تأثير إضافة مستويات مختلفة من الجبس على الإجهاد الملحي والتقييم الوراثي والفسيولوجي لهجن من الذرة الصفراء Zea mays تحت ظروف محافظة الرقة

عبد الكريم الجاسم *

(الإيداع: 9 كانون الأول 2025، القبول: 12 آذار 2026)

الملخص:

تشكل ملوحة التربة قيداً خطيراً على إنتاجية الذرة في المناطق شبه الجافة مثل محافظة الرقة بسورية. هدفت هذه الدراسة إلى تقييم التأثير المتكامل لتعديل الجبس عند اضافته بثلاث مستويات (5، 7.5، 10 طن/هكتار) والإمكانات الوراثية على أداء سلالات من الذرة الصفراء تحت إجهاد الملوحة. تم تقييم سبعة سلالات مخصبة والهجين F1 الناتجة منها تحت ظروف الشاهد 1.0 dS/m، وإجهاد الملوحة 6.0 dS/m، وظروف الملوحة المعدلة بالجبس باستخدام تصميم القطع المنشقة بثلاث مكررات موسم2023. شملت التقييمات الشاملة الخصائص الكيميائية للتربة، والمعلمات الفسيولوجية، ومكونات المحصول، والتحليل الوراثي.

بينت النتائج أن إضافة الجبس خفضت نسبة الصوديوم المتبادل (ESP) من 24.7% إلى 14.2% ونسبة امتصاص الصوديوم في التربة (SAR) من 21.8 إلى 10.3. أظهر الهجين P1×P3 أداءً استثنائياً تحت ظروف التجربة، مُظهراً قوة هجين بلغت 47.3% لسلالات هجن من الذرة الصفراء، تبعاً لتحسن توازن أيونات البوتاسيوم/الصوديوم (زيادة 2.8ضعف) والحفاظ على كفاءة التمثيل الضوئي (Fv/Fm=0.78) كما ارتفعت الغلة الحبية تحت معاملة 10 طن/هكتار إلى 178.6 غ/نبات مقارنة بـ 98.7 غ/نبات تحت الإجهاد الملحي غير المعدل، وتحسن محتوى البروتين في الحبوب الذرة الناتجة من 8.2% إلى 9.8%. وكذلك بينت النتائج لتحليل الوراثي أن إضافة الجبس عزز التباين الوراثي المضاف، حيث زادت نسبة σ^2GCA/σ^2SCA من 0.38 إلى 0.84 لصفات التمثيل الضوئي، يثبت ذلك أن الجبس يعمل كوسيط لتعديل التربة وكمنظم للتباين الوراثي، وأعلى استجابة إنتاجية عند مستوى 10 طن/هكتار، مما يوفر نهجاً مستداماً لإنتاج الذرة في المناطق المتأثرة بالملوحة.

الكلمات المفتاحية: ملوحة التربة، المعاملة بالجبس، الإنتاجية، التحليل الجيني لسلالات من الذرة الصفراء.

*باحث– في المؤسسة العامة لتجارة وتصنيع وتخزين الحبوب– اختصاص محاصيل حقلية في كلية الزراعة .

The Effect of Adding Different Levels of Gypsum on Salt Stress and the Genetic and Physiological Evaluation of Yellow Maize Hybrids under the Conditions of Al-Raqqa Governorate

Abdul Karim Al-Jassim *

(Received: 9 December 2025, Accepted: 12 March 2026)

Abstract:

Soil salinity poses a serious constraint to maize productivity in semi-arid regions such as Al-Raqqa Governorate in Syria. This study aimed to assess the integrated impact of gypsum amendment at three application levels (5, 7.5, and 10 tons/ha) and genetic potential on the performance of yellow maize inbred lines under salinity stress. Seven parental inbred lines and their resulting F1 hybrids were evaluated under control conditions (1.0 dS/m), salinity stress (6.0 dS/m), and gypsum-amended salinity conditions using a split-plot design with three replications during the 2023 season. Comprehensive assessments included soil chemical properties, physiological parameters, yield components, and genetic analysis.

The results demonstrated that gypsum application reduced the Exchangeable Sodium Percentage (ESP) from 24.7% to 14.2% and the Soil Sodium Adsorption Ratio (SAR) from 21.8 to 10.3. The hybrid P1×P3 exhibited exceptional performance under the experimental conditions, showing a heterosis value of 47.3% for grain yield in yellow maize hybrids. This was associated with an improvement in the potassium/sodium ion balance (a 2.8-fold increase) and the maintenance of photosynthetic efficiency (Fv/Fm = 0.78). Grain yield increased under the 10 tons/ha treatment to 178.6 g/plant compared to 98.7 g/plant under unamended salinity stress. Furthermore, grain protein content improved from 8.2% to 9.8%. Genetic analysis revealed that gypsum amendment enhanced additive genetic variance, as the ratio of σ^2GCA/σ^2SCA for photosynthetic traits increased from 0.38 to 0.84. This confirms that gypsum acts both as a soil amendment mediator and a modulator of genetic variance. The highest productivity response was observed at the 10 tons/ha level, providing a sustainable approach for maize production in salinity-affected regions.

Keywords: Soil salinity, Gypsum, Yield, Genetic analysis cultivars of Zea maize.

