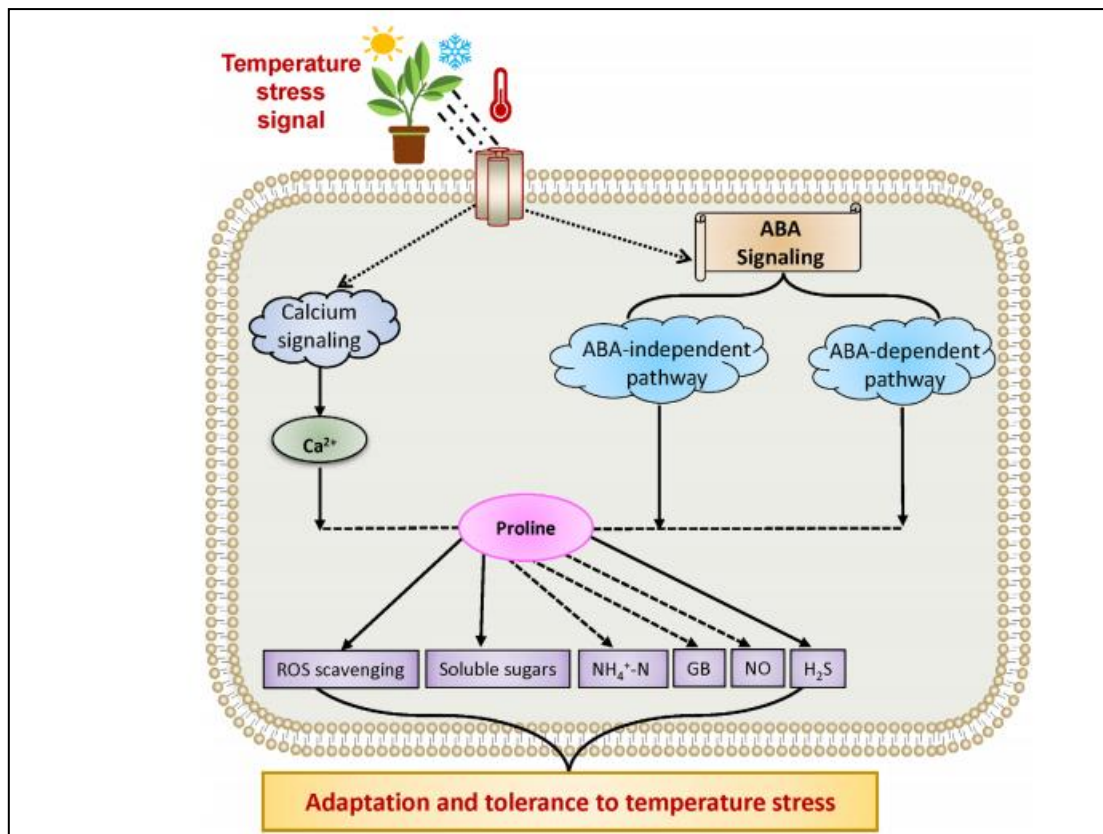
الاستجابة الدفاعية والموت الخلوي المبرمج : يساهم تراكم البرولين أثناء التفاعل مع الممرضات في تعزيز التعبير عن إنزيمات مثل Proline Dehydrogenase (PDH) ، مما يؤدي إلى تراكم مركب P5C و ROS، وهما إشارتان تنشطان الدفاعات النباتية والموت الخلوي المبرمج (Programmed Cell Death, PCD) (Saibi et Brini,2020).

دعم التمثيل الضوئي والتنفس : يُظهر البرولين دوراً مزدوجاً، حيث يعمل كـ منظم أسموزي في الضوء، و كركيزة تنفسية في الظلام، مما يعزز من فعالية عملية البناء الضوئي وكفاءة استخدام الطاقة. كما يساهم في حماية المركب II في سلسلة نقل الإلكترون داخل الميتوكوندريا، مما يحافظ على استقرار التنفس الخلوي تحت ظروف الإجهاد (Rejeb et al., 2012).

آليات تراكمه واستجابته للإجهاد : يتراكم البرولين نتيجةً لتحفيز التخليق الحيوي، أو تثبيط الأكسدة، أو اضطراب تخليق البروتينات. ويظهر سرعة في الامتصاص خلال الإجهاد المائي أو الملحي في نباتات مثل الشعير، الأوكالبتوس (Tadrent, 2017).

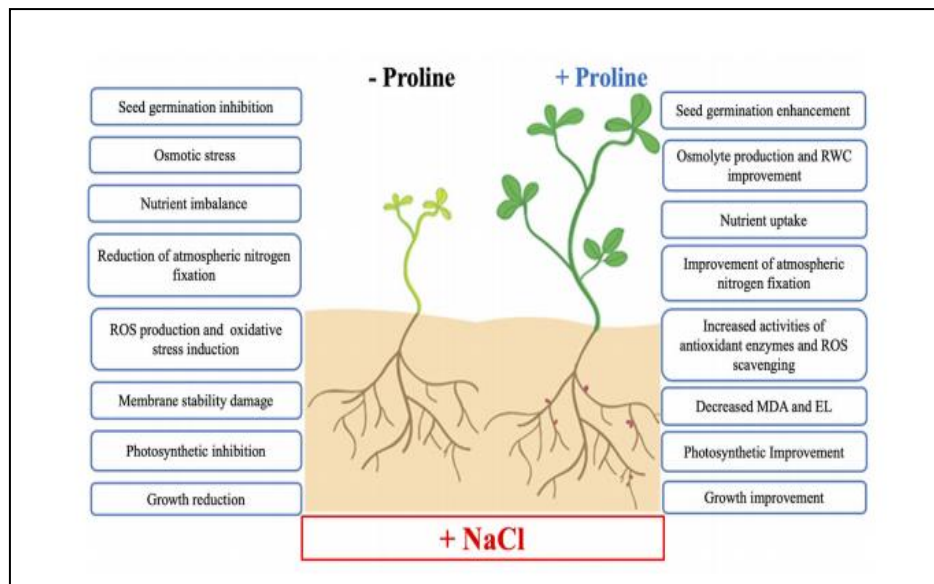
تثبيت الأغشية وتعافي النبات : يُساعد في تثبيت الأغشية ومنع تسرب الكهارل، حيث يتفاعل مع الفسفوليبيدات وبعض الجزيئات الضخمة الأخرى، مما يساهم في الحفاظ على سلامة الأغشية تحت ظروف الإجهاد البيئي. كما أن للبرولين دوراً حيوياً في تعافي النبات بعد زوال الإجهاد؛ إذ يُكسر بسرعة إلى جلوتامات داخل الميتوكوندريا عند عودة الظروف البيئية المواتية، مما يجعله مصدراً هاماً للكربون والنيتروجين يدعم عمليات النمو واستعادة الوظائف الحيوية (Mouri, 2015).

التفاعل مع الفيتوهورمونات: يتفاعل البرولين مع الفيتوهورمونات مثل حمض الأبسيسيك (ABA) والكالسيوم (Ca^{+2})، حيث يساهم توافره في تعزيز تراكم البرولين تحت الإجهاد، بينما يُنظم ABA أيضاً البرولين وتعبئته استجابةً للإجهاد. وقد يظهر تأثير إيجابي أو سلبي لـ ABA حسب نوع النبات وظروف الإجهاد (Raza et al., 2023).



الشكل (17): تداخلات البرولين مع الاشارات الايضية و الهرمونية في مواجهة الاجهاد الحراري (Raza et al., 2023).

يؤثر هذا الدور التنظيمي للبرولين بشكل إيجابي على نمو النبات، وتطوره، وإنتاجيته تحت ظروف الإجهاد الملحي. وتُعد هذه التأثيرات من المحاور الواعدة التي يمكن أن تُوجه أبحاث المحاصيل المستقبلية نحو حلول فعّالة لمشكلات الملوحة. ويُعرض الشكل أدناه ملخصاً لأهم التأثيرات المقترحة للبرولين الخارجي في دعم قدرة النباتات النامية على مقاومة الإجهاد الملحي (Ashraf et Foolad, 2007). كما هو موضح في الشكل (18):



الشكل (18): تأثيرات البرولين الخارجي في تحمل النبات للملوحة (El Moukhtari et al., 2020)

8- استخدامات البرولين في الجانب الزراعي :

يعد البرولين من المركبات الهامة التي تستخدم في تعزيز تحمل النباتات للضغوط البيئية، وخاصة في ظروف الجفاف و الملوحة. تشير الدراسات إلى أن تطبيق البرولين الخارجي على نباتات الذرة تحت ظروف الجفاف أدى إلى تحسينات ملحوظة في النمو والخصائص الفسيولوجية. حيث زاد طول النبات ، وزيادة في محتوى الكلوروفيل، وكفاءة التمثيل الضوئي، مما انعكس ايجابيا على زيادة في غلة الحبوب (Ibrahim et al., 2022). كما اظهرت دراسة اخرى زيادات ملحوظة في طول الساق، الجذر ، والوزن الطازج للساق ، والوزن الطازج للجذر، والوزن الجاف للساق، والوزن الجاف للجذر مقارنة بالنباتات غير المعالجة. كما ساهم البرولين في تقليل تسرب الإلكتروليتات وزيادة محتوى الماء النسبي، مما يدل على تحسن استقرار الأغشية واحتفاظ النبات بالماء. بالإضافة إلى ذلك، انخفضت مستويات بيروكسيد الهيدروجين، والمالونديالدهيد، ما يشير الى تقليل الإجهاد التأكسدي. كما عزز البرولين أيضاً نشاط إنزيمات مضادة للأكسدة مثل الكاتالاز والبيروكسيداز، وزاد من تراكم البروتينات والمغذيات الأساسية مثل النيتروجين والفوسفور والبوتاسيوم، مما يحسن من التوازن الأسموزي والعمليات الأيضية في النبات. تشير هذه النتائج إلى أن البرولين يمكن أن يكون أداة فعالة في تعزيز تحمل الذرة للجفاف وتحسين إنتاجيتها تحت ظروف الإجهاد المائي (Khan et al., 2025).

يساهم التطبيق الخارجي للبروتين في تعزيز نمو النباتات تحت ظروف الإجهاد البيئي، حيث يعمل على تخفيف الآثار السلبية للملوحة في الأرز والبقول السوداني، ويقلل من الأضرار التأكسدية في أغشية الدهون. كما يزيد من الوزن الجاف ومحتوى البروتين الحر في البرسيم، ويحسن تكوين الأجنة الجسدية في الذرة. أظهر أيضاً فعالية في تعزيز نمو الذرة والقمح تحت إجهاد الجفاف، مع تحسين امتصاص

العناصر الغذائية. إضافةً إلى ذلك، خفف من التأثيرات المثبطة للكالسيوم على خلايا التبغ (Hayat et al., 2012)

وفي سياق آخر، أظهرت الأبحاث أن المعالجة المسبقة بالبرولين خففت من سمية الزئبق (Hg^{+2}) في الأرز (*Oryza sativa*) من خلال إزالة أنواع الأكسجين التفاعلية (ROS). كما ساهم البرولين في تقليل الجذور الحرة في النباتات المعدلة وراثياً مثل التبغ، وزاد من نشاط الإنزيمات المضادة للأكسدة في الخلايا تحت الإجهاد الملحي. خلال الظروف الضاغطة، يساهم تخليق البرولين في البلاستيدات في الحفاظ على توازن $NADPH:NADP^{+}$ ودعم التمثيل الضوئي، كما عززت المستويات العالية من البرولين قدرة نباتات مثل (*Thellungiella halophila*) على مقاومة الملوحة (Szabados et Savouré, 2010).

يظهر استخدام البرولين أهميته من خلال تراكمه في النباتات تحت ظروف انخفاض الجهد المائي، حيث يُعتبر من المذابات المتوافقة التي تساعد في التعديل الأسموزي. و تثبيت الجزيئات الكبيرة، وامتصاص الإلكترونات الزائدة، وتخزين الكربون والنيتروجين لاستخدامها بعد انتهاء فترة الجفاف. كما يعمل كعامل حماية أسموزي، ويزيد محتواه تحت إجهاد الجفاف في بعض النباتات مثل البازلاء والبيتونيا، مما يعزز تحملها للجفاف (Farooq et al., 2009).

كما أثبتت الدراسات أن المعالجة بالبرولين تحسن من إنتاجية المحاصيل تحت ظروف الإجهاد الملحي، حيث زادت من غلة الحبوب ووزنها في القمح المزروع بوجود 120 mM NaCl. كما أن رش أوراق الذرة بمحاليل البرولين تحت تركيزات 25 mM و 50 mM NaCl أدى إلى تحسين النمو والإنتاج. هذه النتائج تدعم دور البرولين في تخفيف آثار الإجهاد البيئي في التطبيقات الزراعية (Renzetti et al., 2024).

ويُستخدم البرولين أيضاً في تقليل تراكم أيونات Na^{+} و Cl^{-} وزيادة محتوى K^{+} ، مما يساعد على تحسين تحمل النباتات للإجهاد الملحي. كما يعزز النظام المضاد للأكسدة من خلال رفع نشاط الكاتالاز، أسكوربات بيروكسيداز وسوبر أوكسيد ديسميوتاز. مما يؤدي إلى انخفاض محتوى H_2O_2 وبيروكسدة الدهون، مما يقلل الضرر التأكسدي. أظهرت النباتات المعالجة بالبرولين تأقلاً أفضل مع الملوحة مقارنة بالنباتات غير المعالجة (Saibi et Brini, 2020).

وتُشير البحوث إلى أن البرولين يوفر الحماية الأسموزية ويعزز النمو تحت ظروف الإجهادات غير الحيوية، مثل الجفاف والملوحة، من خلال حماية الأغشية الخلوية من الضرر التأكسدي وتعزيز أنشطة مضادات الأكسدة. كما يساهم في تقليل تراكم الأيونات السامة مثل Na^{+} و Cl^{-} ، إلا أن فعالية البرولين تعتمد على تحديد التركيزات المثلى لتفادي أي تأثيرات سلبية على النمو والعمليات الأيضية (Ashraf et Foolad, 2007).

وأخيراً، فقد أظهرت الأبحاث أن المعالجة الخارجية بالبرولين تُحسن من تحمل نباتات التبغ للإجهاد الملحي، كما زاد البرولين من محتوى حمض الأسكوربيك والغلوتاثيون ونشاط إنزيمات APX و GR و CAT في نبات المونغ، مع انخفاض H_2O_2 والمالوندي الدهيد. كما عزز التعبير الجيني للإنزيمات المضادة للأكسدة في الحمضيات المعدلة وراثياً، وساهم في تعزيز تحمل الجفاف في فول الصويا. ويُعد تحلل البرولين مصدراً للطاقة خلال مراحل النمو وإعادة الترتيب (Kaur et Asthir, 2015).

الجانب التطبيقي

مقارنة و مراجعة حول دور البرولين في

ظل البيئات المتغيرة

بعد البحث و التقصي في محركات البحث المختلفة و إستبعاد كل الدراسات التي ليس لها علاقة بموضوعنا, و قبول المقالات التي تهتم بدراسة دور البرولين في ظل البيئات المتغيرة , تم قبول 7 مقالات مختلفة من حيث دراسة دور البرولين في تخفيف من اضرار الاجهادات و مساعدة النباتات في التكيف .

1-المقال الأول :

ROLE OF PROLINE IN MITIGATING THE DELETERIOUS EFFECTS OF HEAT STRESS IN CHILLIES.

العنوان مترجم للغة العربية:

دور البرولين في التخفيف من الآثار الضارة للإجهاد الحراري في الفلفل الحار.

المؤلفون :

SHAHBAZ AKRAM, C.M. AYYUB, MUHAMMAD SHAHZAD, ALI SHAHZAD,

تم نشر هذا المقال في مجلة CONTEMPORARY AGRICULTURE و التي هي جزء من

SEBRIAN JOURNAL OF AGRICULTURAL في عام 2021 الصفحات من : 28- 35

VOL :70

NO:2-1

الهدف :

- دراسة العديد من الخصائص المرفولوجية و الفيزيولوجية للفلفل الحار لتحمل الحرارة تحت تأثير تطبيق الخارجي للبرولين .

- معرفة دور البرولين في تخفيف آثار الإجهاد الحراري على نبات الفلفل .

المواد و الطرق :

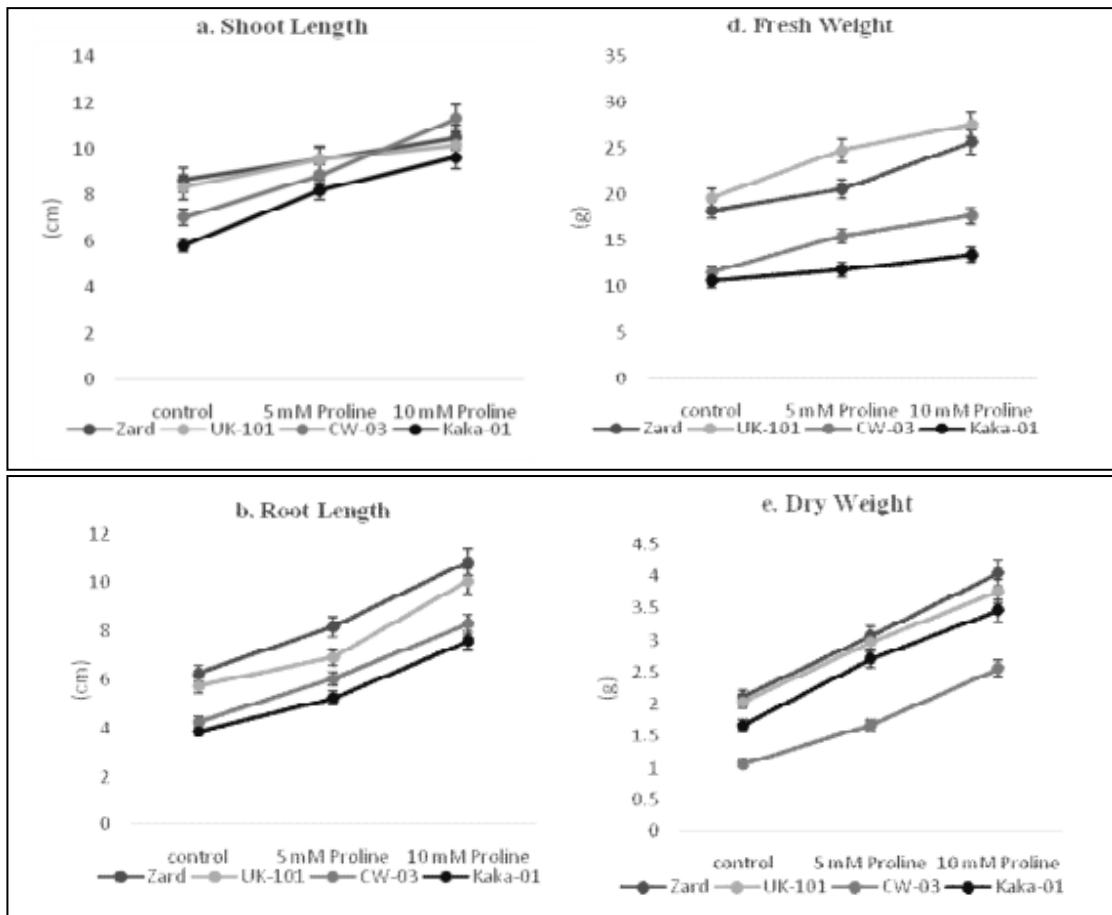
تم إجراء تجربة في غرفة النمو بمعهد علوم البستنة في جامعة الزراعة فيصل اباد عام 2019 باستخدام تصميم عشوائي كامل CRD مع ترتيب عاملين وأربع تكرارات. تم دراسة أربع أصناف من الفلفل الحار (Ka Ka-01,Zard , UK-101;.CW-03) تم زراعة البذور في أصص مليئة بوسط رملي، مع توفير المياه وفقا لاحتياجات النباتات ، بعد الإنبات ، تم تطبيق محلول Hoagland نصف القوة لتغذية النباتات .تم فرض الإجهاد الحراري بعد أربعة أسابيع من ظهور الشتلات حيث تم رفع درجة الحرارة تدريجيا ب2 درجة مئوية يوميا حتى تم الوصول إلى 32/40°C لدرجة حرارة (النهار و الليل) و استمر الإجهاد الحراري لمدة سبعة أيام, مع رش الأوراق بالبرولين بتركيزات 0 مليمول (T0) 5 مليمول (T1) و 10 مليمول (T2) . تم قياس الخصائص المرفولوجية مثل عدد الأوراق ، طول الجذور والسيقان، الوزن الطازج والجاف . بالإضافة إلى الخصائص الفسيولوجية معدل التمثيل الضوئي التبخر،التوصيل الثغري

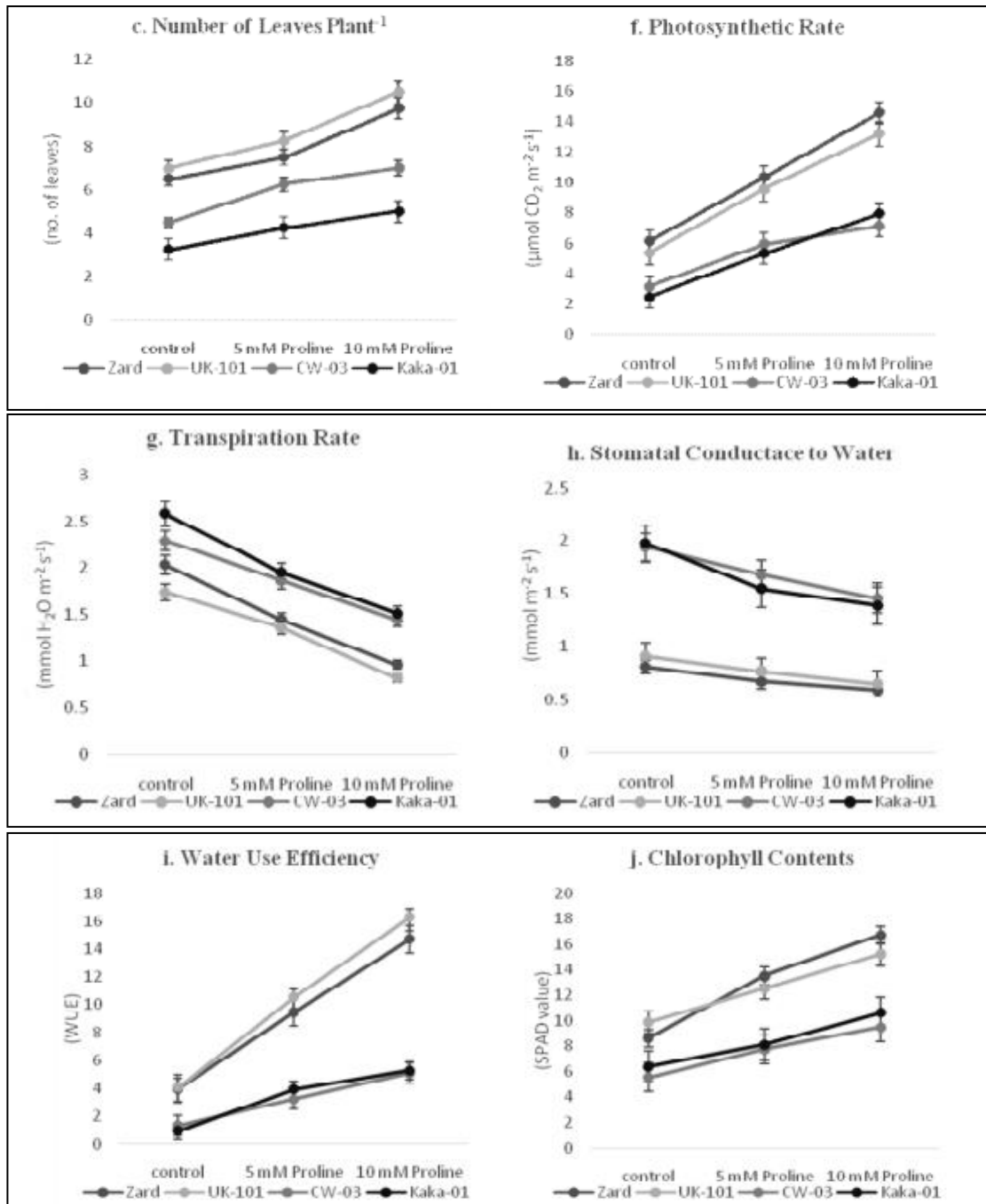
كفاءة استخدام المياه ، ومحتوى الكلوروفيل. تم تحليل البيانات باستخدام تحليل التباين واختبار Tuckey (HSD) عند مستوى احتمال 5 بالمئة.

النتائج :

طول ساق النبات (سم):

تأثر طول الساق بشكل كبير بالإجهاد الحراري في جميع الأنواع، حيث اختلفت الاصناف الجينية بشكل ملحوظ وذلك يبين وجود تباين مع كل نوع وتم تعويض التأثيرات السلبية للإجهاد باستخدام البرولين الخارجي . مع زيادة أطول للساق عند تطبيق 10 مليمول للبرولين (الشكل 19).





الشكل (19): a, b, c, d, e - تأثير البرولين على الصفات المورفولوجية (طول الساق، طول الجذر، عدد الأوراق لكل نبات، الوزن الطازج، والوزن الجاف، على التوالي) في أصناف الفلفل الحار تحت ظروف الإجهاد الحراري. f, g, h, i, j - تأثير البرولين على الصفات الفيزيولوجية (معدل التمثيل الضوئي، معدل النتج، التوصيل الثغري، كفاءة استخدام الماء، ومحتوى الكلوروفيل، على التوالي).

طول جذور النبات (سم):

أظهرت النتائج في (الجدول 3) زيادة في طول الجذور عند تطبيق 10 مليمول برولين لجميع الاصناف الجينية تحت الإجهاد الحراري (الشكل 19- b).

جدول(3):مربعات المتوسط من تحليل التباين لخصائص اربعة اصناف من الفلفل الحار تحت ظروف التحكم و ظروف البرولين المضافة

Source of Variation	DF	SL	RL	LP ⁻¹	FW	DW
Treatment	2	66.09**	742.99**	259.02*	364.11**	1218.34**
Variety	3	12.95**	211.13**	411.48**	933.00**	415.77*
Treatment × Variety	6	3.56**	3.03*	8.54**	17.72**	5.29*
Source of Variation	DF	PR	TR	SC	WUE	CC
Treatment	2	1436.79**	800.92**	1705.84**	2764.33**	1275.77*
Variety	3	730.07*	274.46**	9553.75*	1981.08**	1010.77**
Treatment × Variety	6	38.20**	4.34**	100.03*	217.17**	43.13**

الرموز التوضيحية: * دال عند مستوى احتمال 5%؛ ** دال عند مستوى احتمال 1%؛ DF = درجات الحرية، SL = طول الساق، RL = طول الجذر، LP-1 = عدد الأوراق لكل نبات، FW = الوزن الطازج للنبات، DW = الوزن الجاف للنبات، PR = معدل التمثيل الضوئي، TR = معدل النتج، SC = التوصيل الثغري، WUE = كفاءة استخدام الماء، CC = محتوى الكلوروفيل
عدد الأوراق:

تأثير عدد الأوراق بالإجهاد الحراري حيث زادا عدد الأوراق بتطبيق البرولين الخارجي (الشكل 19- c) مع أفضل أداء للأنواع الجينية uk-101 .
الوزن الطازج و الجاف (غرام):

تم تقليص الوزن الطازج والجاف للنبات بسبب الإجهاد ولكن تم تعويض ذلك بتطبيق البرولين حيث زادا الوزن بشكل عام عند علاج 10 مليمول من البرولين في الوزن الطازج (الشكل 19- d) وفي الوزن الجاف (الشكل 19- e).

معدل التمثيل الضوئي ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$):

تأثر بشكل سلبي بالإجهاد الحراري وأظهرت الأنواع الجينية استجابة ايجابية للبرولين مع أعلى معدل لتمثيل الضوئي في zard و اقل معدل في kaka-01 (الشكل 19- f).

معدل التبخر ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$):

تم زيادة معدل التبخر نتيجة الإجهاد الحراري حيث لوحظ أعلى قيمة عند الصنف kaka-01 و اقل قيمة في الصنف uk-101 ولكن بعد تطبيق البرولين زادا معدل التبخر في uk-101 (الشكل 19- g).

التوصيل الثغري ($1-2 \text{ s}^{-1} \text{ mmol m}^{-2}$):

زادا التوصيل الثغري بسبب الإجهاد الحراري، وتم تقليله بتطبيق البرولين مع استجابة قوية عند 10 مليمول للبرولين (الشكل 19-h).

كفاءة استخدام الماء :

تم تقليله تحت الإجهاد الحراري ، حيث لوحظ أكبر تقليص عند الصنف kaka-01 و اقل تقليص عند الصنف UK-101. تمت ملاحظة تعافي كبير عند تطبيق البرولين 10 مليمول و اقل تعافي عند تطبيق 5 مليمول للبرولين و اظهر الصنف UK-101 أكبر تعافي و يليه صنف Zard (الشكل 19-i).

محتويات الكلوروفيل (SPAD):

تأثرت بشكل كبير بالإجهاد الحراري. أظهرت النتائج في (الجدول 3) إلى أن تأثيرات الشديدة للإجهاد تم تعويضها بتطبيق البرولين الخارجي و زادت محتويات الكلوروفيل مع أفضل تعافي في الصنف Zard (الشكل 19-j).

المناقشة:

الإجهاد الحراري يعد العامل البيئي الرئيسي الذي يؤثر بشكل كبير على إنبات و نمو الفلفل الحار (Sood *et al.*,2009) ويؤدي إلى تغيرات غير مرغوبة فيها في الخصائص المرفولوجية و الفيزيولوجية و البيوكيميائية للإنبات (Sung *et al.*,2003). يعتبر إدخال الإسمولات مثل البرولين تحت الإجهاد الحراري من الطرق الفعالة للتغلب على هذا الإجهاد وتحسين تحمل النباتات . البرولين هو حمض أميني ينتج عن الجلوتامات و يعمل كحل متوافق يساعد في التعديل الاسموزي ، حيث يلعب دورا مهما في الحفاظ على سلامة غشاء الخلية و حمايتها من الجذور الحرة للأكسجين (Szbados *et al.*,2010; Savoure,2009).

البرولين يلعب دورا أساسيا في حماية غشاء الخلية من الأضرار الناتجة عن الجذور الحرة للأكسجين و يساهم في الحفاظ على التوازن الداخلي للخلية (Hayat *et al.*, 2012; Szbados *et al.*, 2009) بالإضافة إلى ذلك البرولين يساعد في التعديل الاسموزي للمحاصيل ضد حالات الإجهاد الحيوي (Heuer, 1994 ; Rhodes *et al.*,1993) و يعمل على عزل الخلية و على تعزيز تكوين البروتينات الحيوية مثل الروبيسكو وهو أساس لعملية التمثيل الضوئي، كما أظهرت الدراسات أن النباتات المعدلة وراثيا تحتوي على كميات اقل من الإسمولات ولكن البرولين قد يعزز تحمل النباتات ضد الإجهاد الحراري (Bajaj *et al.*,1999) لذلك يوصى بتطبيق البرولين الخارجي كبديل او مكمل للتخفيف من التأثيرات الإجهاد على المحاصيل و النباتات (Itai *et al.*,1982).

أدت ظروف الإجهاد الحراري إلى تقليل طول الجذور و السيقان في الفلفل الحار ، وهو ما أكدته العديد من الدراسات (Muslu *et al.*, 2013). ومع ذلك، يمكن للبرولين أن يلعب دور مهما في التعافي من هذه التأثيرات السلبية حيث أكدت العديد من الدراسات (Usman *et al.*,2010; Murmu *et al.*, 2013).

ضد الضغوط الحيوية. يتأثر وزن النبات الطازج والجاف بشدة بالإجهاد الحراري (Zhou *et al.*, 2017). في هذه الدراسة تبين ان البرولين الخارجي يمكن ان يعزز تعافي النباتات من الإجهاد الحراري كما أكده ذلك (Muslu *et al.*, 2013; Heuer, 2003).

الإجهاد الحراري يزيد من فقدان المياه عبر النتج مما يدفع النباتات لإنتاج مركبات ايضية تساعد في استقرار ضغط التورم للخلية و التقليل الجهد المائي للخلية (Crafts- Brandner *et al.*, 2000). المصدر الرئيسي للنشاط الأيضي هو الكربوهيدرات و التي تتناقص في حالات الإجهاد الحراري يعتبر عاملا مقيدا في النظام البيئي (Sweeney *et al.*, 2001). انخفاض مستوى الكربوهيدرات تحت الإجهاد الحراري يحد من النشاط التمثيل الضوئي ويزيد من التنفس المظلم (Liu *et al.*, 2000) في هذه الدراسة لوحظ انخفاض المعدل التمثيل الضوئي بسبب الإجهاد الحراري مما أدى إلى انخفاض نشاط روبيسكو وزيادة التثبيط الضوئي (Chaum *et al.*, 2010).

أظهرت الدراسات أن الأصناف المقاومة للحرارة تتمتع بتحسّن في محتويات الكلوروفيل مقارنة بالأصناف الحساسة للحرارة ، مما يبرز العلاقة الايجابية بين التحمل الحراري والقيود الفوتوتنسية (Wahid *et al.*, 2006). كما أفاد Usman *et al.* (2015) بأن الإجهاد الحراري يقلل من محتويات الكلوروفيل في الفلفل الحار. بينما يلعب البرولين دورا في التخفيف من هذه الآثار الضارة (Nawaz *et al.*, 2010). وأشار Ghai *et al.* (2016) إلى أن الإجهاد الحراري يسبب انخفاض كبير في قيم الكلوروفيل وزيادة في معدل التعرق (Cui *et al.*, 2006). وظهرت تحسنا عند تطبيق البرولين الخارجي (Sharma *et al.*, 2015). يظهر تطبيق البرولين الخارجي تحسنا في تطور خلايا النباتات ويقلل أكسدة الأغشية الدهنية ويحافظ على التمثيل الضوئي في ظروف الإجهاد (Jain *et al.*, 2001).

تعديل الموصلية الثغرية من علاقات المياه والتمثيل الضوئي ، وتزيد مع ارتفاع الحرارة رغم انخفاض احتمال المياه في الأوراق، مما يعزز التعرق وزيادة تركيز ثاني أكسيد الكربون بين الخلايا، لكن ذلك كان غير مرتبط بالتمثيل الضوئي (Urban *et al.*, 2017). انخفضت محتويات الكلوروفيل مع ارتفاع درجة الحرارة، ولكن بتطبيق البرولين الخارجي حسن من محتويات الكلوروفيل (Nawaz *et al.*, 2010). تحسن كفاءة استخدام المياه (WUE) و تعديل حالة المياه للنباتات المتأثرة بالحرارة بتطبيق البرولين الخارجي وقد تكون هذه العواقب ناتجة عن تثبيط تدفق المياه عبر تأثيرات المحاليل على استقرار الأغشية وتقليل التعرق عبر تأثيراتها على الخلايا الثغرية (Ali *et al.*, 2007).

تم تطبيق البرولين عبر رش الأوراق لتخفيف آثار الإجهاد الحراري ، الملحي ونقص المياه، في دراسة Butt *et al.* (2016). على صنفين من الفلفل الحار، تبين أن البرولين حسن الصفات الشكلية والفيزيولوجية عند تطبيقه على الشتلات التي عمرها 30 يوما كما كان تركيز البرولين 0.2 مليمول والأكثر فعالية في تحسين الصفات الشكلية والفيزيولوجية ثم الإبلاغ عن فوائد البرولين لمحاصيل أخرى

مثل الذرة (Ali et al., 2007)، الزيتون (Ahmed et al., 2011)، الفلفل الحار (Butt et al., 2016) والأرز (Nounjan et al., 2012).

