تطوير نموذج رياضي للتنبؤ بالفسفور المتاح في ترب الزراعة المحمية بالاعتماد على بعض خصائصها الكيميائية

ابراهيم علي مبارك[1]* و سقراط سليمان احمد[1] و علي سعد الله جوهرة[1] و أحمد يوسف أحمد[1]

[1] مركز البحوث العلمية الزراعية بطرطوس، الهيئة العامة للبحوث العلمية الزراعية، طرطوس، سورية.

(*للمراسلة: د. إبراهيم مبارك، البريد الإلكتروني: imubarak1976@gmail.com الهاتف:0932328681)

تاريخ الاستلام: 12/ 2/ 2026 تاريخ القبول: 16/ 5/ 2026

الملخّص

يُعيّن الفسفور المتاح في التربة (av. P, ppm) بطرائق مخبرية مُجهِدة ومكلفة غالباً، لذا هدفت الدراسة لتطوير نموذج رياضي للتنبؤ به في ترب الزراعة المحمية بطرطوس اعتماداً على خصائص كيميائية سهلة القياس كدرجة الحموضة (pH)، والمادة العضوية (OM, %)، والناقلية الكهربائية (EC, dS m-1)، والبوتاسيوم المتاح (av. K, ppm). استندت الدراسة إلى قاعدة بيانات تضم 1158 عينة ترابية، قُسّمت عشوائياً بنسبة 80% لإنشاء النموذج، و20% للتحقق المستقل. أظهر تحليل الانحدار الخطي المتعدد أن النموذج الرياضي الأمثل هو:

av. P = 53.919 – 7.059 (pH) + 1.254 (OM) + 3.651 (EC) + 0.017 (av. K)

حقق النموذج كفاءة تفسيرية عالية بمعامل تحديد (R2=0.838, p<0.001)، مع غياب تام لمشكلة التعدد الخطي بأقصى قيمة لمعامل تضخم التباين (VIF) بلغت 1.54 فقط. كما أثبت اختبار t-test وقيم معياري الجودة: الجذر التربيعي لمتوسط مربعات الخطأ (RMSE=4.843) ومتوسط الخطأ المطلق (MAE=3.817) في بيانات التحقق، دقة النموذج وغياب الانحياز. يعكس النموذج القواعد الكيميائية الحاكمة لديناميكية الفوسفور في التربة، بارتباطٍ سالب مع pH، وموجبٍ مع بقية الخصائص مدفوعاً ببصمة التسميد المكثف. توصي الدراسة باعتماد النموذج كأداة رقمية منخفضة التكلفة لدعم اتخاذ القرار التسميدي الرشيد في البيوت المحمية.

الكلمات المفتاحية: نموذج رياضي للتنبؤ، الفسفور المتاح، التعدد الخطي، الزراعة المحمية، طرطوس.

المقدمة:

يُعدُّ الفسفور من العناصر الرئيسة المغذية للنبات، وتختلف النباتات في حاجتها لعنصر الفسفور تبعاً لنوع المحصول ومرحلة النمو. إن ظهور أعراض نقص الفسفور لا يشير بالضرورة إلى عدم وجوده بكمية كافية في التربة، بل قد يرجع السبب أحياناً إلى عدم توافره بشكل قابل للامتصاص من قبل النبات. فعلى الرغم من تميز معظم الترب السورية بمحتوى كبير من الفسفور الكلي، إلا أن مستويات الفسفور المتاح (القابل للامتصاص من قبل النبات، av. P) تكون منخفضة للغاية نظراً لتعرض الفسفور للتثبيت بآليتي الترسيب والادمصاص. وقد تتأثر إتاحة الفسفور بعوامل عديدة أهمها درجة حموضة التربة (pH)، ونسبة المادة العضوية فيها (OM%)، والناقلية الكهربائية (EC)، ووجود كربونات الكلسيوم ($CaCO_3$)، وزمن التلامس بين أيونات الفوسفات ومكونات التربة، (Matar *et al.*, 1992).

تُعدّ الزراعة المحمية من أهم الزراعات في المنطقة الساحلية من سورية وبالأخص في محافظة طرطوس، وتشهد إقبالاً متزايداً لما توفره من فرص لإنتاج محاصيل الخضراوات كالبندورة والخيار والباذنجان والفليفلة في غير موسمها، إضافةً إلى غزارة الإنتاج، وبالتالي الزيادة الكبيرة في العائد والأرباح. وتُعدّ الزراعة المحمية زراعةً مكثفة، الأمر الذي يستدعي العناية بالتربة بغية تحسين خصائصها الفيزيائية والكيميائية لتأمين حاجة النباتات المزروعة، وتعويض الفقد الذي يحصل منها، والحدّ من تدهورها. ويميل المزارعون إلى إضافة الأسمدة المعدنية ومنها الأسمدة الفوسفاتية والبوتاسية بكميات كبيرة ومبالغ فيها أحياناً لتأمين احتياجات النبات بغرض زيادة إنتاجية المحصول؛ وهو ما يترتب عليه مخاطر اقتصادية وبيئية كالإثراء الغذائي (Eutrophication) وتملح التربة (Frossard *et al.*, 2016). لذلك يُعدّ استخدام الجرعات المثلى من الأسمدة الفوسفاتية أمراً بالغ الأهمية للحصول على إنتاج نباتي اقتصادي ومستدام.

إن تقدير مستويات الفسفور المتاح في التربة وتتبع تغيراته سيكون مفيداً لمساعدة المزارعين والباحثين والجهات المعنية على إدارة هذا العنصر المهم، بغرض تحديد كمية السماد الفوسفاتي اللازم إضافتها عند وضع الخطة التسميدية في الزراعات المحمية. لكن ما يعيق ذلك هو نقص الموارد اللازمة لإجراء تحاليل التربة الزراعية بصورة متكررة وشاملة؛ حيث يتطلب الحصول على معلومات دقيقة عن بعض خصائص التربة – ومنها الفسفور المتاح في التربة – استخدامَ طرق تحليل مخبرية مجهدة نسبياً ومكلفة من حيث المواد والتجهيزات والوقت، ويقوم بها كادرٌ خبيرٌ بالضرورة (Bray *et al.*, 1945; Spratt *et al.*, 1980). لذلك، وعلى مدار العقود السابقة، بُذلت محاولات عديدة للتنبؤ بهكذا خصائص انطلاقاً من خصائص أخرى متوفرة بكثرة والتي يمكن قياسها بسهولة نسبياً وبتكاليف معقولة، وذلك باستخدام نماذج رياضية تنبؤية. في علم التربة، تُسمى هذه النماذج الرياضية Pedotransfer Functions (PTFs)، وتتميز بأنها توفر الكثير من الوقت والجهد والمواد وتساعد على اختصار العمل المخبري (Seilsepour *et al.*, 2008; Van Looy *et al.*, 2017; Perreault, *et al.*, 2022).