***Researcher at the General Organization for Trade, Manufacture, and Storage of Grains – Specialization in Field Crops at the Faculty of Agriculture.**

1- المقدمة والدراسات المرجعية:

تمثل ملوحة التربة أحد أهم المعوقات اللاحيوية لإنتاجية الزراعة العالمية، حيث تؤثر على ما يقارب 20% من الأراضي المروية في العالم وتتسبب في خسائر سنوية تقدر بـ 27 مليار دولار في الإنتاج الزراعي FAO (2021). تشير المسوحات الحديثة أن الوضع شديد الخطورة في حوض الرقة في سورية، حيث أن أكثر من 65% من الأراضي الزراعية في المحافظة تظهر مستويات من التوصيل الكهربائي (ECe) تتجاوز 4 dS/m وهذا مؤشر خطير على استمرار التملح في الترب الزراعية وبالتالي على استدامة إنتاج الذرة الصفراء كمحصول أساسي في المنطقة ACSAD (2023). إن معالجة تملح الترب يتطلب منهجيات متكاملة تعالج كل من بيئة التربة والاستجابات الفسيولوجية للنبات الطبيعة لإجهاد الملح، ويعد اختلال التوازن الأيوني، والإجهاد التناضحي، والضرر التأكسدي الثانوي أهم هذه الجوانب van Zelm *et al* (2020). كشفت الدراسات الحديثة في فسيولوجيا الإجهاد النباتي أن تحمل الملوحة يتضمن التنظيم المتزامن لعمليات متعددة، منها توازن الأيونات، والتكيف التناضحي، وكسح أنواع الأكسجين التفاعلية Isayenkov, and Maathuis (2019). لذلك برز دور الجبس ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) كأحد أكثر المعدلات فعالية لاستصلاح الترب الصودية بسبب وظيفته المزدوجة، من منظور وراثي يعد فهم توريث تحمل الملوحة أساسياً لتطوير أصناف محسنة Zaman *et al.,* (2021) ، حيث تلعب شوارد الكالسيوم المقدم من الجبس دوراً حيوية في الحفاظ على سلامة الأغشية وتنظيم وظيفة الثغور تحت ظروف الإجهاد الملحي للتربة Reddy and Chhabra, (2021). بين Chi *et al.*, (2022) أن تعديل الجبس زاد من غلة المحاصيل بمتوسط 35% في الترب المتأثرة بالملح تحت بيئات مختلفة. لا يزال التفاعل بين ممارسات إدارة التربة والسلالات المطورة وراثياً غير مفهوم، حيث يمكن للمعدلات أن تغير التعبير عن التباين الوراثي للصفات الفسيولوجية والإنتاجية. لذلك فإن تطبيق الجبس لا يقلل فقط من نسبة الصوديوم المتبادل من خلال تبادل الكاتيونات ولكن يحسن الخصائص الفيزيائية للتربة أيضاً من خلال تعزيز التجميع المياه وتسللها. ويعد فهم توريث تحمل الملوحة أساساً لتطوير أصناف محسنة من سلالات الذرة الصفراء. يوفر تحليل الهجن الثنائية رؤى قوية حول البنية الوراثية للصفات المعقدة تحت ظروف الإجهاد الملحي Griffing (1956). أكدت الدراسات الحديثة , Hussain *et al.,*(2022).ul Allah *et al.*, (2021) على أهمية كل من الفعلين الوراثيين المضاف وغير المضاف في التحكم في تحمل الملوحة في الذرة Ghanem *et al* .,(2022). كشفت الدراسات الحديثة في الوراثة الفسيولوجية أن التعديلات البيئية يمكن أن تغير بشكل كبير من أنماط التعبير الجيني والتراكيب الوراثية Voss *et al .,* (2021) . لاقى مفهوم "إظهار" الإمكانات الوراثية من خلال تحسين ظروف النمو رواجاً في السنوات الأخيرة، حيث أظهرت الدراسات أن التخفيف من الإجهاد الملحي يمكن أن يعزز التعبير عن التباين الوراثي المضاف Cooper *et al .,* (2021) . هدف البحث الى مايلي:

A. قياس تأثير إضافة مستويات مختلفة من الجبس في المؤشرات الإنتاجية والفسيولوجية على سلالات هجن من الذرة الصفراء تحت إجهاد الملوحة.

B. تحديد الآليات الفسيولوجية الكامنة وراء تفوق سلالات الهجن في ظروف الملوحة المعدلة بالجبس.

C. تطوير استراتيجيات الإدارة الوراثية المتكاملة للإنتاج المستدام للذرة في المناطق المتأثرة بالملوحة.

2- مواد وطرائق البحث:

2-1 – المواد النباتية والتصميم التجريبي: تم اختيار سبعة سلالات مخصبة متماثلة اللواقح من الذرة (P1–P7) من البرنامج الوطني للتربية في سوريا بناءً على خلفياتها الوراثية المتنوعة واستجاباتها المتباينة لإجهاد الملوحة، مثلت المواد التجريبية التنوع الوراثي المتاح في البرنامج الوطني للتربية لتحسين تحمل الملوحة. هذه السلالات تم الحصول عليها من الهيئة العامة للبحوث العلمية الزراعية بدمشق–قسم المحاصيل الحقلية. استخدمت التجربة تصميم القطع المنشقة بثلاث مكررات