بالتالي يعتبر تطبيق البرولين الخارجي فعالاً في تحسين نمو الفلفل الحار تحت الإجهاد الحراري مع تفوق الأصناف Zard و UK-101 في معظم المعايير الشكلية والفيزيولوجية

2-المقال الثاني :

Proline accumulation is a general response to abiotic stress in the date palm tree (*Phoenix dactylifera* L.)

العنوان مترجم للغة العربية:

تراكم البرولين يعتبر استجابة عامة للإجهاد غير الحيوي في شجرة نخيل التمر (*Phoenix dactylifera* L.)

المؤلفون:

M.W. Yaish

تم نشر هذا المقال في مجلة Genetics and Molecular Research في العدد 14 (3) من عام 2015

الهدف :

- التحقيق في مدى تراكم البرولين في شتلات النخيل (*Phoenix dactylifera* L.) نتيجة لتعرضها لمجموعة من الضغوط البيئية المختلفة مثل الملوحة العالية، الجفاف، درجات الحرارة القصوى، صدمة الملوحة، وحمض الأبسيسيك.

- تحديد ما إذا كان تراكم البرولين يحدث فقط بسبب الملوحة و الجفاف أو نتيجة لضغوط بيئية أخرى .

المواد والطرق :

تم إنبات بذور نخيل التمر (*P. dactylifera* صنف خلاص) في فيرميكوليت الرطب المعقم في ظروف مظلمة ومعقمة عند 30°C لمدة عشر أيام . ثم تم زرع البذور المنبثة في أوعية سعة 2 لتر تحتوي على 66 بالمئة فيرميكوليت و 34 بالمئة طحالب الخث ، وتم الاحتفاظ بها في غرفة نمو مع دورة ضوء مدتها 16 ساعة مع شدة ضوء قدرها 350 ميكرو انيشتاين بدرجة حرارة 35 و 30 الضوء والظلام على التوالي مع الحفاظ على الرطوبة عند 60 بالمئة . تم ري النباتات حسب الحاجة حتى تصل إلى السعة الحقلية لمدة 6 أسابيع .

تم تعريض مجموعات منفصلة من ستة شتلات من النباتات إلى معالجات مختلفة :

إما الري المنتظم (المعاملة الضابطة) أو الري مرتين على مدار الأسبوع بمحلول 300 ملليمول /لتر NaCl (صدمة الملوحة)، تركها دون ري لمدة أسبوعين إضافيين (معاملة الجفاف) ، تعريضها

للظلام عند 50°C (معاملة الحرارة) أو 40°C (معاملة البرودة طول الليل) أو رش أوراقها مرتين ب 10 ميكرومتر ABA في معالجات الحرارة و البرودة تم تغطية النباتات بكيس بلاستيكي لمنع جفاف الاوراق .

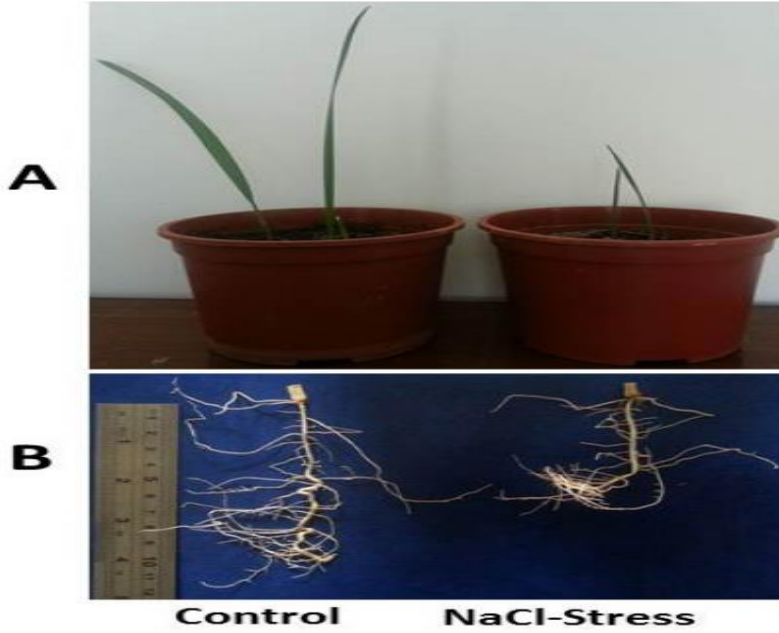
تم ري النباتات مع الزيادة تدريجيا في تركيز محاليل NaCl من 50 الى 300 مليمول / ل على مدار ستة أسابيع . تم جمع عينات من الجذور و الأوراق وتم تنظيفها بالماء الجاري ، تم تجميدها بسرعة في النيتروجين السائل قبل طحنها. تم استخراج البرولين الحر من 1 جرام من الانسجة الطازجة للجذور والأوراق، وقياس تركيز البرولين باستخدام طريقة لونية، كما تم قياس محتوى الماء و الأملاح القابلة للذوبان في التربة باستخدام الطرق الوزنية و التوصيل الكهربائي

النتائج :

تأثير الإجهاد الغير حيوي على النمط الظاهري :

تم إجراء معاملة فيزيولوجية مقارنة للتحقيق في التغيرات في محتوى البرولين استجابة لمختلف الاجهادات الغير الحيوية في الجذور والأوراق لشتلات نخيل التمر المزروعة في الأصص . بالنسبة لمعالجة الجفاف ، تم ترك الشتلات دون ري لمدة أسبوعين حيث انخفض محتوى الرطوبة في التربة من 55% إلى 6% بعد المعالجة ، كما كان من الصعب قياس الجهد المائي للتربة بسبب استخدام تربة صناعية و الأوراق الشائكة صلبة وشمعية وذلك أدى إلى صعوبة تحديد نقطة الذبول الدائم وهي تستخدم كنقطة انطلاق لقياسات البرولين في ظروف الإجهاد.

أما في معالجة صدمة الملوحة ، فكانت التوصيلية الكهربائية للتربة في الأصص المعالجة، 13 ds/m بينما كانت 0.68 ds/m في الأصص الضابطة . وتم استخدام تركيزات متفاوتة من محلول NaCl ، حيث تراوحت ملوحة مياه البحر من 45 ds/m إلى 50 ds/m لم تكن صدمة الملوحة قصيرة المدة المؤثرة على النمط الظاهري للنباتات . لكن الإجهاد طويل المدى اظهر تأثير ملحوظ على نمو الأوراق و الجذور (الشكل 20)، حيث انخفض طول الورقة بنسبة 2 ± 63 لوحضت بقع نخرية على الأوراق (الشكل 20 - a) وطول الجذور بنسبة 7 ± 34 (الشكل 20-b)



الشكل (20): A شتلات نخيل التمر المزروعة في التربة تحت ظروف الإجهاد العادية (التحكم) و ظروف الإجهاد بتركيز ملحي مرتفع (إجهاد NaCl) . B. تأثير المعاملة بالملوحة الممتدة على نظام الجذور مقارنة بالتحكم .

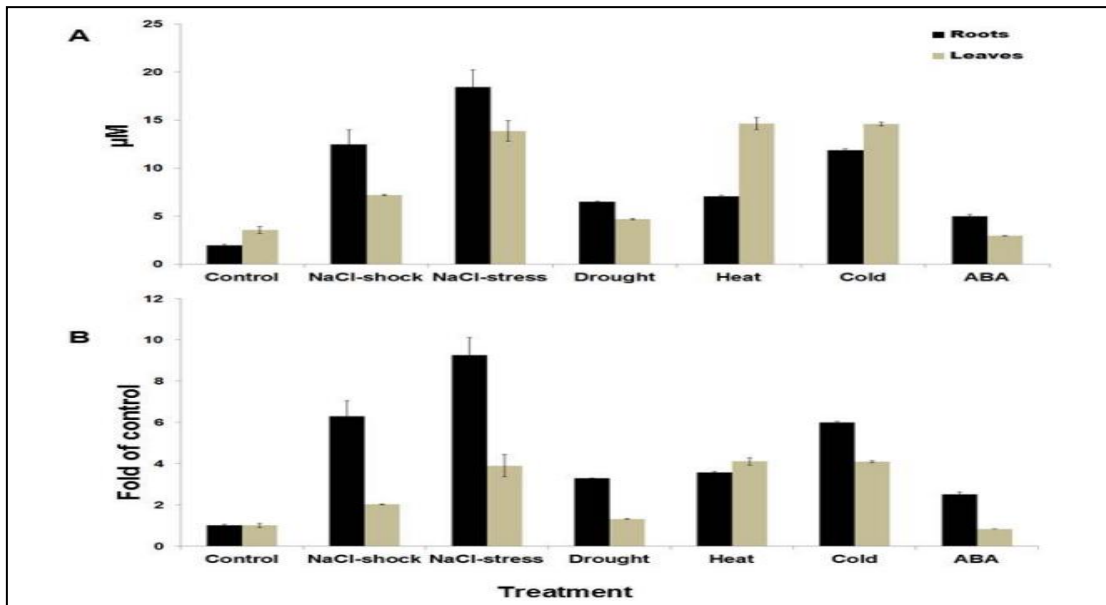
تراكم البرولين بشكل متفاوت في جذور وأوراق شتلات تحت الإجهاد الغير حيوي :

أظهرت التحليلات الكيميائية للجذور و الأوراق تباينا في تراكم البرولين في شتلات نخيل التمر استجابة للإجهادات الغير حيوية فلقد اختلفت بين الجذور و الأوراق لنفس ظروف الإجهاد (الشكل 21) كان مستوى البرولين في الأوراق أعلى قليلا من الجذور في الشتلات غير المعالجة لكن كان مرتفعا بشكل ملحوظ في الأوراق عند تعرض الشتلات لإجهاد الحرارة أو البرودة في الإجهاد الملحي (تدرجي أو سريع) و البرودة تراكم البرولين بشكل اكبر في الجذور مقارنة بالأوراق . المفاجئ أن الجفاف و حمض الابسيسيك ABA كان لهما تأثير ضئيل على تراكم البرولين في الجذور و الأوراق (الشكل A21) اظهر التحليل التفاضلي ارتفاع في مستويات البرولين في الجذور بمعدل 9.3 و 6.3 و 6.0 مرة مقارنة بالضابطة في الإجهاد الملحي صدمة الملوحة و معاملة الباردة على التوالي في حين أظهرت معالجة الجفاف و الحرارة و ABA زيادة في تراكم البرولين في الجذور بنسبة 2.5 إلى 3.5 أضعاف مقارنة بالضابطة (الشكل 21 b) كان تأثير الملوحة واضحا في تراكم البرولين في الجذور لكن المحتوى في الأوراق كان اقل (الشكل 21)

أظهرت الدراسة أن المعاملة الطويلة بالملوحة كانت أكثر تأثيرا من صدمة الملوحة في تراكم البرولين في أنسجة نخيل التمر حيث زادت المعاملة الطويلة بالملوحة محتوى البرولين بمقدار 9.3 و 4.0 أضعاف مقارنة بالضابطة في الجذور و الأوراق على التوالي بينما زادت صدمة الملوحة بمقدار 6.3 و 2.0 أضعاف في الجذور و الأوراق على التوالي (الشكل 21 b) .

على عكس الملوحة كان تأثير إجهاد الجفاف اقل على تراكم البرولين في شتلات نخيل التمر حيث تراكم البرولين في الجذور بزيادة حوالي ثلاث إضعاف مقارنة بالضابطة بينما زادت الكمية في الأوراق بشكل ضعيف .

أما معالجات البرودة و الحرارة فقد أظهرت زيادة ملحوظة في البرولين في الجذور و الأوراق مع تفوق البرولين في الجذور عند التعرض لبرودة مقارنة بالحرارة (الشكل 21) عند تعرض نخيل التمر لدرجة حرارة 4 °C بالبرودة لمدة 16 ساعة لوحظ زيادة في تراكم البرولين في الجذور و الأوراق (الشكل 21) و كان محتوى البرولين نفسه في الأوراق عندما تعرضت الشتلات لظروف حارة و باردة (الشكل 21) مما يشير إلى حساسية الأوراق للحرارة القصوى رغم قدرة الأشجار البالغة على التكيف مع درجات الحرارة .



الشكل (21): A. تراكم البرولين في جذور و اوراق شتلات نخيل التمر المزروعة تحت ضغوط بيئية غير حيوية مختلفة. B. تراكم البرولين النسبي (مضاعف التحكم) في الجذور و الاوراق .

أدى تطبيق الورقي ABA إلى زيادة طفيفة في تراكم البرولين في الجذور ولكن ولم تلاحظ هذه الزيادة في الأوراق (الشكل 20).

قد يكون التراكم المفرط للبرولين نتيجة لإشارة ABA من الأوراق التي تحفز تخليق البرولين لكن هذا التخليق قد يكون مؤقتاً في الأوراق بسبب تحلل ABA سريعاً بعد التطبيق.

المناقشة :

تشير نتائج هذه الدراسة إلى تأثيرات متفاوتة للإجهاد الغير حيوي على شتلات نخيل التمر حيث تم تحليل التغيرات في محتوى البرولين في الجذور والأوراق استجابة لأنواع مختلفة من الاجهادات اظهرت النتائج أن الإجهاد الملحي له تأثير مدمر على النمط الظاهري للشتلات حيث تم تقليص طول الأوراق و الجذور بشكل ملحوظ نتيجة للتعرض للملوحة الممتدة وتشير التقارير المتناقضة بشأن الحد الأقصى

للملوحة التي يمكن ان يتحملها نخيل التمر حيث أفادت بعض المجموعات البحث بتقليل غير كبير في المحصول عند ري النبات ب NaCl حتى 24 ds/m (الجبوري 1994) وتقارير أخرى أظهرت تأثير مدمر كبير عند ريهما بمحلول NaCl بتركيزات تتراوح بين 4 الى 10 ds/m (Sperling *et al.*, 2024) ومن المرجح أن يكون هذا التناقض نتيجة لاستخدام أنواع مختلفة من نخيل التمر وتطبيق المعالجات المالحة في مراحل نمو مختلفة للنبات.

وأظهرت نتائج التحليلات الكيميائية للجذور والأوراق أن دور البرولين هو كحامي خلوي للأسموزية في تحمل الملوحة تراكم البرولين في الجذور يمكن أن يكون ناتج عن الضغط الاسموزي المباشر أو إشارة ناتجة عن تركيزات NaCl الزائدة في النبات وهو ما أظهرته دراسة سابقة تربط مستوى البرولين بتركيز NaCl في الكالوس وكذلك في الشتلات التي تظهر إنباتا مبكرا (Djibril *et al.*, 2005) في نخيل التمر.

المعاملة الطويلة بالملوحة ذات تأثير اكبر من صدمة الملوحة ومن تتفاعل بشكل مختلف مع صدمة الملوحة و إجهاد الملوحة (Shavrukov, 2013) ويشير هذا إلى أن شتلات النخيل التمر تظهر استجابة وظيفية مشتركة للتحمل سواء تم تطبيق NaCl تدريجيا أو فجائيا بتركيز عالي .

من جهة أخرى اظهر الجفاف تأثيرا اقل على تراكم البرولين في النباتات مقارنة بالملوحة. يبدو أن نخيل التمر قادر على التكيف مع الجفاف في الجذور و الأوراق مع إنتاج اقل للبرولين. مما يشير إلى أن البرولين ليس العامل الرئيسي في تحمل نخيل التمر للجفاف. في المقابل اظهر الإجهاد الحراري و البرودة زيادة ملحوظة في تراكم البرولين في كل من الجذور والأوراق مع ملاحظة تراكم أعلى في الجذور عند تعرض النباتات للبرودة .البرولين قد يساعد في موازنة الإجهاد التاكسدي في النباتات المعرضة للحرارة (Wahid et close, 2007) وتمتلك النباتات العديد من الآليات للبقاء على قيد الحياة في درجات الحرارة الباردة (Yaish et Griffith., 2004) كما ان تراكمه في النباتات الباردة مرتبط بمقاومة الضرر الناتج عن الصقيع (chu *et al.*, 1978).

بالنسبة لمعالجة ABA لوحظ زيادة طفيفة في تراكم البرولين في جذور فقط. يعزز ABA تخليق البرولين في بعض النباتات مما يعزز تحمل الجفاف و الملوحة (Yang *et al.*, 2000) كما ان الهرمونات النباتية تلعب دورا في تنظيم استقلاب البرولين اثناء تحمل الملوحة (Iqbal *et al.*, 2014) في نبات الارابيدوبسيس يتطلب ABA تفعيل جيني P5cs الذي يتحكم في تخليق البرولين في الخلية (Strizhov *et al.*, 1997) حيث يلعب ABA دورا مركزيا في ذلك (Knight et Knight , 2001) مع ذلك لم تؤدي زيادة ال ABA دائما الى تحسين تحمل الجفاف حيث تختلف الاستجابة بين انسجة النباتات و انواع الخلايا المختلفة مثل الخلايا الحارسة في الثغور التي تلعب دورا حاسما في تحمل الجفاف للنباتات (Yaish *et al.*, 2010).

3-المقال الثالث:

The role of leaf superoxide dismutase and proline on intra-specific photosynthesis recovery of *Schima superba* following drought

العنوان مترجم للغة العربية:

دور إنزيم سوبر أكسيداز والبرولين في استعادة التمثيل الضوئي في نبات *Schima superba* بعد الجفاف

المؤلفون:

Honglang Duan, Changchang Shao, Nan Zhao, Defu Wang, Víctor Resco de Dios & David T. Tissue

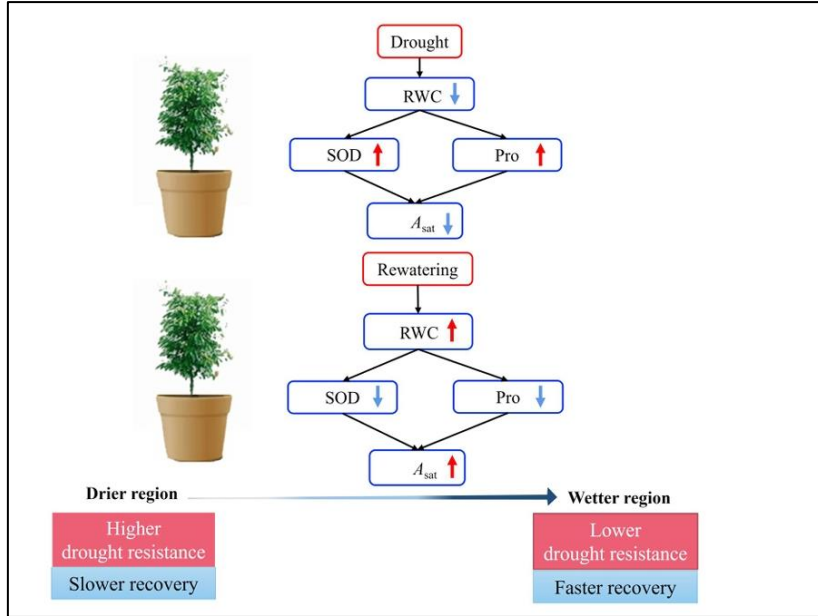
تم نشر هذا المقال في مجلة Scientific Reports في عام 2024.

الهدف:

- دراسة كيفية تأثير الجفاف الشديد على الاستجابات الفسيولوجية والكيميائية الحيوية لشتلات *Schima superba*، مثل التمثيل الضوئي (Asat)، حالة الماء (RWC)، ونشاط إنزيم سوبر أكسيد ديسموتاز (SOD)، وكذلك تركيز البرولين (Pro) كاستجابة للتكيف مع الإجهاد المائي.
- دراسة كيفية تعافي الشتلات بعد إعادة الري.
- تحديد الفروق المحتملة داخل الأنواع في استجابة الشتلات لإجهاد الجفاف و التعافي منه.

الطرق و المواد:

تم جمع بذور *Schima superba* من أربع مناطق في جنوب الصين الاستوائي، بتدرج في معدل الأمطار السنوي من 1124 مم إلى 1796 مم (من AH إلى JX إلى HN إلى GX)، ومتوسط درجات الحرارة السنوية من 16.4 إلى 22.4 درجة مئوية. في مارس 2019، زُرعت شتلات بعمر سنة (ناتجة من بذور بحجم 7.6 لتر) في مأوى ميداني تم فيه تقليل ضوء الشمس الطبيعي بنسبة 15% باستخدام مأوى PVC. احتوى كل وعاء على 6 كجم من التربة الحمراء المجففة بالهواء، وزُرعت فيه شتلة واحدة. خصص 30 نباتاً من كل منشأ للتجربة.



الشكل (22): العلاقات المفترضة للصفات الفسيولوجية والكيميائية الحيوية لشتلات *S. superba* خلال فترة الجفاف وبعد إعادة الري في هذه الدراسة. افترضنا أن الأصول النباتية القادمة من مناطق أكثر جفافاً ستظهر مقاومة أعلى للجفاف مقارنة بالأصول من المناطق الأكثر رطوبة، وذلك بالتوافق مع انخفاض ابطا في المحتوى المائي النسبي (RWC) والتمثيل الضوئي، ولكن مع تعديلات كيميائية حيوية أعلى. وعند إعادة الري، كانت عملية تعافي هذه المعايير أبطأ في الأصول القادمة من المناطق الجافة. تشير الأسهم الحمراء إلى الارتفاع، بينما تمثل الأسهم الزرقاء الانخفاض.

في أغسطس 2019، قُسمت الشتلات عشوائياً إلى معالجتين للري: ري جيد: (n=10 لكل منشأ)، حيث حافظوا على محتوى الماء عند السعة الحقلية. معالجة الجفاف: (n=10 لكل منشأ لكل مستوى PLC)، حيث لم تتلق الشتلات أي ماء حتى وصل الجهد المائي للخشب إلى (P50 2.4 ميغاباسكال) و (P88 3.7 ميغاباسكال). بعد بلوغ مستويات PLC المستهدفة، تم إعادة ري مجموعة من الشتلات (n=6-7) إلى السعة الحقلية لتخضع لفترة تعافٍ لمدة 30 يوماً. أُجريت القياسات وجمعت العينات في أيام 0، 7، 15، و30 بعد الجفاف.

قياسات الموصلية الورقية الدنيا (gmin) و القياسات النظائرية للكربون:

تم أخذ عينات من الأوراق الموسعة حديثاً من كل منشأ قبل بدء الجفاف، لتقدير الموصلية الورقية الدنيا (gmin)، والتي تمثل معدل فقدان الماء من الورقة عند إغلاق الثغور، باستخدام طريقة Sack and Scoffoni. تم قياس مساحة الأوراق باستخدام جهاز (Licor-3100A) (Li-Cor Inc., Lincoln, NE, USA)، ثم تم تجفيف العينات في غرفة نمو بدرجة حرارة 25°C وتحت كثافة ضوء منخفضة (>5 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). بعد ذلك، وزنت العينات كل 20 دقيقة باستخدام ميزان دقيق. وتم حساب (gmin $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) من ميل الانحدار الخطي بين الكتلة الورقية والوقت، مع الأخذ في الاعتبار فرق ضغط بخار الماء في الغرفة ومساحة الورقة.

تحديد نقطة فقدان التوتر الخلوي للورقة (Ψ_{tlp}):

تم إجراء منحنيات الضغط-الحجم (P-V) على ورقة واحدة من 5 إلى 7 شتلات من كل منشأ قبل الجفاف، باستخدام طريقة التجفيف على المنضدة وفقاً لبروتوكول Prometheus (من إعداد Lawren Sack, Jessica Pasquet-Kok و Megan Bartlett). خلال التجفيف، تم قياس جهد الماء في الورقة والمحتوى المائي النسبي باستخدام جهاز قياس الضغط PMS-Model 1505D. من هذه البيانات، تم تقدير نقطة فقدان التوتر الخلوي (Ψ_{tlp}) من منحنيات الضغط-الحجم.

قياسات التركيب الضوئي للأوراق:

تم قياس التركيب الضوئي للأوراق (A_{seat}) على أوراق موسعة حديثاً لأربع عينات من كل منشأ، باستخدام جهاز Licor-6400 (Li-Cor, Lincoln, NE, USA)، في الفترة الصباحية. تم ضبط ظروف الغرفة كما يلي: كثافة تدفق الفوتونات الضوئية، $1500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (PPFD) تركيز ثاني أكسيد الكربون $400 \mu\text{mol mol}^{-1}$ [CO₂]. درجة حرارة الهواء: 31°C (في منتصف اليوم)، فارق ضغط بخار الماء بين الورقة والهواء: 2.1 kPa ، الرطوبة النسبية: بين 60 و 80%، أُجريت القياسات بعد الوصول إلى حالة الاستقرار خلال 5 إلى 10 دقائق.

قياسات محتوى الماء النسبي للأوراق (RWC):

تم أخذ عينات من أوراق أربع شتلات لكل معالجة من كل منشأ خلال مراحل الجفاف وإعادة الري. تم تحديد الوزن الطازج (Wf) مباشرة بعد أخذ العينة، ثم تم قياس الوزن الممتلئ (Wt) بعد 12 ساعة من إعادة الإرواء. بعد ذلك، جُففت العينات في فرن عند 70°C لمدة 72 ساعة لتحديد الوزن الجاف (Wd). تم حساب المحتوى النسبي للماء في الأوراق (RWC) باستخدام المعادلة التالية:

$$\text{RWC (\%)} = 100 \times (\text{Wf} - \text{Wd}) / (\text{Wt} - \text{Wd})$$

اختبارات أنزيم Superoxide dismutase (SOD) و Proline(Pro):

تم استخراج حوالي 0.2 جرام من العينة الورقية المجمدة بالنيتروجين السائل من أربع شتلات مكررة لكل معالجة من كل منشأ، باستخدام 3 مل من محلول الفوسفات المبرد. تم استخدام طريقة Nitroblue Tetrazolium على السائل الطاف لتحديد نشاط إنزيم (SOD) (Superoxide Dismutase)، كما تم استخدام طريقة التفاعل اللوني بـ guaiacol لقياس تركيز البرولين (Pro).

تحديد البنية الرقيقة للورقة:

تم اختيار أوراق موسعة حديثاً من ثلاث شتلات من كل منشأ قبل بدء معالجة الجفاف، وتم تقطيع العينات إلى حجم 1 mm^3 ، ثم وُضعت في مادة مُثَبِّتة لتحضيرها للمجهر الإلكتروني الناقل (TEM) داخل أنبوب EP يحتوي على المثبت. تُبَّتت العينات في درجة حرارة الغرفة لمدة ساعتين، ثم نُقلت للحفظ عند 4°C . بعد ذلك، تم تثبيت العينات باستخدام 1% من حمض الأوزميوم في محلول فوسفات (0.1 M pH)

7.4 لمدة 7 ساعات، تلاها غسل العينات في نفس المحلول. أُجري تجفيف العينات باستخدام سلسلة من تركيزات الإيثانول المختلفة، تمهيداً لتحليلها بالمجهر الإلكتروني الناقل.

تحليل البيانات:

تم إجراء تحليل البيانات باستخدام برنامج (SPSS, Chicago, USA) **SPSS 18.0**, تم تحليل الخصائص قبل الجفاف بين المنشآت باستخدام تحليل التباين الأحادي (ANOVA)، مع تطبيق اختبارات Tukey بعد الانحدار لمقارنة المتوسطات. خلال فترة التجربة، تم استخدام تحليل التباين الثنائي (Two-way ANOVA) لتقييم تأثير كل من مستويات PLC والمنشأ على نشاط SOD وتركيز البرولين (Pro)، تلاه تحليل تباين أحادي لكل عامل، ثم اختبارات Tukey للفروق المعنوية. تم التحقق من تجانس التباين والتوزيع الطبيعي للبيانات قبل التحليل، واعتُبرت النتائج ذات دلالة إحصائية عند مستوى $P < 0.05$. كما تم تقييم العلاقات بين الخصائص باستخدام النماذج الخطية عند توفر الشروط المناسبة.

النتائج:

قبل الجفاف، لم توجد اختلافات معنوية Ψ_{tlp} بين المنشآت (الجدول 4). كانت قيمة $\delta^{13}C$ أعلى في منشأ GX، بينما كانت الموصلية الورقية الدنيا (g_{min}) أعلى في منشأ HN. كما لم توجد اختلافات معنوية في خصائص البنية الدقيقة للأوراق بين المنشآت (الجدول 5، الشكل 23)، مما يشير إلى أن البنية الدقيقة للأوراق بين المنشآت قد لا تلعب دوراً كبيراً في استجابات الجفاف لشتلات *S. superba* في هذه الدراسة القصيرة.

في دراستنا السابقة، تم عرض الديناميكيات الزمنية RWC و التركيب الضوئي النسبي Asat، حيث أظهرت استجابات متشابهة للجفاف ولكن تعافي مختلف في Asat بين المنشآت (تعافي أسرع في HN) حيث استعاد RWC بشكل أسرع (في 3 أيام) مقارنة ب Asat النسبي (≤ 7 أيام). في هذه الدراسة، تم تحليل العلاقات بين RWC و Asat الأصلي مع نشاط SOD و تركيز البرولين Pro، التي لم يتم عرضها سابقاً.

جدول (4): خصائص الماء في الأوراق لشتلات *S. superba* من أربع أصول جغرافية قبل التعرض للجفاف. حيث تشير الرموز: AH، JX، HN، GX إلى أنهوي، جيانغشي، هونان و قوانغشي على التوالي

Provenances	Ψ_{tlp} (MPa)	$\delta^{13}C$ (‰)	g_{min} (mmol m ⁻² s ⁻¹)
AH	-1.8 (0.1) a	-29.1 (0.3) ab	2.5 (0.3) b
JX	-2.1 (0.1) a	-30.1 (0.2) b	1.9 (0.2) b
HN	-1.9 (0.1) a	-29.6 (0.2) b	4.4 (0.4) a
GX	-2.2 (0.1) a	-27.9 (0.5) a	2.8 (0.4) b

Ψ_{tlp} تشير إلى نقطة فقدان التورم (عدد العينات = 5-7).

$\delta^{13}C$ تمثل التركيب النظائري للكربون 13 (عدد العينات = 3).

Gmin تشير إلى الحد الأدنى من التوصيل الثغري للأوراق (عدد العينات = 5-6). القيم في الجدول تمثل المتوسطات والانحرافات المعيارية. (SE) تشير الحروف المختلفة إلى وجود فروقات معنوية بين الأصول الجغرافية في ظروف ما قبل الجفاف. ($P < 0.05$)

جدول (5): الصفات الفوق مجهرية (فوق تركيبية) لأوراق شتلات *S. superba* من الأصول الجغرافية الأربعة. القيم معروضة كمتوسط \pm الانحراف المعياري (SE) (عدد العينات = 3). تشير الحروف المختلفة إلى وجود فروقات معنوية بين الأصول الجغرافية في ظروف ما قبل الجفاف ($P < 0.05$)

Provenances	AH	JX	HN	GX
Chloroplast number	7.1 (2.9) a	10.0 (1.2) a	6.4 (0.9) a	8.4 (2.4) a
Chloroplast length (μm)	6.4 (0.3) a	6.4 (0.4) a	6.2 (0.4) a	6.2 (0.2) a
Chloroplast width (μm)	2.5 (0.1) a	3.0 (0.2) a	2.9 (0.2) a	2.6 (0.3) a
Chloroplast area (μm^2)	11.9 (1.0) a	14.5 (1.0) a	14.0 (1.7) a	12.4 (1.6) a
Starch granule	1.8 (0.4) a	1.2 (0.1) a	1.8 (0.2) a	1.8 (0.4) a
Starch granule length (μm)	2.5 (0.2) a	3.5 (0.2) a	3.1 (0.4) a	3.3 (0.7) a
Starch granule width (μm)	1.2 (0.1) a	1.8 (0.2) a	1.7 (0.3) a	1.7 (0.3) a
Starch granule area (μm^2)	2.2 (0.4) a	5.2 (0.6) a	4.5 (1.2) a	5.0 (2.1) a

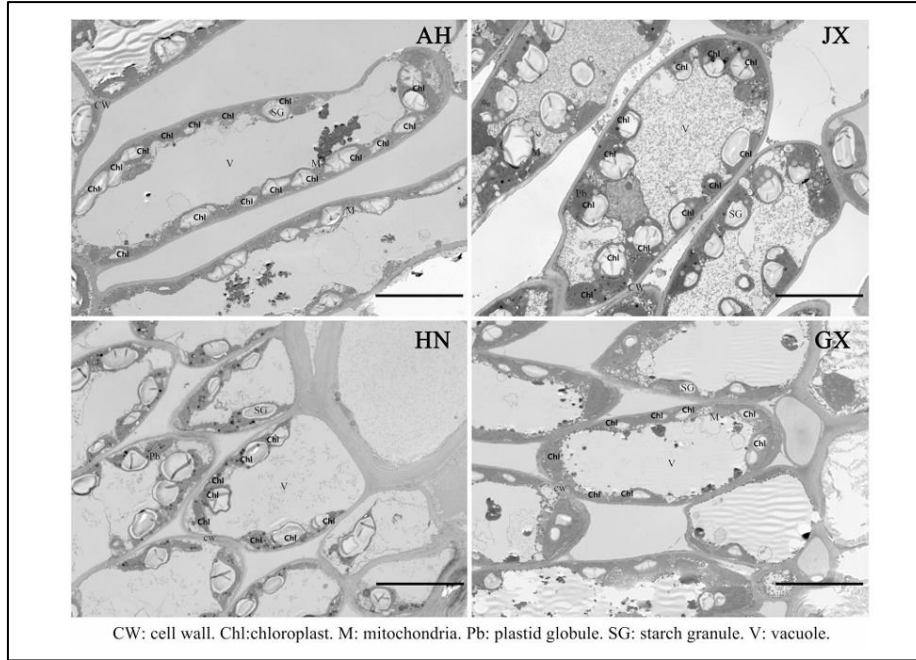
كان لمستويات PLC (أي تأثيرات مختلفة من الجفاف) تأثير معنوي على نشاط SOD و تركيز Pro (جميع نقاط الزمنية) (انخفض نشاط SOD و زاد تركيز البرولين مع زيادة درجة الجفاف. عاد نشاط SOD إلى قيم التحكم في شتلات P50 بعد 7 أيام من إعادة الري، بينما ظل أقل من قيم التحكم في شتلات P88) 16,5; 17,0; 7,6; 10,3 (ل AH; Jx; HN; Gx) بعد 15 يوماً من إعادة الري. مما يشير إلى تعافي أسرع فيمنشأ HN (الشكل 24 a-d). زاد تركيز البرولين مع زيادة إجهاد الجفاف (الشكل e-h 24)، و عاد إلى قيم التحكم في شتلات P50 بعد 7 أيام من إعادة الري. ومع ذلك، تحت P88، استغرقت شتلات AH و HN و GX من 7 إلى 15 يوماً للتعافي إلى مستويات التحكم، بينما تعافت شتلات Jx بعد 15 يوماً. اعتمد تعافي نشاط SOD و البرولين في الشتلات بعد إعادة الري بشكل كبير على درجة إجهاد الجفاف و المنشآت (الشكل 24) كان التعافي أسرع في الشتلات المعرضة لإجهاد P50 مقارنة بتلك المعرضة ل P88 أظهر نشاط SOD ارتباطات خطية إيجابية معنوية مع RWC، لم يختلف المنحدر بين المنشآت (الشكل 25 a-d). بينما أظهر البرولين ارتباطات سلبية مع RWC في منشأ HN و AH مع منحدرات مماثلة (الشكل 25 e-h). كما أظهر تعافي Asat ارتباطات إيجابية معنوية مع SOD في معظم المنشآت، و كان المنحدر أقل في HN و Jx مقارنة AH (الشكل 26 a-d). أما Asat أظهر ارتباطات سلبية مع البرولين باستثناء منشأ GX، لكن المنحدرات لم تختلف (الشكل 26 e-h).