سبق أن بُذلت محاولات لتطوير نماذج رياضية متعلقة بالفسفور المتاح في التربة. فقد طوّر Kleinman وآخرون (1999) نموذج رياضي متعدد المتغيرات لتقدير الفسفور المتاح في التربة اعتماداً على عدة خصائص أخرى للتربة تشتمل على درجة الحموضة والمادة العضوية والألومنيوم والحديد في التربة كمتغيرات إدخال مستقلة. كما طوّر Keshavarzi وآخرون (2016) نموذج رياضي متعدد المتغيرات لتقدير الفسفور المتاح في التربة اعتماداً على درجة الحموضة والكربون العضوي ونسبة الطين في التربة وكربونات الكلسيوم الكلية كمتغيرات إدخال. في حين طوّر كل من Seilsepour وآخرون (2008) و Faraj وآخرون (2023) نماذج رياضية لتقدير الفسفور المتاح في التربة اعتماداً على محتوى التربة من الكربون العضوي كمتغير مستقل وحيد. وبالمثل، قدّر باحثون آخرون الفسفور المتاح في التربة اعتماداً على خصائص أخرى للتربة وفق نماذج مختلفة ومن دول ومناطق جغرافية متباينة (Withers *et al.*, 2017; Valadares *et al.*, 2017; Mundus *et al.*, 2017). إن النطاق الجغرافي لجميع هذه الدراسات كان محدوداً بالمناطق التي جرى اعتيان التربة فيها، وفي مجملها تمثل ترب في الحقول الزراعية المفتوحة والغابات والمراعي. وعلى الرغم من ذلك، تفتقر المكتبة العلمية إلى نماذج مخصصة لأنظمة الزراعة المحمية التي تتميز بإدارة تسميدية مكثفة وظروف كيميائية وحيوية مغايرة تماماً للأنظمة المفتوحة، مما يجعل من استخدام النماذج الحالية وتطبيقها في الزراعة المحمية أمراً محفوفاً بعدم الدقة.

وعلاوة على ذلك، يواجه تطوير النماذج الرياضية (PTFs) تحديات إحصائية جوهرية، أبرزها مشكلة التعدد الخطي (Multicollinearity) بين المتغيرات الكيميائية للتربة، والحاجة للتأكد من تحقق افتراضات الانحدار الخطي لضمان قدرة النموذج الرياضي على التنبؤ بالمتغير المدروس خارج عينات الدراسة.

على حدّ معرفتنا، لا توجد دراسات أو أبحاث علمية موثقة على المستوى الوطني حول التنبؤ بالفسفور المتاح في التربة اعتماداً على خصائصها الأخرى، سواء في ظروف الزراعة المحمية أو المكشوفة. وضمن هذا السياق، وانطلاقاً من الأهمية الاقتصادية للزراعات المحمية في القطر، فقد هدف البحث إلى تطوير نموذج رياضي للتنبؤ بالفسفور المتاح اعتماداً على بعض الخصائص الكيميائية سهلة وسريعة القياس مثل درجة الحموضة والناقلية الكهربائية، وبالاستناد إلى قيم بعض الخصائص الأخرى كالمادة العضوية والبوتاسيوم المتاح. تبرز أهمية هذا النموذج كمساهمة فريدة من خلال تقديم أداة تنبؤية منخفضة التكلفة وعالية الدقة مُعايرة خصيصاً لترب الزراعة المحمية، مع مراعاة الضوابط الإحصائية الصارمة لضمان استقرار النموذج وموثوقيته. كما تتضاعف القيمة التطبيقية للنموذج المقترح في سياق الدراسات المسحية الواسعة والمشاريع الزراعية الكبرى وقواعد البيانات القائمة، وهو ما يسهم في خفض التكاليف التشغيلية بشكل جذري، مما يدعم الإدارة الرشيدة للأسمدة والحفاظ على استدامة التربة في أنظمة الزراعة المحمية.

المواد والطرائق:

1. منطقة الدراسة:

تشمل منطقة الدراسة محافظة طرطوس التي تبلغ مساحتها نحو 1900 كم^2، وتشغل الجزء الجنوبي من المنطقة الساحلية في القطر (الشكل 1). يسود المحافظة مناخ متوسطي رطب إلى شبه رطب، مع معدل هطول مطري سنوي 1215 مم يقل فوق السهول الساحلية ويزداد على المرتفعات (المجموعة الإحصائية الزراعية، 2023). وتتمتع المحافظة بشتاءٍ ماطر ومعتدل في السهول الساحلية وبارد في المرتفعات الجبلية، وبصيفٍ حار ورطب نسبياً. ويبرز أثر العوامل الطبيعية والمناخية بوضوح في توسع الزراعة المحمية في أرجاء المحافظة المختلفة، وتلعب التضاريس دوراً في ذلك حيث تُقسم المحافظة إلى قسمين: سهول ساحلية ومرتفعات جبلية. وتشمل السهول الساحلية من الشمال سهل بانياس ثم سهل طرطوس وسهل صافيتا اللذين يتصلا بأكبر سهل على الساحل السوري وهو سهل عكار (مساحته الإجمالية نحو 26650 هكتار) والذي يمتد شرقاً بمقدار نحو 24 كم، ويتميز بتربة خصبة ساعدت على نجاح الزراعة المحمية.

الشكل (1): الموقع الجغرافي لمحافظة طرطوس والنطاق المكاني الذي تغطيه قاعدة بيانات الدراسة.

أما المرتفعات الجبلية فقد انعكس دورها سلباً على الزراعة المحمية نظراً لدرجات الحرارة المنخفضة غير الملائمة لخضار الزراعة المحمية كالبندورة والخيار التي تتطلب درجات حرارة مرتفعة نسبياً. كما تمتلك المحافظة العديد من الأنهار دائمة الجريان وأخرى موسمية مثل نهر الكبير الجنوبي ونهر الأبرش ونهر مرقية ونهر جوبر ونهر الغمقة ونهر الحصين ونهر بانياس. وقد أقيمت العديد من السدود على بعضها كسد الأبرش وسد تل حوش وسد خليفة بغرض تغذية المياه الجوفية وتأمين مياه الري. كما يستفاد المزارعون من المياه الجوفية في حوض الساحل حيث حُفرت آلاف الآبار. وقد أسهم توفر المياه السطحية والجوفية في التوسع بالمساحات الزراعية المروية في المحافظة، وخاصة بمساحات الزراعات المحمية. الأمر الذي مكّن محافظة طرطوس من شغل المرتبة الأولى بين محافظات القطر بالزراعة المحمية (الخارطة الاستثمارية الزراعية في محافظة طرطوس، 2022).

2. العينات الترابية المدروسة:

تم في هذه الدراسة الاعتماد على نتائج التحاليل المخبرية للعينات الترابية الواردة إلى مخابر محطة بحوث بيت كمونة التابعة لمركز بحوث طرطوس في الهيئة العامة للبحوث العلمية الزراعية، والمأخوذة فقط من ترب الزراعات المحمية من عموم محافظة طرطوس، على مدى السنوات السابقة من 2017 وحتى 2024. ولما كانت التحاليل تتباين بتباين طلبات أصحاب العينات من باحثين ومزارعين وغاياتهم من التحليل، فقد جرى انتقاء العينات الترابية المأخوذة على عمق (0 – 30 سم)، والتي تضمنت نتائج تحاليلها في وقتٍ واحد على كل من درجة الحموضة (pH)، ونسبة المادة العضوية (OM, %)، والناقلية الكهربائية (EC, dS m^{-1})، والآزوت الكلي (t. N, %)، والفسفور المتاح (av. P, ppm)، والبوتاسيوم المتاح (av. K, ppm). وقد لوحظ بأن نسبة كربونات الكلسيوم الكلية (t. $CaCo_3$) في معظم هذه العينات كانت منخفضة للغاية (آثار)؛ وقد يُعزى ذلك إلى الإضافات المتكررة للمخصبات العضوية في ظروف الزراعات المحمية، والتي تؤدي إلى إذابة كربونات الكلسيوم، وغسلها مع مياه الري خارج الطبقة الزراعية السطحية (Royer, 1999; Mubeenuddin *et al.*, 2024). وبناءً عليه، لم تُدرج قيم كربونات الكلسيوم ضمن متغيرات الإدخال في النموذج التنبؤي. بلغ عدد العينات المعتمدة في هذه الدراسة 1158 عينة ترابية. يُظهر الجدول (1) بعض المؤشرات الإحصائية للخصائص الكيميائية لهذه العينات،

الجدول (1): بعض المؤشرات الإحصائية للخصائص الكيميائية للعينات الترابية المدروسة (1158 عينة ترابية).