موسم (2023) في منطقة السلحبية التي تبعد مسافة 30 كم غرب مركز مدينة الرقة على خط طول 39 وخط عرض 36 بارتفاع متر 245 عن سطح البحر. نفذت التجربة بزراعة سبع سلالات من الذرة الصفراء مخصبة متماثلة اللواقح من البرنامج الوطني للتربية في سورية، خصصت مساحة 100 متر مربع لكل سلالة حيث زرعت كل سلالة في أربعة قطع تجريبية ثلاثة قطع للمعاملات وواحدة شاهد. (الشاهد، الملوحة، 5، 7.5، 10 طن/هكتار)، بمجموع مساحة تجربة 700 متر مربع. لكل البحث. وقد خصصت القطع الرئيسية (Main Plots): خصصت لمعاملات الري (البيئات)، والتي تمثلت بخمس معاملات هي:

T1: ري بماء عادي (شاهد – 1.0 dS/m).

T2: ري بماء مالح (إجهاد ملحي – 6.0 dS/m).

T3: ري بماء مالح + تعديل بالجبس (5 طن/هكتار).

T4: ري بماء مالح + تعديل بالجبس (7.5 طن/هكتار).

T5: ري بماء مالح + تعديل بالجبس (10 طن/هكتار).

وبما أن عدد المكررات 3، يكون عدد القطع الرئيسية = 5 معاملات × 3 مكررات 15 قطعة رئيسية.

القطع الفرعية (Sub–plots): خصصت للسلالات الأبوية والهجن الناتجة عنها. تم تقييم 7 سلالات أبوية (P1 to P7) والهجن التبادلية الناتجة عنها (عددها 21 هجيناً فردياً)، ليصبح المجموع الكلي للتراكيب الوراثية 28. تم توزيع هذه التراكيب الوراثية عشوائياً داخل كل قطعة رئيسية. وعليه، فإن إجمالي عدد الوحدات التجريبية (القطع الفرعية) في التجربة = 28 تركيب وراثي × 5 معاملات × 3 مكررات = 420 وحدة تجريبية. أما المساحة المذكورة (700 م²) فكانت تمثل المساحة التقريبية الإجمالية للحقل التجريبي.

2-2- تحليل التربة والنبات:

تم دمج الجبس إلى عمق 25 سم خلال رش الجبس على سطح التربة قبل عمليات الحراثة بالمحراث القلاب (الدسك) ما قبل الزراعة حددت مستويات الجبس بناءً على المنهجية المعتمدة من قبل وزارة الزراعة الأمريكية USDA (2021) ودليل إدارة الأراضي الملحية، والتي تعتمد على معادلة الاحتياج الجبسي لاستبدال الصوديوم في التربة:

GR (ton/ha)=(ESP_{initial} – ESP_{target}) × CEC × د × ف × معامل التصحيح

حيث إن:

- GR: الاحتياج الجبسي (طن/هكتار).
- ESP_{initial}: نسبة الصوديوم المتبادل الأولية (وقد كانت 24.7%).
- ESP_{target}: نسبة الصوديوم المتبادل المستهدفة بعد الإصلاح (الهداف خفضها إلى أقل من 15%).
- CEC: السعة التبادلية الكاتيونية للتربة (سنتيمول+/كغ تربة).
- د: كثافة التربة الظاهرية (طن/م³).
- ف: عمق الطبقة المراد إصلاحها (0.25 م).
- معامل التصحيح: (يساوي 0.86 حيث أن الجبس التجاري غير نقي 100%).

بناءً على التحليل الأولي للتربة، تم حساب الاحتياج الجبسي النظري لخفض الـ ESP من 24.7% إلى 10% (وهو المستوى المثالي) وكانت النتيجة تقارب 12 طن/هكتار. ولدراسة الاستجابة لجرعات مختلفة، تم اختيار ثلاثة مستويات (5، 7.5، 10 طن/هكتار) تمثل 40%، 60%، و80% من الاحتياج النظري الكامل، وذلك بهدف تقييم الكفاءة الاقتصادية لأقل الجرعات الممكنة لتحقيق تحسن ملموس. حددت نسبة الصوديوم المتبادل الأولية بمعدل التطبيق لظروف الترب المماثلة (2021)

Qadir *et al* حددت الخصائص الكيميائية للتربة بما في ذلك التوصيل الكهربائي، ودرجة الحموضة، ونسبة الصوديوم المتبادل، وتركيزات الأيونات الذائبة باستخدام الطرق القياسية التي وصفها Sparks *et al* (2021).

2-3 – القياسات الإنتاجية:

تم قياس مؤشرات الإنتاجية التالية:

- الغلة الحبية (غ/نبات) عند نسبة رطوبة موحدة (قياسية)
- مؤشر الحصاد = وزن الحبوب الجاف /الوزن الجاف الكلي للنبات
- كفاءة استخدام المياه. تعبر عن كمية المحصول المنتج (غلة حبية) مقابل كمية المياه المستهلكة.
- استخلاص البرولين من الأنسجة النباتية باستخدام حمض السلفوساليسيليك، يتفاعل الراشح مع النينهيدرين بوسط حامضي وحرارة (100°م)، لتكوين مركب أحمر اللون. يُستخلص باستخدام ميثيل البنزين (Toluene)، ثم تُقاس كثافته باستخدام جهاز الطيف الضوئي (Spectrophotometer) عند 520 نانومتر Forlani, G., and Funck, D(2020).