المنافشة:

تلخص النتائج الرئيسية في (الشكل 27) أن (a) شدة الجفاف الأكبر (لضغط P88 مقارنة ب P50) أدت إلى انخفاض نشاط إنزيم SOD و زيادة البرولين (Pro) في شتلات *S. superba* مما أدى إلى تعافي أبطأ في الشتلات تحت ضغط الجفاف كثر شدة، (b) في المقابل، اختلفت استجابة بعض المؤشرات الفيزيولوجية و البيوكيميائية (مثل نشاط الرئيسي لأنزيم SOD و Asat) بين المنشآت (c) تبين أن معدل التعافي يختلف بين العمليات بعد إعادة الري ، مع الترتيب التالي : محتوى الماء في الأنسجة (RWC) ، ثم النشاط الأنزيمي SOD، ثم البرولين (Pro) و أخيراً التركيب الضوئي (Asat). (d) خلال إعادة الري، تم ملاحظة ارتباط بين نشاط SOD و تركيز البرولين (Pro) مع محتوى الماء في الأنسجة (RWC) ، ثم أثرت هذه العوامل على تعافي (Asat) بطرق متنوعة بين المنشآت .

الاستجابة للجفاف:

يزيد إجهاد الجفاف من إنتاج أنواع الأكسجين التفاعلية (ROS) في النباتات، مما يؤدي إلى تأكسد دهون الأغشية، تلف الخلايا، والموت الخلوي، نظراً لأن ROS الناتجة تحت الضغط تكون شديدة التفاعل مع البروتينات، الدهون، الكربوهيدرات، والأحماض النووية (You et Chan, 2015). لمواجهة ذلك، تنتج النباتات إنزيمات مضادة للأكسدة مثل (SOD و POD و CAT) (Ge et al., 2014; Abid et al., 2018). أظهرت هذه الدراسة أن نشاط إنزيم SOD انخفض مع زيادة شدة إجهاد الجفاف، أي عند الانتقال من إجهاد P50 إلى P88. كما أظهرت دراسة سابقة أن تبادل الغازات انخفض إلى الصفر قبل الوصول إلى إجهاد P50 (Duan et al., 2022)، مما يشير إلى أن SOD في *S. superba* لا يؤدي دوره تحت الإجهاد الشديد (Wada et al., 2019; Wang, 2006). تدل هذه النتائج على أن استجابات SOD تختلف حسب شدة الجفاف. وعلى الرغم من أن نتائجنا لا تتفق مع بعض الدراسات السابقة التي أُجريت تحت إجهاد جفاف خفيف إلى معتدل (Hassan et al., 2026; Khalofah et al., 2026)، إلا أنها تتفق مع دراسات أخرى أظهرت أن SOD ينخفض مع زيادة شدة الجفاف (Song et al., 2022; Hu et al., 2015).

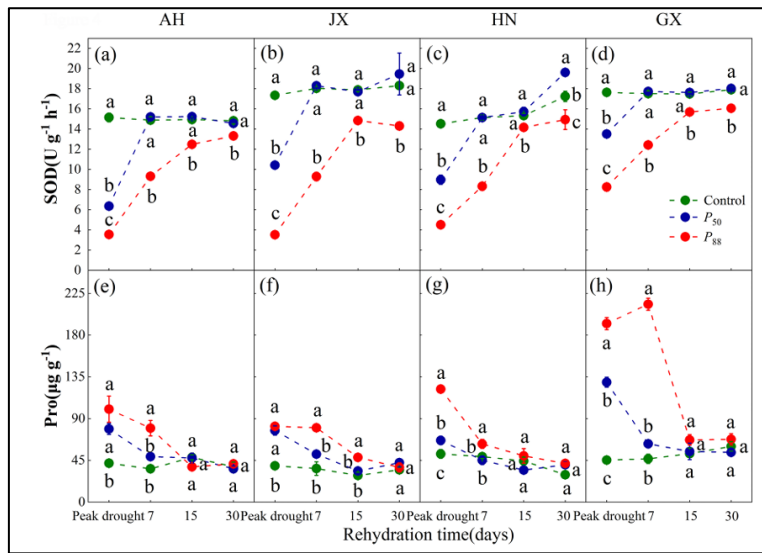


شكل (23):الصفات الفوق تركيبية لأوراق شتلات *S. superba* من جميع الأصول الجغرافية في مرحلة ما قبل الجفاف. تشير الرموز AH، JX، HN، GX إلى أنهوي، جيانغشي، هونان وقوانغشي على التوالي. CW = جدار خلوي، Chl = بلاستيده خضراء، M = ميتوكوندريا، Pb = حبيبة بلاستيديه، SG = حبة نشا، V = فجوة. تشير الأشطرطة الأفقية إلى مقياس الرسم (10 ميكرومتر).

في المقابل، زاد تركيز البرولين تدريجيا مع زيادة الجفاف، مما يساعد *S. superba* على مكافحة ROS. و أظهرت دراسات سابقة أن البرولين يمكن أن يحافظ بفاعلية على توازن الأسموزية الخلوية و سلامة الغشاء الخلوي، و كان يعتبر من العوامل التي تقضي على ROS (Moukhtari *et al.*, 2020; Takagi *et al.*, 2016). تشير أن النتائج إلى أن *S. superba* تعتمد بشكل رئيسي على تنظيم الأسموزية للتعامل مع الجفاف الشديد بدلا من القضاء على ROS. الاستجابة لإعادة الري:

أدى إجهاد الجفاف الأكبر (P88) إلى تعافٍ فيزيولوجي أبطأ في الشتلات مقارنة بإجهاد الجفاف الأقل (P50)، وهي نتائج تتوافق مع الدراسات السابقة (Duan *et al.*, 2020; Ouyang *et al.*, 2021; Guo *et al.*, 2021). في حين أن إعادة الري يمكن أن تخفف من الضرر الناتج عن الجفاف الخفيف أو المعتدل، إلا أن النشاط الإنزيمي (SOD) لم يتمكن من التعافي بعد الجفاف الشديد (Wang *et al.*, 2020; Luo et Yuan, 2019). تشير الأدلة إلى أن إعادة الري يمكن أن تقلل الضرر الفسيولوجي فقط في حالات الجفاف الخفيف إلى المعتدل، أما في الجفاف الشديد فيحدث تثبيط لتخليق الإنزيمات، مما يؤدي إلى بطء أو عدم تعافي نشاط SOD (Duan *et al.*, 2020). كما بينت دراسات سابقة أن قدرة التنظيم الأسموزي تتخفف مع زيادة شدة الإجهاد (He *et al.*, 2020; Jimenez–Castillo *et al.*, 2022). تمت ملاحظة تعافي البرولين بعد إعادة الري من إجهاد P88، مما يشير إلى أن خلايا الأوراق في *S. superba*

لا تزال تحتفظ بقدرتها على تنظيم الوظيفة الأسموزية بعد تخفيف الجفاف الشديد. أظهرت الدراسة وجود ارتباط بين SOD، البرولين، و RWC؛ حيث ساعدت زيادة RWC على تحسين تكامل الخلايا النباتية من جهة، ومن جهة أخرى، على إعادة تفعيل دور الحماية للـ SOD في التخلص من أيونات Superoxide الزائدة (Hassan *et al.*, 2021; Upadhyaya *et al.*, 2011; Bu *et al.*, 2017). وبالتالي، تزداد قدرة الخلايا النباتية على امتصاص الماء، دون الحاجة إلى تخليق إضافي لمكونات الحماية الأسموزية (Huang *et al.*, 2022; Chen *et al.*, 2020). ومع ذلك، لم يظهر ارتباط كبير بين البرولين و RWC في شتلات Gx و Jx، مما يشير إلى أن هذه الشتلات كانت أقل قدرة على تنظيم البرولين بعد الجفاف الشديد. بالتالي، يجب أخذ التباين داخل النوع في الاعتبار عند تقييم مرونة *S. superba* تجاه الجفاف.

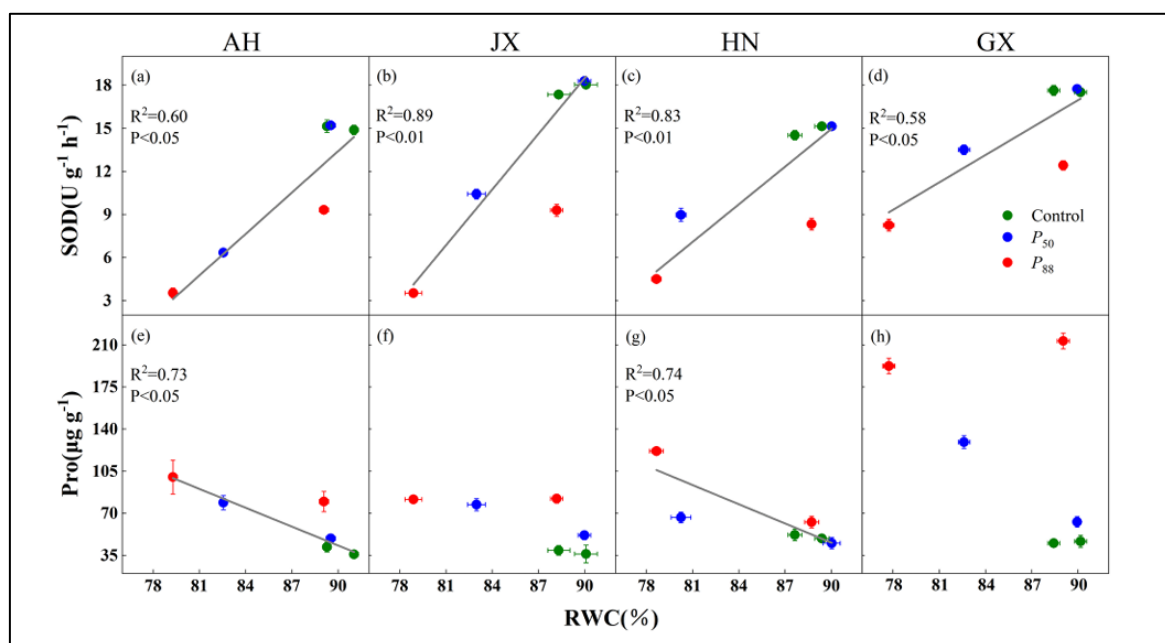


الشكل (24) : نشاط إنزيم سوبر أوكسيد ديسميوتاز (SOD) وتركيز البرولين (Pro) لجميع أصول شتلات *S. superba* عند مستويات فقدان التوصيل الهيدروليكي (PLC) المستهدفة وبعد إعادة الري. القيم معروضة كمتوسط \pm الانحراف المعياري (SE) (عدد العينات = 4). تشير الحروف المختلفة إلى وجود فروقات معنوية بين مستويات PLC في تاريخ أخذ العينات نفسه ($P < 0.05$).

تم ملاحظة تعافي هرمي للعمليات الفيزيولوجية في شتلات *S. superba* بعد الجفاف، حيث تعافي RWC أولاً، يليه زيادة في نشاط SOD وتقلص في تركيز البرولين، مما ساعد على استعادة وظيفة الغشاء الخلوي من خلال تخفيف تلفه (Hu *et al.*, 2012; Malik *et al.*, 2015). يرتبط انخفاض RWC بتدمير الغشاء الخلوي (Chaturvedi *et al.*, 2014; Guadagno *et al.*, 2017). أدى ذلك إلى تحسين استقرار الأغشية الخلوية والبروتينات واستعادة التمثيل الضوئي (Lambers, 2006) و كان تعافي Asat مرتبطاً بـ SOD والبرولين مما يشير إلى أن التغيير في Asat تأثر بكل العوامل الثغرية والغير ثغرية (Campos *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2012)، ولكن لم يكن هذا الارتباط ذا دلالة لشتلات Gx بسبب

بطء التعافي في Asat ، مما يشير إلى تأثير العوامل الغير تغذية مثل تلف جهاز التمثيل الضوئي .قد يساهم في هذه العملية. لوحظ أن التلف في المنشأ Gx كان أكثر شدة تحت نفس درجة الجفاف (Hu *et al.*, 2015) بالإضافة إلى تقييد الفيزيولوجيا الضوئية أي (V_{max} و J_{max}) على (Olorunwa *et al.*, 2018) ; Pegurro-Pina *et al.*, 2020 . توضح هذه الدراسة أهمية إنزيمات مضادة للأوكسدة و تنظيم الاسموزية في الأغشية الخلوية في تعافي قدرة التمثيل الضوئي جزئيا بعد استعادة وظيفة الخلايا .
الاختلافات داخل النوع في الاستجابة للجفاف و إعادة الري:

اظهرت هذه الدراسات السابقة وجود ارتباط كبير بين مقاومة الجفاف داخل النوع و البنية التحتية للأوراق (Kayabas, 2022; Salem-Fnayou *et al.*, 2016). و مع ذلك ، في هذه الدراسة ، اظهرت أن الخصائص البنية التحتية للأوراق لم تختلف بين المنشآت في ظروف ما قبل الجفاف، و هو ما يتوافق مع دراسات أخرى (Zhou *et al.*, 2019 Chen *et al.*, 2011). كما أن مدة الجفاف في التجربة كانت قصيرة مما قد لا يتيح وقتا كافيا لتغيير بنية الأوراق بشكل كبير. لذلك، يفترض أن بنية الأوراق تلعب دورا كبيرا في الاختلافات داخل النوع في تعافي شتلات *S. superba* من الجفاف. و مع ذلك قد يساعد استكشاف مرونة بنية الأوراق على المدى الطويل في فهم دورها بشكل أفضل في مراحل الجفاف و إعادة الري.



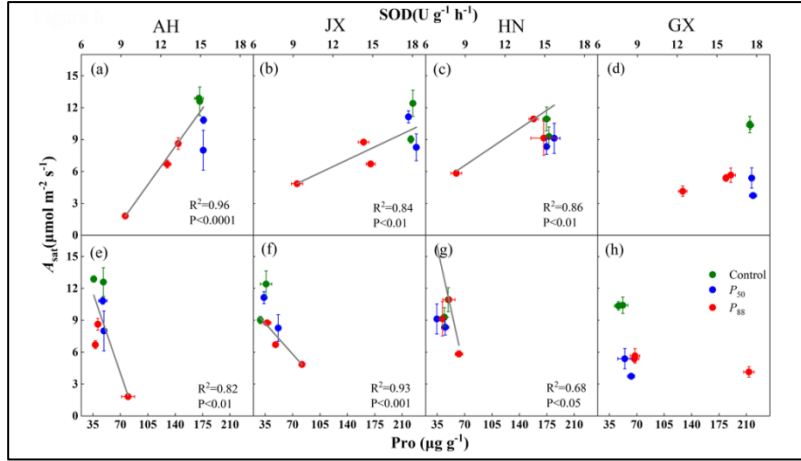
الشكل (25): العلاقة بين نشاط إنزيم السوبر أوكسيد ديسميوتاز (SOD) ومحتوى الماء النسبي في الأوراق (a-d) (RWC)، وتركيز البرولين (Pro) ومحتوى الماء النسبي في الأوراق (e-h) (RWC) لأربعة مصادر جغرافية (provenances) من شتلات *S. superba*

القيم معروضة كمتوسطات \pm الخطأ المعياري (n = 4). المعادلات الملائمة كما يلي: (a) SOD = 1.0RWC - 73.1 (فاصل الثقة 95% للميل: 0.3, 1.6)؛ (b) SOD = 1.3RWC - 97.9 (فاصل الثقة 95%: 0.9, 1.7)؛ (c) SOD = 0.9RWC - 63.6 (فاصل الثقة 95%: 0.5, 1.2)؛ (d) SOD = 0.6RWC - 40.3

(فاصل الثقة 95% للميل: 0.2، 1.1)؛ Pro = -5.2RWC + 514.0 (e) (فاصل الثقة 95% للميل: -7.9، -2.5)؛ Pro = -5.3RWC + 524.8 (g) (فاصل الثقة 95% للميل: -8.0، -2.6). تم جمع البيانات خلال ذروة الجفاف وبعد 7 أيام من إعادة الري.

تم جمع البيانات خلال ذروة الجفاف وبعد 7 أيام من إعادة الري.

لاحظنا وجود فروق داخل النوع في استجابات كل من SOD و Asat و Pro، كما أظهرت Asat ارتباطاً كبيراً مع كل من SOD و Pro وقد ترافقت انخفاضات Asat إلى حد كبير مع انخفاض التوصيل الشعري (Duan *et al.*, 2022) (gs) ، وهو ما يتوافق مع نتائج سابقة تم ملاحظتها (Silva, 2013; Li *et al.*, 2019; Zhou *et al.*, 2021). بالإضافة إلى ذلك، قد يتم تعديل الفروق داخل النوع في Asat بواسطة نشاط SOD بين الأصول الجغرافية، وهو ما ينعكس من خلال اختلاف العلاقات الإيجابية بينها. علاوة على ذلك، أظهرت بعض الدراسات أن الاختلافات الكبيرة في معدل هطول الأمطار ودرجات الحرارة والتربة يمكن أن تؤدي إلى تباين كبير بين الأصول الجغرافية (Piper *et al.*, 2019; Jamnicka. *et al.*, 2016). على سبيل المثال، يبدو أن الأصول القادمة من مناخات جافة أكثر مقاومة للجفاف، نظراً لقدرتها الأكبر على مقاومة الانسداد (embolism) وقدرتها الأيضية العالية (MacAllister *et al.*, 2019). ومع ذلك، لاحظنا أن استجابات SOD و Asat ومؤشرات أخرى لم تكن مفسرة بمناخ الأصل. كما أن التربة المستخدمة كانت متشابهة بين الأصول، لذلك من غير المرجح أن تكون سبباً في التباين داخل النوع في هذه الدراسة. وبالتالي، من الصعب تفسير الآلية التي تقود الاختلافات داخل النوع في SOD وغيرها من المؤشرات الفيزيولوجية اعتماداً على التصميم التجريبي الحالي، وهذا يتجاوز نطاق هذه الدراسة. لكن على الأقل، تم تحديد دور SOD في تعافي Asat. علاوة على ذلك، كان gmin أعلى في HN مقارنةً بالأصول الأخرى، مما يشير إلى أن فقدان الماء من الأوراق بعد إغلاق الثغور كان أسرع في HN. ومع ذلك، يبقى من غير المعروف ما إذا كانت هذه الفروق مرتبطة بسمات تركيبية أخرى للأوراق، وكيف يمكن أن تكون مرتبطة بالتعافي الفيزيولوجي وهي أمور تستحق المزيد من الدراسة. بالإضافة إلى ذلك، نقترح أن تؤخذ الفروقات داخل النوع في الفيزيولوجيا والكيمياء الحيوية استجابةً للجفاف وإعادة الري بعين الاعتبار، من أجل التمييز بين استراتيجيات النباتات لمقاومة الجفاف داخل النوع نفسه في ظل التغيرات المناخية المستقبلية.



الشكل (26): العلاقة بين التمثيل الضوئي للأوراق تحت إضاءة مشبعة (Asat) ونشاط إنزيم سوبر أوكسيد ديسميوتاز (SOD) (a-d)، وبين Asat وتركيز البرولين (Pro) (e-h) لأربعة مصادر وراثية (provenances) لشتلات *S. superba*. القيم معروضة كمتوسطات \pm الخطأ المعياري (n = 4). المعادلات الملائمة كما يلي:

$$(a) \text{ Asat} = 1.7\text{SOD} - 14.4 \text{ (فترة الثقة 95\% للانحدار: 1.47 إلى 2.01)}$$

$$(b) \text{ Asat} = 0.6\text{SOD} - 0.6 \text{ (فترة الثقة 95\% للانحدار: 0.39 إلى 0.79)}$$

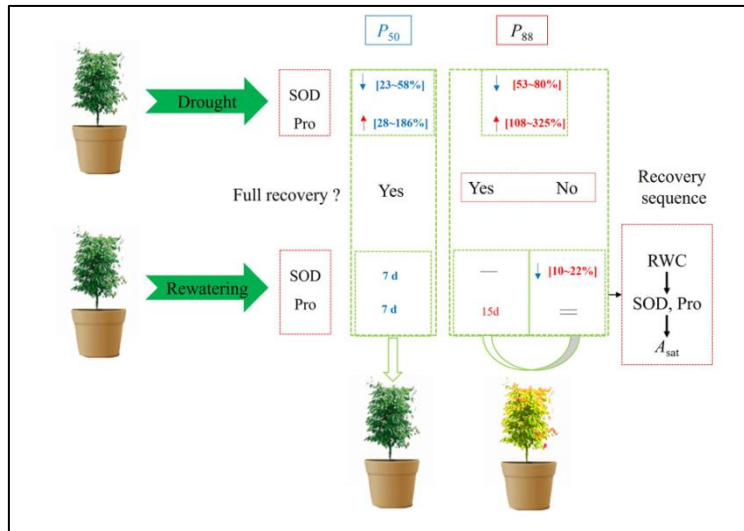
$$(c) \text{ Asat} = 0.8\text{SOD} - 1.0 \text{ (فترة الثقة 95\% للانحدار: 0.57 إلى 1.11)}$$

$$(e) \text{ Asat} = -0.2\text{Pro} + 19.1 \text{ (فترة الثقة 95\% للانحدار: -0.3 إلى -0.14)}$$

$$(f) \text{ Asat} = -0.1\text{Pro} + 11.6 \text{ (فترة الثقة 95\% للانحدار: -1 إلى -0.06)}$$

$$(g) \text{ Asat} = -0.3\text{Pro} + 27.5 \text{ (فترة الثقة 95\% للانحدار: -0.51 إلى -0.15)}$$

تم أخذ البيانات خلال ذروة الجفاف، وبعد 7 أيام و15 يوماً (لمصدر P88 فقط) من إعادة الري.



الشكل (27): يوضح العمليات البيوكيميائية التي تحدث في نبات *S. superba* خلال فترات الجفاف وبعد إعادة الري، بالإضافة إلى تسلسل تعافي الصفات الفيزيولوجية. أثناء الجفاف، أدى الإجهاد إلى انخفاض نشاط إنزيم سوبر أوكسيد ديسميوتاز (SOD) وارتفاع تركيز البرولين (Pro)، وكانت نسبة هذا التغير أكثر

وضوحاً تحت إجهاد P88 مقارنة بـ P50. كما أظهرت نتائج الدراسة أن نمط التعافي اختلف جزئياً بين المصادر الوراثية. ففي حالة التعافي من P50، تعافى أولاً محتوى الماء النسبي (RWC) خلال 3 أيام، ثم تبعه تعافي كل من SOD و Pro في غضون 7 أيام، ما أدى لاحقاً إلى تعافي التمثيل الضوئي للأوراق (Asat) بعد 7 أيام أو أكثر. أما في حالة P88، فقد تعافى البرولين بعد 15 يوماً، بينما لم يتعاف نشاط SOD حتى بعد مرور 30 يوماً، مما يدل على تأخر أو عدم اكتمال التعافي تحت ظروف الإجهاد الشديد. تشير الأسمم الزرقاء في المخطط إلى الانخفاض، بينما تشير الحمراء إلى الزيادة، في حين تدل كلمة "نعم" على تعافي الصفة إلى حالتها الطبيعية، و"لا" على عدم تعافها.

4-المقال الرابع:

Impact of cobalt and proline foliar application for alleviation of salinity stress in radish.

العنوان مترجم للغة العربية:

تأثير رش الأوراق بالكوبالت والبرولين في تخفيف إجهاد الملوحة في نبات الفجل.

المؤلفون:

Hira Inayat, Hassan Mehmood, Subhan Danish, Sulaiman Ali Alharbi, Mohammad Javed Ansari and Rahul Datta.

نُشر في مجلة BMC Plant Biology في عام 2024، في العدد 24، المقال رقم 287.

الهدف:

استكشاف تأثير تطبيق مستويات مختلفة من الكوبالت (Co) والبرولين عند استخدامهما رشاً على الأوراق على نبات الفجل المزروع في تربة متأثرة بالملوحة، وذلك بهدف معرفة مدى قدرة هذين العنصرين على التخفيف من آثار إجهاد الملوحة وتحسين النمو والإنتاجية.

الطرق و المواد:

موقع التجربة:

أُجريت التجربة في عام 2023 بموقع تابع لـ ResearchSolution، حيث جمعت عينات التربة لتحليل خصائصها الفيزيائية والكيميائية. بعد تجفيف العينات وتمريها عبر غربال 2 مم، تم تقييم خصائص التربة ومياه الري، والتي تم توضيحها في (الجدول 6).

جدول(6):الخصائص الأولية للتربة والري قبل التجربة.

Soil	Values	References	Irrigation	Values	References
pH	8.29	[43]	pH	7.34	[44]
ECe (dS/m)	5.09	[45]	EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	612	
SOM (%)	0.65	[46]	Carbonates (meq/L)	0.05	
TN (%)	0.025	[47]	Bicarbonates (meq/L)	7.66	
AP ($\mu\text{g}/\text{g}$)	8.34	[48]	Chloride (meq/L)	0.05	
EK ($\mu\text{g}/\text{g}$)	143	[49]	Ca+Mg (meq/L)	1.62	
ENa ($\mu\text{g}/\text{g}$)	231	[50]	Sodium (mg/L)	154	
Texture	Clay Loam	[51]			

AP = الفوسفور المتاح؛ TN = النيتروجين الكلي؛ ENa = الصوديوم القابل للاستخلاص؛ EK = البوتاسيوم القابل للاستخلاص؛ SOM = المادة العضوية في التربة
كبريتات الكوبالت والبرولين:

تم شراء كبريتات الكوبالت (II) سباعية الهيدرات والبرولين من موزع معتمد لشركة *Sigma* في ملتان، مع تحديد بيانات المنتج ورقم الدفعة لكل منهما، لضمان الجودة والتوثيق.

خطة المعاملة وتصميم التجربة:

تم استخدام مستويين من البرولين، وهما: بدون برولين، ومع برولين بتركيز 0.25 ملي مول (mM). كما تم تطبيق أربع معاملات من كبريتات الكوبالت (CoSO_4)، وهي:

1. معاملة ضابطة (بدون كوبالت)
2. 10 ملغم/لتر.
3. 15 ملغم/لتر.
4. 20 ملغم/لتر.

وقد تم تطبيق هذه المعاملات بأربع مكررات باستخدام تصميم عشوائي كامل (CRD).

جمع وتعقيم البذور:

تم شراء بذور الفجل المستخدمة في الدراسة من مورد محلي للبذور. وقد تم تعقيم هذه البذور باستخدام محلول هيبوكلوريت الصوديوم بتركيز 5%، تلاه ثلاث غسلات باستخدام الإيثانول بتركيز 95%. بعد ذلك، تم شطف البذور ثلاث مرات بماء منزوع الأيونات لإزالة أي بقايا من مواد التعقيم.

زراعة البذور والتخفيف:

تم زرع 4 بذور في 15 فبراير 2023، حيث كان كل وعاء يحتوي على 12 كجم من التربة. بعد الإنبات، تم تقليص عدد الشتلات في كل وعاء إلى 2 عن طريق التخفيف.

السماد:

خلال الزراعة، يُنصح بإضافة سماد روث الأبقار المتحلل جيداً إلى التربة مع كميات محددة من العناصر الغذائية لكل فدان. يشمل ذلك النيتروجين بمعدل 25 كجم (0.37 جم/كجم تربة) باستخدام اليوريا والفوسفور بمعدل 12 كجم (0.18 جم/كجم تربة) باستخدام السوبر فوسفات الأحادي.

الري:

هدف التجربة كان محاكاة رطوبة التربة بنسبة 65% من السعة الحقلية باستخدام جهاز قياس الرطوبة (YIERYI 4 in 1)، وفقاً للمنهجية الموصى بها في الدراسة.

الحصاد وجمع البيانات:

بعد 60 يوماً من الزراعة، تم حصاد النباتات لجمع البيانات. تم قياس الأوزان الطازجة للساق والجذور فور الحصاد. بعد ذلك، تم تجفيف العينات في فرن عند درجة حرارة 65 درجة مئوية لمدة 72 ساعة لضمان الوزن الثابت لتحديد الكتلة الجافة لكل من مكونات الساق والجذر.

محتوى الكلوروفيل:

تم قياس مستويات الكلوروفيل في أوراق النباتات الطازجة باستخدام طريقة *آرنون*. تم استخدام الأسيتون بنسبة 80% لاستخراج الكلوروفيل، ثم تم قياس الامتصاص عند الأطوال الموجية 663 و645 نانومتر. تم استخدام صيغ محددة لحساب كميات الكلوروفيل أ، الكلوروفيل ب، والكلوروفيل الكلي.

$$\text{الكلوروفيل أ (ملجم/جم)} = (12.7 \times A_{663}) - (2.69 \times A_{645}) \times V / (1000 \times W)$$

$$\text{الكلوروفيل ب (ملجم/جم)} = (22.9 \times A_{645}) - (4.68 \times A_{663}) \times V / (1000 \times W)$$

$$\text{الكلوروفيل الكلي (ملجم/جم)} = 20.2 \times OD_{645} + 8.02 \times OD_{663} \times V / 1000 (W)$$

الأنزيمات المضادة للأكسدة: (Antioxidants) تم قياس مجموعة من الأنزيمات والمركبات المرتبطة بمقاومة الإجهاد التأكسدي في نبات الفجل باستخدام تقنيات طيفية دقيقة:

- نشاط SOD تم تقييمه من خلال قياس انخفاض امتصاص مادة NBT عند 560 نانومتر.
- نشاط POD حدد بقياس الامتصاص عند 420 نانومتر وفقاً لطريقة موثقة.
- نشاط CAT تم عبر مراقبة انخفاض الامتصاص عند 240 نانومتر أثناء تفكك H_2O_2 .
- نشاط APX تم بقياس أكسدة حمض الأسكوربيك في وجود H_2O_2 عند 290 نانومتر.

كما تم تحديد:

- مستويات MDA عبر تفاعل مع حمض الثيوباربيتوريك (TBA) وقياس الامتصاص عند 532 نانومتر كمؤشر على تلف الأغشية.
- محتوى البرولين في الأنسجة باستخدام تفاعل لوني مع النينهيدرين.
- نشاط إنزيم GR من خلال متابعة اختزال GSSG إلى GSH باستخدام NADPH كمساعد إنزيمي.
- محتوى GSH قيس طيفياً بتفاعله مع مركب DTNB.
- محتوى ASA (فيتامين C) تم تحديده عبر قياس تحوله إلى DHA باستخدام مادة DCPIP.

تهدف هذه التحاليل إلى تقييم فعالية المعاملات المختلفة في تعزيز استجابة النبات لمواجهة إجهاد الملوحة.

تسرب الإلكتروليتات: (Electrolyte Leakage)

تم غسل أوراق النبات بماء منزوع الأيونات لإزالة أي شوائب سطحية قبل التحليل. بعد ذلك، تم أخذ قطع أوراق موحدة الوزن (حوالي 1 جرام لكل منها) باستخدام أسطوانة معدنية بقطر 1 سم. وُضعت كل قطعة في أنبوب اختبار يحتوي على 20 مل من ماء منزوع الأيونات، وحُفظت الأنابيب عند درجة حرارة 25°م لمدة 24 ساعة، للسماح للإلكترونات بالتسرب من الأنسجة إلى الماء المحيط. بعد فترة الحضانة، تم قياس التوصيلية الكهربائية الأولى للمحلول (EC1) باستخدام جهاز موصلية كهربائية معيار مسبقاً.

ثم تم تسخين الأنابيب في حمام مائي عند 120°م لمدة 20 دقيقة، وتم بعدها قياس التوصيلية الكهربائية الثانية (EC2).

$$\text{ElectrolyteLeakage}(\%) = (\text{EC1}/\text{EC2}) \times 100$$

المحتوى النسبي للماء (Relative Water Content – RWC)

يتم تحديد المحتوى النسبي للماء (RWC) في أنسجة النبات من خلال مقارنة محتوى الماء في العينة مع وزنها عند التشبع الكامل ووزنها التورمي بعد غمرها في الماء وصيغة حساب RWC هي:

$$\text{RWC} = (\text{TW} - \text{DW}) / (\text{FW} - \text{DW}) \times 100$$

التحليل الإحصائي:

تم استخدام النموذج الخطي المختلط لتحليل البيانات، حيث اعتُبر الكوبالت والبرولين كعوامل ثابتة، والتكرارات كعامل عشوائي. أُجري التحليل باستخدام برنامج OriginPro 2021، وتمت مقارنة المتوسطات باستخدام اختبار توكي للمقارنات المتعددة عند مستوى دلالة $p \leq 0.05$. كما شملت التحليلات إجراء مقارنات زوجية ورسوم بيانية عنقودية باستخدام نفس البرنامج.

النتائج:

طول الساق والجذر، والوزن الطازج والجاف للنبات:

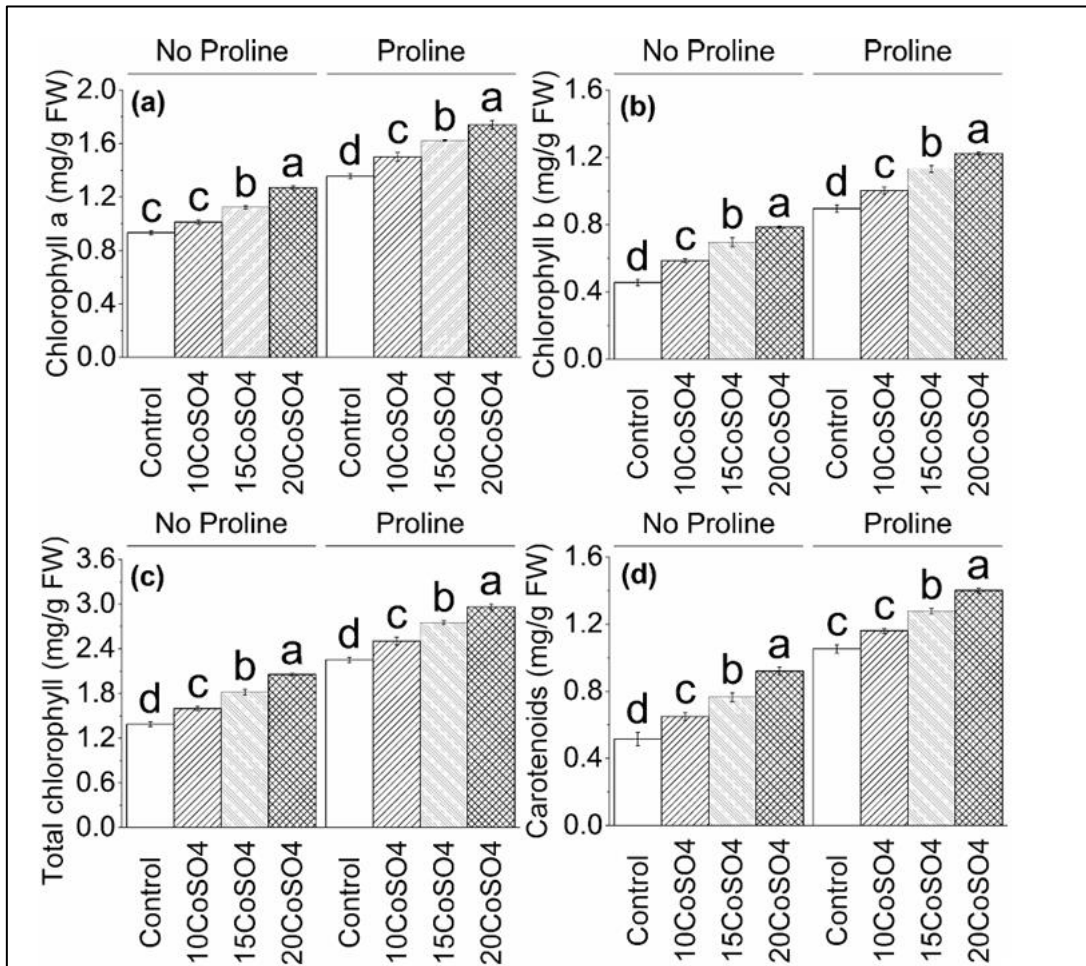
أظهرت المعاملة بكبريتات الكوبالت (CoSO_4) دون وجود البرولين زيادات تدريجية في طول الساق والجذر والوزن الطازج والجاف للنبات، حيث بلغت أعلى الزيادات عند تركيز 20 ملغم/لتر، مسجلةً 23%، 42%، و22%، و101% على التوالي مقارنةً بالمجموعة الضابطة. أما في وجود البرولين، فقد استمرت الزيادات في نفس المؤشرات لكن بنسب أقل، حيث كانت أعلاها أيضاً عند تركيز 20 ملغم/لتر CoSO_4 وبلغت 20%، 23%، و19%، و41% على التوالي. تشير النتائج إلى التأثير الإيجابي لكل من الكوبالت والبرولين على النمو الخضري للنبات، مع تعزيز واضح عند التركيزات الأعلى (الجدول 7).