الخاصية	القيمة العظمى Max.	القيمة الصغرى Min.	المتوسط Mean	الانحراف المعياري St. dev.	معامل الاختلاف C.V. (%)
درجة الحموضة pH	7.99	6.41	7.31	0.29	3.9
المادة العضوية OM (%)	6.90	0.12	3.22	1.29	40.1
الناقلية الكهربائية EC (dS m^{-1})	8.00	0.08	2.02	1.62	80.0
الآزوت الكلي t. N (%)	0.99	0.01	0.17	0.09	53.6
الفسفور المتاح av. P (ppm)	74.68	2.90	21.31	12.47	58.5
البوتاسيوم المتاح av. K (ppm)	2562.50	13.08	433.58	330.04	76.1

علماً بأن التحاليل المخبرية قد أنجزت وفق الطرائق التالية:

- قيست درجة حموضة التربة باستخدام جهاز قياس pH meter في معلق تربة (1:5).
- وقيست الناقلية الكهربائية في مستخلص تربة (1:5) باستخدام جهاز الـ EC.

- وقُدّرت المادة العضوية اعتماداً على أكسدتها بكمية زائدة من ثاني كرومات البوتاسيوم بوجود حمض الكبريت المركّز ومن ثم المعايرة بسلفات الحديدي بوجود مشعر الفروئين (Walkley and Black, 1934).
- وقُدّر الآزوت الكلي وفق طريقة (تفاعل) بيرثلوت (Searle, 1984).
- وقُدّر البوتاسيوم المتاح باستخدام جهاز التحليل الطيفي باللهب.
- وقُدّر الفسفور المتاح وفق طريقة أولسن (Olsen *et al.*, 1954).

3. إنشاء النموذج الرياضي والتحقق منه:

أُعتمد في هذه الدراسة تحليل الانحدار الخطي المتعدد (Multiple linear regression analysis) لإنشاء نموذج رياضي يمثل العلاقة الخطية بين خصائص التربة المذكورة كمتغيرات إدخال مستقلة والفسفور المتاح كمتغير تابع، الأمر الذي يسمح بفهم التأثير المشترك لهذه الخصائص على التنبؤ بقيم الفسفور المتاح. يُعطى النموذج الرياضي بالصيغة التالية:

$$\mathbf{av.\ P = a + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5} \quad (1)$$

حيث:

- a قيمة ثابتة Constant أو Intercept،
- b_1, b_2, b_3, b_4, b_5 معامِلات الانحدار أو معاملات النموذج،
- x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 المتغيرات المستقلة وهي الخصائص الكيميائية المدروسة للتربة: درجة الحموضة، ونسبة المادة العضوية، والناقلية الكهربائية، والآزوت الكلي، والبوتاسيوم المتاح، على التتالي.

ولضمان موثوقية النمذجة، تم التأكد من تجانس البيانات المجمعة عبر السنوات (2017–2024) باستخدام اختبار تحليل التباين (ANOVA) ، حيث تم التحقق من أن التباينات السنوية لا تؤثر على استقرار علاقات الارتباط. كما تم حساب مصفوفة ارتباط بيرسون (Pearson Correlation) لمجموعة بيانات الإنشاء لاستكشاف قوة واتجاه العلاقات بين الفوسفور المتاح والمتغيرات المستقلة، وللتأكد من عدم وجود ارتباطات بينية قوية قد تؤدي إلى مشكلات التعدد الخطي (Multicollinearity). ولتأكيد ذلك إحصائياً، جرى حساب معامل تضخم التباين (Variance Inflation Factor, VIF) لكل متغير مستقل، حيث اعتُبرت القيم التي تقل عن 5 (VIF<5) دليلاً حاسماً على غياب التعدد الخطي واستقرار النموذج (Montgomery *et al.*, 2021; Souza, 2025).

تم ضبط معامِلات النموذج a و b_1 و b_2 و b_3 و b_4 و b_5 للحصول على النموذج الأنسب الذي يمثل البيانات المخبرية المتوفرة، حيث قُسّمت البيانات المخبرية تقسيماً عشوائياً إلى مجموعتين: اشتملت المجموعة الأولى على 927 عينة (80%) لإنشاء النموذج الرياضي وتعيين قيم معامِلاته الرياضية وفحص أهميتها الإحصائية، والمجموعة الثانية على 231 عينة (20%) للتحقق من صحته. استُخدمت حزمة أدوات تحليل البيانات (Data analysis tools) في برنامج Microsoft Office Excel 2016 لضبط المعامِلات وفق طريقة المربعات الصغرى (Least squares method) بغية الحصول على أنسب معادلة معبّرة عن المتغير التابع (الفسفور المتاح)؛ وتُعدُّ طريقة المربعات الصغرى أفضل الطرق لإيجاد معادلة الانحدار المُثلى كونها تُقلل مجموع مربعات البواقي (Residuals)، أي تقوم بتقليل الفروقات بين القيم المقاسة مخبرياً (Measured av. P) وتلك المُتنبأ بها (Predicted av. P)، مما يزيد بدوره من دقة النموذج الرياضي. جرى التحقق من الأهمية الإحصائية لقيم معامِلات النموذج عند مستوى 0.05، وقد عُدّت مساهمة المتغير

المستقل في النموذج الرياضي مقبولةً إحصائياً في حال كانت قيمة p-value الخاصة بمعامِله أقل من 0.05، وإلا فيُستبعد ويُعاد إنشاء النموذج الرياضي حتى الحصول على نموذج جديد تكون فيه جميع المعامِلات ذات دلالة إحصائية.

بعد ذلك، جرى التحقق من صحة النموذج الرياضي باستخدام المجموعة الثانية من البيانات (بيانات التحقق)؛ حيث تمت مقارنة قيم الفسفور المتاح المقاس مخبرياً في بيانات التحقق مع قيم الفسفور المتاح المتنبأ بها وذلك باستخدام اختبار t-test عند مستوى 0.05، وقد استُخدمت أيضاً حزمة أدوات تحليل البيانات المشار إليها أعلاه لإنجاز هذا الاختبار. إلى جانب اختبار t-test، جرى تقييم كفاءة النموذج التنبؤية باستخدام معايير إحصائية إضافية شملت معامل التحديد (R^2)، والجذر التربيعي لمتوسط مربعات الخطأ (Root mean square error, RMSE) وفق المعادلة (2) ومتوسط الخطأ المطلق (Mean absolute error, MAE)،

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}[z(r_i) - z^*(r_i)]^2} \quad \ldots (2)$$

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|z(r_i) - z^*(r_i)| \quad \ldots (3)$$

وفق المعادلة (3) بين القيم المقاسة $z(r_i)$ والمتنبأ بها $z^*(r_i)$ حيث n عدد العينات، لضمان تقييم شامل لدقة التنبؤ: وتزداد جودة النموذج في التعبير عن البيانات المقاسة كلما صغُرت قيمة هذين المعيارين.

