تأثير استخدام الزنك والحديد والمولبيدنيوم في أعداد بعض المجاميع الفيزيولوجية للكائنات الحية الدقيقة في التربة المزروعة بالحمص الشتوي (غاب5)

م. يامن الحسن[1] ا.د. عبد الله العيسى[2] د. محمود الحمدان [3]

الملخص:

نُفِّذ البحث تحت الظروف الحقلية في مركز البحوث العلمية الزراعية بمحافظة حمص – سورية، خلال الموسم الزراعي 2024، بهدف تقييم تأثير التسميد المعدني (الزنك والحديد والمولبيدنيوم) على بعض مجاميع المجتمع الميكروبي في التربة. تم تسميد التربة المزروعة بالحمص الشتوي بتراكيز محددة من الأسمدة المعدنية التقليدية وهي: كبريتات الزنك (5 كغ/هكتار)، وشيلات الحديد (5 كغ/هكتار)، ومولبيدات الأمونيوم (200 مل/هكتار). وأظهرت النتائج مايلي: استجابة المجاميع الفيزيولوجية للكائنات الحية الدقيقة في التربة لهذه الإضافات، فازدادت أعداد بكتيريا النشدرة والآزوتوباكتر والبكتيريا المستخدمة للنيتروجين المعدني والأكتينومايسيتات والفطريات والبكتيريا المذيبة للفوسفور بشكل ملحوظ عند استخدام التسميد المشترك بالزنك والحديد معاً Zn+Fe في حين أدى استخدام المولبيدنيوم– خاصةً عند تداخله مع الزنك– إلى انخفاض معنوي في أعداد بكتيريا النشدرة والبكتيريا المستخدمة للنيتروجين المعدني والآزوتوباكتر والبكتيريا المتبوغة التابعة للجنس *Bacillus*، بينما لم تتأثر أعداد الأكتينومايسيتات والفطريات والبكتيريا المذيبة للفوسفور سلباً بهذا المزيج.

الكلمات المفتاحية: الأسمدة المعدنية، شيلات الحديد، كبريتات الزنك، مولبيدات الأمونيوم، المجتمع الميكروبي.

1- طالب دراسات عليا (دكتوراه)، قسم التربة واستصلاح الأراضي، كلية الزراعة، جامعة حمص

2- أستاذ في قسم التربة واستصلاح الاراضي، كلية الزراعة، جامعة حمص، سوريا

3- باحث في الهيئة العامة للبحوث العلمية الزراعية، حمص، سوريا

Effect of the Application of Zinc, Iron, and Molybdenum on the counts of some physiological groups of microorganisms in soil cultivated with winter chickpea (Ghab 5)

Yamen Al-Hasan [1] Prof. Dr. Abdulla Alissa [2] Dr. Mahmoud Al-Hamdan[3]

Abstract:

The research was conducted under field conditions at the Agricultural Scientific Research Center in Homs Governorate, Syria, during the 2024 growing season, with the aim of evaluating the effect of mineral fertilization (zinc, iron, and molybdenum) on some groups of the soil microbial community. Soil cultivated with winter chickpea was fertilized with specific concentrations of conventional mineral fertilizers, namely: zinc sulfate (5 kg/ha), chelated iron (5 kg/ha), and ammonium molybdate (200 ml/ha). The results showed the following: The physiological groups of soil microorganisms responded to these additions, as the counts of ammonifying bacteria, *Azotobacter*, mineral-nitrogen-utilizing bacteria, actinomycetes, fungi, and phosphate-dissolving bacteria increased

significantly with the combined application of zinc and iron together (Zn+Fe). In contrast, the use of molybdenum—especially when combined with zinc—led to a significant decrease in the counts of ammonifying bacteria, mineral-nitrogen-utilizing bacteria, *Azotobacter*, and spore-forming bacteria of the genus *Bacillus*, while the counts of actinomycetes, fungi, and phosphate-dissolving bacteria were not negatively affected by this combination.