جدول (7): تأثيرات المستويات المختلفة من كبريتات الكوبالت (10، 15، 20 ملغم/لتر) بدون و/أو مع البرولين على طول الساق والجذر، الوزن الطازج والجاف للنبات، محتوى البروتين، ومحتوى الكربونيل في فجل مزروع تحت إجهاد الملوحة. القيم تمثل متوسطات 3 مكررات \pm الانحراف المعياري

Applications of cobalt sulphate	Shoot length (cm)		Root length (cm)		Plant fresh weight (g)	
	No Proline	Proline	No Proline	Proline	No Proline	Proline
Control	14.82±0.33a	19.62±0.45a	6.79±0.35a	10.54±0.33a	9.49±0.28a	12.48±0.30a
10CoSO ₄	15.83±0.45b	21.15±0.45b	7.76±0.19b	11.48±0.40b	10.08±0.16b	13.14±0.23b
15CoSO ₄	16.92±0.48c	22.45±0.55c	8.62±0.26c	12.18±0.15c	10.66±0.27c	14.12±0.26c
20CoSO ₄	18.28±0.41d	23.49±0.43d	9.65±0.23d	12.98±0.33d	11.54±0.25d	14.85±0.28d
Applications of cobalt sulphate	Plant dry weight (g)		Protein content (mg/g FW)		Carbonyl content (μmol/g FW)	
	No Proline	Proline	No Proline	Proline	No Proline	Proline
Control	1.33±0.20a	3.12±0.14a	4.34±0.78a	12.25±0.74a	0.41±0.04a	0.8±0.04a
10CoSO ₄	1.84±0.06b	3.57±0.09b	6.02±0.52b	14.02±0.45b	0.54±0.04b	0.89±0.04b
15CoSO ₄	2.26±0.12c	3.87±0.06c	7.46±0.52c	15.25±0.50c	0.62±0.03c	0.98±0.01c
20CoSO ₄	2.68±0.20d	4.39±0.06d	9.85±0.93d	17.26±0.84d	0.72±0.03d	1.08±0.06d

الكوروفيل **a**، الكوروفيل **b**، الكوروفيل الكلي، والكاروتينويدات:

أظهرت المعاملة بكبريتات الكوبالت (CoSO₄) بدون برولين زيادات واضحة في محتوى الكوروفيل **a** و **b**، الكوروفيل الكلي، والكاروتينويدات، حيث كانت التحسينات الأعلى عند تركيز 20 ملغم/لتر، وبلغت نحو 36%، 73%، 48%، و79% على التوالي مقارنةً بالمجموعة الضابطة. في وجود البرولين، استمر التحسن في هذه المؤشرات، ولكن بنسب أقل قليلاً، حيث سجل أعلى تركيز (20 ملغم/لتر) زيادات بنسبة 28%، 37%، 32%، و33% في نفس المؤشرات مقارنةً بالمجموعة الضابطة. تشير النتائج إلى أن التفاعل بين CoSO₄ والبرولين يعزز من محتوى الأصباغ النباتية، وخاصة عند التركيزات الأعلى (الشكل 28).

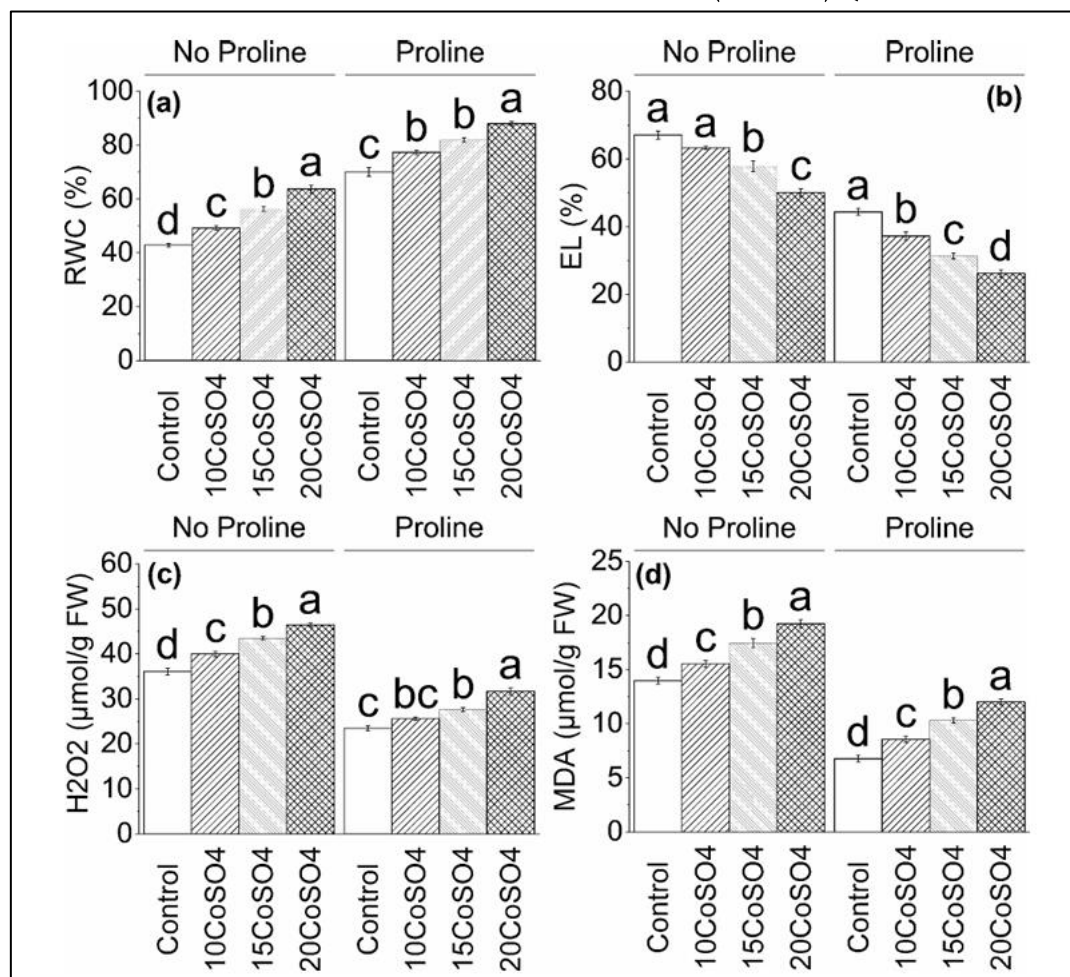


الشكل (28): تأثير المستويات المختلفة من CoSO₄ (10، 15، و20 ملغم/لتر) على الكوروفيل (a)، الكوروفيل (b)، الكوروفيل الكلي (c)، والكاروتينات (d) في نبات الفجل مع وبدون استخدام البرولين.

الأعمدة تمثل متوسط 4 مكررات \pm الخطأ المعياري (SE). الحروف المختلفة على الأعمدة تشير إلى فروقات معنوية عند مستوى دلالة $0.05 \geq$ حسب اختبار توكي (Tukey's test). CoSO_4 : كبريتات الكوبالت.

المحتوى النسبي للماء، تسرب الإلكتروليتات، بيروكسيد الهيدروجين (H_2O_2) ومالون ثنائي الألديهيد (MDA):

أظهرت المعاملة بكبريتات الكوبالت (CoSO_4) تأثيرات إيجابية على المحتوى النسبي للماء، حيث سجلت أعلى زيادة عند تركيز 20 ملغم/لتر سواء في وجود البرولين أو غيابه، بنسبة 49% و 26% على التوالي مقارنةً بالمجموعة الضابطة. كما أدى CoSO_4 إلى تقليل تسرب الإلكتروليتات، حيث كان الانخفاض الأقصى في وجود البرولين عند تركيز 20 ملغم/لتر، مسجلاً 41% مقارنةً بالضابطة. أما فيما يتعلق بـ بيروكسيد الهيدروجين (H_2O_2) ومالون ثنائي الألديهيد (MDA)، فقد أظهرت القيم ارتفاعاً تدريجياً مع زيادة تركيز CoSO_4 ، وكانت الزيادات الأكبر في وجود البرولين، حيث بلغ التأثير الأقصى عند 20 ملغم/لتر بنسبة 35% و 78% لـ H_2O_2 و MDA على التوالي. تشير النتائج إلى أن CoSO_4 يحسن الحالة المائية ويقلل تلف الغشاء الخلوي، بينما يؤدي أيضاً إلى زيادة تراكم المؤشرات المرتبطة بالإجهاد التأكسدي (الشكل 29).



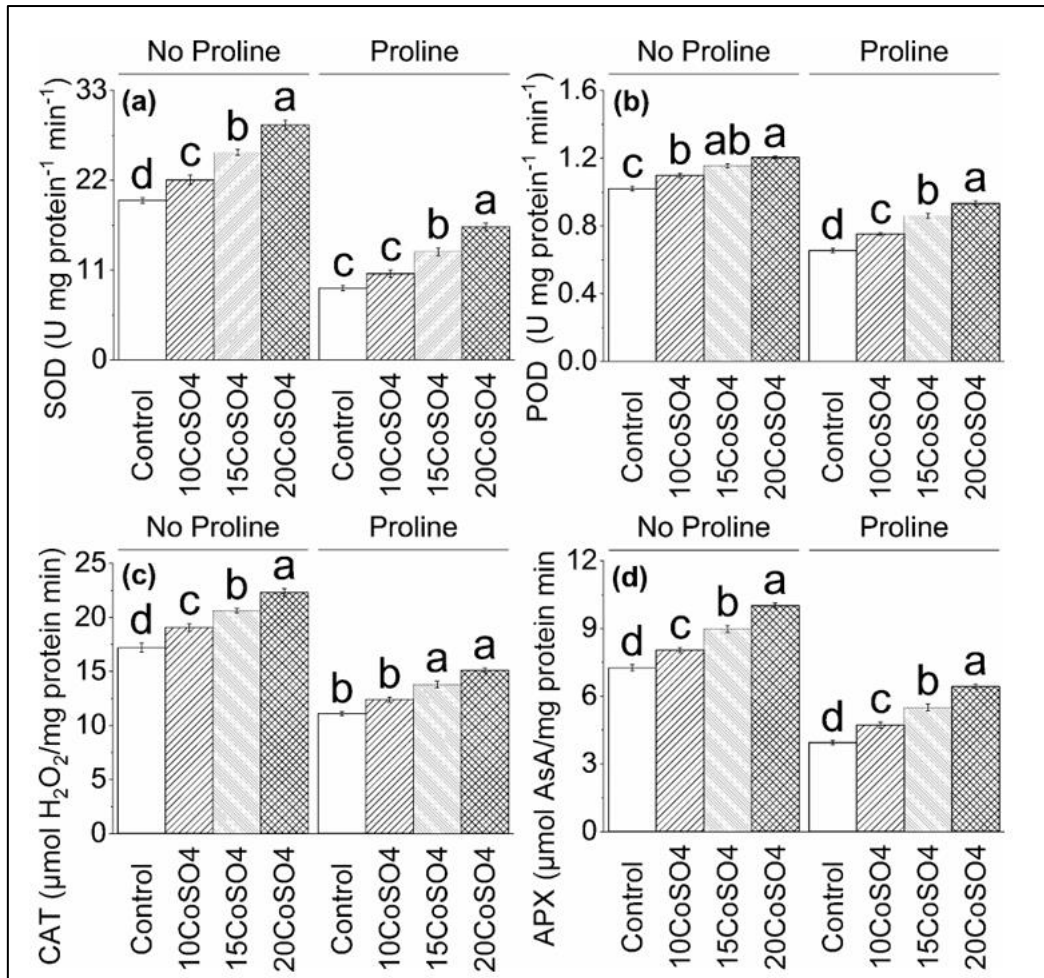
الشكل (29): تأثير المستويات المختلفة من CoSO_4 (10، 15، و20 ملغم/لتر) على المحتوى النسبي للماء (a)، تسرب الإلكتروليتات (b)، بيروكسيد الهيدروجين (c)، والمالوندي ألدهيد (d) (MDA) في نبات الفجل مع وبدون استخدام البرولين. الأعمدة تمثل متوسط 4 مكررات \pm الخطأ المعياري (SE). الحروف المختلفة على الأعمدة تشير إلى فروقات معنوية عند مستوى دلالة $0.05 \geq$ حسب اختبار توكي (Tukey's test). CoSO_4 : كبريتات الكوبالت، H_2O_2 : بيروكسيد الهيدروجين، MDA: المالوندي ألدهيد.

SOD و POD و CAT و APX:

أظهرت معاملات كبريتات الكوبالت (CoSO_4) بدون برولين زيادات تدريجية في نشاط الإنزيمات المضادة للأكسدة (SOD، POD، CAT، و APX)، حيث كانت الزيادة الأكبر عند تركيز 20 ملغم/لتر، مسجلة حتى 47% في SOD و 38% في APX مقارنةً بالمجموعة الضابطة. أما في وجود البرولين، فقد ازدادت الفعالية بشكل ملحوظ، حيث سجل تركيز 20 ملغم/لتر CoSO_4 أعلى زيادات:

SOD:87% ; POD:49% ; CAT:36% ; APX:63%

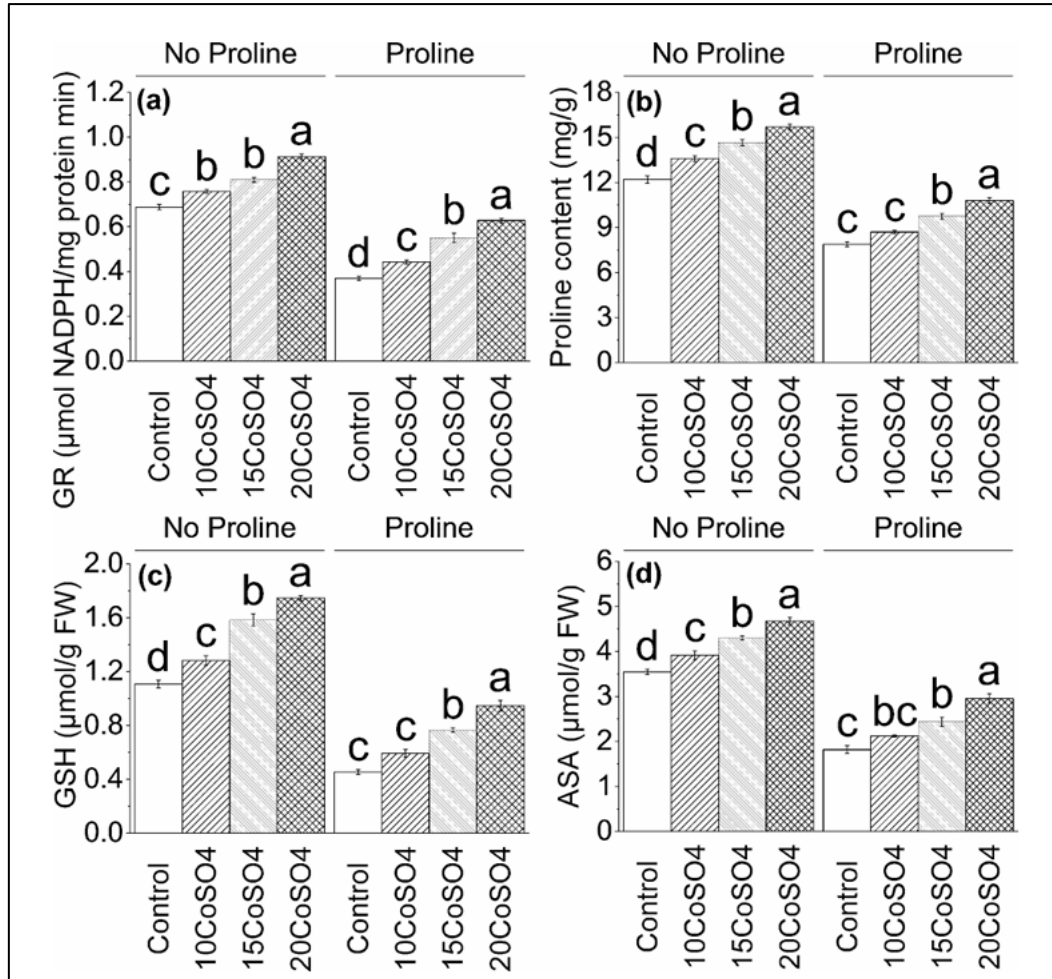
تشير هذه النتائج إلى وجود تأثير تفاعلي قوي بين الكوبالت والبرولين في تعزيز نظام الدفاع المضاد للأكسدة لدى النبات، مما قد يساهم في تحسين مقاومته للإجهاد التأكسدي (الشكل 30).



الشكل (30): تأثير المستويات المختلفة من CoSO_4 (10 ، 15 ، و 20 ملغم/لتر) على نشاط إنزيم (a) SOD ، (b) (POD) ، (c) (APX) ، و (d) (CAT) في نبات الفجل مع وبدون استخدام البرولين. الأعمدة تمثل متوسط 4 مكررات \pm الخطأ المعياري (SE). الحروف المختلفة على الأعمدة تشير إلى فروقات معنوية عند مستوى دلالة ≥ 0.05 حسب اختبار توكي (Tukey's test). CoSO_4 : كبريتات الكوبالت، POD : إنزيم البيروكسيداز، SOD: إنزيم سوبر أوكسيد ديسموتاز، APX: إنزيم أسكورات بيروكسيداز، CAT: إنزيم الكاتالاز.

الـ GR ، البرولين ، GSH ، و AsA:

أظهرت معاملة النباتات بكبريتات الكوبالت (CoSO_4) تحسناً ملحوظاً في مستويات الجلوتاثيون ريدوكتاز (GR)، البرولين، الجلوتاثيون المختزل (GSH)، والأسكورات (AsA)، خاصة عند تركيز 20 ملغم/لتر. في غياب البرولين، كانت أعلى الزيادات عند CoSO_4 20، حيث بلغت 33% لـ GR، و 29% للبرولين، و 58% لـ GSH، و 32% لـ AsA مقارنةً بالمجموعة الضابطة. أما في وجود البرولين، فقد كانت التأثيرات أكثر وضوحاً، وبلغت الزيادة القصوى عند CoSO_4 20 أيضاً: 70% لـ GR، و 37% للبرولين، و 108% لـ GSH، و 62% لـ AsA. تشير هذه النتائج إلى دور تآزري بين الكوبالت والبرولين في تعزيز آليات الدفاع غير الإنزيمية في النبات، مما يعكس استجابة فيزيولوجية قوية لمواجهة ظروف الإجهاد (الشكل 31).



الشكل (31): تأثير المستويات المختلفة من CoSO_4 (10، 15، و 20 ملغم/لتر) على (a) GR، البرولين (b، c) GSH، و (d) ASA في نبات الفجل مع وبدون استخدام البرولين. الأعمدة تمثل متوسط 4 مكررات \pm الخطأ المعياري (SE). الحروف المختلفة على الأعمدة تشير إلى فروقات معنوية عند مستوى دلالة $0.05 \geq$ حسب اختبار توكي (Tukey's test). CoSO_4 : كبريتات الكوبالت، GR: إنزيم غلوتاثيون ريدوكتاز، GSH: الغلوتاثيون المختزل، ASA: حمض الأسكوربيك.

محتوى البروتين والمركبات الكربونيلية:

أظهرت النتائج أن محتوى البروتين والكاربونيل ارتفع بشكل واضح نتيجة المعالجة بـ CoSO_4 ، وكانت الزيادة أكثر وضوحاً عند غياب البرولين مقارنةً بحضوره.

• بدون إضافة البرولين: زيادات تدريجية في محتوى البروتين (39%، 72%، 127%) والكاربونيل (33%، 54%، 78%) عند تراكيز 10، 15، و 20 CoSO_4 على التوالي.

• مع إضافة البرولين: لوحظت زيادات أقل نسبياً في البروتين (14%، 24%، 41%) والكاربونيل (11%، 23%، 35%) عند نفس التراكيز.

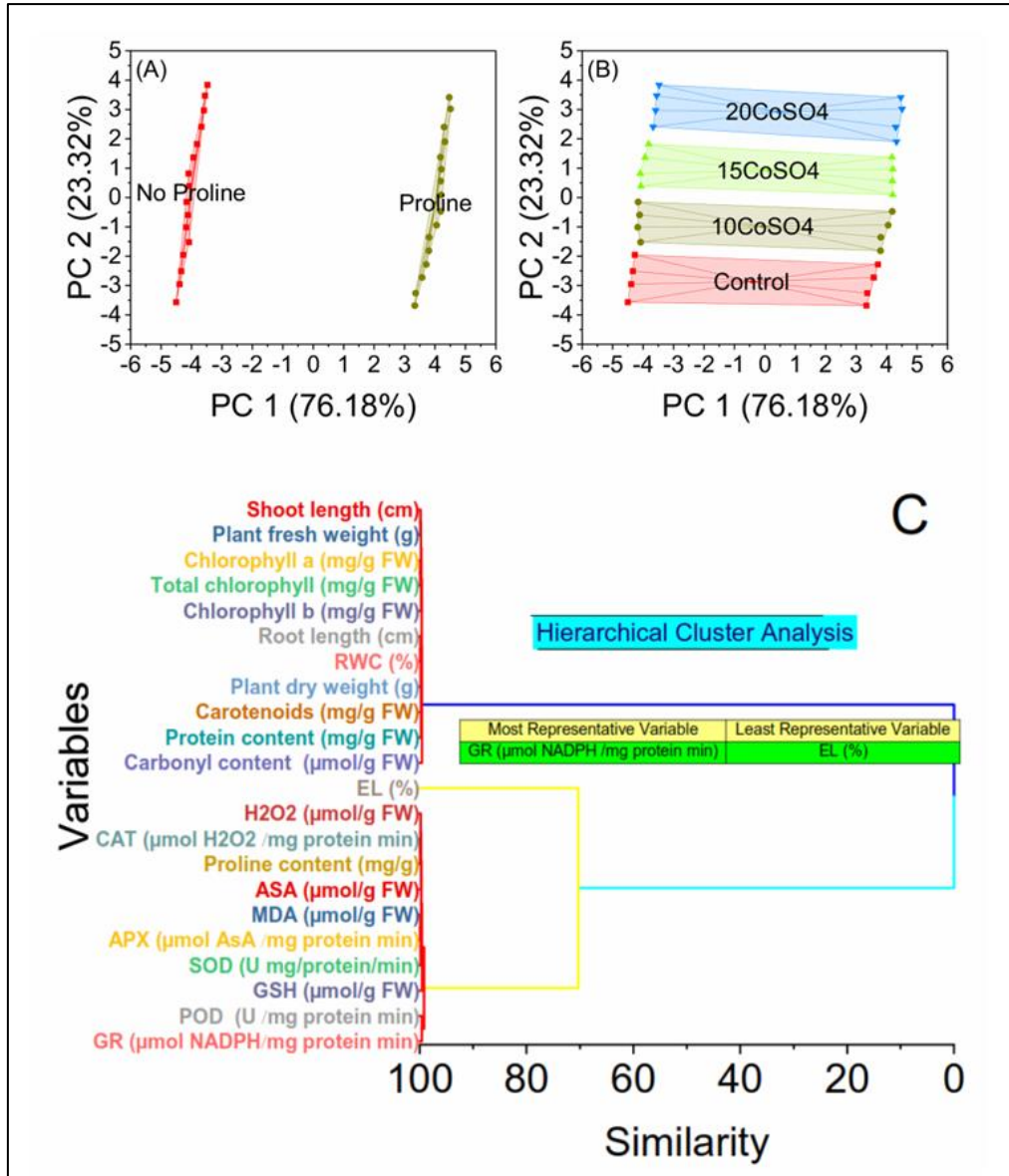
تشير النتائج إلى أن CoSO_4 يعزز محتوى البروتين والكاربونيل، بينما يخفف البرولين من هذا التأثير، كما هو موضح في الجدول (8).

الرسم البياني للمغلف المحدب: (Convex Hull)

أظهر تحليل المغلف المحدب (Convex Hull) تمايزاً واضحاً بين العينات اعتماداً على وجود البرولين. حيث سجلت العينات بدون برولين قيمة سالبة على المحورين PC1 و PC2، مما يعكس انخفاض محتوى البرولين، في حين سجلت العينات التي تحتوي على البرولين قيمة موجبة، مشيرة إلى ارتفاع المحتوى. يمثل المحور PC1 النسبة الأكبر من التباين (76.18%) ويعكس بشكل رئيسي اختلافات مرتبطة بمحتوى البرولين، بينما يوضح (23.32%) (PC2) تبايناً إضافياً غير مرتبط مباشرة بالبرولين (الشكل A 32). كما أظهرت النتائج تمايزاً واضحاً لمجموعة الضبط التي تموضعت منفصلة بقيم سالبة على كلا المحورين، دالة على انخفاض المؤشرات المقاسة، مقارنةً بالعينات المعالجة بـ $CoSO_4$ التي أظهرت قيمة موجبة، خصوصاً عند التراكيز الأعلى، مما يشير إلى ارتفاع في تلك المؤشرات. وتبين وجود نمط تصاعدي في القيم مع زيادة تركيز $CoSO_4$ ، مما يدل على استجابة تعتمد على الجرعة (الشكل B32).

الرسم البياني للتصنيف العنقودي الهرمي (Hierarchical Cluster Plot):

أظهر تحليل التصنيف العنقودي الهرمي تفاوتاً في درجات التشابه بين المعايير الفسيولوجية المختلفة. سجل أقل تشابه بين نشاط إنزيم الكاتالاز ومحتوى البرولين (0.09517)، بينما كان التشابه أعلى قليلاً بين تركيز MDA ونشاط APX (0.11681)، وكذلك بين الكلوروفيل a والكلوروفيل الكلي (0.1182). تشابه متوسط لوحظ بين طول الساق، الوزن الطازج، وطول الجذر/محتوى الماء النسبي (0.15281 و 0.16208)، في حين تقاربت درجات التشابه بين نشاط SOD وتركيز بيروكسيد الهيدروجين (0.1736 و 0.18088). كما أظهر كل من الوزن الجاف للنبات والكاروتينات تشابهاً نسبياً مرتفعاً (0.20733 و 0.22728). ارتفعت درجات التشابه بين تركيز الأسكوربات ومحتوى البروتين (0.2494 و 0.25318)، والكلوروفيل b أظهر تشابهاً ملحوظاً (0.3156). كما لوحظ تقارب واضح بين نشاط إنزيمي POD و GR (0.41363)، وكذلك بين محتوى الكربونيل وتركيز الجلوتاثيون (0.42957 و 0.44247). الجدير بالذكر أن فقدان الإلكتروليتات أظهر تشابهاً مرتفعاً للغاية (29.69999). كما اتضح أن المعالجتين 41 و 43 سجلتا معاملات تشابه عالية جداً (99.57043 و 70.30001)، ما يشير إلى وجود علاقة قوية بينهما (الشكل 32 C).



الشكل (32): مخططات تجميعية باستخدام الغلاف المحدب (Convex Hull) للمعاملات (A)، والبرولين (B)، ومخططات التجميع الهرمي (Hierarchical Cluster) للصفات المدروسة (C). المناقشة:

الإجهاد الملحي: (Salinity Stress)

يُعتبر الإجهاد الملحي أحد أبرز التحديات البيئية التي تؤثر سلباً على الإنتاج الزراعي، إلى جانب الجفاف والاحتباس الحراري (Mukhopadhyay *et al.*, 2021). وتعد ملوحة التربة من المشكلات الرئيسية التي تُعيق نمو المحاصيل وإنتاجيتها، مما يجعل معالجتها ضرورية لتحقيق الأمن الغذائي (Atta *et al.*, 2023; Godfray *et al.*, 2014). يحدث الإجهاد الملحي تأثيرات متعددة على النباتات تشمل تغييرات مورفولوجية وكيميائية حيوية، مثل انخفاض طول الجذور والسيقان، تقليل إنتاج الخضروات، انخفاض محتوى الكلوروفيل، وتغيرات في المركبات الثانوية كالمركبات المؤكسدة، وجزيئات الإشارة،

والهرمونات (Munns *et al.*, 2006; Abdelaal *et al.*, 2022). كما يؤدي إلى تراجع معدل الإنبات ونمو البادرات. يسبب الإجهاد الملحي أيضاً إجهاداً تأكسدياً داخل النبات، يؤثر سلباً على عملية الأيض، ويقلل من محتوى السكريات الذائبة والكلوروفيل (Khanet *al.*, 2022). من حيث الآلية، تؤثر الملوحة على نبات الفجل عبر عدة مسارات مترابطة واستجابات فيزيولوجية (Fahadet *al.*, 2015; Yildirim *et al.*, 2008)، تبدأ بـ: اختلال التوازن الأسموزي داخل الخلايا، مما يؤدي إلى فقدان الماء وضعف امتصاص العناصر الغذائية (Arifet *al.*, 2020). تحفيز الإجهاد التأكسدي نتيجة التراكم الزائد لـ ROS، مما يسبب تلف البروتينات، الدهون، والـ DNA. اضطراب التوازن الهرموني، لا سيما في مستوى حمض الأبسيسيك (ABA) المسؤول عن استجابات النبات للضغوط (Fahadet *al.*, 2015).

كما تؤثر الملوحة على التعبير الجيني المرتبط بتوازن الأيونات والتنظيم الأسموزي (Aminet *al.*, 2021)، حيث تُفعل الجينات الناقلة للأيونات للتخلص من الأيونات السامة، وتُفعل الجينات المرتبطة بالإجهاد لتحسين قدرة النبات على التكيف. استجابة لذلك، تعمل النباتات على تجميع المواد الذائبة المتوافقة مثل البرولين والجلاليسين بيتين للحفاظ على التوازن الأسموزي وحماية الخلايا من الجفاف (Singhet *al.*, 2015). بالإضافة إلى ذلك، يتم تنشيط أنظمة الدفاع المضادة للأكسدة، بما في ذلك إنزيمات مثل الكاتالاز، السوبر أوكسيد ديسميوتاز، والبيروكسيداز، بهدف إزالة ROS والحد من الأضرار التأكسدية. تساعد هذه الآليات نبات الفجل على التكيف مع آثار الإجهاد الملحي والتخفيف منها، رغم أن فعالية التكيف تختلف باختلاف التركيب الوراثي والبيئة المحيطة. وفي المعاملة الضابطة، لوحظت تأثيرات مشابهة، حيث تسبب الإجهاد الملحي بانخفاض واضح في مؤشرات النمو، ومحتوى الكلوروفيل، ومحتوى الماء النسبي، إلى جانب اضطرابات في العمليات الفسيولوجية والكيميائية الحيوية في الجذور والسيقان.

كبريتات الكوبالت (Cobalt Sulfate):

أظهرت الدراسة أن المعاملة الورقية بكبريتات الكوبالت كان لها تأثيرات إيجابية ملحوظة على نبات الفجل تحت الإجهاد الملحي، حيث أدت إلى تحسينات كبيرة في طول الساق والجذر، والوزن الطازج والجاف للنبات، مما يدل على أن الكوبالت يعزز النمو العام للنبات حتى في ظروف الملوحة (Gadet *al.*, 2020; Akeel et Jahan., 2018). يرجح أن الكوبالت يساهم في انقسام واستطالة الخلايا، مما يعزز هذه الصفات (Aliet *al.*, 2018; Roychoudhyry et chakraborty, 2022).

كما ساهمت المعاملة بالكوبالت في رفع مستويات الكلوروفيل a و b، والكلوروفيل الكلي، والكاروتينات، مما يحسن من كفاءة التمثيل الضوئي ويزيد من تحمل النبات للإجهاد، عن طريق تحفيز تخليق الكلوروفيل ومنع تحلله (Akeel et Jahan., 2020; Jahanet *al.*, 2019).

وأظهرت النباتات المعاملة بالكوبالت تحسناً في محتوى الماء النسبي (RWC) وانخفاضاً في تسرب الإلكترونات (EL)، مما يشير إلى حالة مائية جيدة وسلامة الأغشية الخلوية (Brenghiet *al.*, 2022).

ورغم ارتفاع مؤشرات الإجهاد التأكسدي مثل بيروكسيد الهيدروجين (H_2O_2) والمالوندي ألدهيد (MDA)، إلا أن الكوبالت ساعد في تفعيل أنظمة الدفاع المضادة للأكسدة، مما ساعد في التخلص من ROS وحماية الخلايا النباتية (Tourky *et al.*, 2023). فيما يخص المعايير الكيميائية الحيوية، فإن الكوبالت أثر بشكل إيجابي على مركبات مثل الجلوتاثيون (GSH)، وحمض الأسكوربيك (ASA)، وإنزيم جلوتاثيون ريدوكتاز (GR)، وقد أثرت المعاملة الورقية بالكوبالت على محتوى البروتين، والبرولين، والجلوتاثيون (GSH)، وحيث يعمل GSH كمضاد للأكسدة يحمي الخلايا من الضرر الناتج عن ROS تحت ظروف الإجهاد (Hasanuzzaman *et al.*, 2021)، بينما ASA يُعد عاملاً مساعداً للعديد من الإنزيمات المرتبطة بالدفاع المضاد للأكسدة والعمليات الأيضية الأخرى (RajRai *et al.*, 2021). ويساهم GR في إعادة تدوير GSH المؤكسد إلى شكله المختزل، مما يُعزز دفاعات الخلية المضادة للأكسدة في ظل ظروف الإجهاد (Sofa *et al.*, 2015). حمض الأسكوربيك (ASA) في نباتات الفجل تحت ظروف الإجهاد الملحي، مما يُشير إلى تحسن في تحمل الإجهاد وزيادة في النشاط الأيضي (Salam *et al.*, 2023). من الممكن أن الكوبالت يُعزز من تخليق البروتين، ويحفظ تراكم المواد الأسموزية الواقية، ويُعدل من نظام الدفاع المضاد للأكسدة، مما يزيد من مقاومة النبات للإجهاد ويحسن من صحته العامة (Gomez-Merino *et Trejo-Téllez*, 2018). آليات الكوبالت تشمل تعزيز النمو، وتحسين التمثيل الضوئي، والحد من الإجهاد التأكسدي، وتنظيم المسارات الكيميائية الحيوية المرتبطة بالإجهاد، مثل تعديل التعبير الجيني ونشاط الإنزيمات ومستويات المركبات الأيضية (Huet *et al.*, 2021; Isah, 2019).