النتائج والمناقشة:

تُصنّف ترب العينات وفق الجدول (1) بين حامضية خفيفة (6.41) وقاعدية (7.99)، وفق تصنيف Marx *et al.* (1999). بينما تراوحت قيم المادة العضوية بين المنخفضة جداً (0.12%) والغنية (6.90%)، وفق تصنيف منظمة الفاو (FAO, 1980). كذلك تُصنف هذه الترب بين غير المالحة (0.08) والمالحة جداً (8.00)، وفق تقييم منظمة الفاو لقيم الناقلية الكهربائية لمحلول التربة (FAO, 2007). أما بالنسبة للمؤشرات الخصوبية للتربة، فتُصنف تبعاً لقيم الآزوت الكلي بين الفقيرة (0.01%) والغنية (0.99%)، وفق تصنيف منظمة الفاو (FAO, 1980)، وبين فقيرة جداً بالبوتاسيوم المتاح (13.08 ppm) وغنية جداً (2562.50 ppm)، وبين فقيرة بالفسفور المتاح (2.90 ppm) وغنية جداً (74.68 ppm)، وفق تقييم منظمة الفاو (FAO, 2007). وتعود هذه التباينات الكبيرة في الخصائص الكيميائية للترب المدروسة إلى الاختلاف في طبيعة الأراضي الزراعية التي جرى اعتيانها من مناطق جغرافية مختلفة، وإلى التباين الكبير في الممارسات الزراعية للمزارعين وإدارتهم للبيوت المحمية على الأقل من حيث نوعية وكمية الأسمدة المضافة بشقيها العضوي والمعدني، حيث تجلى ذلك في ارتفاع قيم معامل الاختلاف (CV%) للمؤشرات الخصوبية (N, P, K)، والذي أدى إلى ارتفاع معامل الاختلاف للناقلية الكهربائية أيضاً (الجدول 1). بكل الأحوال، تَظهر أهمية هذه التباينات في أن قاعدة البيانات المدروسة تمثل طيفاً واسعاً من الترب المختلفة بالطبيعة والإدارة تحت نظام الزراعة المحمية، مما يمنح النموذج الرياضي المُطوّر مرونة عالية وقدرة على التنبؤ ضمن نطاق واسع من الظروف الميدانية الحقيقية.

وقبل البدء بإنشاء النموذج، ونظراً لامتداد فترة جمع البيانات على مدى ثمان سنوات من 2017 إلى 2024، فقد أظهرت نتائج تحليل التباين (ANOVA) لتقييم التجانس الزمني لقاعدة البيانات استقراراً وعدم وجود فروق معنوية في قيم المادة العضوية، والناقلية

الكهربائية، والآزوت الكلي، والبوتاسيوم المتاح ($p>0.05$) عبر سنوات الدراسة. في حين لوحظت فروق معنوية في مستويات الفسفور المتاح ودرجة الحموضة، ويُعزى ذلك إلى الطبيعة الديناميكية لهذه الخصائص في أنظمة الزراعة المحمية نتيجة الإضافات التسميدية الفوسفاتية المتراكمة والتعديلات الحمضية المتكررة. كما يُعزى إلى تباين مصادر العينات (البيوت المحمية) التي تعكس تنوعاً في الممارسات الإدارية والتسميدية لكل مُزارع عبر السنوات. ومع ذلك، فإن هذا التباين الناتج عن اختلاف المواقع والممارسات يُعدُّ ميزةً إحصائية؛ حيث يتيح بناء نموذج تنبؤي يعتمد على علاقات الارتباط الكامنة بين المتغيرات في ظل ظروف ميدانية حقيقية ومتباينة (Real-world variability)، مما يرفع من كفاءة النموذج وقدرته على التنبؤ تحت ظروف إدارية متنوعة.

كما تم إجراء مصفوفة ارتباط بيرسون لبيانات مجموعة الإنشاء (الجدول 2) لاستكشاف العلاقات البينية؛ حيث أظهرت النتائج ارتباطات عالية المعنوية ($p < 0.001$) بين الفسفور المتاح وكافة المتغيرات المستقلة، كان أقواها مع البوتاسيوم المتاح ($r = 0.598$)، ثم الناقلية الكهربائية ($r = 0.581$) يليها الارتباط العكسي مع pH ($r = -0.314$). كما أكدت المصفوفة استقلالية المتغيرات المستقلة عن بعضها البعض، حيث كانت جميع الارتباطات البينية دون العتبة الحرجة ($r < 0.60$)، مما قدم مؤشراً أولياً على غياب مشكلة التعدد الخطي (Multicollinearity) وفقاً للمعايير الإحصائية التي تقترحها الدراسات (Montgomery *et al.*, 2021; Souza, 2025).

الجدول (2): مصفوفة ارتباط بيرسون للخصائص الكيميائية المدروسة لبيانات مجموعة الإنشاء (927 عينة).

av. K	av. P	t. N	EC	OM	pH	الخاصية
					1	درجة الحموضة pH
				1	-0.053^{ns}	المادة العضوية OM (%)
			1	0.190^{***}	-0.235^{***}	الناقلية الكهربائية EC ($dS\ m^{-1}$)
		1	0.167^{***}	0.527^{***}	-0.022^{ns}	الآزوت الكلي t. N (%)
	1	0.218^{***}	0.581^{***}	0.310^{***}	-0.314^{***}	الفسفور المتاح av. P (ppm)
1	0.598^{***}	0.238^{***}	0.443^{***}	0.386^{***}	-0.162^{***}	البوتاسيوم المتاح av. K (ppm)

^{ns} = غير معنوي عند مستوى 0.05، *** = معنوي عند مستوى $p<0.001$

استناداً إلى نتائج تحاليل العينات الترابية في بيانات الإنشاء، تم تعيين قيم المعامِلات a وb_1 وb_2 وb_3 وb_4 وb_5 المثلى للنموذج الرياضي التنبؤي وفق المعادلة (1)، باستخدام طريقة المربعات الصغرى، كما هو مبين في الجدول (3). ولدى فحص الأهمية الإحصائية لقيم هذه المعامِلات، تبين أن جميع المعامِلات مقبولة إحصائياً ($p<0.001$) باستثناء المعامِل b_4 المرتبط بالآزوت الكلي؛ حيث سجلت $p = 0.576$ (الجدول (3)، المحاولة الأولى). وعليه فالنموذج الرياضي المتولد بوجود الآزوت الكلي غير مقبول إحصائياً. ونتيجةً لذلك، جرى استبعاده من قاعدة البيانات، وأُعيد إنشاء وبناء النموذج الرياضي وفق المعادلة (1) من جديد باستخدام المتغيرات المستقلة المتبقية (pH، وOM، وEC، وav. K). تم الحصول على القيم المثلى الجديدة لمعامِلات النموذج كما هو مبين في الجدول (3) المحاولة الثانية. ولدى فحص الأهمية الإحصائية لها، وُجد أن جميعها دون استثناء مقبولة إحصائياً ($p<0.001$) كما هو مبين في الجدول (3). وعليه يمكن كتابة النموذج الرياضي للتنبؤ بقيم الفسفور المتاح في التربة اعتماداً على البيانات المخبرية المتوفرة وفق المعادلة التالية:

$$\textbf{av. P} = 53.919 - 7.059\ \textbf{(pH)} + 1.254\ \textbf{(OM)} + 3.651\ \textbf{(EC)} + 0.017\ \textbf{(av. K)} \quad (4)$$