Keywords: Mineral fertilizers, Iron chelates, Zinc sulfate, Ammonium molybdate, Microbial community

(1) Graduate Student (PhD), Department of Soil and Land Reclamation, College of Agriculture, Homs University

(2) Professor, Department of Soil and Land Reclamation, College of Agriculture, Homs University, Syria

(3) Researcher at the General Authority for Scientific Agricultural Research, Homs, Syria

1- المقدمة:

يتوسع الإنتاج الزراعي عالمياً استجابة للطلب المتزايد على الغذاء والأعلاف والوقود الحيوي، حيث تُخصص (47.9 مليون/ كم^2) للزراعة [53 ,19]، ويمكن تحقيق إنتاجية نباتية أعلى من خلال الاستخدام الأمثل للأسمدة وتنفيذ ممارسات إنتاجية استراتيجية، ومع الاعتماد المتزايد على الأسمدة الكيميائية المحتوية على العناصر الكبرى(NPK)، يظهر قلق كبير بشأن آثارها البيئية السلبية، مثل انبعاثات غازات الاحتباس الحراري وتلوث النظم البيئية للتربة والمياه [14]، وتؤثر هذه الممارسات الزراعية بشكل عميق على المجتمعات الميكروبية في التربة، والتي تلعب بدورها أدواراً محورية في الحفاظ على وظائف التربة ودورة المغذيات [40, 52]، فبينما يمكن للتسميد أن يحفز نمو مجموعات ميكروبية محددة ويزيد الكتلة الحيوية

الإجمالية [16, 35]، فإنه قد يؤدي في الوقت نفسه إلى تقليل التنوع الميكروبي وإضعاف المجموعات المفيدة للنبات [20]، مما قد يهدد استقرار النظم الزراعية على المدى الطويل [12, 18]، وقد نُسبت الزيادة في الكتلة الحيوية الميكروبية في بعض الحالات إلى نمو أفضل للنبات، مما يؤدي إلى إفرازات جذرية أعلى [22]، ووُجد أن هذه الإفرازات كانت أكثر فعالية في تحديد تحول في المجتمع الفطري [7]، كما أشارت أبحاث أخرى إلى أن بكتيريا التربة كانت أكثر حساسية من الفطريات لممارسات التسميد [13, 43].

يؤكد [39] على أن الإلمام الدقيق باستجابة المجتمعات الميكروبية المعقدة للتسميد المعدني المتنوع يُعد ركيزة أساسية لتحقيق الاستدامة في النظم الزراعية، وقد أظهرت العديد من الدراسات أن تركيب المجتمع الميكروبي للتربة (من حيث التركيب، والتنوع، والوفرة النسبية لأنواع محددة) يتغير بعد التسميد الكيميائي أو العضوي [9, 25, 37]، حيث يؤثر الأخير على نمو الميكروبات وقدرتها التنافسية لأن المجموعات البكتيرية والفطرية الدقيقة يمكن أن تختلف في قدرتها على استخدام أشكال المغذيات المختلفة الموجودة في التربة [17, 20, 29] ، على سبيل المثال تسبب التسميد المعدني لبستان تفاح (*Malus domestica*) بعد إعادة الزراعة في زيادة أعداد الأكتينوميسيتات، والآزوتوباكتر، والبكتيريا المحللة للبروتين والبكتيريا المذيبة للفوسفور [49].

يأتي الاهتمام المتزايد بدور العناصر الغذائية الصغرى، مثل الزنك والحديد والمولبيدنيوم، ليس فقط لضرورتها المباشرة لنمو النبات، بل أيضاً لتأثيرها المباشر في تشكيل ووظائف المجموعات الميكروبية في التربة، فقد بيّنت دراسة [28] أن التسميد المشترك بالنيتروجين والزنك (N-Zn)أدى إلى جذب مجموعات بكتيرية في منطقة الجذور (الريزوسفير) ذات صلة وثيقة بدورتي النيتروجين والزنك في التربة، وشملت هذه المجموعات Proteobacteria و Acidobacteria و Gemmatimonadota، وقد نتج عن ذلك تكوين شبكات تفاعل بكتيرية أكثر تعقيداً وترابطاً، كما أفادت دراسة ميدانية استمرت تسع سنوات في نظام زراعي من القمح