وأكدت النتائج فاعلية كبريتات الكوبالت، حيث سُجّلت زيادات ملحوظة في محتوى الكلوروفيل وخصائص النمو عند استخدامها كمُحسّن للتربة مع البرولين، وكانت أفضل النتائج عند تطبيق $CoSO_4$ ، لا سيما فيما يتعلق بزيادة محتوى البرولين.

البرولين (Proline):

البرولين هو مركب طبيعي تلجأ النباتات إلى تراكمه كآلية دفاعية لمواجهة الإجهادات البيئية مثل الملوحة (Siddique *et al.*, 2018; Mansour *et Ali*, 2017)، حيث يعمل كعامل أسموزي يُنظم توازن الماء داخل الخلايا (Hayat *et al.*, 2012; Khanna Chopra *et al.*, 2019)، وكما يلعب دور مضاد للأكسدة من خلال إزالة أنواع الأوكسجين التفاعلية (ROS) الضارة (Hossain *et al.*, 2014). يحدث الإجهاد الملحي عند وجود تركيزات عالية من الأملاح في التربة أو المياه، مما يؤدي إلى اضطراب وظائف النبات الطبيعية (Carillo *et al.*, 2011). وتحت هذا الإجهاد، تعاني نباتات الفجل من انخفاض في النمو، وانخفاض في محتوى الكلوروفيل، بالإضافة إلى تلف خلوي ناتج عن الإجهاد التأكسدي (Yaldrim *et al.*, 2008).

تطبيق البرولين كرزاق ورقي على نباتات الفجل تحت الملوحة أظهر نتائج إيجابية؛ منها الحفاظ على طول الساق والجذر والوزن الطازج والجاف (Yaqoob *et al.*, 2019)، نتيجة تعزيز النمو والكتلة الحيوية بفضل دور البرولين كعامل أسموزي يُحافظ على ضغط الامتلاء (Hosseini *et al.*, 2022). كما يساهم

البرولين في الحفاظ على مستويات الكلوروفيل والكاروتينات، الضرورية لعملية التمثيل الضوئي. إذ يؤدي الإجهاد الملحي إلى انخفاض في محتوى الكلوروفيل والكاروتينات، مما يضعف من كفاءة التمثيل الضوئي (Leiva-Ampuero *et al.*, 2020). أما استخدام البرولين فيحافظ على هذه المستويات، ربما من خلال تثبيت أغشية التايلاكويد والحفاظ على مسارات تصنيع الأصباغ (Hayat *et al.*, 2012). كذلك، ساهم في تقليل تسرب الإلكترونات وتحسين محتوى الماء النسبي (RWC)، مما يدل على تحسن حالة الأغشية وسلامة الخلايا (Zahedi *et al.*, 2023; Irshad *et al.*, 2024; Semid *et al.*, 2019). كما قلل من بيروكسدة الدهون، محافظاً على البنية الخلوية (Shafiq *et al.*, 2019). البرولين أيضاً ينشط الإنزيمات المضادة للأكسدة مثل SOD، POD، CAT، APX، وGR، التي تساعد في إزالة ROS والحفاظ على التوازن التأكسدي (Hossain *et al.*, 2014; Rohman *et al.*, 2015). كما أن البرولين يقلل من تحلل البروتين وتكون الكربونيل، وهي مؤشرات على الضرر التأكسدي للبروتينات داخل خلايا النبات تحت الإجهاد الملحي (Hussain *et al.*, 2019). وتُشير نتائجه إلى أنه يحافظ على محتوى البروتين ويقلل من مستويات الكربونيل من خلال تثبيت بنية البروتين ومنع التعديلات الناتجة عن ROS (Liang *et al.*, 2013) ويؤدي تراكم البرولين سواء طبيعياً أو عند رشه إلى تعزيز التكيف الأسموزي والتخلص من ROS، كما يؤثر على مستويات مضادات الأكسدة الأخرى مثل GSH وASA، مما يحسن استجابات النبات للإجهاد (Hossain *et al.*, 2019). تُظهر كل هذه الآليات أن البرولين فعال في دعم النمو، كفاءة التمثيل الضوئي، حماية البروتينات، تقوية النظام المضاد للأكسدة، وضبط التوازن الأسموزي والتأكسدي، وبالتالي تحسين مقاومة نبات الفجل للإجهاد الملحي (Khalid *et al.*, 2022). وفي الدراسة الحالية، أثبت دمج 20 CoSO₄ مع الرش الورقي بالبرولين فعاليته الكبيرة في تقليل آثار الإجهاد الملحي، من خلال دعم النمو، الحفاظ على التمثيل الضوئي، وسلامة الخلايا.

5-المقال الخامس:

Proline accumulation in response to high temperature in winter-acclimated shoots of *Prunus persica*: a response associated with growth resumption or heat stress?

العنوان مترجم للغة العربية:

تراكم البرولين استجابة لدرجات الحرارة المرتفعة في براعم نبات الخوخ *Prunus persica* المتأقلمة مع

البرودة: استجابة مرتبطة باستئناف النمو أو الإجهاد الحراري؟

المؤلفون:

Hyunsuk Shin , Sewon Oh , Rajeev Arora , and Daeil Kim .

الهدف:

تحديد ما إذا كان تراكم البرولين (Pro) في أفرع أشجار الخوخ المتأقلمة على البرودة عند تعرضها لدرجات حرارة مرتفعة، يُعدّ استجابة فيزيولوجية لإجهاد الحرارة، أم أنه يمثل تحضيراً أيضاً لاستئناف النمو باستخدام أشجار الخوخ من صنف *Daewol*.

الطرق و المواد:

المواد النباتية:

استخدمت الدراسة أشجار خوخ بعمر سنة واحدة من صنف *Daewol*، مطعمة على شتلات خوخ بري، وذلك نظراً لحساسيتها العالية لتغيرات درجات الحرارة كما أثبتت دراسات سابقة. في 2 فبراير 2015، تم اقتلاع 35 شجرة وزراعتها في أوعية سعة 2 لتر تحتوي على تربة طينية رملية، ووضعت في الخارج لمدة 4 أيام في ظروف مناخية باردة (متوسط درجة الحرارة 0.6°C). تم تقسيم الأشجار إلى مجموعتين: 20 شجرة للدراسة الأولى و15 للدراسة الثانية. وقد خضعت الأشجار لمعالجات حرارية (HT) ومعالجات باردة (CT) كما هو موضح في مخطط تجريبي (الشكل 33). بعد كل معالجة، جُمعت الأفرع العلوية من 5 أشجار، وجرى تجميدها سريعاً في النيتروجين السائل، ثم نُقلت إلى المختبر لتحليل محتوى البرولين وتعبير الجينات المرتبطة بتخليقه.

المعالجة الحرارية (HT) والمعالجة الباردة (CT) للنباتات خلال حالة السكون البيئي (الدراسة 1):

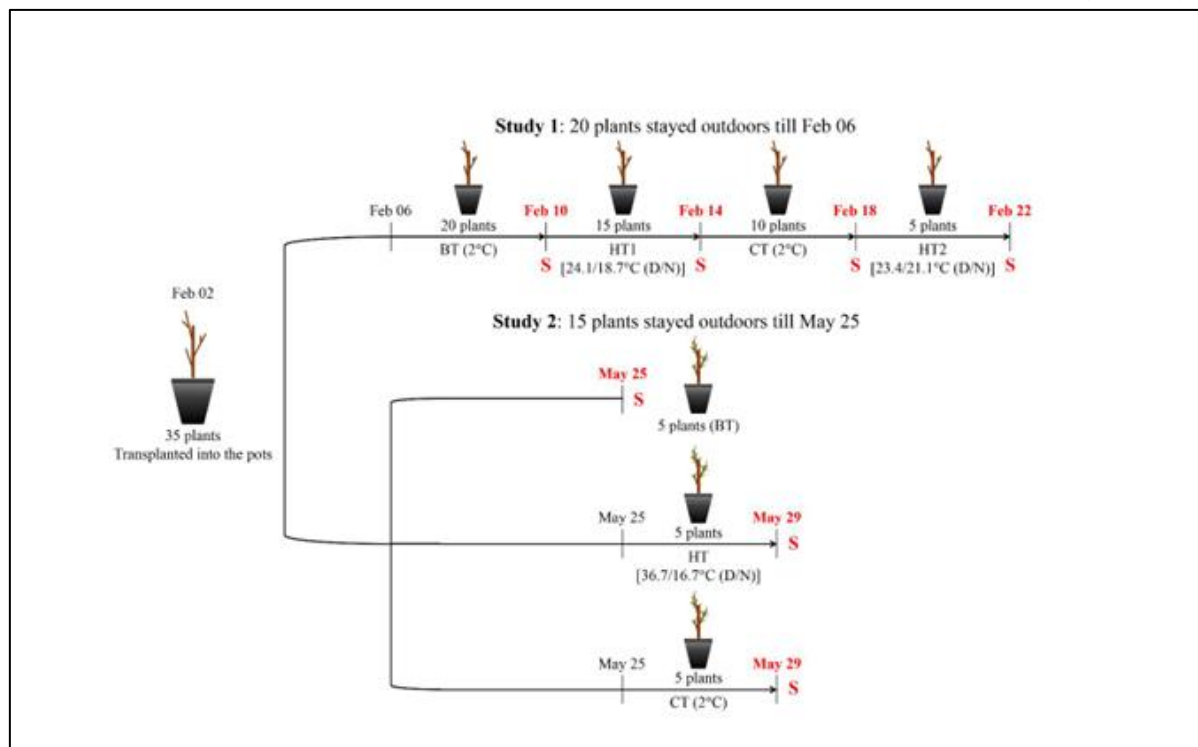
تم التحقق من حالة السكون في أشجار الخوخ "*Daewol*" من خلال مراقبة تفتح البراعم في ظروف بيت زجاجي مدفأ. أظهرت النتائج أن احتياج البراعم للتبريد قد تم استيفائه بحلول 20 يناير، ما يشير إلى أن الأشجار دخلت مرحلة السكون البيئي (ecodormancy). في 6 فبراير، تم نقل 20 شجرة مزروعة في أوعية من الهواء الطلق إلى غرفة باردة (2°C) مع إضاءة صناعية (70 ميكرومول/م²/ثانية) لمدة 4 أيام لتكوين مجموعة ما قبل المعالجة (BT). بعد ذلك، خضعت الأشجار إلى سلسلة من ثلاث معالجات حرارية وباردة كما يلي: HT1: تعريض النباتات لمدة 4 أيام لحرارة $18.7/24.1^{\circ}\text{C}$ (نهار/ليل) في بيت زجاجي طبيعي الإضاءة (105 ميكرومول/م²/ثانية).

CT: إعادة النباتات إلى برودة 2°C لمدة 4 أيام تحت إضاءة فلورية.

HT2: تعريض النباتات مرة أخرى لحرارة $21.1/23.4^{\circ}\text{C}$ (نهار/ليل) لمدة 4 أيام.

تم جمع عينات من الأفرع بعد كل مرحلة، ولم يلاحظ أي تفتح للبراعم خلال فترة التجربة. سبب استخدام معالجتين حراريتين (HT1 و HT2): اعتمد هذا التصميم على نتائج سابقة بينت أن المعالجة الحرارية الأولى تؤدي إلى فقدان التصلب (deacclimation)، بينما تساعد المعالجة الباردة التالية على استعادة التأقلم (reacclimation)، ثم يُفقد مجدداً بعد HT2. وقد ارتبطت هذه التغيرات بتقلبات في بروتينات ديهيدرين، وتعبير الجينات، وتراكم السكريات، وهي عناصر مرتبطة بآليات التأقلم مع البرودة. وتهدف هذه الدراسة

إلى متابعة تراكم البرولين استجابةً لتسلسل المعالجات (BT → HT1 → CT → HT2)، كما هو موضح في (شكل 33).



الشكل (33): رسم توضيحي لترتيب التجربة (المعالجات) وإجراءات/تواريخ أخذ العينات في الدراستين 1 و 2 على *Prunus persica* صنف "Daewol". تشير الحرف S (باللون الأحمر) إلى تاريخ أخذ العينة (سوق مأخوذة من 5 أشجار). تمثل درجات الحرارة (نهار/ليل) المتوسطات خلال فترة المعالجة التي استمرت 4 أيام.

المعالجة الحرارية (HT) والمعالجة الباردة (CT) للنباتات خلال فترة النمو (الدراسة 2):

في الدراسة الثانية، تم استخدام 15 شجرة خوخ مزروعة في أوعية، نُميت في الهواء الطلق تحت ظروف طبيعية. بتاريخ 25 مايو، أي بعد 30 يوماً من الإزهار الكامل، تم اختيار 5 نباتات لجمع أفرع منها كمجموعة "قبل المعالجة" (BT) [درجة الحرارة C°20.9/24.7 (نهار/ليل)، فترة إضاءة 14.5 ساعة، شدة إضاءة 1357 ميكرومول/م²/ثانية].

أما النباتات الـ 10 المتبقية، فقد تم تقسيمها إلى مجموعتين: معالجة حرارية (HT): تعرّضت لدرجات حرارة مرتفعة في بيت زجاجي طبيعي الإضاءة بمتوسط C°16.7/36.7 (نهار/ليل) وشدة إضاءة 603 ميكرومول/م²/ثانية. معالجة باردة (CT): وُضعت في غرفة بدرجة حرارة C°2 تحت إضاءة فلورية بقوة 805 ميكرومول/م²/ثانية، لمدة 14.5 ساعة يومياً. تمت جميع المعالجات لمدة 4 أيام متتالية.

قياس Fv/Fm (كفاءة التمثيل الضوئي):

تم قياس الفلورة الكلوروفيلية (Fv/Fm) يومياً خلال المعالجتين الحرارية والباردة في الدراسة الثانية، باستخدام جهاز (PAM 2000) بين الساعة 2 و3 مساءً. قبل القياس، تم تظليل الأوراق لمدة 30 دقيقة. اختيرت 3 نباتات عشوائياً، وتم استخدام ورقتين من كل نبات، وقد عرضت النتائج كمتوسط لثلاث مكررات تقنية.

تحليل البرولين (Pro):

تم تحديد محتوى البرولين وفقاً للبروتوكولات الموضحة في (1973) Bates و Patton وآخرين (2007)، مع بعض التعديلات الطفيفة.

استخلاص الحمض النووي الريبي (RNA) وتحليل التعبير الجيني النسبي:

تم في هذه الدراسة استخلاص الحمض النووي الريبي الكلي (Total RNA) وتنفيذ تحليل qPCR وفقاً لما ورد في Shin وآخرين (2016). اعتمدت المقارنة في التعبير الجيني النسبي على عينات BT من الدراستين 1 و2، والتي اعتُبرت كمرجع (بقيمة 1). وشملت البيانات مكررين بيولوجيين، كل منهما يحتوي على ثلاث مكررات تقنية لكل جين مرجعي.

تضمن (الجدول 9) قائمة بالجينات المستهدفة والمرجعية بالإضافة إلى معلومات البادئات المستخدمة في qPCR. وأظهر تحليل BLAST تماثلاً عالياً بين تسلسلات *Prunus mume* وتسلسلات EST الخاصة بالخوخ: (89% في جين P5CS 439 نوكلويدياً)، (85% في P5CR 206 نوكلويدات)، (و99% في OAT 390 نوكلويدياً). تم استخدام RP II وTEF2 كجينات مرجعية استناداً إلى Tong وآخرين (2009).

الجدول (8): البوادئ (Primers) المستخدمة في تحليل تفاعل البوليميراز المتسلسل الكمي بالزمن الحقيقي (RT-qPCR) لجينات P5CS وP5CR وOAT في السوق التابعة لأشجار الخوخ من صنف "Daewol".

Gene abbreviation	Primer sequence (5'-3') (forward/reverse)	Product		GenBank accession No.
		size (bp)	Origin	
<i>P5CS</i>	F: CCA AGG GGC AGC AAT AAA CTG R: CTT CTA GGT CTT CTG CGA TAA	439	<i>Prunus mume</i>	XP008233492.1
<i>P5CR</i>	F: GCA TCC AGG TCA GCT AAA GG R: CCA GCG CTA TGA AAA GGA AG	206	<i>Prunus mume</i>	XP008240728.1
<i>OAT</i>	F: GTC AGA GAG CTG TGC TCA AA R: ACC TCT TCC TCG AAC TTC CT	389	<i>Prunus mume</i>	XM008227284.1
<i>RP II</i>	F: TGA AGC ATA CAC CTA TGA TGA TGA AG R: CTT TGA CAG CAC CAG TAG ATT CC	128	<i>Arabidopsis thaliana</i>	AT2G15430
<i>TEF2</i>	F: GGT GTG ACG ATG AAG AGT GAT G R: TGA AGG AGA GGG AAG GTG AAA G	129	<i>Prunus persica</i>	JQ732180.1

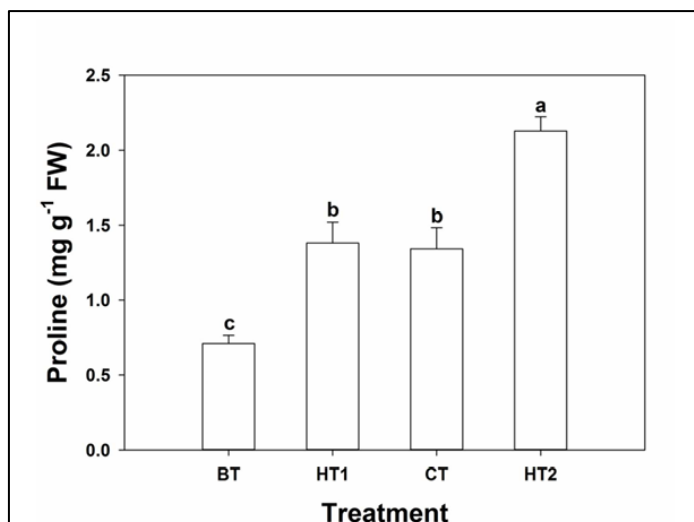
التحليل الإحصائي:

تم تقييم الفروقات الإحصائية باستخدام تحليل التباين (ANOVA) باستخدام برنامج SAS 9.4 (شركة SAS Institute Inc، كاري، نورث كارولاينا، الولايات المتحدة الأمريكية). وتم تحديد الفروقات بين المتوسطات باستخدام اختبار دنكان متعدد المدى (Duncan's multiple range test).

النتائج:

محتوى البرولين (Pro) في السوق خلال مرحلة السكون البيئي (الدراسة 1) أو فترة النمو (الدراسة 2):

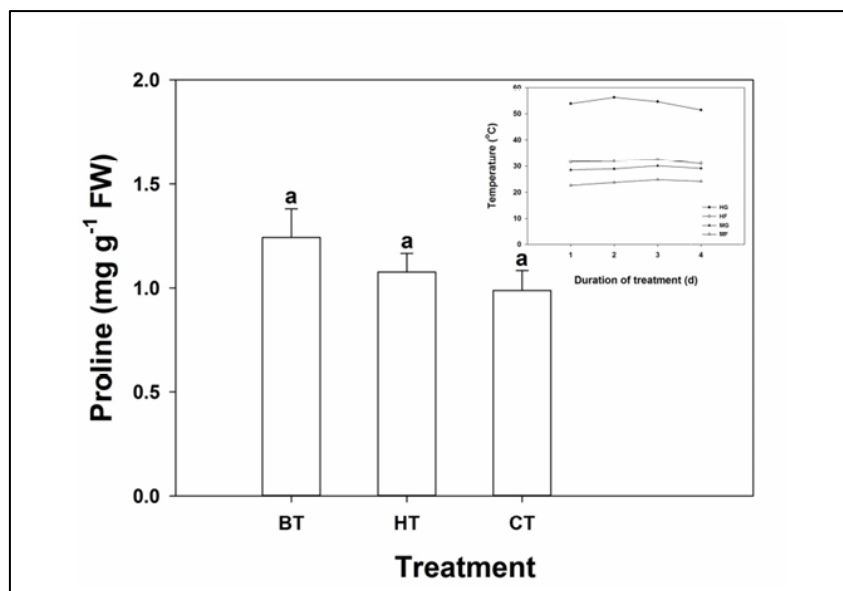
في الدراسة 1، تضاعف محتوى البرولين في السوق من 0.7 ملغ/غم من الوزن الطازج في مرحلة BT (النباتات المتكيفة مع البرودة) إلى 1.4 ملغ/غم بعد المعالجة الحرارية الأولى لمدة 4 أيام (HT1) (الشكل 34). ولم يلاحظ اختلاف معنوي عند تعريض نباتات HT1 لدرجة حرارة معتدلة (CT)، حيث بلغ المحتوى 1.3 ملغ/غم. ومع ذلك، ارتفع محتوى البرولين بشكل أكبر إلى 2.1 ملغ/غم بعد تعريض نباتات CT للمعالجة الحرارية الثانية (HT2)، أي ما يقارب ثلاثة أضعاف محتوى BT (الشكل 34).



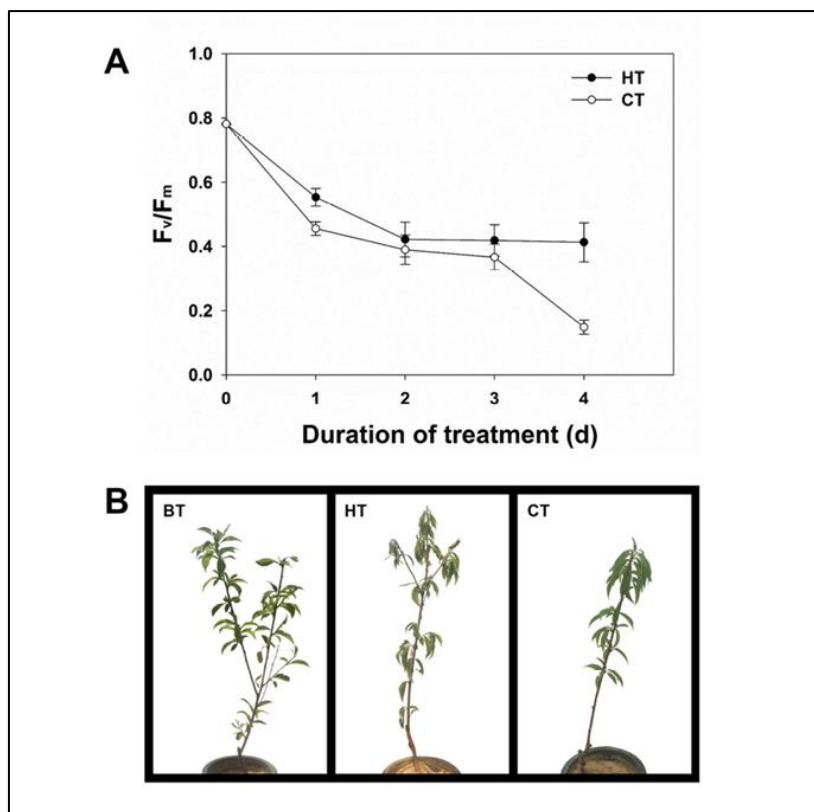
شكل (34): التغيرات في محتوى البرولين في السوق ذات السكون البيئي لأشجار الخوخ من صنف "Daewol" خلال المعالجات الحرارية المتكررة (HT1 و HT2) والمعالجة الباردة البينية (CT) (الدراسة 1، فبراير 2015). تُعرض البيانات على شكل متوسطات \pm الخطأ المعياري ($n = 3$) (SE). تشير الحروف المختلفة إلى وجود فروق معنوية بين المعالجات ($P \leq 0.05$).
BT: قبل المعالجة.

الأبعاد: 98×122 مم (300 × 300 نقطة في البوصة).

في الدراسة 2، لم يتغير محتوى البرولين في السوق بشكل معنوي بين مراحل BT و HT و CT (الشكل 35). في المقابل، أظهرت الأوراق انخفاضاً معنوياً في تألق الكلوروفيل (F_v/F_m) استجابةً لكل من الحرارة العالية (HT) والمعتدلة (CT) (الشكل 36). وكان هذا الانخفاض تدريجياً تحت CT على مدى 4 أيام، حيث بلغ حوالي 88% مقارنة بـ BT، في حين كانت الاستجابة تحت HT أكثر استقراراً بعد اليوم الثاني، مع انخفاض بلغ حوالي 50%. كما لوحظت علامات إجهاد واضحة على الأوراق في كلتا المعالجتين، تمثلت في الاصفرار والذبول (الشكل B36).



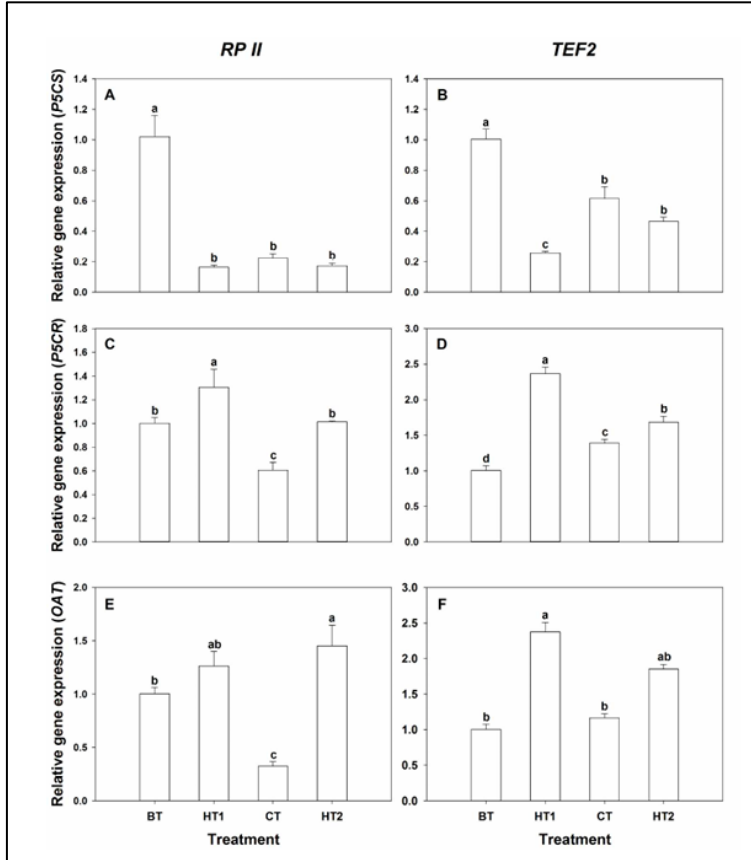
شكل (35): التغيرات في محتوى البرولين في السوق الخاصة بأشجار الخوخ من صنف "Daewol" بعد المعالجة الحرارية (HT) أو المعالجة الباردة (CT) خلال فترة النمو (الدراسة 2، مايو 2015). تُعرض البيانات على شكل متوسطات \pm الخطأ المعياري (n = 3) (SE). BT: قبل المعالجة. تشير الحروف المختلفة إلى وجود فروق معنوية بين المعالجات ($P \leq 0.05$). (الإطار الصغير) درجات حرارة الهواء اليومية خلال المعالجة الحرارية في البيت الزجاجي (HT) أو تحت ظروف الحقل: HG: أعلى درجات حرارة في البيت الزجاجي، HF: أعلى درجات حرارة تحت ظروف الحقل، MG: متوسط درجات الحرارة في البيت الزجاجي، MF: متوسط درجات الحرارة تحت ظروف الحقل. الأبعاد: 98×122 مم (300 × 300 نقطة في البوص).



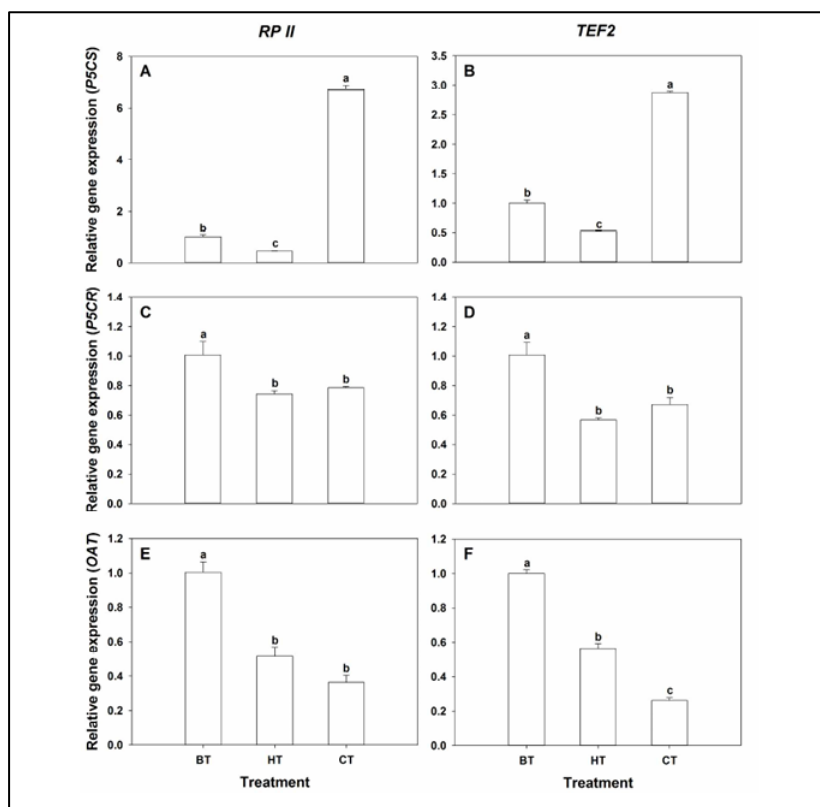
شكل (36): (A) التغيرات في التآلق الكلوروفيلي (F_v/F_m) لأوراق شجرة الخوخ من صنف "Daewol" أثناء المعالجة الحرارية (HT) والمعالجة الباردة (CT) ضمن الدراسة الثانية (مايو 2015). تُعرض البيانات على شكل متوسطات \pm الخطأ المعياري ($n = 3$) (SE). (B) صورة تمثيلية لأشجار الخوخ من صنف "Daewol" في حالات ما قبل المعالجة (BT)، وبعد المعالجة الحرارية (HT) والمعالجة الباردة (CT). الأبعاد: 223×183 ملم (150×150 نقطة في البوصة).

التعبير النسبي لجينات P5CS و P5CR و OAT في الدراستين 1 و 2 :

في الدراسة 1، أظهر جين P5CS انخفاضاً معنوياً في التعبير بنسبة تقارب 80% بعد المعالجة الحرارية الأولى (HT1) مقارنة بمرحلة BT، ثم ارتفع تعبيره قليلاً بعد التعرض لدرجة حرارة معتدلة (CT)، قبل أن ينخفض مجدداً بشكل غير معنوي بعد المعالجة الحرارية الثانية (HT2) (الشكل 37A، B). في المقابل، أظهر كل من P5CR و OAT ارتفاعاً معنوياً في التعبير بعد HT1 مقارنة بـ BT، تلاه انخفاض معنوي بعد CT، ثم ارتفاع معنوي مرة أخرى بعد HT2 (الشكل 37C، D، E، F). أما في الدراسة 2، فقد انخفض تعبير P5CS بشكل معنوي بعد HT مقارنة بـ BT، لكنه ارتفع بشكل كبير بمعدل 3 إلى 7 أضعاف استجابةً لـ CT (الشكل 38 A، B). أما P5CR، فانخفض تعبيره معنوياً بنسبة 30-40% بعد HT و 20-30% بعد CT، مقارنة بـ BT. كما انخفض تعبير OAT بنسبة 40-50% بعد HT و 60-70% بعد CT، مقارنة بمستويات BT (الشكل 36 C، D، E، F).



شكل (37): التغيرات في التعبير الجيني لكل من (A) P5CS، (B)، و (C) P5CR، (D)، و (E) OAT، (F) بالنسبة إلى "BT" الذي اعتُبر القيمة المرجعية (1) في السوق التابعة لأشجار الخوخ من صنف "Daewol" خلال معالجتين حراريتين متكررتين (HT1 و HT2) ومعالجة باردة بينهما (CT) أثناء حالة السكون البيئي (الدراسة الأولى، فبراير 2015). تُعرض البيانات كمتوسطات \pm الخطأ المعياري (SE) (n = 3). تشير الحروف المختلفة إلى وجود فروقات معنوية بين المعالجات (P ≤ 0.05): BT. قبل المعالجة؛ RP II و TEF2: جينات مرجعية. الأبعاد: 342×291 ملم (300 × 300 نقطة في البوصة).



شكل (38): التغيرات في مستويات التعبير الجيني لكل من (A) P5CS، (B)، و(C) P5CR، (D)، و(OAT) و(E)، (F) بالنسبة إلى "BT" الذي اعتُبر القيمة المرجعية (1) في السوق التابعة لأشجار الخوخ من صنف "Daewol" بعد المعالجة الحرارية (HT) والمعالجة الباردة (CT) خلال فترة النمو (الدراسة الثانية، مايو 2015). تُعرض البيانات كمتوسطات \pm الخطأ المعياري (n = 3) (SE). تشير الحروف المختلفة إلى وجود فروقات معنوية بين المعالجات (BT: قبل المعالجة؛ RP II و TEF2: جينات مرجعية. الأبعاد: 336×294 ملم (300 × 300 نقطة في البوصة)).

المنافشة :

أشارت العديد من الدراسات إلى أن تراكم البرولين (Pro) خلال التصلب البارد يُعد ظاهرة شائعة، حيث يُعتقد أن له دوراً مهماً كمذاب متوافق يساعد النباتات على تحمل الجفاف الناتج عن التجمد (Cook *et al.*, 2004؛ Hannah *et al.*, 2005؛ Kaplan *et al.*, 2007). إلا أن الأبحاث حول هذه الظاهرة في الأنواع الخشبية لا تزال محدودة. فعلى سبيل المثال، لم تُظهر دراستان على الأنواع الخشبية *Picea mariana* و *Picea obovat* علاقة واضحة بين تغيرات محتوى البرولين والتأقلم مع البرودة أو تحمل الإجهاد الناتج عن درجات الحرارة المنخفضة (Angelcheva *et al.*, 2014؛ Odlum *et al.*, 1993). وتبين من الأبحاث أن العلاقة بين تراكم البرولين والتحمل للإجهادات غير الحيوية ليست

قاعدة عامة، إذ تم توثيق تراكم البرولين في بعض الأنواع العشبية الحساسة للإجهادات الملحية أو الحرارية (Kishor و Sreenivasulu 2014) العلاقة بين تراكم البرولين والتكيف مع الإجهاد بأنها "لا تزال مثار جدل إلى حد ما". وعلى صعيد آخر، لا يُعرف الكثير عن مصير البرولين خلال عملية إزالة التصلب الناتجة عن التعرض للحرارة، خصوصاً في النباتات الخشبية المعمرة. وقد لوحظ في دراسة سابقة (Shin *et al.*, 2016) أن محتوى البرولين في السوق لـ 11 صنفاً من الخوخ، من بينها *Daewol*، يزداد عند إزالة التصلب من النباتات المتصلبة طبيعياً بواسطة درجات حرارة دافئة. وقد أدى هذا الاكتشاف إلى طرح تساؤلات حول ما إذا كان تراكم البرولين في هذه الحالة ناتجاً عن استجابة لإجهاد حراري مفاجئ، أو نتيجة لاستعداد فسيولوجي للنبات لاستئناف النمو خلال مرحلة السكون البيئي.