بلغت قيمة معامل التحديد (Coefficient of determination, R^2) لهذا النموذج 0.838 مع $p<0.001$، ومعامل الارتباط (Coefficient of correlation, r) بين القيم المقاسة مخبرياً والقيم المقابِلة المُتنبأ بها 0.915 مع $p<0.001$. مما يعني أن النموذج يفسر نحو 84% من التباين الحاصل في قيم الفسفور المتاح. ولضمان سلامة الاستنتاج الإحصائي من مشكلة التعدد الخطي (Multicollinearity)، تم حساب معامل تضخم التباين (VIF) لجميع المتغيرات؛ حيث بلغت أقصى قيمة له 1.54، وهي أقل بكثير من الحد الحرج (5)، مما يؤكد استقرار النموذج وموثوقية المعاملات المقدرة (Montgomery *et al.*, 2021; Souza, 2025).

يتجاوز هذا النموذج كونه صيغة رياضية ليمثل انعكاساً للقواعد الكيميائية والحيوية الحاكمة لديناميكية الفوسفور في ترب منطقة الدراسة؛ حيث يشير معامل الـ pH السالب (-7.059) إلى التأثير الحاسم لعمليات الترسيب (Precipitation) للفسفور مع الكلسيوم في الوسط القاعدي، أما معامل المادة العضوية (+1.254) فيؤكد دورها الحيوي في تحرير الفسفور عبر التمعدن والمنافسة على مواقع الادمصاص، بينما يعكس معامل الـ EC الموجب (+3.651) "بصمة الإدارة التسميدية"، حيث تترافق زيادة الفسفور مع ارتفاع ملوحة محلول التربة نتيجة كثافة الأسمدة المضافة. في حين يشير معامل البوتاسيوم (+0.017) إلى حالة التوازن الخصوبي الناتجة عن التسميد المتكامل.

الجدول (3): قيم معامِلات النموذج الرياضي وفحص الأهمية الإحصائية لها.

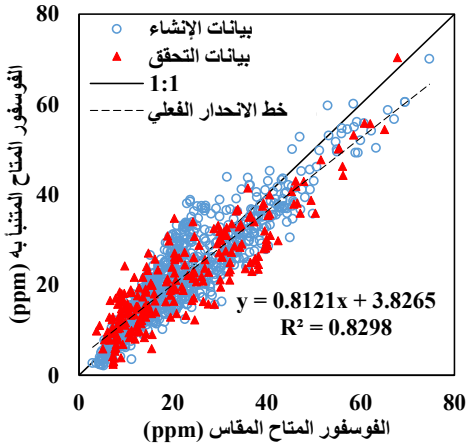
تطوير النموذج	المعامِل	a	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5
	المتغير الموافق	–	pH	OM	EC	t. N	av. K
المحاولة الأولى حيث يتضمن النموذج كافة المتغيرات	القيمة	53.929	-7.066	1.204	3.649	1.200	**0.017**
	p-value	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.576^{ns}	**< 0.001**
المحاولة الثانية بعد استبعاد الآزوت الكلي	القيمة	53.919	-7.059	1.254	3.651	-	**0.017**
	p-value	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	–	**< 0.001**

^{ns} = غير معنوي عند مستوى 0.05

بعد الحصول على النموذج الرياضي الأمثل (المعادلة 4)، تم تطبيقه على بيانات التحقق بغرض التحقق المستقل من صحته. بينت نتائج اختبار t-test لدى مقارنة قيم الفسفور المتاح المتنبأ به وفق النموذج مع القيم المقابِلة لها والمقاسة مخبرياً، عدم وجود فروقات معنوية فيما بينها ($p = 0.322$)، الأمر الذي يؤكد صحة النموذج الرياضي المعطى. كما وتؤكد هذه النتيجة أن القيمة المتنبأ بها تقع تماماً ضمن مجال الثقة لمتوسط الفوسفور المتاح المقاس، مما يثبت دقة النموذج في تمثيل المجتمع الإحصائي للدراسة. وللتحقق من افتراضات الانحدار الخطي، تم فحص توزع البواقي؛ حيث أظهر اختبار D'Agostino-Pearson بقيمة ($p = 0.202$) واختبار Jarque-Bera بقيمة ($p = 0.267$) أن الأخطاء تتبع توزيعاً طبيعياً متماثلاً حول الصفر، مع انحراف معياري قدره (6.17). تؤكد هذه النتائج استيفاء شروط استقلالية وتجانس تباين البواقي، مما يضمن أن النموذج المُطوّر يمتلك قوة تنبؤية حقيقية وغير متحيزة (D'Agostino and Pearson, 1973; Jarque and Bera, 1987).

وعلاوةً على ذلك، ولتقييم كفاءة التنبؤ بشكل شامل، تم حساب معايير الخطأ الإحصائية؛ حيث بلغت قيمة الجذر التربيعي لمتوسط مربعات الخطأ (RMSE) نحو 4.843، ومتوسط الخطأ المطلق (MAE) نحو 3.817. إن انخفاض هذه القيم بالتزامن مع معامل التحديد العالي يؤكد أن النموذج يمتلك قدرة تنبؤية فائقة. كما نلاحظ أن قيمة RMSE هي أصغر من قيمة الانحراف المعياري للبيانات التجريبية المقاسة (12.47 ppm كما في الجدول 1)، الأمر الذي يُعزّز تعزيزاً فائقاً من جودة أداء النموذج (Liemohn *et al.*, 2021). يُظهر الشكل (2) توزع قيم الفسفور المتاح المقاس مخبرياً والمتنبأ بها لبيانات مجموعتي الإنشاء والتحقق حول خط التطابق

المثالي (1:1) وخط الانحدار الفعلي. ويلاحظ بوضوح تقارب النقاط من خط التطابق، مما يعزز الثقة بالقدرة التطبيقية للنموذج في ظروف الزراعة المحمية.



الشكل (2): توزع قيم الفسفور المتاح المقاس مخبرياً والمتنبأ به، لكل من بيانات إنشاء النموذج (الدوائر) وبيانات التحقق (المثلثات) حول خط التطابق المثالي 1:1، وخط الانحدار الفعلي.