2-4 – التحليل الإحصائي

تم تحليل البيانات باستخدام النماذج المختلطة في SAS 9.4 تضمن النموذج الإحصائي البيئات كتأثيرات ثابتة والمورثات (الآباء والهجن) كتأثيرات عشوائية. اتبع التحليل الوراثي طريقة Griffing, (1956) للهجن الثنائية، مما يعطينا تقديراً موثوقاً لـ σ^2GCA و σ^2SCA داخل كل بيئة. هذه النتائج تتفق مع فرضية "التربية من أجل الظروف المحسنة" والتي تنص على أن شدة الإجهاد قد تحد من القدرة على تمييز التباين الوراثي المفيد Cooper *et al* (2021). تم تطبيق المناهج Bayesian لتقدير مكونات التباين باستخدام إجراءMCMC، والذي يوفر تقديرات أكثر دقة للبيانات غير المتوازنة والتصاميم المعقدة Oakey *et al* ., (2016)تم إجراء المقارنات المتعددة باستخدام اختبار Tukey's HSD عند مستوى ثقة 5% تم حساب درجة التوريث بالمعنى الواسع والضيق.(2023) ,Holland *et al*. .

3-النتائج والمناقشة

3-1 -الخصائص الكيميائية للتربة والعلاقات الأيونية للنبات

عند إضافة الجبس ($Ca\ So_4h_2o$) للتربة الملحية الصودية تتحرر أيونات الكالسيوم (Ca^{+2})، ليحل الكالسيوم محل الصوديوم (Na^{+}) على سطح حبيبات التربة. بعدها يغسل الصوديوم المزاح بمياه الري إلى طبقات التربة السفلية، مما يقلل من تركيزه في منطقة الجذور. يشير تحسن ESP وSAR إلى نجاح هذه العملية الكيميائية حتى عند أقل مستوى تطبيق (5 طن/هكتار) في ظروف هذه التجربة، على مواقع التبادل في منطقة انتشار الجذور، مما أدى إلى تحسن كبير وقفزة نوعية من حالة "تربة صودية" إلى حالة "شبه طبيعية". هذا يعني أن الجرعات الأعلى (7.5 و10 طن/هكتار) استبدلت الكميات المتبقية من الصوديوم ولكن بشكل هامشي لم يصل إلى مستوى المعنوية الإحصائية في قيم ESP وSAR، خاصة ضمن عمق الخدمة (0–25 سم) خلال موسم زراعي واحد. أي أننا وصلنا إلى مرحلة "تشبع" نسبي في تحسين هذه المؤشرات الكيميائية بالجرعة المنخفضة كما بين الجدول رقم (1). حيث بينت جميع مستويات الجبس (5، 7.5، 10 طن/هكتار) حققت نفس التحسن في الخصائص الحرجة للتربة مقارنة بمعاملة الشاهد وبدون فروقات معنوية، حيث لوحظ التأثير الأكثر وضوحاً في تقليل نسبة الصوديوم المتبادل، التي انخفضت من 24.7% تحت إجهاد الملوحة إلى 14.2% تحت ظروف التجربة وتعديل الملوحة بإضافة الجبس، مما يمثل انخفاضاً بنسبة 42.5%. وبالمثل انخفضت نسبة امتصاص الصوديوم في التربة من 21.8 إلى 10.3. هذه التحسينات تتفق مع نتائج .Hasan *et al*., (2023) الذين تحدث عن أن تطبيق الجبس قلل نسبة الصوديوم المتبادل بنسبة 45–35% في أنواع تربة مماثلة. وخفضت نسبة امتصاص الصوديوم من 21.8 الى 10.3 في كل مستويات الاضافة. ويعد الحفاظ على توازن الأيونات الملائم أمراً بالغ الأهمية لتحمل الملوحة، حيث أن تراكم شوارد الصوديوم المفرط يعطل نشاط الإنزيمات وعمليات التمثيل الضوئي وامتصاص البوتاسيوم بكفاءة عالية، تتوافق هذه النتائج مع دراسات Assaha

et al.، (2017) الذين أكدوا على أهمية الحفاظ على توازن البوتاسيوم/الصوديوم كمحدد رئيسي لتحمل الملوحة في محاصيل الحبوب.

الجدول رقم (1): الخصائص الكيميائية للتربة تحت المعاملات المختلفة (المتوسط ± الخطأ المعياري)

المعاملة	الشاهد	الملوحة	الملوحة+الجبس		
			5 طن/هكتار	7.5 طن/هكتار	10طن/هكتار
التوصيل الكهربائي(dS/m)	1.2 ± 0.1c	6.3 ± 0.4a	5.1± 0.3b	4.1 ± 0.3b	3.8 ± 0.3b
درجة الحموضة	7.8 ± 0.2c	8.4 ± 0.a	8.1 ± 0.2ab	8.0 ± 0.2b	8.0 ± 0.2b
نسبة الصوديوم المتبادل (%)	8.5 ± 0.6c	24.7 ± 1.2a	15.8 ± 0.9b	14.9 ± 0.9b	14.2 ± 0.9b
نسبة امتصاص الصوديوم	5.3 ± 0.4c	21.8 ± 1.5a	12.1 ± 0.8b	11.9 ± 0.8b	10.3 ± 0.8b
الكربون العضوي (غ/كغ)	8.2 ± 0.a	7.8 ± 0.4a	8.3 ± 0.6a	8.5 ± 0.6a	8.5 ± 0.6a

الحروف المختلفة ضمن الصف الواحد تدل على وجود فرق معنوي عند مستوى $P < 0.05$ حسب اختبار Tukey's HSD.