تم ملاحظة زيادة كبيرة في محتوى البرولين (Pro) عند تعرض السوق المتصلبة بالبرودة والتي كانت في حالة سكون بيئي (ecodormant) للمعالجة الحرارية الأولى HT1 (شكل 34)، مما يؤكد نتائجنا السابقة (Shin *et al.*, 2016). مع ذلك، ظل محتوى البرولين ثابتاً عند نقل نباتات HT1 إلى المعالجة الباردة CT، لكنه ازداد مرة أخرى عندما تعرضت نباتات CT لدرجات حرارة دافئة، أي خلال المعالجة الحرارية الثانية HT2. في المقابل، أظهرت بيانات الدراسة الثانية (فترة النمو) في هذا البحث (شكل 35) عدم حدوث أي زيادة مماثلة في محتوى البرولين استجابةً للمعالجة الحرارية HT، التي تضمنت تعرضاً لدرجات حرارة مرتفعة لمدة 4 أيام [16.7/36.7°م (نهار/ليل)]، مع درجة حرارة قصوى تراوحت بين 52-55°م (المبينة في الشكل 35، الإطار)، وهي أعلى بحوالي 20°م من الحد الأقصى الذي تعرضت له نباتات BT في الحقل. لم يتغير محتوى البرولين بشكل ملحوظ في نباتات HT مقارنةً بنباتات BT (شكل 35). تشير بيانات التألق الكلوروفيلي (شكل 36) إلى أن نباتات HT في الدراسة الثانية كانت قد تعرضت لإجهاد حراري بالفعل، كما يتضح من انخفاض نسبة Fv/Fm، مما يشير إلى انخفاض كفاءة النظام الضوئي الثاني PSII. من خلال نتائج الدراسة الأولى والثانية، يمكن الاستنتاج أن تراكم البرولين في سوق الخوخ الذي تم ملاحظته في الدراسة الأولى بعد HT1 (شكل 34) قد يرتبط بتفعيل العمليات الأيضية، حيث كانت هذه النباتات في حالة سكون بيئي وعلى استعداد لاستئناف النمو بعد تراكم وحدات الحرارة، أي بعد التعرض لدرجات حرارة 19.2/23.5°م (نهار/ليل) لمدة 4 أيام. في حين أن الإجهاد الحراري كما في HT2 (شكل 35) لم يؤدي إلى تراكم البرولين. كما يمكن استنتاج من بياناتنا (شكل 34) أن التعرض لـ CT بعد HT1 لم يكن كافياً لعكس التحضير الأيضي لاستئناف النمو، لكنه ربما أوقفه إلى حد ما كما يظهر من عدم تغيير محتوى البرولين (شكل 35). مع ذلك، بدأ أن الجرعة الثانية من درجات الحرارة الأكثر دفئاً (HT2) كانت موالية لمزيد من النمو، وترافقت مع زيادة في تراكم البرولين (شكل 34). تم ملاحظة انخفاض مشابه، وأكثر وضوحاً إلى حد ما، في نسبة Fv/Fm في نباتات CT، التي أظهرت أيضاً انخفاضاً طفيفاً في محتوى البرولين مقارنةً بنباتات BT (شكل 35)، وهو ما يؤكد

ملاحظتنا السابقة (Shin *et al.*, 2016). قد يكون الانخفاض في Fv/Fm في الأشجار المعرضة لـ CT ناتجاً عن تثبيط ضوئي، حيث إن CT شمل نقل الأشجار من الحقل (في مايو) إلى نظام درجة حرارة 20°م، مع تعرضها لإشعاع ضوئي عند 805 PAR $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ وفترة إضاءة مدتها 14.5 ساعة لمدة 4 أيام (شكل 33).

تناولت العديد من الدراسات ديناميكية تراكم البرولين (Pro) فيما يتعلق بالإجهادات غير الحيوية من خلال دراسة التعبير الجيني لـ P5CS و P5CR المرتبطين بتخليق البرولين (Gleeson *et al.*, 2005؛ Hur *et al.*, 2004؛ Kavi Kishor *et al.*, 1995؛ Nanjo *et al.*, 1999) إلى ارتباط تراكم البرولين بتعبير جيني P5CS و P5CR. في الدراسة الأولى من هذا البحث، وُجد أن P5CS تم تثبيطه بشكل ملحوظ في معالجات HT مقارنةً بـ BT، مع تحفيز طفيف خلال CT، لكنه بقي منخفضاً مقارنةً بـ BT (شكل 37A، B). أما في الدراسة الثانية، فقد أظهر P5CS ارتفاعاً ملحوظاً بعد CT وانخفاضاً بعد HT (شكل 38، B). في *Arabidopsis thaliana*، يتم ترميز P5CS بواسطة الجينين P5CS1 و P5CS2، حيث يُعرف أن P5CS1 يستجيب للإجهادات غير الحيوية، بينما P5CS2 يرتبط بالخلايا المنقسمة دون تحفيز واضح من الإجهاد (Strizhov *et al.*, 1997؛ Székely *et al.*, 2008). وفي ظل غياب معلومات مماثلة في الأنواع الخشبية، تشير نتائج هذا البحث وسابقه (Shin *et al.*, 2016) إلى أن P5CS المدروس في خوخ "Daewol" ربما يكون هو P5CS1.

من جهة أخرى، أظهرت البيانات أن P5CR، المسؤول عن الخطوة النهائية في تخليق البرولين، تم تحفيزه خلال HT1، وتثبيطه خلال CT، ثم تحفيزه مجدداً في HT2، توازياً مع تراكم البرولين (شكل 37C، D؛ شكل 34). وأظهر الجين OAT نمط تعبير مشابه (شكل 37E، F). وقد دعمت دراسة على *Arabidopsis* (Kaplan *et al.*, 2007) هذه النتائج، حيث وُجد توافق بين تراكم البرولين وتحفيز P5CR مع تثبيط P5CS. كما بين Lee و Chang (1999) أن نشاط إنزيمي P5CR و OAT زاد في *Gracilaria tenuistipitata* تحت الإجهاد، مما يشير إلى تنشيط مسار الأورنيثين (Orn pathway). لكن في الدراسة الحالية، لوحظ انخفاض كبير في تعبير P5CR و OAT بعد HT و CT مقارنةً بـ BT (شكل 38C، D، E، F)، بالتوازي مع انخفاض البرولين (شكل 35). تدعم هذه النتائج ما أورده Lee و Chang (1999) حول احتمال اعتماد النبات على مسار الأورنيثين، بدلاً من مسار الجلوتامات (Glu)، لتخليق البرولين في خوخ "Daewol". وفي الأخير، يتراكم البرولين في السوق ذات السكون البيئي عند التعرض للحرارة كجزء من التحضير لاستئناف النمو، ويبدو أن مسار الأورنيثين يلعب دوراً فسيولوجياً مهماً في كل من عملية استئناف النمو والاستجابة للإجهاد الحراري في خوخ "Daewol".

6-المقال السادس:

Proline, glycine bétaïne et composition minérale des plantes de *Solanum lycopersicum*

L. (var. *Microtom*) sous stress salin.

العنوان مترجم للغة العربية:

البرولين والجليسين والبيتين والعناصر المعدنية لنباتات الطماطم *Solanum lycopersicum L. var. Microtom* النامية تحت الإجهاد الملحي.

المؤلفون:

H. BACHA1, E. MANSOUR, F. GUASMI, T. TRIKI, ET A. FERCHICHI.

نُشر في مجلة Journal of New Sciences، المجلد 22، العدد 3، في أكتوبر 2015.

الهدف:

تقييم الدور الوقائي للمُذابات التوافقية، وخاصة البرولين والجلاليسين-بيتاين، التي تتراكم في أوراق نبات الطماطم (*Solanum lycopersicum*، الصنف *Microtom*) عند تعرضه لإجهاد ملحي بدرجات متفاوتة من تركيز ملح NaCl.

الطرق و المواد:

تحضير النبات:

تم إنبات بذور طماطم *Solanum lycopersicum L.* الصنف (*Microtom*) في وسط فيرميكوللايت عند 28°C، وبعد 7 أيام نُقلت الشتلات إلى عبوات سعة 15 لترًا تحتوي على أنظمة مائية مهواة مزودة بمحلول Hoagland المخفف بنسبة 1/10.

نُميت النباتات في غرفة نمو بظروف محكمة: دورة ضوئية/ظلامية 16/8 ساعة، درجة الحرارة: 25°C نهاراً، 20°C ليلاً، الرطوبة النسبية 65% نهاراً، 80% ليلاً، كثافة الإضاءة 365 ميكرومول/م²/ثانية.

تم تحضير المحلول المغذي من $Ca(NO_3)_2$ ، $MgSO_4$ ، $Ca(HP_2O_4)_2$ ، عناصر صغرى $CaCl_2$ (50 ميكرومول)، H_3BO_3 (12.5)، $MnSO_4$ (1)، $ZnSO_4$ (1)، $CuSO_4$ (0.5)، H_2MoO_4 (0.1)، $NiSO_4$ (0.1)، $Fe-EDDHA$ (10). تم تعديل pH يومياً إلى 5.5، وتجديد المحاليل أسبوعياً. بعد زراعة النباتات في محلول تحكم لمدة 14 يوماً، نُقلت إلى محاليل تحتوي على تراكيز مختلفة من (200-1 NaCl ملي مولار) لمتابعة تطورها خلال 8 أيام.

تحديد محتوى البرولين:

تم استخلاص البرولين من 20 ملغم من الوزن الجاف للعينة باستخدام 1 مل من حمض السلفوساليسيليك (3%)، مع تحريك لمدة ساعة عند 30°C. بعدها، خضعت العينات لـ الطرد المركزي بسرعة 10000 دورة/دقيقة لمدة 5 دقائق عند 4°C. تم أخذ 125 ميكرو لتر من السوبرناتانت، وأضيف إليه 125 ميكرو لتر من حمض الخليك الجليدي و125 ميكرو لتر من حمض النينهيدرين في أنبوب اختبار. تم

حضن الأنابيب في حمام مائي عند 90°C لمدة ساعة، ثم تُبرد لمدة دقيقة في الثلج. أخيراً، أُضيف 4 مل من التولوين، وتم قياس الامتصاصية عند 520 نانومتر لتحديد تركيز البرولين.

تحديد محتوى الجلايسين-بيتاين:

تمت إضافة 0.5 غرام من المادة النباتية الجافة المطحونة إلى 20 مل من الماء المقطر، وتم تحضين المحلول الناتج لمدة 48 ساعة عند 25°C . بعد ذلك، تم ترشيح العينة وتخزين الترشيح في المجمد حتى التحليل. تم إذابة المستخلصات المجمدة ثم تخفيفها 1:1 مع حمض الكبريتيك N_2 . تم أخذ 0.5 مل من المحلول وتبريده في ماء مثلج لمدة ساعة. ثم أُضيف 0.2 مل من كاشف KI-I_2 ، وتم تحريك المزيج باستخدام جهاز الفورتيكس. تم تخزين العينات في درجة حرارة $4-0^{\circ}\text{C}$ لمدة 16 ساعة. بعد ذلك، تم طرد العينات مركزياً عند 10000 جرام لمدة 15 دقيقة عند 0°C ، ثم تم استخلاص السائل الفائق باستخدام ميكروبيبيتا. بما أن ذوبان المركب يزداد مع درجة الحرارة، تم فصل المركب البارد عن الوسط الحمضي. تم إذابة الرواسب في 9 مل من 1,2-ثنائي كلورو إيثنان، وتم غسلها بـ 0.5 مل لمدة 5 دقائق، ثم تم خلط الأنابيب باستخدام الفورتيكس لضمان ذوبان كامل في المذيب. بعد ساعتين، تم قياس الامتصاصية عند 365 نانومتر باستخدام جهاز الطيف الضوئي. تم تحضير المعايير القياسية للجلايسين-بيتاين (50-200 ميكروغرام/مل) في حمض الكبريتيك N_2 واتبعت نفس الإجراءات لتقدير محتوى العينة.

تحديد التركيب المعدني: تم حصاد النبات بعد المعاملات المحددة وفصل الجذور، ثم تم تجفيفه في فرن هواء قسري عند درجة حرارة 65°C لمدة 4 أيام لتحديد الوزن الجاف (PS). تم هضم المادة الجافة باستخدام خليط من HNO_3 : HClO_4 (بنسبة 1:2، حجم: حجم). تم تحديد تركيزات K^+ ، Mg^{2+} ، Na^+ ، و Cl^- باستخدام ICP-MS بواسطة مقياس الطيف الكتلي (Iris Intrepid ICP) من شركة Thermo Electron Corporation، فرانكلين، الولايات المتحدة الأمريكية). تم الإبلاغ عن البيانات على أنها متوسط ثلاث قيم لكل معالجة، وتمثل أشرطة الخطأ الخطأ المعياري.

التحليل الإحصائي:

تم إجراء المعالجة الإحصائية باستخدام برنامج SPSS، الإصدار 18.0، وتم إخضاع المعلمات المسجلة لتحليل التباين الثنائي (Two-way ANOVA). وقد أُجريت المقارنات بين المتوسطات باستخدام اختبار ANOVA عند مستوى دلالة 0.05.

النتائج:

تأثير الإجهاد الملحي على الوزن الجاف للأوراق:

أدى ارتفاع تركيز أيون الصوديوم (Na^+) في المحلول إلى انخفاض ملحوظ في نمو أوراق نبات *Microtom*. وقد كان للملوحة تأثير سلبي أكبر على إنتاج الكتلة الحيوية الجافة للأجزاء الهوائية من هذا

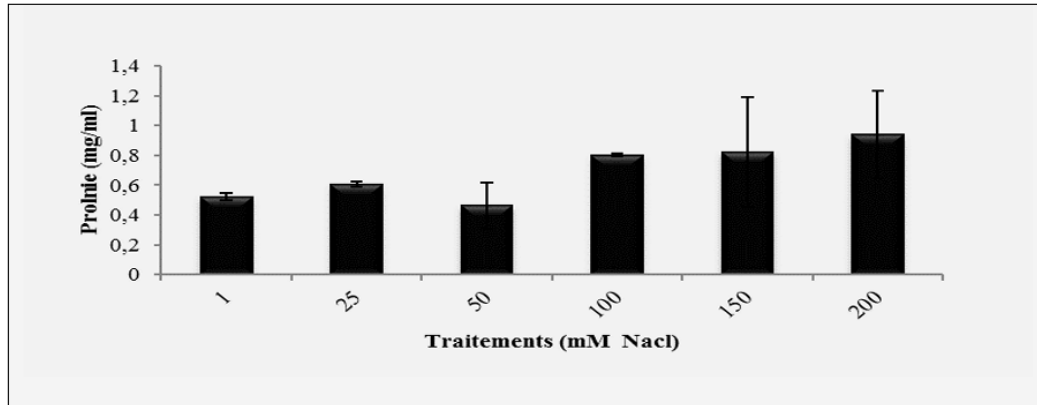
النبات الغليكوفيتي. لوحظ أقصى إنتاج للمادة الجافة (2.92 غرام) عند تركيز متوسط من الملح يبلغ 25 ملي مول (الجدول 10). وقد لوحظ انخفاضاً كبيراً في إنتاج المادة الجافة لنباتات الطماطم مع زيادة الملوحة؛ فمقارنةً بمعاملة الشاهد بتركيز 1 ملي مول، تم تسجيل انخفاض ملحوظ في إنتاج المادة الجافة في أوراق نباتات الطماطم عند تركيز ملحي قدره 150 ملي مول (الجدول 10).

الجدول (9): القيم المتوسطة للوزن الجاف لأوراق نباتات *Solanum lycopersicum* صنف *Microtom* المعرضة لإجهاد ملحي تحت تراكيز مختلفة: 1 ملي مول (شاهد)، 25 ملي مول، 50 ملي مول، 100 ملي مول، 150 ملي مول، و 200 ملي مول. كل قيمة تمثل متوسط ثلاث تكرارات.

NaCl [mM]	Moyenne du Poids Sec des Feuilles [g]
1	4,53 ± 1,02 c
25	2,92 ± 0,17 b
50	2,31 ± 0,41 b
100	0,82 ± 0,33 a
150	0,17 ± 0,02 a
200	0,06 ± 0,01 a

تأثير الإجهاد الملحي على البرولين:

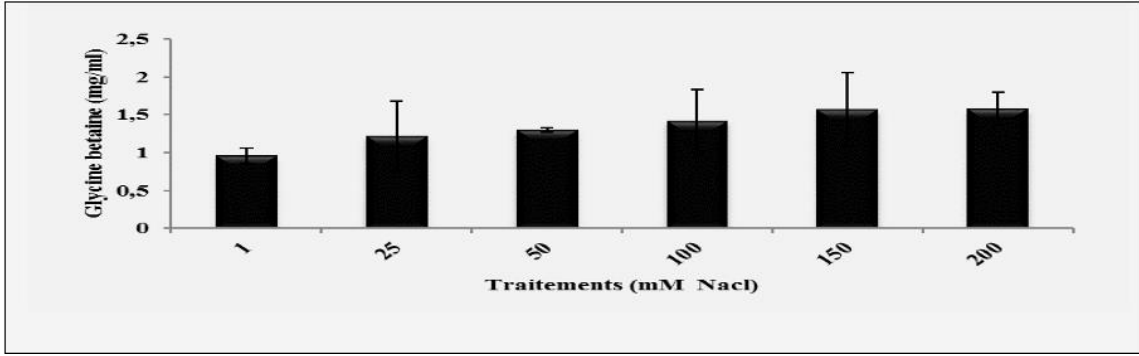
تتوافق نتائج الباحثين الحديثين مع نتائج عملنا الحالي، حيث تزداد نسبة تخليق البرولين بشكل تدريجي مع تقدم الإجهاد الملحي، وبشكل أكثر تحديداً في أوراق نبات *Microtom* بين تركيزي 50 ملي مول و 200 ملي مول من NaCl، مع تسجيل أعلى معدل بلغ 0.29 ± 1.18 ملغ/مل لهذا الأوسموليت عند تركيز 200 ملي مول من NaCl (الشكل 39).



الشكل (39): تغير معدل البرولين لدى نباتات *Solanum lycopersicum* صنف *Microtom* المعرضة لإجهاد ملحي تحت تراكيز مختلفة: 1 ملي مول (شاهد)، 25 ملي مول، 50 ملي مول، 100 ملي مول، 150 ملي مول، و 200 ملي مول. كل قيمة تمثل متوسط ثلاث تكرارات.

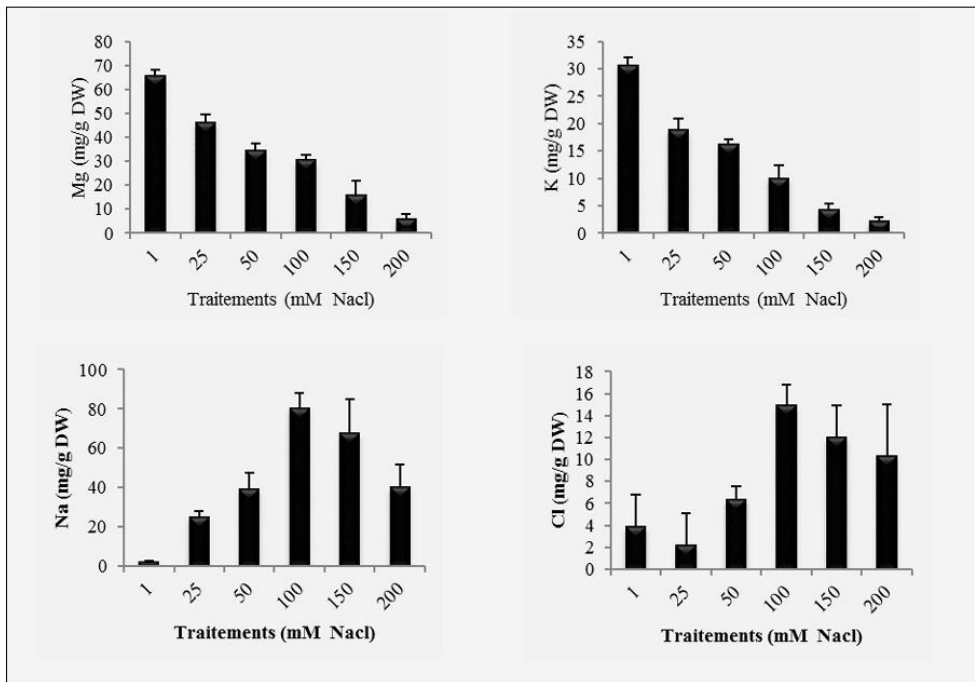
تأثير الإجهاد الملحي على الجلایسین بیتاین:

بلغت نسبة الجلایسین بیتاین (Glybet) مستوى مرتفعاً قدره 0.21 ± 1.77 ملغ/مل عند تركيز 200 ملي مول من NaCl (الشكل 40).



الشكل (40): تغير معدل الجلايسين بيتاين لدى نباتات *Solanum lycopersicum* صنف *Microtom* المعرضة لإجهاد ملحي تحت تراكيز مختلفة: 1 ملي مول (شاهد)، 25 ملي مول، 50 ملي مول، 100 ملي مول، 150 ملي مول، و 200 ملي مول. كل قيمة تمثل متوسط ثلاث تكرارات. تأثير الإجهاد الملحي على التركيب المعدني:

في الأجزاء الهوائية (الأوراق) من نبات الطماطم من الصنف *Microtom*، بين المعاملتين 1 ملي مول و 150 ملي مول من NaCl، يلاحظ وجود تنافس في تراكم أيوني K^+ و Na^+ في أوراق *Microtom* (الشكل 41)



الشكل (41): تغير تركيز أيونات K^+ ، Mg^{2+} ، Na^+ و Cl^- في أوراق *Microtom*. تم توضيح أشرطة الخطأ. وتشير المعايير إلى وجود تأثيرات معنوية لأيونات K^+ ، Mg^{2+} ، Na^+ و Cl^- وتفاعلاتها وفقاً لاختبار ANOVA.

المنافشة:

أدى ارتفاع تركيز أيون الصوديوم (Na^+) في المحلول إلى انخفاض ملحوظ في نمو أوراق نبات *Microtom*. وقد كان للملوحة تأثير سلبي أكبر على إنتاج الكتلة الحيوية الجافة للأجزاء الهوائية من هذا النبات، وقد لاحظ كل من Attenburrow و Waller (1980) انخفاضاً كبيراً في إنتاج المادة الجافة لنباتات الطماطم مع زيادة الملوحة. وقد لوحظ الأمر ذاته في تجربتنا. كما أن التغيرات في إنتاج المادة الجافة كانت تعتمد أيضاً على نوع الأملاح (Ryan *et al.*, 1975)، ومن بين الأملاح القابلة للذوبان، يعد $NaCl$ الأكثر ضرراً على نمو النباتات وامتصاصها للعناصر الغذائية (AL-Rawahy *et al.*, 1990). وفي تجاربهم، أدت مياه البحر التي تحتوي على كميات مرتفعة من $NaCl$ إلى إنتاج كمية أقل من المادة الجافة مقارنةً بملوحة التربة. تقلل الملوحة من مساحة الأوراق ومعدل النمو النسبي (Alarcon *et al.*, 1994)، مما قد يساهم في تقليل الوزن وإنتاج الثمار الجافة في نبات الطماطم (Mahajan et Tuteja, 2005). وقد تم الإبلاغ عن تأثير هذا الإجهاد اللاأحيائي على الكتلة الحيوية الجافة للأجزاء الهوائية أيضاً من قبل (Laaziza *et al.*, 2003)، حيث خفضت الملوحة نمو الأجزاء الهوائية لنبات النفل بدرجة أكبر مقارنةً بالجذور. وقد تم الإبلاغ عن نتائج مماثلة من قبل (Dubey et Singh, 1999).

تتوافق نتائج الباحثين الحديثين مع نتائج عملنا الحالي، حيث تزداد نسبة تخليق البرولين بشكل تدريجي مع تقدم الإجهاد الملحي، وقد طبقت نتائجنا ما توصل إليه (Syed *et al.*, 2011) على الطماطم، حيث أشاروا إلى أن قدرة النبات على زيادة تخليق البرولين تحت ظروف الإجهاد الملحي يمكن أن تحدد مستويات تحمله للملوحة. ومن المحتمل أن تحسين تراكم البرولين قد ينظم عدة عمليات ضرورية لبقاء النبات في ظل ظروف الإجهاد الملحي. (Maggio *et al.*, 2002).

بلغت نسبة الجلایسین بيتاين (Glybet) مستوى مرتفعاً، وقد تناولت دراسات أخرى تخليق الجلایسین بيتاين في عدة نباتات خضعت للإجهاد الملحي. وفيما يتعلق بالتنظيم الأسموزي، فإن توافق هذا المركب المسمى بالجلایسین بيتاين (Glybet) يجعله مركباً يمكن أن يلعب دوراً حيوياً في الحماية الفعالة ضد الملوحة، والجفاف، وإجهاد درجات الحرارة القصوى (Achraf et Foolad, 2004; Achraf et Harris., 2004; Chen et Murata., 2008).

7-المقال السابع:

Proline Promotes Drought Tolerance in Maize.

العنوان مترجم للغة العربية:

دور البرولين في تعزيز تحمل الجفاف في نبات الذرة.

المؤلفون:

Pirzada Khan, Ashraf M. M. Abdelbacki, Mohammed Albaqami , Rahmatullah Jan, and Kyung-Min Kim.

تم نشر هذا المقال في مجلة Biology، في العدد رقم 14 لعام 2025، تحت رقم المقال 41.

الهدف:

- التحقق من فعالية مكملات البرولين في التخفيف من الآثار السلبية للإجهاد الناتج عن الجفاف على نباتات الذرة (*Zea mays L.*).

المواد والطرق:

إعداد التجربة:

أجريت الدراسة في بيت زجاجي خلال مارس 2023 باستخدام صنف الذرة (*Zea mays L.*) من السلالة B73، حيث قُسمت النباتات إلى أربع مجموعات: ضابطة، معالجة بالبرولين، تحت إجهاد الجفاف، وتحت الجفاف مع المعالجة بالبرولين. بعد تعقيم البذور وإنباتها في الظلام عند 25°C لمدة 48 ساعة، زُرعت كل بذرة في وعاء يحتوي على 2 كغم من خليط متساوٍ من الخث والبيرلايت والرمل، مع تكرار كل معالجة ثلاث مرات. عُولجت مجموعة البرولين بمحلول تركيزه 30 ملي مولار بعد أسبوع من الزراعة، بينما خضعت مجموعتا الجفاف والجفاف + برولين لمحلول PEG-6000 بتركيز 30% في الأسبوع التالي لمحاكاة الجفاف. رُويت المجموعة الضابطة كل يومين، بينما زُوِّدت المجموعات الأخرى بالمحالييل يوميًا. استمرت المعالجات لمدة ثلاثة أسابيع، وشملت التقييمات: أطوال الجذور والسيقان، الأوزان الطازجة والجافة، محتوى الماء النسبي، تركيب العناصر الغذائية، ونشاط الإنزيمات المضادة للأوكسدة. جُفِّت العينات عند 80°C لمدة 48 ساعة لتحديد الوزن الجاف.

قياس تسرب الإلكتروليتات (Electrolyte Leakage – EL):

تم تقييم تسرب الإلكتروليتات في أوراق الذرة تحت تأثير إجهاد الجفاف من خلال جمع العينات بعد أسبوع من التعرض للجفاف. قُطع نحو 200 ملغم من نسيج الورقة إلى قطع بطول 5 مم، ووضعت في أنابيب اختبار تحتوي على 10 مل من ماء منزوع الأيونات. حُضنت العينات عند 32°C لمدة ساعتين لتسهيل خروج الإلكتروليتات، ثم قيسَت التوصيلية الكهربائية الأولية (EC1) باستخدام جهاز التوصيلية (الطراز CM-115، شركة Kyoto Electronics، اليابان). بعد ذلك، عَقِّمت العينات في الأوتوكلاف، وتُركت لتبرد إلى درجة حرارة الغرفة، ثم قيسَت التوصيلية النهائية (EC2) تم حساب نسبة تسرب الإلكتروليتات

(EL) باستخدام المعادلة:

$$EL = (EC1 \div EC2) \times 100$$

قياس المحتوى النسبي للماء (RWC)، مساحة الورقة، وقطر الساق:

تم تحديد المحتوى النسبي للماء (RWC) في الأوراق بطرح الوزن الجاف من الوزن الطازج، حيث وُزنت الأوراق مباشرة بعد قطعها، ثم جُفِّت في فرن عند 70°C لمدة 48 ساعة لقياس الوزن الجاف. حُسبت مساحة الورقة (بـ3 مكررات) بضرب الطول في العرض في معامل 0.75، والذي يعكس شكل

أوراق الذرة وفقاً لدراسات سابقة. واشتقت المساحة الورقية الكلية للنبات (Yp، سم²) بجمع مساحات جميع الأوراق. أما قطر الساق، فتم قياسه باستخدام القدم Vernier.

محتوى الكلوروفيل:

لتقييم كفاءة التمثيل الضوئي لنباتات الذرة تحت إجهاد الجفاف، تم قياس محتوى الكلوروفيل بعد ثلاثة أسابيع من التعرض للإجهاد باستخدام جهاز SPAD-502 Plus (Konica Minolta Sensing، سيول، كوريا). أُجريت القياسات على ثلاث أوراق مختارة من كل نبات، وفي ثلاثة مواضع مختلفة من كل ورقة (الطرف، والمنتصف، والقاعدة) لتمثيل التباين الطبيعي في محتوى الكلوروفيل.

قياس تركيز بيروكسيد الهيدروجين ودرجة بيروكسيد الدهون:

تم تحديد تركيز بيروكسيد الهيدروجين (H₂O₂) في أوراق الذرة باستخدام بروتوكول معدل من طريقة موصوفة سابقاً. طُحنت 200 ملغم من الأوراق الطازجة في النيتروجين السائل، واستُخلص H₂O₂ باستخدام 0.1% TCA، ثم طُرد المركز بسرعة 10,000 دورة/دقيقة لمدة 15 دقيقة. خلط الراشح مع 1 مل KI (1 ملي مولار) و500 ميكرو لتر من محلول فوسفات منظم (10 ملي مولار)، وأعيد الطرد بنفس الشروط. قيس الامتصاص عند 390 نانومتر، وتم احتساب تركيز H₂O₂ باستخدام معامل الانقراض ϵ (0.28 = ملي مول/سم). كما تم قياس بيروكسيد الدهون عبر محتوى المالوندايالدهيد (MDA) باستخدام مجموعة أدوات تجارية من شركة Sigma (سيول، كوريا) وفقاً للبروتوكول المرفق.

قياس نشاط إنزيمات مضادات الأكسدة:

تم تحليل نشاط إنزيمات الكاتالاز (CAT) والديسموتاز الفائق (SOD) باستخدام بروتوكولات معتمدة من دراسات سابقة. لاستخلاص الإنزيمات، جُهِز مستخلص من 1 غرام من أوراق الذرة الطازجة في محلول فوسفات البوتاسيوم (50 ملي مولار، pH 7.0) يحتوي على 1 ملي مولار EDTA و1% بولي فينيل بايروليدون، ثم طُرد مركزياً بسرعة 12,000 دورة/دقيقة لمدة 20 دقيقة. استُخدم الراشح الناتج لتقييم نشاط الإنزيمات. قُيِّم نشاط SOD عبر قياس تثبيط اختزال NBT ضوئياً عند 560 نانومتر، بينما تم تحديد نشاط CAT من خلال متابعة تحلل H₂O₂ عند 240 نانومتر. كما قيس نشاط إنزيم البيروكسيداز (POD) باستخدام مستخلص محضر من 0.2 غرام من الأوراق في محلول فوسفات البوتاسيوم (0.1 ملي مولار)، وطُرد مركزياً بسرعة 12,000 دورة/دقيقة لمدة 15 دقيقة. تكون خليط التفاعل من 10 ميكرو لتر من المستخلص، 50 ميكرو لتر بايروجالول (50 ميكرومول)، و50 ميكرو لتر H₂O₂ (50 ميكرومول)، وتم إنهاء التفاعل بإضافة حمض الكبريتيك بعد حضانة لمدة 5-10 دقائق عند 25°C، وقيس الامتصاص عند 420 نانومتر.

قياس محتوى البرولين، الأحماض الأمينية الكلية، والسكريات:

تم قياس محتوى البرولين في أوراق الذرة باستخدام طريقة معتمدة سابقاً، حيث تم تحليل خليط التفاعل المحتوي على التولوين باستخدام جهاز طيف ضوئي عند 520 نانومتر، وعُبرت النتائج بوحدة

ميكروغرام/غرام من الوزن الطازج. أما الأحماض الأمينية الكلية، فتم تحليلها وفق بروتوكول موصوف سابقاً، إذ طُحنت الأوراق في النيتروجين السائل، وحُلَّت 0.2 ملغم من العينة في حمض الهيدروكلوريك N 6 تحت تفريغ عند 110°C لمدة 24 ساعة، ثم جُفِّت عند 80°C لمدة مماثلة. أُعيد إذابتها في HCl (0.02N)، ورُشحت (0.45 ميكرومتر)، ثم حُلَّت باستخدام جهاز Hitachi L-8900 لتحليل الأحماض الأمينية. لقياس السكريات الكلية، استُخدم تحليل HPLC وفق طريقة منشورة، حيث جهزت العينات بتجانس 0.2 غرام من الأوراق في إيثانول 80%، وحُصِّت عند 80°C لمدة 20 دقيقة، ثم طُرِدت مركزياً بسرعة 10,000 دورة/دقيقة لمدة 15 دقيقة. أُعيد إذابة الرواسب في 2 مل ماء، ورُشحت (0.2 ميكرومتر)، وتم تحليلها باستخدام HPLC بعمود Aminex 87C والماء كطور متحرك بمعدل تدفق 0.6 مل/دقيقة.

قياس تركيز العناصر الغذائية (النيتروجين، الفوسفور، والبوتاسيوم):

تم تحليل محتوى العناصر الغذائية في أوراق الذرة باستخدام منهجية معدلة من دراسة سابقة. جُفِّت أوراق مختارة عشوائياً من ثلاث نباتات، ثم سُحقت باستخدام النيتروجين السائل للحصول على مسحوق متجانس. للهضم، خلطت العينات بـ3 مل حمض نيتريك (62% w/w)، 3 مل بيروكسيد الهيدروجين (30% w/w)، و2 مل حمض هيدروفلوريك (45% w/w)، ثم خضعت لعملية هضم ميكروويفي لضمان التحلل الكامل. بعد ذلك، خففت المحاليل إلى 100 مل باستخدام حمض البوريك (4% w/v)، وتم تحليل العناصر باستخدام مطياف البلازما المقترنة بالحث (ICP) من طراز Optima 7900DV، (PerkinElmer، الولايات المتحدة).