يُظهر النموذج الرياضي المتحصل عليه والمعطى بالعلاقة (4) وجود علاقة ارتباط معنوية سالبة (عكسية) بين الفسفور المتاح في التربة ودرجة حموضة التربة (pH)، وعلاقات ارتباط معنوية موجبة (طردية) بين الفسفور المتاح في التربة وبقية الخصائص (OM, EC, av. K). ولا تقتصر أهمية هذه المعاملات على دلالاتها الإحصائية، بل تمتد لتعكس التفاعلات الكيميائية والحيوية المعقدة السائدة في ترب البيوت المحمية بمنطقة الدراسة، ويمكن تفسيرها وفق الآتي:

- ***تأثير الثابت (Intercept) +53.919:***

يمثل الثابت القيمة المتنبأ بها للفسفور المتاح عندما تكون جميع المتغيرات المستقلة الأخرى (pH, OM, EC, av. K) تساوي صفر. من الناحية النظرية، هذا يعني أن التربة ستوفر 53.919 ppm من الفسفور المتاح حتى لو كانت جميع الخصائص الأخرى غير موجودة أو عند قيمتها الصفرية. في الواقع العملي، لا يمكن أن تكون قيم pH أو المادة العضوية أو الناقلية الكهربائية أو البوتاسيوم المتاح صفراً في تربة زراعية. لذلك، فإن القيمة المطلقة للثابت ليس لها تفسير واقعي بيولوجي أو كيميائي مباشر في سياق خصوبة التربة. إنها تمثل نقطة مرجعية رياضية بحتة للنموذج وليست مؤشراً على توافر الفسفور في غياب جميع العوامل الأخرى.

- ***تأثير درجة الحموضة (pH) ومعاملها -7.059:***

يُعدُّ الـ pH المتغير الأكثر حساسية وتأثيراً في النموذج؛ حيث يشير المعامل السالب (-7.059) إلى علاقة عكسية قوية بين pH وإتاحة الفسفور، وهذا يعني أن زيادة وحدة واحدة في قيمة pH تؤدي إلى خفض الفسفور المتاح بمقدار 7.059 ppm، والعكس صحيح. وتفسير هذه العلاقة يعود إلى ديناميكية الفسفور المعقدة في التربة: ففي التربة القلوية (pH مرتفع) يميل الفسفور إلى التثبيت (Fixation) مع أيونات الكلسيوم (Ca^{2+}) والمغنيزيوم (Mg^{2+}) لتكوين مركبات فوسفات الكالسيوم والمغنيزيوم شحيحة الذوبان، مما تيسره للنبات. أما في التربة الحامضية (pH منخفض) يميل الفسفور إلى التثبيت مع أيونات الحديد (Fe^{3+}) والألومنيوم (Al^{3+}) لتكوين مركبات فوسفات الحديد والألومنيوم غير الذائبة. كما أن لأكاسيد الحديد والألمنيوم في ظروف الترب القلوية دور مهم أيضاً، إذ تكفي تراكيز قليلة منها للتأثير على ادمصاص الفسفور، لأن تواجدها على شكل شوائب أو أغشية على السطوح الغروية

للتربة يتيح لها أخذ دور جسور تربط أنيونات الفوسفات على سطوح الكربونات وفلزات الطين الثانوية؛ لذلك يكون تيسير الفسفور في أعلى مستوياته عادةً في نطاق pH يتراوح بين 6.0 و7.0، حيث يكون التثبيت بأقل مستوياته (Ryan *et al.*, 1985; McDowell *et al.*, 2003; Barrow, 2017). وهو ما يقدم دليلاً على ضرورة إدارة مياه الري والتسميد لخفض pH نحو المدى المتعادل (6.5-7) لضمان أقصى استفادة من الفسفور المضاف أو الموجود طبيعياً. بما أن ترب منطقة الدراسة تقع ضمن النطاق المائل للقلوية (بقيمة متوسطة pH = 7.31 كما في الجدول 1)، فإن هذا يستدعي من المزارعين تفعيل برامج التسميد المتكامل (عضوي + معدني) واستخدام الأسمدة ذات الأثر الحامضي (مثل استخدام حمض الفوسفوريك) للحفاظ على ذوبانية الفسفور ومنع تحوله لصور غير ميسرة.

- ***تأثير المادة العضوية (OM) ومعاملها +1.254:***

يشير المعامل الموجب (+1.254) إلى علاقة طردية بين نسبة المادة العضوية في التربة وتوافر الفسفور المتاح، وهو يعكس الأثر الإيجابي للمادة العضوية على إتاحة الفسفور؛ حيث يساهم تحللها البيولوجي في إطلاق أحماض عضوية كحمض الستريك والماليك تنافس أنيونات الفوسفات على مواقع الادمصاص في التربة (Ligand exchange)، مما يمنع ترسيبها ويبقيها في محلول التربة بصورة ميسرة لامتصاص النبات (Wang and Lampers, 2019). كما يمكن لأحماض الهيوميك أن تعمل كمواد مخلبية (Chelating agents) تشكل مركبات معقدة مع أيونات الحديد والألومنيوم وكذلك أيونات الكلسيوم، وبالتالي تبقى أنيونات الفوسفات بصورة ذائبة متاحة للنبات. وتعمل المادة العضوية أيضاً على تغليف غرويات التربة مما يمنع احتجاز (Sorption) الفسفور بين طبقات معادن الطين، بالإضافة إلى دورها المباشر في إطلاق الفسفور العضوي عبر عملية التمعدن (Mineralization) المدعومة بالنشاط الحيوي في منطقة الرايزوسفير (Afif *et al.*, 1996; Hinsinger, 2001; Mohanty *et al.*, 2006). يؤكد هذا المعامل على أهمية التسميد العضوي كاستراتيجية حيوية لزيادة توافر الفسفور وتحسين خصوبة التربة بشكل عام.

- ***تأثير الناقلية الكهربائية (EC) ومعاملها +3.651:***

يشير المعامل الموجب (+3.651) إلى علاقة طردية بين الناقلية الكهربائية وتوافر الفسفور المتاح. وهو يمثل بصمة التسميد المكثف في سياق الزراعة المحمية وليس علاقة كيميائية سببية مباشرة. فالمزارعون في البيوت المحمية يميلون لزراعة أصناف عالية الإنتاجية تتطلب إضافة جرعات مبالغ فيها من الأسمدة المعدنية كالأسمدة الفوسفاتية والبوتاسية. هذه الإضافات المتكررة تؤدي إلى تراكم متزامن للأيونات المرافقة والشوائب (كالكبريتات، والكربونات، والصوديوم، والكلوريد) في محلول التربة، مما يرفع EC بالتوازي مع ارتفاع تراكيز الفسفور والبوتاسيوم (Omonode and Vyn, 2006; Deraoui *et al.*, 2015; Mazur *et al.*, 2022). يمكن أن يكون EC مؤشراً غير مباشر على كثافة برنامج التسميد، حيث ارتفاعه قد يعني أن هناك كميات كبيرة من المغذيات (بما في ذلك الفسفور) في محلول التربة. لكن يجب الحذر، فبينما قد يشير ارتفاع EC إلى توافر المغذيات، فإن المستويات العالية جداً منه يمكن أن تسبب إجهاداً للنبات وتقلل النشاط الميكروبي في التربة وتترافق غالباً بارتفاع درجات الـ pH، مما يسبب على المدى الطويل تثبيت الفسفور وتقليل حركته في محلول التربة. لذا، يجب موازنة توافر المغذيات مع الحفاظ على مستويات EC مقبولة لنمو النبات. إن إدراج الناقلية الكهربائية في النموذج يُكسب النموذج قدرة على التنبؤ بالفسفور من خلال تتبع مستوى ملوحة التربة والممارسات التسميدية التراكمية السابقة.