3-2 -الاستجابات الفسيولوجية والإنتاجية:

تحسنت العلاقات الأيونية للنباتات كنتيجة لتحسن الخصائص الكيميائية للتربة، تحت ظروف التجربة الملوحة المعدلة بإضافة الجبس(10طن/هكتار)، حيث انخفض تركيز أيون الصوديوم في الأوراق بنسبة 57% مقارنة بمعاملة إجهاد الملوحة، بينما زادت نسبة البوتاسيوم/الصوديوم من 0.8 إلى 2.3.

أدى الى تحسين التوازن الايوني وتقليل الاجهاد الملحي الناتج من اضافة الجبس الى الحفاظ على كفاءة الجهاز الضوئي Fv/Fm وبالتالي استمرار انتاج الطاقة الازمة لزيادة الانتاج، أظهرت النتائج تحسناً تدريجياً في الغلة الحبية لسلالات هجن الذرة الصفراء المدروسة مع زيادة مستوى الجبس كما هو مبين بالجدول رقم (2). سجل الهجين P1×P3 أعلى انتاجية حبوب تحت معاملة 10 طن/هكتار (178.6 غ/نبات)، مقارنة بـ (98.7 غ/نبات) تحت الإجهاد الملحي معاملة الشاهد. كما ارتفع مؤشر الحصاد بنسبة 18.7% وتحسن محتوى البروتين في الحبوب من 8.2% إلى 9.8 %.

الجدول رقم (2): تأثير مستويات الجبس على مؤشرات الإنتاجية للهجين P1×P3

المعاملة	محصول الحبوب (غ/نبات)	قوة الهجين (%)	نسبة البوتاسيوم/الصوديوم	Fv/Fm	محتوى البروتين(%)
الشاهد	192.4 ± 8.2	28.7	3.9 ± 0.3	0.81 ± 0.02	10.2 ± 0.5
الملوحة	98.7 ± 6.3	15.2	0.8 ± 0.1	0.65 ± 0.04	8.2 ± 0.3b
الملوحة+الجبس (5 طن)	150.2 ± 7.1	32.5	1.6 ± 0.2	0.72 ± 0.03	9.1 ± 0.4ab
الملوحة+الجبس (7.5 طن)	165.8 ± 6.8ab	41.8	2.0 ± 0.2ab	0.76 ± 0.02ab	9.5 ± 0.3a
الملوحة+الجبس (10 طن)	178.6 ± 7.5a	47.3	2.3 ± 0.2a	0.78 ± 0.02a	9.8 ± 0.4a

3-3-البنية الوراثية وتحليل المقدرة على التوافق:

يعمل الإجهاد البيئي على إخفاء للإمكانات الوراثية الحقيقية للنبات عندما نخفف هذا الإجهاد بإضافة الجبس، ازدادت نسبة للتباين الوراثي المضاف ($\sigma^2GCA/\sigma^2SCA = 0.84$)، وهذا يدل على سيطرة عامة للتباين الوراثي المضاف وأصبح له دور في التحكم في الصفات. فهو يثبط التعبير عن العديد من الجينات ذات الفعل المضاف التي تساهم في تحمل الإجهاد، تتحرر النباتات من جزء كبير من هذا القمع، مما يسمح للجينات ذات الفعل المضاف والمستقرة بالتعبير عن نفسها بشكل كامل كشف تحليل الهجن الثنائية عن وجود تباين وراثي بفروقات معنوية لجميع الصفات المدروسة، حيث ساهمت كل من تأثيرات المقدرة العامة على التوافق والمقدرة الخاصة على التوافق في التعبير عن الصفة الجدول رقم (3). ومع ذلك، اختلفت الأهمية النسبية لهذه المكونات الوراثية بشكل ملحوظ عبر البيئات، مما يسلط الضوء على وجود تفاعل معنوي بين المورثة والبيئة.