التحليل الإحصائي:

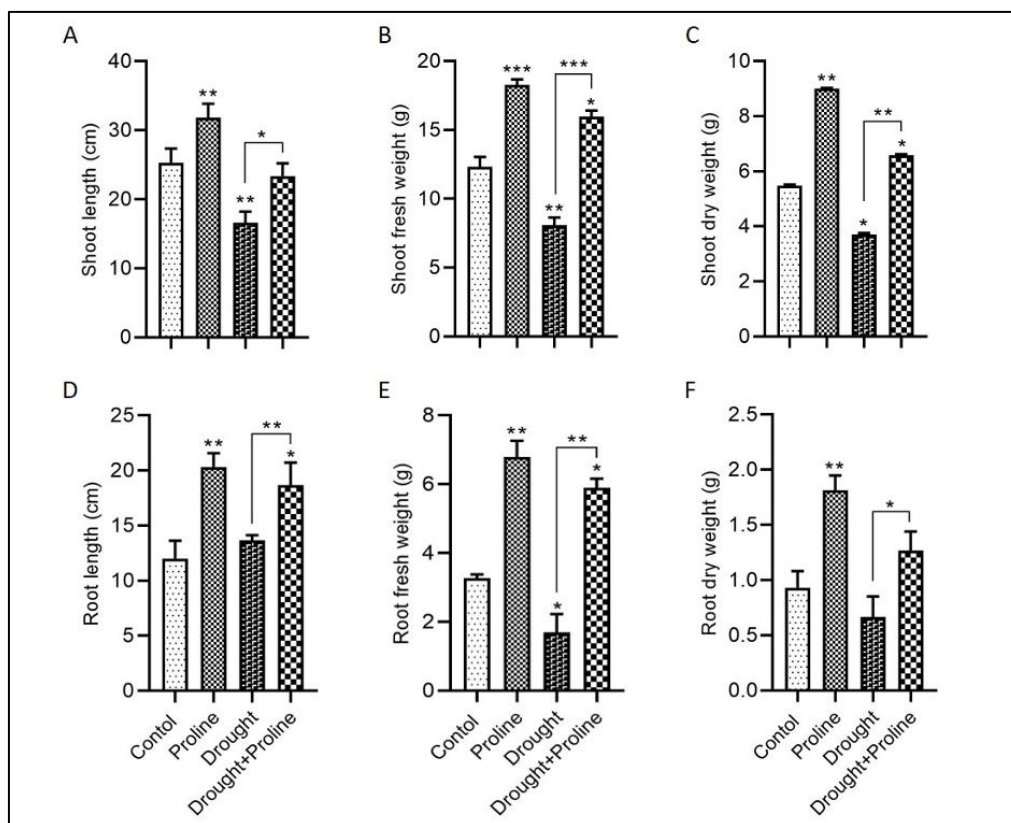
تم تنفيذ التجربة وفق تصميم عشوائي كامل مع ثلاث مكررات. جرى تحليل البيانات باستخدام تحليل التباين الأحادي (ANOVA)، تلاه اختبار بوست هوك Bonferroni عند مستوى دلالة (p = 0.05). تم عرض النتائج على شكل متوسطات وانحرافات معيارية، وتم تمثيلها بيانياً باستخدام برنامج GraphPad Prism (الإصدار 5.01؛ شركة GraphPad Software، سان دييغو، كاليفورنيا، الولايات المتحدة الأمريكية).

النتائج:

تطبيق البرولين يعزز نمو الذرة تحت إجهاد الجفاف:

أظهر استخدام مكملات البرولين تحسناً ملحوظاً في نمو نباتات الذرة تحت ظروف الري الكافي، حيث زادت أطوال السيقان والجذور وأوزانها الطازجة والجافة مقارنة بالنباتات غير المعالجة (الشكل 42). وتحت إجهاد الجفاف، تراجع نمو النباتات غير المعالجة بشكل واضح، بينما ساهم البرولين في التخفيف من هذه الآثار. فقد سجلت النباتات المعالجة بالبرولين تحت الجفاف زيادات كبيرة في

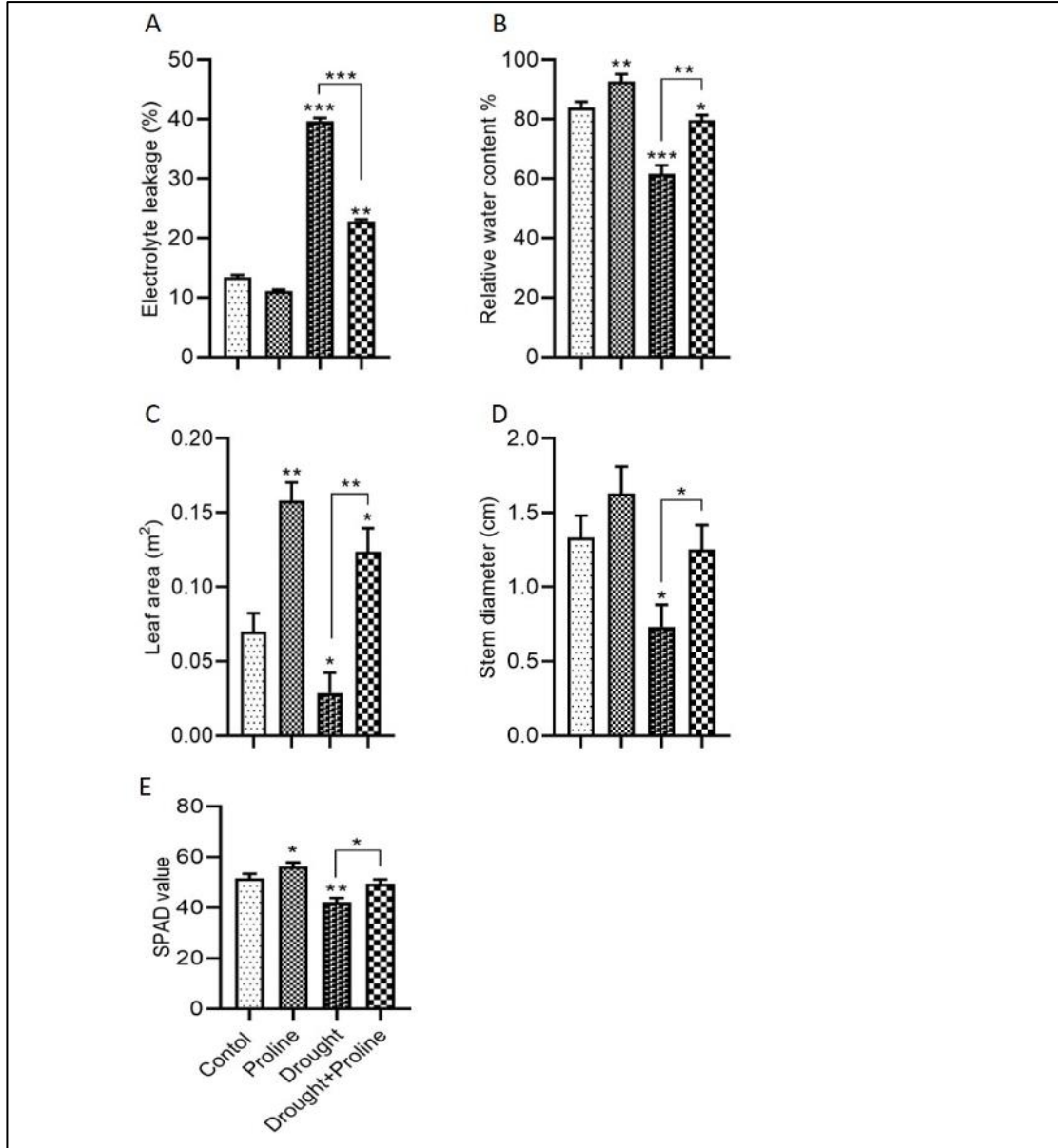
مؤشرات النمو، مثل ارتفاع طول الساق بنسبة 40%، والجذر 36%، والوزن الطازج للساق 97%، والجذر 247%، والوزن الجاف للساق 77%، والجذر 154%، مقارنة بالنباتات غير المعالجة.



الشكل (42): تأثير تطبيق البرولين على تعزيز مؤشرات نمو نبات الذرة تحت إجهاد الجفاف. (A) طول الساق، (B) الوزن الطازج للساق، (C) الوزن الجاف للساق، (D) طول الجذر، (E) الوزن الطازج للجذر، (F) الوزن الجاف للجذر. تشير مستويات الدلالة الإحصائية إلى ما يلي: * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$. تمثل الأشرطة في الشكل مقدار الخطأ المعياري، وتشير العلامات النجمية فوق الأشرطة إلى الفروقات الإحصائية بين المعالجات.

الآثار المترتبة على استخدام البرولين في تسرب الإلكتروليتات، واحتباس الماء، ومساحة الأوراق، وقطر الساق، وثبات الكلوروفيل:

أدى إجهاد الجفاف إلى زيادة تسرب الإلكتروليتات بنسبة 195% وانخفاض محتوى الماء النسبي بنسبة 26% مقارنة بالنباتات الضابطة (شكل A43, B43). غير أن مكملات البرولين قللت تسرب الإلكتروليتات بنسبة 42%، ورفعت محتوى الماء بنسبة 29% تحت الجفاف، مما يعكس دورها في تقليل الإجهاد التأكسدي وتعزيز استقرار الأغشية. كما زاد البرولين من مساحة الأوراق وقطر الساق مقارنة بالنباتات غير المعالجة تحت الجفاف (شكل C43, D43)، وساهم في الحفاظ على محتوى الكلوروفيل، الذي ارتفع بنسبة 8% و17% تحت الظروف العادية والجفاف على التوالي (شكل E43).

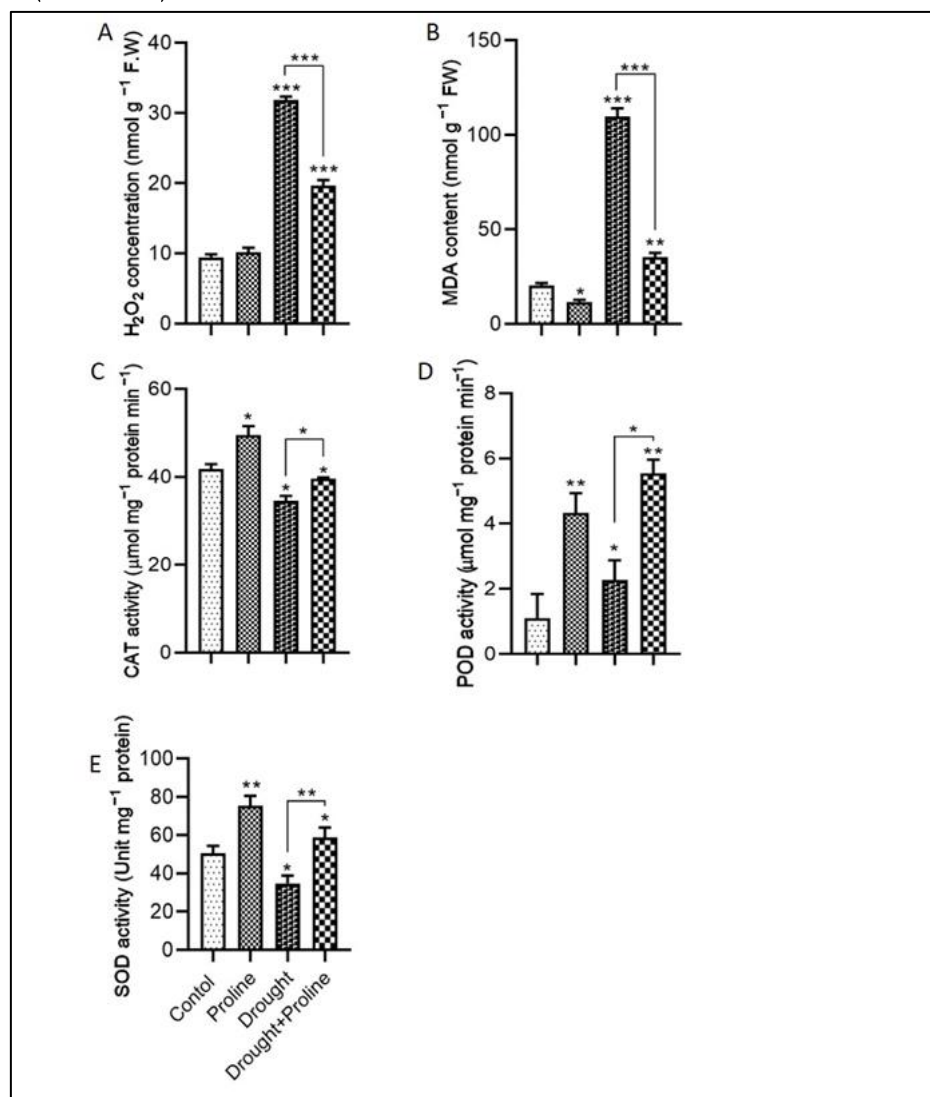


الشكل (43): تطبيق البرولين يعزز المعايير الفيزيولوجية في الذرة تحت إجهاد الجفاف. (A) تسرب الإلكتروليتات، (B) محتوى الماء النسبي، (C) مساحة الورقة، (D) قطر الساق، و (E) محتوى الكلوروفيل (قيمة SPAD). مستويات الأهمية موضحة كما يلي: * $p < 0.05$ ، ** $p < 0.01$ ، و *** $p < 0.001$. الخطوط تمثل الخطأ المعياري. النجوم فوق الأعمدة تشير إلى المقارنات مع المجموعة الضابطة، بينما النجوم فوق الخطوط تشير إلى المقارنات بين مجموعات المعالجة.

البرولين يخفف من الإجهاد التأكسدي الناتج عن الجفاف من خلال تنظيم نظام المضادات الأوكسدة:

تم تقييم دور البرولين في تخفيف الإجهاد التأكسدي الناتج عن الجفاف من خلال قياس تراكم H_2O_2 ، نشاط إنزيمات مضادات الأوكسدة، ومستويات أكسدة الدهون (شكل 44). أظهر الجفاف زيادة في مستويات H_2O_2 نتيجة ارتفاع إنتاج ROS، بينما قللت مكملات البرولين من تراكم H_2O_2 بنسبة 38% (شكل A44)،

مما يشير إلى دورها في تقليل الإجهاد التأكسدي. كما انخفضت مستويات MDA، كمؤشر لتلف الأغشية، بنسبة 67% في النباتات المعالجة بالبرولين تحت الجفاف مقارنة بغير المعالجة (شكل B44).



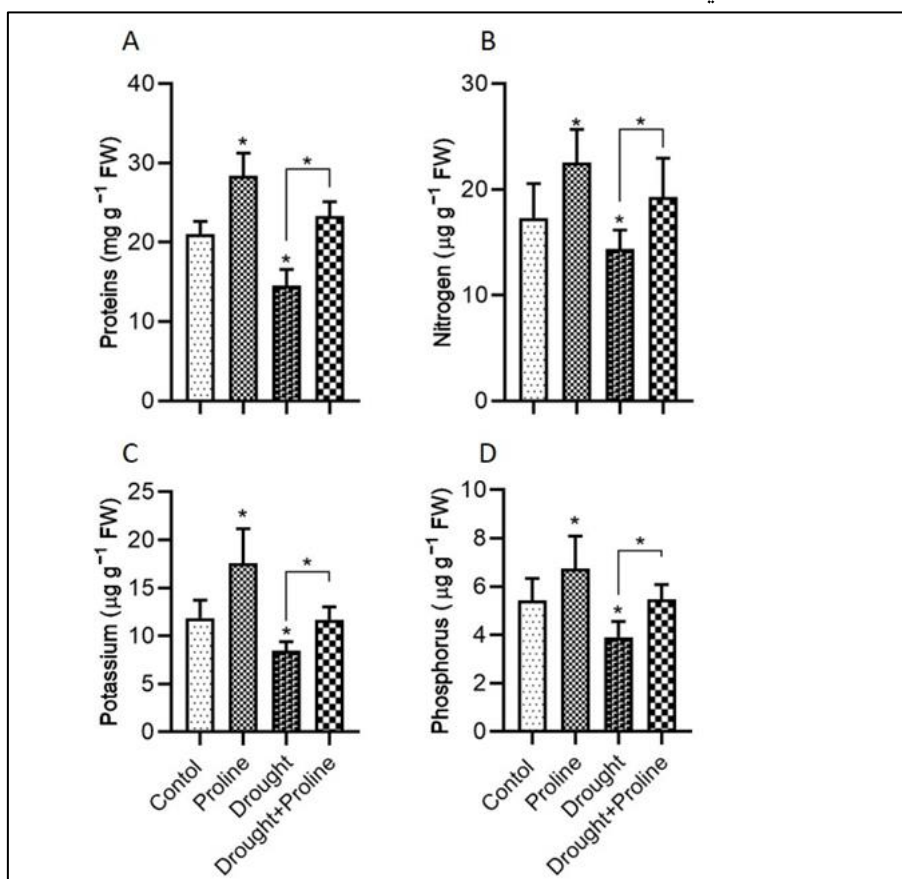
الشكل (44): تأثيرات تطبيق البرولين على مؤشرات الإجهاد التأكسدي وأنشطة إنزيمات المضادات الأوكسدة في الذرة تحت إجهاد الجفاف (A). تركيز H_2O_2 ، (B) تركيز المالوندايالدهيد (MDA)، (C) نشاط الكاتالاز (CAT)، (D) نشاط البيروكسيداز (POD)، و (E) نشاط سوپر أوكسيد ديسموتاز (SOD). تم تحديد مستويات الأهمية كما يلي $p < 0.05$ *، $p < 0.01$ **، و $p < 0.001$ *** الأعمدة تمثل الخطأ المعياري. تشير النجوم فوق الأعمدة إلى المقارنات مع المجموعة الضابطة، بينما تشير النجوم فوق الخطوط إلى المقارنات بين مجموعات المعالجة.

أظهرت النتائج أن البرولين يعزز نظام الدفاع المضاد للأوكسدة في نباتات الذرة، سواء تحت الظروف العادية أو إجهاد الجفاف. فقد زاد نشاط إنزيمات الكاتالاز (CAT)، والبيروكسيداز (POD)، وسوبر أوكسيد ديسموتاز (SOD) بشكل ملحوظ، خاصة تحت الجفاف، حيث ارتفعت أنشطتها بنسبة 14%، و 69%، و 144% على التوالي مقارنة بالنباتات غير المعالجة (شكل C-E44). ويعكس ذلك دور البرولين

في الحد من تراكم ROS وتقليل أكسدة الدهون، مما يقلل من الأضرار التأكسدية ويعزز مقاومة النبات للإجهاد.

البرولين يعزز محتوى البروتين الكلي والمغذيات تحت إجهاد الجفاف:

تلعب مستويات البروتين دوراً مهماً في استجابة النباتات للجفاف، إذ تسهم في تعزيز المرونة الفسيولوجية. أظهر قياس البروتين الكلي (شكل A45) أن مكملات البرولين زادت من تراكم البروتين تحت الظروف العادية، مما يعكس تأثيره الإيجابي على تخليق البروتين. وتحت الجفاف، تراجع تركيز البروتين الكلي، لكن البرولين خفف هذا الأثر، حيث زاد تركيز البروتين بنسبة 60% مقارنة بالنباتات غير المعالجة، مما يشير إلى دوره في الحفاظ على استقرار البروتين أثناء الإجهاد.

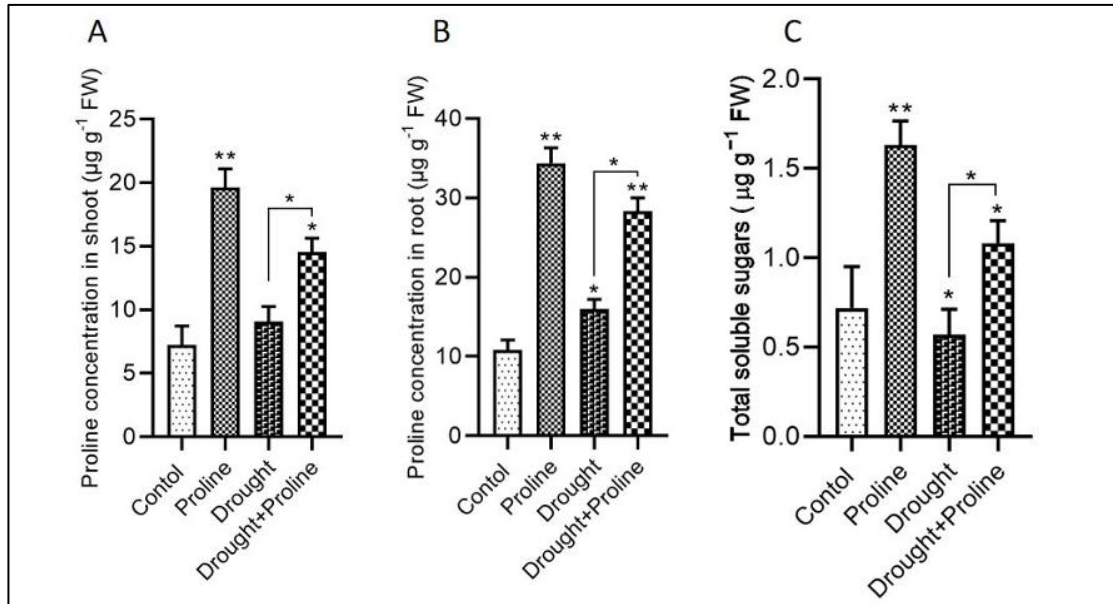


الشكل (45): تطبيق البرولين يعزز تركيزات البروتين والمغذيات في نباتات الذرة تحت إجهاد الجفاف. البروتين، (A) النيتروجين، (B) البوتاسيوم، و (C) الفسفور. أدى إجهاد الجفاف إلى انخفاض كبير في مستويات البروتين والنيتروجين والبوتاسيوم والفسفور. ومع ذلك، ساهم تطبيق البرولين تحت إجهاد الجفاف في زيادة هذه المستويات، مما يشير إلى تأثير مهدئ على استنزاف المغذيات بسبب الجفاف. تُعرض البيانات كمتوسط \pm الخطأ المعياري. تم الإشارة إلى مستويات الأهمية على النحو التالي: * $p < 0.05$. تمثل الأعمدة الخطأ المعياري. النجوم فوق الأعمدة تشير إلى المقارنات مع المجموعة الضابطة، بينما النجوم فوق الخطوط تشير إلى المقارنات بين مجموعات المعالجة.

أظهرت نتائج تحليل المغذيات الأساسية (النيتروجين، البوتاسيوم، الفوسفور) أن البرولين يعزز امتصاصها أو احتفاظ النبات بها، إذ سجلت النباتات المعالجة بالبرولين مستويات أعلى من هذه العناصر تحت الظروف العادية مقارنة بالضوابط (شكل B-D45). وتحت إجهاد الجفاف، ورغم الانخفاض العام في المغذيات، ساهم البرولين في الحفاظ عليها، حيث زادت نسب النيتروجين والبوتاسيوم والفوسفور بنسبة 30%، 40%، و28% على التوالي مقارنة بالنباتات غير المعالجة، مما يعزز دور البرولين في دعم التوازن الأيضي والأوزموزي أثناء الإجهاد.

تراكم البرولين والسكريات أثناء إجهاد الجفاف:

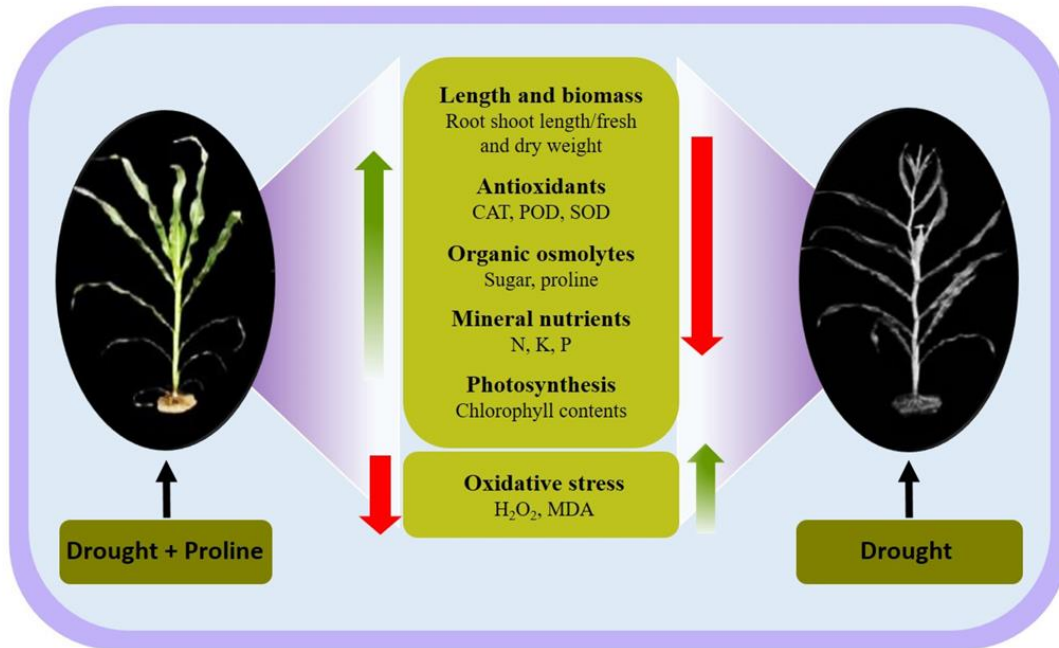
أظهرت الدراسة أن البرولين أدى إلى زيادة كبيرة في تركيزه داخل الأجزاء الخضرية والجذور، حيث ارتفعت تراكماته بنسبة 172% تحت الظروف العادية، و60% تحت الجفاف مقارنة بالنباتات غير المعالجة (شكل A, B). ساهم هذا التراكم في التعديل الأسموزي والحفاظ على توتر الخلايا، مما خفف من تأثير نقص المياه. كما ارتفعت مستويات السكريات القابلة للذوبان في النباتات المعالجة بالبرولين، خاصة تحت الجفاف، حيث زادت بنسبة 90%، مما يعكس دور البرولين في دعم التوازن الأسموزي وتحسين قدرة النبات على التكيف (شكل C46).



الشكل (46): التطبيق الخارجي للبرولين يعزز مستويات البرولين والسكريات الذاتية في نباتات الذرة تحت إجهاد الجفاف. (A) تركيز البرولين في الأجزاء الخضرية، (B) تركيز البرولين في الجذور، و (C) إجمالي السكريات القابلة للذوبان. يتم تقديم البيانات كمتوسط + الخطأ المعياري. تم تحديد مستويات الدلالة على النحو التالي: * $p < 0.05$ و ** $p < 0.01$. تمثل الأعمدة الخطأ المعياري. تشير النجوم فوق الأعمدة إلى المقارنات مع مجموعة الضبط، بينما تشير النجوم فوق الخطوط إلى المقارنات بين مجموعات المعالجة.

المناقشة :

إجهاد الجفاف يحد بشكل كبير من إنتاجية الذرة من خلال التأثير على العمليات الفسيولوجية والكيميائية الحيوية والجزيئية. تُظهر دراستنا أن مكملات البرولين تعزز من قدرة الذرة على التكيف مع الجفاف من خلال تحسين النمو، واحتباس الماء، واستقرار الأغشية، وتراكم المغذيات، وتقليل الأضرار التأكسدية (الأشكال 47 و S1). تسلط هذه النتائج الضوء على دور البرولين المتعدد الأوجه في التخفيف من إجهاد الجفاف وتقدم رؤى لتطوير استراتيجيات لتحسين مرونة المحاصيل تحت الظروف المناخية القاسية.



الشكل (47): يوضح هذا الشكل استجابة نمو الذرة تحت إجهاد الجفاف مع وبدون مكملات البرولين. تُظهر اللوحة اليسرى نبات ذرة تم معالجته بإجهاد الجفاف والبرولين الخارجي، مع تحسن في معايير النمو. بالمقابل، تُظهر اللوحة اليمنى نبات ذرة تم تعريضه لإجهاد الجفاف فقط، مع تقليل في النمو ومحتوى الكلوروفيل. الجزء المركزي يعرض التغيرات الفيزيولوجية والكيميائية الحيوية التي لوحظت تحت هذه الظروف. يعزز علاج البرولين معايير النمو وأنشطة المضادات الأكسدة، بما في ذلك الكاتالاز (CAT)، البيروكسيدياز (POD)، والسوبر أوكسيد ديسموتاز (SOD)، بالإضافة إلى تراكم الأوزموليتات العضوية مثل السكريات والبرولين. علاوة على ذلك، يزيد من تركيزات المغذيات المعدنية الأساسية، بما في ذلك النيتروجين (N)، والفوسفور (P)، والبوتاسيوم (K). تدعم هذه التغيرات مجتمعة التمثيل الضوئي وتقلل من مؤشرات الإجهاد التأكسدي مثل H_2O_2 والمالونديالدهيد (MDA). تشير الأسهم الخضراء إلى الزيادات، بينما تشير الأسهم الحمراء إلى التغيرات المعاكسة.

تلجأ النباتات إلى آليات تكيفية متعددة لمواجهة الضغوط البيئية، خصوصاً الضغوط غير الحيوية مثل الجفاف. من بين هذه الآليات، يُعدّ استخدام المواد الأسموزية الواقية مثل الأحماض الأمينية، البرولين، البيتين، والتريهالوز فعالاً في تقليل الأضرار الناتجة عن الإجهاد (Ashraf et Foolad,2007). في هذه الدراسة، أُثبت أن تطبيق البرولين الخارجي على نباتات الذرة تحت ظروف الجفاف يعزز من قدرتها على التكيف، حيث ساهم في تحسين النمو من خلال زيادة أطوال الأجزاء الخضرية والجذور، والأوزان الطازجة والجافة، ومساحة الأوراق، وقطر الساق. كذلك، أدى البرولين الخارجي إلى زيادة تراكم البرولين الداخلي في الجذور والأجزاء الخضرية، مما دعم التكيف الأسموزي وحافظ على ضغط الخلايا. في المقابل، سبب الجفاف وحده تدهوراً حاداً في مؤشرات النمو. تتوافق هذه النتائج مع دراسات سابقة على الذرة (Ali et al.,2007)، وكذلك في الأرز و *Allenrolfea occidentalis*، حيث عزز البرولين النمو تحت الجفاف والملوحة (Chorminski et al.,1989, Kishor et al.,1995). يساهم البرولين الخارجي في رفع مستويات البرولين الداخلي، ما يساعد على استقرار الإنزيمات والبروتينات والأغشية، ويوفر طاقة للنمو خلال الإجهاد (Ali et al.,2007). لوحظت نتائج مماثلة لتحسين النمو تحت ملوحة التربة في أنواع نباتية متعددة مثل *Triticum durum*، *Cucumis sativus*، *Helianthus annuus*، *Medicago sativa*، *Zea mays*، و *Oryza sativa* (Alam et al.,2016، Rady et al.,2016). مع ذلك، يختلف تأثير البرولين باختلاف نوع النبات، مرحلة النمو، طريقة التطبيق، والتركيز المستخدم. في هذه الدراسة، أدى تطبيق تركيز (30 mM) من البرولين في مرحلة الشتلات إلى تحسن واضح في نمو الذرة، بما يتفق مع نتائج مماثلة في الأرز (30 mM) والفاصوليا (30 mM)، بينما كان تركيز (10 mM) فعالاً في خلايا التبغ (Roy Okuma et al.,2000، et al.,1993). تؤكد هذه النتائج أن البرولين يُعدّ أوزمولىً فعالاً يعزز نمو النباتات وتحملها للجفاف، خصوصاً عند استخدامه بتركيزات ومراحل نمو مثالية، مع أهمية التوسع في دراسة آليات تحمله لتطوير استراتيجيات زراعية مستدامة في البيئات المعرضة للإجهاد.

يتسبب إجهاد الجفاف في الذرة في تقليل مساحة الأوراق ومستويات الكلوروفيل، مما يضعف كفاءة التمثيل الضوئي نتيجة زيادة الإجهاد التأكسدي، كما يظهر في ارتفاع مستويات (H_2O_2) و (MDA) وانخفاض نشاط إنزيمات مضادات الأكسدة (SOD ، POD ، CAT) (شكل 44). أظهر تطبيق البرولين الخارجي فعاليته في تخفيف هذا الإجهاد من خلال تعزيز نشاط تلك الإنزيمات وتقليل الضرر الناتج عن الجفاف. يساعد التمثيل الحيوي للبرولين أيضاً في الحفاظ على التوازن الأسموزي واستعادة محتوى الماء أثناء الإجهاد الأسموزي (Hur,2005). وأكدت دراسة قاسم علي وآخرين (Ali et al.,2007) أن البرولين يدعم التمثيل الضوئي في الذرة من خلال تقليل الإجهاد التأكسدي. كما أظهرت نتائج هذه الدراسة أن البرولين يقلل من إنتاج (H_2O_2) وتراكم (MDA) (شكل A44، B)، مما يحسّن توصيل الثغور واستيعاب (CO_2) ، وبالتالي يعزز التمثيل الضوئي، وهو ما يتماشى مع دراسات سابقة أظهرت تأثير البرولين الإيجابي على توصيل الثغور وامتصاص (CO_2) في الذرة المعرضة للجفاف (Sharkey et al.,2007).

تشير الدراسة أن البرولين الخارجي يزيد من مستويات البرولين داخل الخلايا، مما يحفز نشاط إنزيمات مضادات الأكسدة مثل (CAT، POD)، و(SOD)، ويساهم في تقليل الإجهاد التأكسدي. وأشارت دراسات سابقة إلى أن البرولين يعمل كقابل للإلكترونات، مما يعزز نشاط هذه الإنزيمات ويقلل الأضرار الناتجة عن أنواع الأوكسجين التفاعلية (ROS) (Ural,2022، Kavi kishor,2022). على سبيل المثال، في الشمندر السكري، زاد البرولين من تراكم البرولين الداخلي، المركبات الفينولية، ونشاط مضادات الأكسدة، مما خفف من أعراض الإجهاد التأكسدي (Alkahtani et al.,2021). كما أن تطبيق البرولين يعزز من قدرة النبات على تحمل الإجهاد من خلال تحسين امتصاص العناصر الغذائية، امتصاص الماء، كفاءة التمثيل الضوئي، تبادل الغازات، والاستجابة المضادة للأكسدة (Semida، Dien et al.,2019، Hur,2005). في هذه الدراسة، ساعد البرولين على الحد من تراكم (H₂O₂) و(MDA) عبر زيادة نشاط الإنزيمات المضادة للأكسدة، كما أكدت دراسات حديثة أن تنشيط البذور بالبرولين عزز من نشاط (APX، CAT) و(SOD) في أصناف الذرة FS-67 وCML-539 (Gelaw et Senan-Mishra,2024). ويُعد (CAT) محفزاً لاستجابات التكيف مع الإجهاد، بينما يمثل (SOD) خط الدفاع الأول ضد (ROS) بتحويلها إلى جزيئات غير ضارة مثل الأوكسجين والماء (Gondim et al.,2012). وتشير دراسة أخرى إلى أن البرولين يعمل أيضاً كمنظف لـ(ROS)، مما يحمي البلاستيدات الخضراء والأنوية من الضرر التأكسدي (Gao et al.,2023). تبرز هذه النتائج الدور المحوري للبرولين كعامل أسموزي واقٍ يعزز من مقاومة النبات للجفاف من خلال تقليل الإجهاد التأكسدي، وتحسين التمثيل الضوئي، وزيادة قدرة النبات على التحمل.