- **تأثير البوتاسيوم (av. K) ومعامله 0.017+:**

يشير المعامل الموجب (0.017+) إلى علاقة طردية ضعيفة نسبياً بين البوتاسيوم المتاح (av. K) وتوافر الفسفور المتاح. هذا يعني أنه كلما زاد البوتاسيوم المتاح، زاد الفسفور المتاح، ولكن بتأثير أقل مقارنةً بالمتغيرات الأخرى. وهذه العلاقة غالباً ما تكون غير مباشرة وتفسر على النحو الآتي. في الزراعة المحمية، يتم عادةً إضافة الفسفور والبوتاسيوم (وغيرها من المغذيات) كجزء من برنامج تسميد متكامل. وبالتالي، فإن المستويات العالية من البوتاسيوم المتاح قد تكون ببساطة مؤشراً على أن التربة تتلقى مستويات عالية من الأسمدة بشكل عام، والتي تشمل الفسفور. ولا توجد آلية كيميائية مباشرة رئيسة معروفة يؤدي فيها البوتاسيوم إلى زيادة توافر الفسفور في التربة بنفس الطريقة التي تؤثر بها pH أو المادة العضوية. قد تكون هناك بعض التفاعلات المعقدة على مستوى امتصاص النبات، ولكن العلاقة في النموذج الإحصائي هي على الأرجح ارتباط غير مباشر يعكس ممارسات الإدارة. وتتوافق هذه النتيجة مع ما توصل إليه باحثون آخرون (Mazur *et al.*, 2022)، حيث أثبتوا وجود علاقات ارتباط موجبة وقوية بين مستويات البوتاسيوم والفسفور في التربة متعلقة بنظم التسميد والتقنيات الزراعية المتبعة. ويشير هذا المعامل إلى أهمية النظر إلى إدارة المغذيات ككل. إذا كانت مستويات البوتاسيوم عالية، فمن المحتمل أن تكون مستويات الفسفور عالية أيضاً بسبب برامج التسميد. ويجب على المزارعين تجنب الإفراط في إضافة أي من المغذيات، حتى لو كانت العلاقة إيجابية في النموذج، لأن ذلك قد يؤدي إلى اختلالات غذائية أخرى أو تلوث بيئي.

الاستنتاجات والتوصيات:

1. نجحت الدراسة في تطوير نموذج رياضي للتنبؤ بالفسفور المتاح في ترب الزراعة المحمية؛ حيث أثبت النموذج جدارته الإحصائية بمعامل تحديد(R^2 = 0.838) ، مما يعني قدرته على تفسير نحو 84% من تباين الفسفور المتاح بالاعتماد على خصائص سريعة وسهلة القياس (pH, OM, EC, av. K).
2. أظهرت الاختبارات خلو النموذج تماماً من مشكلات التعدد الخطي (بأقصى قيمة VIF بلغت 1.54 فقط)، مع استيفاء كامل لفرضيات الانحدار الخطي من حيث استقلالية البواقي وتوزعها الطبيعي. كما أثبت اختبار *t*-test وقيم معياري الجودة (RMSE=4.84 and MAE=3.817) قدرة النموذج على التنبؤ الدقيق بعينات مستقلة خارج عينات الإنشاء والبناء.
3. سُجّل وجود علاقة ارتباط معنوية سالبة بين الفسفور المتاح ودرجة الحموضة تعكس آلية التثبيت ضمن المدى القلوي السائد، بينما سُجّلت علاقات ارتباط معنوية موجبة مع بقية الخصائص المدروسة كأثر تراكمي لبرامج التسميد المكثف المتبعة في البيوت المحمية.
4. نوصي المراكز البحثية والمهندسين الزراعيين بتبني هذا النموذج الرياضي كأداة رقمية بسيطة وسريعة ومنخفضة التكلفة لتقدير حاجة التربة للسماد الفوسفاتي، مما يحدّ من ظاهرة التسميد العشوائي المفرط السائدة في البيوت المحمية، ويقلل التكاليف الاقتصادية ومخاطر الإثراء الغذائي.
5. نوصي المزارعين بالإدارة المتكاملة للأسمدة واستخدام المخصبات العضوية نظراً لدورها الهام في خفض درجة الـ pH ولو بدرجة محدودة، وزيادة كفاءة الاستفادة من الأسمدة الفوسفاتية المضافة بناءً على الأوزان الترجيحية التي أظهرتها معاملات النموذج.

6. نوصي الباحثين في الدراسات المستقبلية بإدخال متغيرات فيزيائية كنسبة الطين أو سعة التبادل الكاتيوني (CEC) لتحسين أداء النموذج وشموليته. كما نوصي بتطبيق نفس المنهجية العلمية لبناء نماذج مشابهة مخصصة لترب الحقول المكشوفة، مما يسهم في بناء قاعدة بيانات رقمية شاملة تدعم الإدارة المستدامة للأراضي الزراعية على المستوى الوطني.

كلمة شكر:

يودّ المؤلفون شكر إدارة الهيئة العامة للبحوث العلمية الزراعية ومركز بحوث طرطوس على الدعم والتشجيع، والشكر موصول لكل من ساهم في إنجاز العمل من العاملين في مخابر محطة بحوث بيت كمونة بطرطوس.

المراجع:

الخارطة الاستثمارية الزراعية في محافظة طرطوس (2022). وزارة الزراعة، دمشق، سورية.

المجموعة الإحصائية الزراعية السنوية (2023). وزارة الزراعة، دمشق، سورية.

Afif, E; V. Barron; and J. Torrent (1996). Organic matter delays but does not prevent phosphate sorption by Cerrado soils from Brazil. Soil Sci. 159(3): 207- 211.

Barrow, N.J. (2017). The effects of pH on phosphate uptake from the soil. Plant soil, 410: 401–410.

Bray, R.H.; and L.T. Kurtz (1945). Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. Soil Sci., 59: 39-45.

D'Agostino R.B.; and E.S. Pearson (1973). Tests for Departure from Normality. Biometrika, 60: 613-622.

Deraoui, N.; L. Hanifi; and A. Mihoub (2015). Effect of Incubation Period of Phosphorus Fertilizer on some Properties of Sandy Soil with Low Calcareous Content, Southern Algeria. Asian J. Agric. Res., 9(3): 123-131.

FAO (1980). Soil testing and plant analysis. Bull. No. 38/1, Food and Agriculture Organization, Rome, Italy.

FAO (2007). Methods of analysis for soils of arid and semi-arid regions. Food and Agriculture Organization, Rome, Italy.

Faraj, S.G.; K.H. Karim; and R.O. Ali (2023). Determination of the best model for predicting soil available phosphorus based on soil organic carbon. Tikrit J. Agric. Sci., 23(4): 85-94.

Frossard, E.; E.K. Bünemann; L. Gunst; A. Oberson; M. Schärer; F. Tamburini (2016). Fate of Fertilizer P in Soils-The Organic Pathway. In. Schnug, E.; and L.J. De Kok (Eds). Phosphorus in agriculture: 100% zero (Pp 41-61). Springer.

Hinsinger, P. (2001). Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. Plant Soil 237: 173–195.

Jarque C.M.; and A.K. Bera (1987). A test for normality of observations and regression residuals. International Statistical Review. 55(2): 163-172.

Keshavarzi, A.; E.O. El-Sayed; S.M. Bateni; B. Pradhan; D. Vasu; and A. Bagherzadeh (2016). Modeling of available soil phosphorus (ASP) using multi-objective group method of data handling. Model. Earth Syst. Env., 2: 157. doi:10.1007/s40808-016-0216-5.