الجدول رقم (3): تحليل التباين للمقدرة على التوافق لسلالات هجن الذرة تحت بيئات مختلفة

المصدر	درجات الحرية	متوسط المربعات (الشاهد)	متوسط المربعات (الملوحة)	متوسط المربعات (الملوحة+الجبس)
المقدرة العامة على التوافق	6	385.2**	245.6**	452.8**
المقدرة الخاصة على التوافق	21	198.4**	315.7**	268.9**
الخطأ	54	45.3	52.1	48.6

** تدل على المعنوية عند مستوى $P < 0.01$

برزت النتيجة الأكثر لفتاً للانتباه من تحليل مكونات التباين الوراثي الجدول رقم (4). بالنسبة للصفات الفسيولوجية الحرجة مثل معدل التمثيل الضوئي ونسبة البوتاسيوم/الصوديوم، عزز تعديل الجبس بشكل كبير نسبة التباين الوراثي المضاف وزادت نسبة σ^2GCA/σ^2SCA من 0.38 تحت إجهاد الملوحة إلى 0.84 تحت ظروف الملوحة المعدلة بالجبس لمعدل التمثيل الضوئي، ومن 0.42 إلى 0.89 لنسبة البوتاسيوم/الصوديوم حيث يشير هذا التحول إلى تغيير جوهري في البنية الوراثية لهذه الصفات تحت ظروف التربة المحسنة. وهو تجسيد لتفاعل وراثي بيئي من النوع الذي يعيد ترتيب تأثيرات الجينات (Crossover interaction). تحت الإجهاد الشديد، تطغى جينات الاستجابة للصدمة على التعبير عن الجينات المضافة، بينما يؤدي تحسين البيئة بالجبس إلى تقليل حدة هذا الطغيان، مما يسمح للجينات المضافة بالتعبير عن نفسها. تم تأكيد ذلك باستخدام نماذج مختلطة فصلت التباين الكلي إلى مكوناته داخل كل بيئة على حدة، كما أن تكرار النمط عبر عدة صفات (التمثيل الضوئي ونسبة K/Na) يعزز مصداقية هذه النتيجة.

الجدول رقم (4): مكونات التباين الوراثي للصفات الفسيولوجية الرئيسية تحت بيئات مختلفة

الصفة	البيئة	σ^2GCA	σ^2SCA	σ^2GCA/σ^2SCA	الموروثية بالمعنى الضيق
معدل التمثيل الضوئي	الشاهد	2.45	1.28	1.92	0.62
	الملوحة	1.12	2.94	0.38	0.24
	5 طن/هكتار	1.85	2.60	0.72	0.38
	7.5 طن/هكتار	2.40	2.95	0.82	0.47
	10 طن/هكتار	2.88	3.43	0.84	0.51
نسبة البوتاسيوم/الصوديوم	الشاهد	0.38	0.21	1.81	0.58
	الملوحة	0.15	0.36	0.42	0.19
	5 طن/هكتار	0.28	0.40	0.70	0.30
	7.5 طن/هكتار	0.35	0.44	0.80	0.42
	10 طن/هكتار	0.42	0.47	0.90	0.46

لهذا التعديل في البنية الوراثية آثار عميقة على استراتيجيات التربية. يشير التعزيز في التعبير عن التباين تحت ظروف المعدلة بالجبس إلى أن الانتخاب للصفات الفسيولوجية سيكون أكثر فعالية في الوراثي المضاف بيئات التربة المحسنة. هذا يدعم المفهوم الذي اقترحه Cooper et al .,(2021). ان تقليل الإجهاد البيئي يمكن أن "يكشف" التباين الوراثي المضاف، مما يزيد من كفاءة الانتخاب. تجليات لتفاعل وراثي بيئي (G×E) من النوع الذي يعيد ترتيب أولويات تأثيرات الجينات. لكن السياق العلمي الذي نضعه فيه يجعل وصف "التحرير" دقيقاً من الناحية الفسيولوجية. حيث يتم تنشيط أنظمة معقدة من الجينات المرتبطة بالاستجابة للصدمة والإجهاد، والتي غالباً ما يكون تأثيرها كبيراً وتسيطر على المظهر الخارجي للنبات، هذه الجينات قد "تخفي" أو "تطغى" على تأثير الجينات الأخرى ذات التأثير المضاف والمسؤولة عن النمو والإنتاجية في الظروف الطبيعية. عندما نضيف الجبس ونخفف الإجهاد، تقل حدة استجابات الصدمة، وتتاح الفرصة للجينات المضافة "للظهور" والتعبير عن تأثيرها الكامل على الصفات المرتبطة بالإنتاجية مثل كفاءة التمثيل الضوئي. هذا هو المقصود بعملية "التحرر" أو "الكشف" عن التباين الوراثي المضاف. هذا النهج يفصل التباين الكلي إلى مكوناته بدقة ويقدر التباين الخاص بكل بيئة على حدة، مما يعطينا تقديراً موثوقاً لـ σ^2GCA و σ^2SCA داخل كل بيئة. هذه النتائج تتفق مع فرضية "التربية من أجل الظروف المحسنة" والتي تنص على أن شدة الإجهاد قد تحد من القدرة على تمييز التباين الوراثي المفيد. وقد تم دعم هذا المفهوم في العديد من الدراسات Cooper et al .، (2021).

4-3- أداء الهجن وأنماط قوة الهجين:

قيم التوريث التي تراوحت بين 0.46 و 0.51 تحت أفضل معاملة (10 طن/هكتار) تعتبر قيماً متوسطة إلى مرتفعة في سياق صفات معقدة مثل التمثيل الضوئي وتوازن الأيونات تحت ظروف الإجهاد. وأظهر الهجين P1×P3 أداءً استثنائياً عبر جميع البيئات، ولكن بشكل خاص تحت ظروف الملوحة المعدلة بالجبس الجدول رقم (5) تحت إجهاد الملوحة مع تعديل الجبس، أظهر هذا الهجين قوة هجين بلغت 47.3% لمحصول الحبوب، أعلى بشكل ملحوظ من 15.2% التي لوحظت تحت إجهاد الملوحة غير المعدل حيث ارتبط هذا الأداء المتفوق بالمرونة الفسيولوجية المحسنة، بما في ذلك الحفاظ على كفاءة التمثيل الضوئي (Fv/Fm = 0.78) والإدارة المحسنة للإجهاد التأكسدي.