والذرة أن التطبيق الأمثل للزنك قد حفّز أنشطة أنزيمات التربة وأدى إلى تحولات في الوفرة النسبية لعدة مجموعات بكتيرية مثل: Rhodospirillales و Gaieallales و Frankiales و Latescibacteria [26]، كما أظهر التسميد المشترك بالنيتروجين والزنك في محصول الأرز قدرة على تسهيل تحول النيتروجين وتحسين توافره، وذلك من خلال تعديل المجموعات الميكروبية وتغيير أنشطة أنزيمات التربة، مما أدى إلى تعزيز كفاءة امتصاص النيتروجين وزيادة الإنتاجية الحيوية [30]، أما بالنسبة للحديد، فأكدت دراسة [15]أن كلاً من الزنك (Zn^{2+}) والحديد (Fe^{2+}) عنصران حيويان لا غنى عنهما لضمان كفاءة الاستقلاب البكتيري، حيث يعمل الزنك كعامل مساعد أساسي للأنزيمات المنظمة للاستقلاب، بينما يدخل الحديد في تركيب العوامل المساعدة المحورية للأنزيمات المنتجة للطاقة مثل الهيم والعناقيد الكبريت–حديدية (Fe-S clusters)، وتقوم البكتيريا بالحفاظ على توازن هذين العنصرين داخل الخلية عبر أنظمة استشعار بروتينية متخصصة (مثل Zur للزنك وFur للحديد) تضبط عمليات الامتصاص والتخزين والطرد، مما يمنع السمية ويضمن أداءً استقلابياً مثالياً، كما بينت دراسة [41] أن مصادر هذه العناصر (شيلات مقابل أملاح) لها تأثيرات متفاوتة، حيث أظهرت شيلات الحديد والزنك (EDTA) أعلى تأثير تثبيطي على الأنزيمات (خاصة الفوسفاتيز القلوي) والمجتمعات الميكروبية (خاصة الأكتينومايستات)، بينما كانت الأملاح (كبريتات الحديد والزنك) أقل تثبيطاً، حيث حفزت بعض الأنزيمات (مثل اليورياز)، وكانت الكائنات الدقيقة الأكثر تأثراً سلباً هي Actinomycetes، تليها الفطريات، وزادت هذه التأثيرات السلبية غالباً بمرور الوقت وبزيادة التركيز، حيث يرتبط تفاعل هذه المصادر مع المادة العضوية في التربة بالآلية الرئيسية لتأثيرها على التوافر الحيوي والأنشطة البيولوجية.

يُعد المولبيدنيوم عنصراً أساسياً للنشاط الميكروبي في التربة، حيث يكمن دوره الحيوي في كونه جزءاً أساسياً من العامل المساعد (FeMo-cofactor) لـNitrogenase الضروري

لتثبيت النيتروجين الجوي، وكذلك في أنزيمات حيوية أخرى مثل نترات ريدوكتاز، ويؤدي الاعتماد المتبادل بين الموليبدينوم والحديد إلى تعقيد هذه العلاقة، حيث أن تركيب Moco نفسه يعتمد على أنزيمات تحتوي على معقدات حديد–كبريت(Fe-S clusters)، مما يعني أن نقص الحديد قد يعوق قدرة الميكروبات على استغلال المولبيدنيوم بشكل فعال، وبالتالي يحد من كفاءتها الوظيفية في التربة[33].

أظهرت دراسة [42] أن استمرار التسميد لنبات الفول العريض بعنصر المولبيدنيوم أحدث تحولات واضحة في بنية المجتمعات الميكروبية في منطقة الجذور، حيث زاد من تنوع الفطريات ووفرة أجناس مثل *Chaetomium* و *Leucosporidium* و *Thielavia*.