Kleinman, P.J.; R. Bryant; and W. Reid (1999). Development of pedotransfer functions to quantify phosphorus saturation of agricultural soils. J. Environ. Quality 28: 2026–2030.

Liemohn, M.W.; A.D. Shane; A.R. Azari; A.K. Petersen; B.M. Swiger; and A. Mukhopadhyay (2021). RMSE is not enough: guidelines to robust data-model comparisons for magnetospheric Physics. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. (218), Article ID: 105624. https://doi.org/10.1016/j.jastp.2021.105624

Marx E.S.; J. M. Hart; and R.G. Stevens (1999). Soil Test Interpretation Guide, EC 1478, Oregon State University, USA.

Matar, A.; J. Torrent; and J. Ryan (1992). Soil and fertilizer phosphorus and crop responses in the dry land Mediterranean zone. Adv. Soil Sci., 18: 81-146.

Mazur, P.; D. Gozdowski; and E. Wójcik-Gront (2022). Soil Electrical Conductivity and Satellite-Derived Vegetation Indices for Evaluation of Phosphorus, Potassium and Magnesium Content, pH, and Delineation of Within-Field Management Zones. Agriculture, 12: 883.

McDowell, R.W.; N. Mahien; P.C. Brookes; and P.R. Poulton (2003). Mechanisms of phosphorus solubilisation in a limed soil as a function of PH. 51: 685-692.

Mohanty, S.; N.K. Paikaray; and A.R. Rajan (2006). Availability and uptake of phosphorus from organic manures in groundnut (*Arachis hypogea* L.)-corn (*Zea mays* L.) sequence using radio tracer technique. Geoderma, 133: 225-230.

Montgomery, D.C.; E.A. Peck; and G.G. Vining (2021). Introduction to linear regression analysis (6th ed.). John Wiley & Sons, Inc. Pp 704.

Mubeenuddin, M. A.; P. Ravi; A. Krishna Chaitanya; and E. Rajanikanth (2024). Effect of continuous use of organic and inorganic fertilizers on soil physicochemical properties in a Rice cropping system on Inseptisols. Inter. J. Res. Agronomy, 7(8): 21-24.

Mundus, S.; A. Carstensen; S. Husted (2017). Predicting phosphorus availability to spring barley (Hordeum vulgare) in agricultural soils of Scandinavia. Field Crops Res., 212: 1–10.

Olsen, S.R.; C.V. Cole; F.S. Watanabe; and L.A. Dean (1954). Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. US Department of Agriculture Circular, Washington, DC.

Omonode, R.A.; and T.J. Vyn (2006). Spatial dependence and relationships of electrical conductivity to soil organic matter, phosphorus, and potassium. Soil Sci., 171: 223–238.

Perreault, S.; A. El Alem; K. Chokmani; and A.N. Cambouris (2022). Development of Pedotransfer Functions to Predict Soil Physical Properties in Southern Quebec (Canada). Agronomy, 12(2): 526.

Royer, D.L. (1999). Depth to pedogenic carbonate horizon as a paleo precipitation indicator? : Geology, 27: 1123-1126.

Ryan, J.; D. Curtin, and M.A. Cheema (1985). Significance of iron oxides and calcium carbonate particle size in phosphate sorption by calcareous soils. Soil Sci. Soc. Am. J. 49: 74-76.

Searle, P.L. (1984). The Berthelot or indophenol's reaction and its use in the analytical chemistry of nitrogen. Analyst, 109: 549–568.

Seilsepour, M.; M. Rashidi; B.G. Khabbaz (2008). Prediction of soil available phosphorus based on soil organic carbon. Am. Eurasian J. Agric. Environ. Sci., 4(2): 189-193.

Souza, T. (2025). Advanced statistical analysis for soil scientists. Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-88161-9

Spratt, E.D.; F.G. Warder; L.D. Bailey; and D.W.L. Read (1980). Measurement fertilizer phosphorus residues and its utilization. Soil Sci. Soc. Am. J., 44: 1200-1204.

Valadares, S.V.; W.P. Cropper; J.C. Lima Neves; H.G. Leite; N.F. Barros; and S. Gerber (2017). Pedotransfer Functions to Estimate Parameters for Soil Phosphorus Models. Soil Sci. Soc. Am. J., 81: 210–213.

Van looy, K.; J. Bouma; M. Herbst; J. Koestel; B. Minasny; U. Mishra; C. Montzka; A. Nemes; Y. Pachepsky; J. Padarian; M. Schaap; B. Szabó; A. Verhoef; J. Vanderborght; M. Ploeg; L. Weihermüller; S. Zacharias; Y. Zhang; and H. Vereecken (2017). Pedotransfer Functions in Earth System Science: Challenges and Perspectives. Reviews of Geophysics. 55. 10.1002/2017RG000581.

Walkley, A.; and A. Black (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Sci., 37: 29-38.

Wang, Y.; and H. Lambers (2019). Root-release organic anions in response to low phosphorus availability: recent progress, challenges and future perspectives. Plant and Soil: 447: 135-156.

Withers, P.J.; R.A. Hodgkinson; A. Rollett; C. Dyer; R. Dils; A.L. Collins; P.E. Bilsborrow; G. Bailey; and R. Sylvester-Bradley (2017). Reducing soil phosphorus fertility brings potential long-term environmental gains: A UK analysis. Environmental Research Letters 12: p.063001.

Developing a pedotransfer function to predict available phosphorus in greenhouse soils based on some of their chemical properties

Ibrahim Mubarak[1*], Sokrat Ahmad[1], Ali Jouhra[1] and Ahmad Ahmad[1]

[1] Scientific Agricultural Research Center of Tartous, General Commission for Scientific Agricultural Research – GCSAR, Tartous, Syria

(*Corresponding author: Dr. Ibrahim MUBARAK, Email: imubarak1976@gmail.com Mob:0932328681)

Received: 12/ 2/ 2026 **Accepted:** 16/ 5/ 2026

Abstract

Soil available phosphorus (av.P, ppm) is often determined using laborious and costly laboratory methods. Therefore, this study aimed to develop a pedotransfer function (PTF) to predict av.P in greenhouse soils in Tartous, based on easily measurable chemical properties: soil pH, organic matter (OM, %), electrical conductivity (EC, dS m^{-1}), and available potassium (av.K, ppm). The study relied on a database containing 1158 soil samples, randomly divided into 80% for model calibration and 20% for independent validation. Multiple linear regression analysis revealed the optimal mathematical model as:

av.P = 53.919 – 7.059 (pH) + 1.254 (OM) + 3.651 (EC) + 0.017 (av.K)

The model achieved high explanatory efficiency with a coefficient of determination (R^2=0.838, $p<0.001$), with a total absence of multicollinearity as the maximum variance inflation factor (VIF) reached only 1.54. Furthermore, both the t-test and the criteria of root mean square error (RMSE = 4.843) and mean absolute error (MAE = 3.817) in the validation data proved the model's accuracy and lack of bias. The model reflects the chemical rules governing soil phosphorus dynamics, with a negative correlation with pH and positive correlations with the other properties driven by the intensive fertilization legacy. The study recommends adopting the model as a low-cost digital tool to support rational fertilization decision-making in greenhouses.

Keywords: Pedotransfer function, Available phosphorus, Multicollinearity, Greenhouse, Tartous.