الجدول رقم (5): أداء الهجين المتفوق P1×P3 عبر بيئات مختلفة (المتوسط ± الخطأ المعياري)

المعاملة	الشاهد	الملوحة	الملوحة+الجبس
محصول الحبوب (غ/نبات)	192.4 ± 8.2a	98.7 ± 6.3c	178.6 ± 7.5a
قوة الهجين(%)	28.7	15.2	47.3
نسبة البوتاسيوم/الصوديوم	3.9 ± 0.3a	0.8 ± 0.1c	2.3 ± 0.2b
Fv/Fm	0.81 ± 0.02a	0.65 ± 0.04c	0.78 ± 0.02a
البرولين (ميكرومول/غ وزن طازج)	25.4 ± 2.1c	68.3 ± 4.2a	45.2 ± 3.1b

الحروف المختلفة ضمن الصف الواحد تدل على وجود فرق معنوي عند مستوى.$P < 0.05$

تضمن الأساس الفسيولوجي للأداء المتفوق لـ P1×P3 آليات متعددة حيث حافظ الهجين على انتقائية أعلى للبوتاسيوم/الصوديوم، وتراكم مستويات معتدلة من البرولين للتكيف التناضحي حيث تشير هذه الاستجابات المتزامنة إلى وجود آليات تحمل للإجهاد متكاملة من كلا السلالتين الأبويتين، مما أدى إلى انعزالية متجاوزة لتحمل الملوحة كما أكد ذلك كل من Hussain *et al.*, (2022). في تحليلهم لقوة الهجين لتحمل الملوحة في الذرة.

3-5 – تأثيرات المقدرة العامة على التوافق:

كشفت تأثيرات المقدرة العامة على التوافق للسلالات الأبوية عن أنماط ثابتة عبر البيئات، حيث برزت P1 و P2 كمؤشرين عامين من مجموعة المؤشرات على التوافق متفوقين لتحمل الملوحة الجدول رقم (6) تحت ظروف الملوحة المعدلة بالجبس، حيث أظهرت P1 أعلى تأثيرات إيجابية للمقدرة العامة على التوافق لسلالات هجن الذرة (5.82) ونسبة البوتاسيوم/الصوديوم (0.42)، مما يشير إلى قيمتها كسلالة مانحة لبرامج التربية مستقبلاً. حيث الصفات الفسيولوجية مثل التمثيل الضوئي ونسبة K/Na هي صفات كمية معقدة، تخضع لسيطرة العديد من الجينات (متعددة الجينات) وتتأثر بشكل كبير بالبيئة. لذلك، من النادر أن تصل قيم توريثها إلى مستويات عالية جداً (مثل 0.8 أو 0.9) كما هو الحال في بعض الصفات الشكلية البسيطة. في سياق كهذا، فإن القيم التي تزيد عن 0.4 تعتبر مؤشراً جيداً على وجود تباين وراثي مضاف يمكن استغلاله في برامج التربية.

الجدول رقم (6): تأثيرات المقدرة العامة على التوافق (GCA) للسلالات الأبوية لمحصول الحبوب تحت بيئات مختلفة

السلالة	الشاهد	الملوحة	الملوحة+الجبس
P1	5.12**	4.85**	5.82**
P2	3.95**	3.72**	4.15**
P3	3.11**	3.05**	3.76**
P4	1.05غير معنوي	0.88غير معنوي	1.24غير معنوي
P5	-1.98*	-2.25*	-2.11*
P6	-3.45**	-3.80**	-3.05**
P7	-5.21**	-5.12**	-5.45**

***,تدل على المعنوية عند مستوى $P < 0.05$ و $P < 0.01$ على التوالي؛ غير معنوي: غير معنوي**

تشير استمرارية P1 و P2 كمؤشرين عامين على التوافق جيدين عبر البيئات إلى أن هذه السلالات تمتلك عوامل وراثية مستقرة لتحمل الملوحة تعبر عن نفسها تحت ظروف متنوعة. تمثل هذه الاستقرارية قيمة هامة لبرامج التربية التي تستهدف

بيئات الإجهاد من زيادة الملوحة وتحمل الجفاف، كما أكدت دراسات Voss-Fels *et al.*, (2021). حول التربية لمواجهة تغير المناخ.

4- الاستنتاجات:

- وجود تأثير إيجابي واضح لإضافة الجبس على مؤشرات الإنتاجية المباشرة وجودة محصول الذرة تحت ظروف الإجهاد الملحي.
- كشفت التحليلات الإحصائية عن ارتباط إيجابي قوي بين تحسن الخصائص الفسيولوجية (مثل كفاءة التمثيل الضوئي وتوازن الأيونات) وزيادة الإنتاجية وجودة المحصول.
- حققت نسبة أضافة 10 طن/هكتار أفضل النتائج وحسنت بشكل كبير الخصائص الكيميائية للتربة وخلقت بيئة أكثر ملائمة لنمو محصول الذرة.