يلجأ النبات تحت إجهاد الجفاف إلى آليات تكيفية متعددة للحفاظ على ضغط الامتلاء الخلوي، من أبرزها التنظيم الأسموزي عبر تراكم مركبات واقية مثل البرولين، والسكريات القابلة للذوبان، والأحماض الأمينية، والتي تساعد على الاحتفاظ بالماء وضمان الوظائف الخلوية. وقد أشارت دراسات سابقة إلى أهمية هذه المركبات في تعديل الضغط الأسموزي والحفاظ على الامتلاء الخلوي (Hossain، Burritt,2012). في هذه الدراسة، أظهرت شتلات الذرة المعالجة بالبرولين الخارجي تحت الجفاف ارتفاعاً ملحوظاً في مستويات البروتين الكلي، والسكريات القابلة للذوبان، والعناصر الغذائية (N، P، K)، إلى جانب زيادة في تركيز البرولين الداخلي مقارنة بالنباتات المصابة بالجفاف وغير المعالجة (شكل 45 و46). ورغم أن بعض الدراسات ترى أن الجفاف قد يرفع من مستويات هذه المركبات مقارنة بالنباتات المروية (Semida et al.,2020)، فإن دراستنا أظهرت انخفاضها في النباتات المعرضة للجفاف فقط، ويرجح أن ذلك ناتج عن شدة أو طول مدة الإجهاد في تجربتنا، ما قد يكون فاق قدرة النبات على التكيف. تختلف استجابات النباتات لإجهاد الجفاف باختلاف الأنواع النباتية، والمراحل النمائية، والظروف البيئية، وتصميمات التجارب. وفي هذه الدراسة، أظهرت بذور الذرة المعاملة بالبرولين تراكمًا مرتفعاً من البرولين الداخلي والسكريات خلال الجفاف (Hosseinfard et al.,2022)، وهو ما يتوافق مع نتائج

دراسات سابقة تؤكد أن البرولين الخارجي يعزز التراكم الداخلي للبرولين ويقوي التعديل الأسموزي (Ali *et al.*, 2007). (Bajji *et al.*, 2000, Hoque *et al.*, 2007, Ashraf *et al.*, 2007, *et al.*, 2007).

أظهرت نتائج الدراسة توافقاً مع أبحاث حديثة تؤكد أن البرولين الخارجي يعزز امتصاص العناصر الغذائية الأساسية مثل البوتاسيوم، الكالسيوم، الفوسفور، والنيتروجين تحت إجهاد الجفاف (Ali *et al.*, 2008)، مما يعكس أهمية توازن المغذيات لتحمل الجفاف. يلعب البوتاسيوم دوراً في التنظيم الأسموزي وتنشيط الإنزيمات وتنظيم الثغور، بينما يساهم النيتروجين في البنية الخلوية، ويُعد الفوسفور محورياً في عمليات الطاقة والتنفس والتمثيل الضوئي (Alam, 1999, Lahaye *et al.*, 1971). في المقابل، أدى الجفاف بدون إضافة البرولين إلى انخفاض ملحوظ في مستويات N و P و K، وهو ما عزاه Pessaraki (2019) إلى انخفاض التوصيل الثغري ومعدلات التنفس أثناء الإجهاد المائي. وبما أن امتصاص العناصر يعتمد على حركة الماء من الجذور إلى الأجزاء الهوائية (Keller, 2005)، فإن تطبيق البرولين ساعد على التخفيف من آثار الجفاف من خلال تعزيز امتصاص وتراكم هذه العناصر، ما يجعل من البرولين استراتيجية واعدة لتحسين تحمل الجفاف في الذرة.

مقارنة بين نتائج المقالات:

1. أظهرت الدراسة أن الإجهاد الحراري أثر سلباً على الخصائص المورفولوجية والفيزيولوجية للفلل الحار، بينما ساعد البرولين الخارجي بتركيز 10 مليمول في تقليل هذه التأثيرات. تبين أن الصنف UK-101 أظهر أعلى تحمل، ويعد البرولين وسيلة فعالة للتخفيف من الإجهاد الحراري عند اختيار الأصناف المقاومة.
2. أظهرت الدراسة أن الإجهادات غير الحيوية أثرت بشكل متفاوت على تراكم البرولين في شتلات نخيل التمر، وكانت المعاملة الطويلة بالملوحة الأكثر تأثيراً، تليها البرودة، بينما كان تأثير الجفاف و ABA محدوداً. لوحظ تراكم أعلى للبرولين في الجذور مقارنة بالأوراق، مما يدل على دور الجذور الأساسي في الاستجابة للإجهاد، ويؤكد أن البرولين مؤشر فعال لاستجابة النبات للضغوط البيئية.
3. أظهرت الدراسة تبايناً واضحاً في استجابة شتلات *Schima superba* للجفاف بين الأصول الجغرافية، حيث أبدى منشأ HN تعافياً أسرع في نشاط SOD وتركيز البرولين بعد إعادة الري. كما ارتبط تراكم البرولين سلباً بمحتوى الماء النسبي، في حين أظهر نشاط SOD ارتباطاً إيجابياً به، مما يبرز أهمية هذين المؤشرين في تقييم كفاءة تحمل النباتات لإجهاد الجفاف وتعافيتها منه.
4. أظهرت الدراسة أن معاملة النباتات بكبريتات الكوبالت ($CoSO_4$) تعزز النمو الخضري، محتوى الأصباغ، والأنظمة الدفاعية المضادة للأكسدة، خاصة عند تركيز 20 ملغم/لتر. إضافة البرولين زادت من فعالية هذه التأثيرات، خصوصاً في نشاط الإنزيمات المضادة للأكسدة. على الرغم من تأثير البرولين المخفف على بعض المؤشرات، إلا أنه أظهر تآزراً مع الكوبالت في تحسين مقاومة النبات للإجهاد.
5. استنتجت الدراسة أن المعالجات الحرارية والباردة تؤثر بشكل كبير على محتوى البرولين وستعبر الجينات المتعلقة بتخليقه في أشجار الخوخ. في الدراسة الأولى، لوحظت تغييرات كبيرة في محتوى البرولين بعد المعالجات الحرارية والباردة، بينما في الدراسة الثانية لم تتغير مستويات البرولين بشكل معنوي ولكن لوحظ انخفاض في تآلق الكلوروفيل. تُظهر النتائج تقلبات ملحوظة في التعبير الجيني لجينات P5CS، P5CR، و OAT بين المعالجات المختلفة.
6. أظهرت الدراسة أن الإجهاد الملحي يقلل من نمو نبات الطماطم (*Microtom*) ويخفض وزن الأوراق الجاف مع زيادة تركيز NaCl. كما لوحظ زيادة تدريجية في تركيز البرولين والجلاليسين بيتاين مع ارتفاع تركيز الملح، مع أعلى قيم عند 200 ملي مول NaCl. بالإضافة إلى ذلك، تبين

وجود تنافس بين تراكم أيونات Na^+ و K^+ و Mg^{2+} في الأوراق، مما يقدم رؤى حول آليات تحمل النباتات للإجهاد الملحي.

7. تؤكد نتائج الدراسة أن تطبيق البرولين الخارجي يعزز بشكل فعال تحمل نباتات الذرة لإجهاد الجفاف من خلال تحسين النمو، واستقرار الأعشية، واحتباس الماء، وتقليل الإجهاد التأكسدي عبر تنشيط إنزيمات الدفاع. كما يسهم في رفع مستويات البروتين والمغذيات الأساسية، وزيادة تراكم البرولين والسكريات القابلة للذوبان، مما يعزز التوازن الأسموزي. توضح هذه النتائج أن البرولين يدعم آليات التكيف الفسيولوجي والدفاعي للنبات، ويُعد خياراً واعداً في الزراعة المستدامة لمواجهة الجفاف والتغيرات المناخية.

الخاتمة

الخاتمة:

في خضم التحديات البيئية المتزايدة التي تواجهها الكائنات الحية، لا سيما النباتات، يبرز البرولين كمركب حيوي أساسي يساهم في تعزيز القدرة على التكيف مع الإجهادات البيئية المختلفة. فقد أثبتت الأبحاث أن لهذا الحمض الأميني غير الأساسي دوراً فعالاً في تنظيم استجابات النباتات للإجهادات الفيزيولوجية مثل الجفاف، والملوحة، والبرودة، من خلال عمله كمثبت للبروتينات، وحامٍ للغشاء الخلوي، ومضاد للأكسدة، إضافة إلى دوره في تنظيم التوازن الأسموزي. وعند النظر بشكل أعمق، نلاحظ أن البرولين يعمل على تثبيت البروتينات من خلال المحافظة على بنيتها الثلاثية تحت ظروف الجهد، مما يقلل من خطر التفكك أو فقدان الوظيفة البيولوجية. أما على مستوى الغشاء الخلوي، فيساعد البرولين على الحفاظ على سلامة الغشاء ومنع تسرب الأيونات والمواد الحيوية، ما يضمن استمرار العمليات الحيوية الأساسية داخل الخلية. أما من الناحية الأيضية، فيُعد البرولين مخزناً مؤقتاً للطاقة والكربون والنيتروجين، يمكن للنبات استخدامه عند تحسن الظروف البيئية. كذلك، يساهم في تعديل مستويات أنواع الأوكسجين التفاعلية (ROS)، مما يحد من الأضرار التأكسدية التي قد تدمر الأنسجة النباتية.

يُظهر تراكم البرولين استجابة مباشرة وسريعة للإجهاد، مما يجعله مؤشراً حيوياً يمكن الاستفادة منه في تقييم مدى مقاومة النباتات للظروف البيئية المتغيرة. وتشير الدراسات إلى أن تراكم البرولين يحدث غالباً في المراحل المبكرة من التعرض للإجهاد، ويُعد بمثابة إشارة إنذار مبكرة تُحفز سلسلة من التفاعلات البيوكيميائية والتنظيمات الجينية. ويمكن قياس مستوياته بسهولة نسبياً، مما يجعله أداة فعالة في برامج تقييم سلالات النباتات ومدى قدرتها على الصمود. كما أن العلاقة بين كمية البرولين المتراكمة وشدة الإجهاد تتيح إمكانية استخدامه كمؤشر كمي لمدى تأقلم النبات، خاصة في الأبحاث المتعلقة بانتقاء الأصناف المقاومة. وقد فتح ذلك آفاقاً بحثية واسعة في مجالات البيولوجيا الجزيئية والتقنيات الحيوية، خصوصاً في مجال تحسين المحاصيل الزراعية عبر التعديل الوراثي أو الانتقاء التقليدي لرفع كفاءة إنتاج البرولين تحت ظروف الإجهاد.

وعليه، فإن تعزيز الفهم العلمي للدور الذي يلعبه البرولين لا يسهم فقط في تفسير آليات مقاومة النباتات، بل يُعد أيضاً خطوة محورية نحو تطوير استراتيجيات زراعية مستدامة قادرة على مواجهة آثار التغير المناخي وضمان الأمن الغذائي في المستقبل.

قائمة المصادر والمراجع

قائمة المصادر والمراجع

المراجع بالعربية:

1. أبو جاد الله، ج. م. (2010). فسيولوجيا وبيولوجيا النبات الجزيئية أثناء الإجهاد المائي. جامعة المنصورة. مصر.
2. أبو نقطة، ف. (2003-2004). أساسيات في علم التربة. جامعة دمشق.
3. الحمودي، مالك عبدهللا عذبي. (2011). استجابة أربعة أصناف من الحنطة (*Triticum aestivum* L.) لتراكيز البرولين المضافة تحت مستويات إجهاد مائي مختلفة. رسالة ماجستير، كلية التربية للعلوم الصرفة، جامعة كربلاء، العراق.
4. الحجيري، ج. ك. ع. (2013). تأثير إضافة البوتاسيوم في قابلية الحنطة (*Triticum aestivum* L.) لتحمل الإجهاد المائي. رسالة ماجستير، جامعة كربلاء، كلية التربية للعلوم الصرفة، قسم علوم الحياة. 5. الزايدة، خ. (2020). التسميد العضوي وآثره على تراكم العناصر الثقيلة والأضرار الناجمة عنه. مذكرة ماستر أكاديمي، جامعة قاصدي مرباح ورقلة. وزارة التعليم العالي والبحث العلمي.
6. الشريف، ع. ا. ا. (2022). تأثير الإجهاد الملحي على إنبات ونمو بذور بعض أصناف القمح الليبي. رسالة ماجستير غير منشورة، جامعة الزاوية، ليبيا.
7. الربيعي، ب. ج. ه. (2022). إجهاد الجفاف في النباتات.
8. رواص، ف.، & رواص، ن. (2022). تحديد تركيز بعض المعادن الثقيلة في عدد من النباتات الطبية المحلية الجزائرية. مذكرة ماستر أكاديمي، جامعة قاصدي مرباح - ورقلة، الجزائر.
9. زناتي، س.، & يعقوبي، ش. (2021). استجابة القمح الصلب (*Triticum durum* Desf.) لعائق الملوحة في وسط النمو بواسطة منبه البرولين. مذكرة ماستر، جامعة الإخوة منتوري قسنطينة.
10. شروانة، ش.، وشرواط، ج. (2019). تأثير حامض البرولين ودوره في تقليل التأثير السلبي لكلوريد الصوديوم على المرحلة الخضريّة لنبات القمح. مذكرة ماستر، جامعة قسنطينة 10، كلية علوم الطبيعة والحياة.

11. عباس، س. م. ص. (2020). دراسة بعض خصائص الترب المتأثرة بالأملاح وتدهورها في محافظة البصرة باستعمال التقانات الجيومكانية. أطروحة دكتوراه، كلية الزراعة، جامعة البصرة.
12. عريبي، ر.، و بوسنة، ر. (2022). [مذكرة ماستر أكاديمي في كيمياء المحيط]. جامعة قاصدي مرباح - ورقلة، كلية الرياضيات وعلوم المادة، قسم الكيمياء.
13. فطحيزة سعد، إ.، فطحيزة سعد، ش.، فطحيزة سعد، ص. (2022). تأثير الملوحة على نمو وإنتاج بعض أصناف الكينوا *Chenopodium quinoa Willd*. مذكرة ماستر، جامعة الشهيد حمة لخضر - الوادي، الجزائر، كلية علوم الطبيعة والحياة.
14. معارفية، س. (2009). تأثير الإجهاد الملحي على التوازن الهرموني لدى نباتات المحاصيل الحقلية. مذكرة ماجستير غير منشورة، جامعة منتوري قسنطينة، الجزائر.
15. ميسه، إ.، و كامط، ص. (2021). تأثير النقع بمنظمات النمو (Kénitine) على خصائص الإنبات لأصناف من نبات الكينوا (*Chenopodium quinoa Willd*) تحت الظروف الملحية. مذكرة ماستر، جامعة الشهيد حمة لخضر الوادي، كلية علوم الطبيعة والحياة.
16. بوعرت، م.، و خزندار، ش. م. (2021). الأسمدة الزراعية: استخداماتها، منافعها وأضرارها [مذكرة ماستر، جامعة الإخوة منتوري قسنطينة 1]. كلية علوم الطبيعة والحياة، قسم البيولوجيا والإيكولوجيا النباتية.
17. دالي، ن.، و جاب الله، أ. (2018). الاجهاد المائي وعلاقته ببعض الصفات المورفولوجية و الفسيولوجية لنبات القمح (*Triticum sp*). مذكرة ماستر، جامعة الإخوة منتوري قسنطينة 1، الجزائر.
18. 18. خيار، م.، و مقلاتي، خ. (2016). دراسة بعض الصفات الفيزيو-مورفولوجية لنبات القمح الصلب (*Triticum durum Desf*). تحت تأثير الإجهاد المائي. مذكرة ماستر، جامعة الإخوة منتوري قسنطينة 1، كلية علوم الطبيعة والحياة.
19. حساسة، ر.، و سويد، أ. (2019). دراسة تأثير الملوحة على قوة النبات عند أصناف القمح المحمية والمنتخبة. مذكرة ماستر أكاديمي، جامعة الشهيد حمة لخضر الوادي، كلية علوم الطبيعة والحياة.

المراجع بالفرنسية:

20. Abdesseme, S. (2009). Comportement des semis du Cèdre de l'Atlas en conditions de stress thermique [Mémoire de magistère, Université Mentouri Constantine]. Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, Département de Biologie et d'Ecologie. p53
21. Aidaoui, H., Meguelatani, S., & Mouasse, N. (2013). *Étude de l'effet de stress salin sur la qualité de trois variétés de blé dur (Waha, Semito et Vitron)* [Mémoire de master, Université 08 mai 1945 Guelma]. Faculté des sciences de la nature et de la vie. P9
22. Akhtar, I., & Nazir, N. (2013). Effect of waterlogging and drought stress in plants. *International Journal of Water Resources and Environmental Sciences*, 2(2), 34–40. <https://doi.org/10.5829/idosi.ijwres.2013.2.2.11125>
23. Akram, S., Ayyub, C. M., Shahzad, M., & Shahzad, A. (2021). Role of proline in mitigating the deleterious effects of heat stress in chillies. *Contemporary Agriculture*, 70(1-2), 1–8. <https://doi.org/10.2478/contagri-2021-0006>
24. Almeida, L. M. M. (2022). Effets des stress thermiques répétés sur le rendement et la qualité grainière du colza : caractérisation écophysiological et modélisation (Thèse de doctorat, Normandie Université). HAL.
25. Amenas, Y. (2007). Caractérisation de la réponse physiologique d'*Atriplex halimus* L. et *Atriplex canescens* sous l'effet du stress hydrique . l'obtention du grade de MAGISTER , Université d'Oran Es-Senia, Algérie).
26. Amrouche, I., & Mesbah, E. K. (2017). Effet du stress abiotique sur l'accumulation des protéines totales chez deux variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) [Mémoire de Master, Université des Frères Mentouri Constantine, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie].
27. Angon, P. B., Islam, M. S., KC, S., Das, A., Anjum, N., Poudel, A., & Suchi, S. A. (2024). Sources, effects and present perspectives of heavy metals contamination: Soil, plants and human food chain. *Heliyon*, 10*, e28357. P3-5
28. Aouissi, N. (2011). Impact de la pollution atmosphérique générée par le transport sur la santé publique, un essai écotoxicologique sur le blé dur (*Triticum durum*, Desf). Cas de la région de Annaba (Mémoire de magistère, Université Badji Mokhtar - Annaba).
29. Ashraf, M. A. (2012). Waterlogging stress in plants: A review. *African Journal of Agricultural Research*, 7(13), 1976-1981. <https://doi.org/10.5897/AJARX11.084>

30. Ashraf, M. F. M. R., & Foolad, M. R. (2007). Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. *Environmental and experimental botany*, 59(2), 206-216.
31. Atoui, A., & Fergati, M. (2019). Accumulation de la proline et des protéines totales chez quelques variétés de blé dur (*Triticum durum Desf*) cultivé sous condition de stress hydrique [Mémoire de Master, Université des Frères Mentouri Constantine 1]. Université des Frères Mentouri Constantine 1.
32. Baba Sidi-Kaci, S. (2010). Effet du stress salin sur quelques paramètres phoenologiques (biométrie, anatomie) et nutritionnels de l'Atriplex en vue d'une valorisation agronomique [Mémoire de magistère, Université Kasdi Merbah - Ouargla]. Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et Sciences de la Terre et de l'Univers, Département des Sciences Agronomiques.
33. Bacha, H., Mansour, E., Guasmi, F., Triki, T., & Ferchichi, A. (2015). Proline, glycine bétaïne et composition minérale des plantes de *Solanum lycopersicum* L. (var. Microtom) sous stress salin. *Journal of New Sciences, Agriculture and Biotechnology*, 22(3), 1007–1013.
34. Barrett-Lennard, E. G. (2003). The interaction between waterlogging and salinity in higher plants: Causes, consequences and implications. *Plant and Soil*, 253(1), 35–54. p36
35. Bekka, S. (2019). Effets de la proline exogène en conditions de stress hydrique sur la régulation du métabolisme de la proline et quelques paramètres morphophysologiques et biochimiques du blé tendre (*Triticum aestivum* L.) [Thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene]. P4
36. Benaissa, A., & Djebbar, R. (2022). Aridity, stress and plant. Conference paper. Laboratory of Biology and Physiology of Organisms, University of Sciences and Technologies of Houari Boumediene, Algeria. <https://www.researchgate.net/publication/361944200>
37. Benkolli, M., & Bouzeghaia, B. (2016). Étude biochimique de dix variétés de blé dur (*Triticum durum* Desf.) sous l'effet d'un stress oxydatif généré par un stress hydrique [Mémoire de Master, Université des Frères Mentouri Constantine].
38. Benmerad, Y. (2022). Effets de la température et de la salinité sur la germination des graines de trois variétés de quinoa [Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah - Ouargla]. Faculté des sciences de la nature et de la vie.p8

39. Berwal, M. K., Kumar, R., Prakash, K., Rai, G. K., & Hebbar, K. B. (2021). Antioxidant defense system in plants against abiotic stress. In *Abiotic stress tolerance mechanisms in plants* (pp. 175-202). CRC Press.
40. Boualem, S., Boutaleb, F., Ababou, A., & Gacem, F. (2019). Effect of salinity on the physiological behavior of the olive tree (variety Sigoise). **Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 11*(1), 432–447. <https://doi.org/10.4314/jfas.v11i1.33>
41. BOUCHENE, C., & DAHMANI, A. (2019). Impact de la salinité - l'acide salicylique sur la germination et la croissance d'une culture d'intérêt agronomique (Cas de l'orge : *Hordeum vulgare* L.) Mémoire de Master, Université de Blida 1.
42. Boukraâ, D. (2008). Interaction acide sulfosalicylique et salinité sur la réponse de la proline et des variations minérales chez des plantes juvéniles d'*Atriplex halimus* L. (Mémoire de magistère , Université d'Oran Es-Senia, Algérie).
43. Bouzekri, Z. (2019). Réponses physiologiques et biochimiques de deux variétés de Trèfle (*Trifolium alexandrinum* L. et *Trifolium repens* L.) à la bio-fertilisation sous contrainte saline [Master's thesis, Université Ziane Achour - Djelfa].
44. Brik, R., & Saadouni, M. (2021). Évaluation de l'efficacité des stimulateurs de défense des plantes dans la résistance des effets de stress salin [Mémoire de master, Université de Hamma Lakhdar - El Oued]. Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, Département d'Agronomie.
45. Carlier, L. (2006). Production de domaines recombinants PRODH en vue de l'analyse structurale & Caractérisation de la région 51-160 de la protéine KIN17 humaine par RMN et Modélisation Moléculaire (Doctoral dissertation, Université de Rouen)
46. Casasni, L. (2022). Caractérisation écophysiological et biochimique d'*Atriplex halimus* en réponse aux stress abiotiques (Thèse de doctorat, Université de Blida 1, Algérie). Faculté des Sciences de la nature et de la vie, Département de biotechnologie et d'agroécologie.
47. Chettouhi, M. (2020). La tolérance des plantes aux métaux lourds (Projet de fin d'études, Université Ziane Achour – Djelfa, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, Département des Sciences biologiques).
48. Draï, L. (2012). Effet d'un stress hydrique sur la formation des protéines de stress et quelques activités enzymatiques chez deux variétés de lentille (*Lens culinaris* L.) [Mémoire de Magister, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene].

49. Duan, H., Shao, C., Zhao, N., Wang, D., Resco de Dios, V., & Tissue, D. T. (2024). The role of leaf superoxide dismutase and proline on intra-specific photosynthesis recovery of *Schima superba* following sdrought. *Scientific Reports*, 14, 8824. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-59467-9>
50. El Moukhtari, A., Cabassa-Hourton, C., Farissi, M., & Savouré, A. (2020). How does proline treatment promote salt stress tolerance during crop plant development?. *Frontiers in plant science*, 11, 1127.
51. Fang, W. Y., Dahiya, R., Qin, H. L., Mourya, R., & Maharaj, S. (2016). Natural proline-rich cyclopolypeptides from marine organisms: Chemistry, synthetic methodologies and biological status. *Marine Drugs*, 14(11), 194.
52. Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N. S. M. A., Fujita, D. B. S. M. A., & Basra, S. M. (2009). Plant drought stress: effects, mechanisms and management. In *Sustainable agriculture* (pp. 153-188). Dordrecht: Springer Netherlands.
53. Galal, T. M. (2016). Impact of environmental pollution on the growth and production of Egyptian clover. *International Journal of Plant Production*, 10(3), 271–284.
54. Guo, Z., Gao, Y., Yuan, X., Yuan, M., Huang, L., Wang, S., Liu, C., & Duan, C. (2023). Effects of heavy metals on stomata in plants: A review. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(11), 9302.p6 <https://doi.org/10.3390/ijms24119302>
55. Hayat, S., Hayat, Q., Alyemeni, M. N., Wani, A. S., Pichtel, J., & Ahmad, A. (2012). Role of proline under changing environments: a review. *Plant signaling & behavior*, 7(11), 1456-1466.
56. Heuer, B. (2010). Role of proline in plant response to drought and salinity. *Handbook of plant and crop stress*, 3, 213-238
57. Ibrahim, A. E. A., Abd El Mageed, T., Abohamid, Y., Abdallah, H., El-Saadony, M., AbuQamar, S., ... & Abdou, N. (2022). Exogenously applied proline enhances morphophysiological responses and yield of drought-stressed maize plants grown under different irrigation systems. *Frontiers in Plant Science*, 13, 897027
58. Inayat, H., Mehmood, H., Danish, S., Alharbi, S. A., Ansari, M. J., & Datta, R. (2024). Impact of cobalt and proline foliar application for alleviation of salinity stress in radish. *BMC Plant Biology*, 24, Article 178. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-04415-1>

59. Jabari, F. M. (2024). The impact of water stress on some nutrients and phytochemical content of thyme (*Majorana syriaca*) (Master's thesis, Hebron University). Hebron University. P16
60. Kaur, G., & Asthir, B. J. B. P. (2015). Proline: a key player in plant abiotic stress tolerance. *Biologia plantarum*, 59, 609-619.
61. Kavi Kishor, P. B., Hima Kumari, P., Sunita, M. S. L., & Sreenivasulu, N. (2015). Role of proline in cell wall synthesis and plant development and its implications in plant ontogeny. *Frontiers in plant science*, 6, 544.
62. Khadi, M. M. M. (2006). Effet de la salinité sur la proline et les glucides chez la fève (*Vicia faba L.*) [Thèse de Magister, Université d'Oran Es-Senia, Faculté des Sciences, Département de Biologie, Laboratoire de Physiologie Végétale]. Promotion 2004/2006
63. Khan, P., Abdelbacki, A. M., Albaqami, M., Jan, R., & Kim, K. M. (2025). Proline Promotes Drought Tolerance in Maize. *Biology*, 14(1), 41.
64. Kishor, P. K., Sangam, S., Amrutha, R. N., Laxmi, P. S., Naidu, K. R., Rao, K. S., ... & Sreenivasulu, N. (2005). Regulation of proline biosynthesis, degradation, uptake and transport in higher plants: its implications in plant growth and abiotic stress tolerance. *Current science*, 424-438
65. Kulkarnia, S., & Goswami, A. (2019). Effect of excess fertilizers and nutrients: A review on impact on plants and human population. Datta Meghe College of Engineering & University Institute of Chemical Technology.
66. Laala, A. (2009). Comportement des semis de Pin d'Alep sous contraintes thermiques [Mémoire de magistère, Université Mentouri Constantine]. Université Mentouri Constantine, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, Département de Biologie et Écologie. p13
67. Labгаа, N., & Fakroun, N. (2018). La sélection du blé dur (*Triticum durum Desf.*) pour la tolérance aux stress abiotiques [Mémoire de master, Université Ziane Achour - Djelfa, Algérie]. Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, Département de Biolog. P17
68. Lejdel, T. M., & Ben Sasi, N. E. (2021). La culture in vitro des trois genres des semences d'Atriplex (*halimus*, *canescens*, *nummularia*), à l'application des différentes doses de NaCl [Master's thesis, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued].
69. Maazouz, A., & Abbas, C. (2021). Caractérisation du proline du stress hydrique chez le blé dur (*Triticum durum Desf.*) [Mémoire de Master, Université Mohamed El Bachir El

- Ibrahimi, Bordj Bou Arreridj, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la Terre et de l'Univers, Département des Sciences Agronomique.[
70. Mandalapu, D. (2015). L-proline and d-proline (chiral amino acid catalysts). *Synlett*, 26(05), 707-708.
71. Mansour, M. M. F., & Ali, E. F. (2017). Evaluation of proline functions in saline conditions. *Phytochemistry*, 140, 52-68
72. Meena, M., Divyanshu, K., Kumar, S., Swapnil, P., Zehra, A., Shukla, V., Yadav, M., & Upadhyay, R. S. (2019). Regulation of L-proline biosynthesis, signal transduction, transport, accumulation and its vital role in plants during variable environmental conditions. *Heliyon*, 5(12), e02952. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02952>.
73. Mehboob, I., Baig, S., Siddique, M., Shan, X., Baig, A., Shah, M. M., Shahzadi, I., Zhao, H., Nawazish, S., & Khalid, S. (2024). Deciphering the role of SIWRKY36 and SIWRKY51 in salt stress tolerance via modulating ion homeostasis and proline biosynthesis. **Current Plant Biology*, 39*, 100380. <https://doi.org/10.1016/j.cpb.2024.100380>
74. Merewitz, E., & Huang, B. (2007). 8 Biotechnology in Plant Tolerance to Heat and Drought Stress. *Plant Stress and Biotechnology*, .105p 107-109
75. Miller, N. (1993). Expression d'une thermotolérance au niveau de la fonction du photosystème II (Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Trois-Rivières). Université du Québec.p24-25
76. Mouhoubi, D., & Hamadou, M. (2020). Étude de l'effet de la salinité sur la germination et la croissance de quelques variétés de petit pois (*Pisum sativum* L.) cas de la région d'Ouargla [Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla].
77. MOURI, C. (2015). Contribution à l'étude de l'auto écologie et de la variabilité génétique intraspécifique chez *Ammophila arénaria* (L.) dans la région ouest de l'Algérie (Doctoral dissertation.(
78. Mundada, P. S., Jadhav, S. V., Salunkhe, S. S., Gurme, S. T., Umdale, S. D., Nikam, T. D., & Ahire, M. L. (2021). Plant performance and defensive role of proline under environmental stress. In A. Husen (Ed.), *Plant performance under environmental stress* (pp. 201–221). Springer
79. Nabti, N. (2020). *Stratégies et mécanismes moléculaires de tolérance aux stressés abiotiques chez le blé* [Mémoire de Master, Université Frères Mentouri Constantine 1]. Université Frères Mentouri Constantine 1.P19

80. Oukarroum, A. (2007). Vitalité des plantes d'orge ("Hordeum vulgare" L.) en conditions de stress hydrique et thermique analysée par la fluorescence chlorophyllienne (Doctoral thesis). University of Geneva.(pp.27-90)
81. Ould Said, C. (2021). Etude de l'implication de la proline exogène dans la tolérance des plantules de fenugrec (*Trigonella foenum graecum* L.) soumises à un stress chimique (Doctoral dissertation) .
82. Parween, T., Jan, S., Mahmooduzzafar, S., Fatma, T., & Siddiqui, Z. H. (2016). Selective effect of pesticides on plant—A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 56(1), 160-179.p 160-169<https://doi.org/10.1080/10408398.2013.787969>
83. Rao, K., Raghavendra, A., & Reddy, K. (2006). *Physiology and molecular biology of stress tolerance* (pp. 1-14). Dordrecht: Springer.pl
84. Raza, A., Charagh, S., Abbas, S., Hassan, M. U., Saeed, F., Haider, S., Sharif, R., Anand, A., Corpas, F. J., Jin, W., & Varshney, R. K. (2023). Assessment of proline function in higher plants under extreme temperatures. *Plant Biology*, 25(3), 379–395.
85. Rejeb, K. B., Abdelly, C., & Savouré, A. (2012). La proline, un acide aminé multifonctionnel impliqué dans l'adaptation des plantes aux contraintes environnementales. *Biologie aujourd'hui*, 206(4), 291-299.
86. Rejeb, K. B., Abdelly, C., & Savouré, A. (2014). How reactive oxygen species and proline face stress together. *Plant Physiology and Biochemistry*, 80, 278-284
87. Renzetti, M., Funck, D., & Trovato, M. (2024). Proline and ROS: A unified mechanism in plant development and stress response?. *Plants*, 14(1), 2.
88. Sahi, B., & Nedil, K. (2022). Effet d'un stress thermique (froid) sur la physiologie d'une plante. Cas de *Triticum durum* Desf. [Mémoire de Master, Université Ziane Achour – Djelfa, Algérie]. Département de Biologie, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie.p37
89. Saibi, W., Bouazzi, H., & Brini, F. (2020). Use of osmolytes for improving abiotic stress tolerance in brassicaceae plants: the case of proline. *Am. J. Biomed. Sci. Res*, 10(4), 310-315.
90. Saibi, W., Brini, F., & Brini, F. (2020). Proline, a peculiar amino acid with astucious functions in development and salt tolerance process in plants. *J. Food Nutr. Metab*, 3, 1-8.

91. Saibi, W., Feki, K., Yacoubi, I., & Brini, F. (2015). Bridging between proline structure, functions, metabolism, and involvement in organism physiology. *Applied biochemistry and biotechnology*, 176, 2107-2119.
92. Savci, S. (2012). Investigation of effect of chemical fertilizers on environment. *APCBEE Procedia*, 1, 287–292
93. Saxena, P., & Kulshrestha, U. (2016). Biochemical effects of air pollutants on plants. In U. Kulshrestha & P. Saxena (Eds.), *Plant responses to air pollution* (pp. 59-). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-10-1201-3_6
94. Shin, H., Oh, S., Arora, R., & Kim, D. (2016). Proline accumulation in response to high temperature in winter-acclimated shoots of *Prunus persica*: A response associated with growth resumption or heat stress? *Canadian Journal of Plant Science*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1139/CJPS-2016-0032>
95. Site web : Aquaportail, Définition de la proline, [en ligne], disponible sur : <https://www.aquaportail.com/dictionnaire/definition/11740/proline> (consulté le 2 mai 2025)
96. Szabados, L., & Saviouré, A. (2010). Proline: a multifunctional amino acid. *Trends in plant science*, 15(2), 89-97
97. Szepesi, Á., & Szöllösi, R. (2018). Mechanism of proline biosynthesis and role of proline metabolism enzymes under environmental stress in plants. In *Plant metabolites and regulation under environmental stress* (pp. 337-353). Academic Press.
98. Tadrent, F. (2017). Dosage de la proline et la glycine bêtaïne chez quatre variétés de lentilles (*Lens culinaris L.*) sous stress salin (Mémoire de Master, Université des Frères Mentouri Constantine). Département de Biologie et Physiologie, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie.
99. Tammeda, S., & Harrat, J. (2022). Analyse de la dynamique du comportement printanier d'*Astragalus armatus* sous climat aride (Cas de la région Laghouat) [Mémoire de Master, Université Amar Telidji Laghouat].
100. THOMPSON, J. F. (1980). Arginine synthesis, proline synthesis, and related processes. In *Amino acids and derivatives* (pp. 375-402). Academic Press...
101. Timothy, N., & Williams, E. T. (2019). Environmental pollution by heavy metal: An overview. *International Journal of Environmental Chemistry*, 3(2), 72-82.P76

102. Trovato, M., Mattioli, R., & Costantino, P. (2008). Multiple roles of proline in plant stress tolerance and development. *Rendiconti Lincei*, 19, 325-346.
103. Vasilachi, I. C., Stoleru, V., & Gavrilesco, M. (2023). Analysis of heavy metal impacts on cereal crop growth and development in contaminated soils. *Agriculture*, 13(10), 1983. <https://doi.org/10.3390/agriculture13101983>
104. Yaish, M. W. (2015). Proline accumulation is a general response to abiotic stress in the date palm tree (*Phoenix dactylifera* L.). *Genetics and Molecular Research*, 14(3), 9943–9950. <https://doi.org/10.4238/2015.August.19.30>
105. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28357>
106. <https://doi.org/10.11648/j.ijec.20190302.14>
107. <https://doi.org/10.13097/archive-ouverte/unige:488>
108. <https://theses.hal.science/tel-04042258v1>
109. <https://www.ijpp.info>
110. <https://doi.org/10.1023/A:1024573305991>