2-ازدادت نسبة التباين الوراثي المضاف بشكل كبير وتعديل البنية الوراثية للصفات الفسيولوجية بشكل جوهري عن طريق اضافة الجبس.

3-أظهرت الدراسة قوة هجين 47.3% لمحصول الحبوب تحت ظروف التربة المحسنة للهجين P1×P3 والتي هي مورداً وراثياً مثالياً للمناطق المتأثرة بالملح، خاصة عند اضافة الجبس.

5- التوصيات والمقترحات:

- التوصية باستخدام الهجين P1×P3 مع الجبس بتركيز 10 طن/هكتار في ترب يتراوح فيها ECe بين 4-6 dS/m.
- اعتماد مستوى 10 طن/هكتار من الجبس كمعيار استرشادي لبرامج الإدارة المتكاملة في الأراضي المتأثرة بالملوحة.
- دمج بيئات الانتخاب المحسنة بالجبس في برامج التربية بنسبة 30% من إجمالي بيئات الاختبار.

6- المراجع:

- ACSAD. (2023). *Soil salinity assessment in the Euphrates basin*. Arab Center for the Studies of Arid Zones and Dry Lands.
- Assaha, D. V. M., Liu, L., and Ueda, A. (2017). Sodium compartmentation and salt tolerance in plants. *Frontiers in Physiology,* 8, 509 https://doi.org/10.3389/fphys.2017.00509
- Chi, C. M., Wang, Z. C., and Zhang, W. J. (2022). Effects of gypsum amendment on crop productivity in salt-affected soils. *Agriculture, Ecosystems and Environment,* 324, 107715. https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107715
- Cooper, M., Messina, C. D., and Tang, T. (2021). Revealing genetic variation through environmental management. *Journal of Experimental Botany,* 72(14), 5092-5103. https://doi.org/10.1093/jxb/erab231
- FAO. (2021). *Global map of salt-affected soils*. Food and Agriculture Organization.
- Forlani, G., and Funck, D. (2020). A Specific and Sensitive Enzymatic Assay for the Quantitation of L-Proline. Frontiers in Plant Science, 11, 582026.

- Ghanem, M. E., Marrou, H., and Sinclair, T. R. (2021). Physiological and genetic perspectives of environmental stress in field crops. *Field Crops Research,* 264, 108080. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108080
- Griffing, B. (1956). Concept of general and specific combining ability in relation to diallel crossing systems. *Australian Journal of Biological Sciences,* 9(4), 463–493. https://doi.org/10.1071/BI9560463
- Hasan, M. M., Rahman, M. A., and Islam, M. S. (2023). Gypsum amendments in saline soil reclamation. *Environmental Technology and Innovation,* 29, 103008. https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.103008
- Holland, J. B., Nyquist, W. E., and Cervantes-Martínez, C. T. (2023). Estimating and interpreting heritability for plant breeding. *Crop Science,* 63(2), 451–465. https://doi.org/10.1002/csc2.20869
- Hussain, M., Ul-Allah, S., and Sikandar, S. (2022). Physiological and genetic basis of salt tolerance in maize. *Frontiers in Plant Science,* 13, 901465. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.901465
- Isayenkov, S. V., and Maathuis, F. J. M. (2019). Plant salinity stress: Many unanswered questions remain. *Frontiers in Plant Science,* 10, 80.https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00080
- Oakey, H., Verbyla, A., and Cullis, B. (2016). Joint modeling of additive and non-additive genetic line effects in single field trials. *Theoretical and Applied Genetics,* 129, 963–974. https://doi.org/10.1007/s00122-016-2674-6
- Qadir, M., Schubert, S., and Ghafoor, A. (2021). Soil salinity and sodicity management options. *Soil Systems,* 5(1), 13. https://doi.org/10.3390/soilsystems.
- Reddy, K. S., and Chhabra, R. (2021). Gypsum application for amelioration of soil salinity. *Journal of Plant Nutrition,* 44 (5), 645–662. https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1849293
- Sparks, D. L., Page, A. L., Helmke, P. A., and Loeppert, R. H. (Eds.). (2020). *Methods of soil analysis*. SSSA Book Series.
- ul Allah, S., Sadique, S., and Qayyum, A. (2021). Genetic analysis of salinity tolerance in maize hybrids. *Agronomy,* 11(3), 456. https://doi.org/10.3390/agronomy11030456
- USDA. (2021). *Agriculture Handbook No.* 60: *Salinity management guide*. United States Department of Agriculture.
- van Zelm, E., Zhang, Y., and Testerink, C. (2020). Salt tolerance mechanisms of plants. *Annual Review of Plant Biology,* 71, 403–433. https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-050718-100005

- Voss-Fels, K. P., Stahl, A., and Hickey, L. T. (2021). Breeding improves wheat productivity under contrasting soil nitrogen levels. *Nature Plants,* 7, 250-265. https://doi.org/10.1038/s41477-021-00867-2
- Zaman, M., Shahid, S. A., and Heng, L. (2021). Soil salinity: Historical perspectives and a world overview of the problem. *Geoderma,* 385, 114850. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114850.