على الرغم من تعدد الدراسات، يبقى التأثير المشترك والتفاعلي للعناصر الثلاثة (الزنك– الحديد – المولبيدنيوم) على المجموعات الميكروبية في التربة، وخاصة تحت ظروف محصول الحمص الشتوي غير مُستكشف بشكل كافٍ، حيث لا تقدم الأبحاث السابقة صورة واضحة عن كيفية تفاعل هذه العناصر مع بعضها البعض في التربة وكيف تؤثر تركيباتها المختلفة على وفرة وتنوع المجموعات الميكروبية الرئيسية، ولذلك تأتي أهمية هذه الدراسة في تأثير التسميد المنفرد والمشترك بالزنك والحديد والمولبيدنيوم على أعداد بعض الكائنات الحية الدقيقة في التربة المزروعة بالحمص الشتوي، مما يساهم في وضع توصيات لإدارة مغذيات أكثر استدامة تدعم صحة التربة والإنتاجية الزراعية.

2– هدف البحث:

بيان مدى تأثير التسميد المنفرد والمشترك بالزنك والحديد والمولبيدنيوم في أعداد بعض الكائنات الحية الدقيقة في التربة المزروعة بالحمّص الشتوي، وذلك في ظروف محافظة حمص – سورية.

3- مواد وطرائق البحث: نُفِّذ البحث في مركز البحوث العلمية الزراعية الواقع على بعد 5 كم شمال مدينة حمص (إحداثيات: 34.42° شمالاً، 36.43° شرقاً، وارتفاع 482 م فوق مستوى سطح البحر). يقع المركز ضمن المنطقة الأولى للاستقرار المطري، بمتوسط هطول سنوي يبلغ 439 ملم وذلك حسب بيانات محطة الأرصاد الجوية في حمص لعام (2023-2024)، تميزت تربة موقع التجربة بأنها تربة حمراء طينية متعادلة التفاعل، غير مالحة، محتواها كاف من المادة العضوية، ومتوسطة المحتوى من الكربونات الكلية، وفقيرة في عناصر الزنك والحديد والمولبيدنيوم (جدول 1).

الجدول(1): بعض الخصائص الكيميائية لتربة الموقع المدروس على عمق (0-30 سم)

التحليل الميكانيكي			pH	الناقلية الكهربائية	المادة العضوية	كربونات الكالسيوم	الحديد	الزنك	المولبيدنيوم
رمل%	سلت%	طين%	1:2.5	dS/m	%	%	مغ/كغ	مغ/كغ	مغ/كغ
32	21	47	7.20	0.38	1.55	12	3.6	1.1	0.07

تمت زراعة صنف الحمص المحلي "غاب 5" (*Cicer arietinum* L.) في 7 من شهر كانون الثاني 2024. أُعدت الأرض للزراعة بحراثتين متعامدتين باستخدام محراث قلاب (مطرحي) بعمق 30 سم. ثم نُعمت التربة بعد إضافة الدفعة الأساسية من الأسمدة الكيميائية وفقاً لتوصيات الهيئة العامة للبحوث العلمية الزراعية، وهي: السماد الآزوتي يوريا (46%) البالغة 20 كغ/هـ والسماد الفوسفوري P_2O_5 (46%) 60 كغ /هـ والسماد البوتاسي K_2O(50%) 40 كغ/هـ، بعد ذلك سُويت التربة ميكانيكياً وتم فتح خطوط الزراعة، حيث قُسمت أرض التجربة إلى قطع (وحدات) تجريبية بمساحة 24 متراً مربعاً (4 × 6 أمتار)، ضمت كل منها خمسة خطوط زراعة بطول 6 أمتار. كانت المسافة بين الخطوط 50 سم، وبين النباتات

داخل الخط 10 سم. تركت ممرات خدمة بعرض 2 متر بين القطع والمعاملات المختلفة. بلغ معدل البذار 90 كغ/هـ، حيث وُضعت البذور يدوياً في حفر على عمق 5–10 سم، بواقع 1–2 بذرة لكل حفرة. بعد أسبوعين من الزراعة، تم تفريد النباتات للحفاظ على نبات واحد في كل جورة، أُجري الري مباشرة بعد الزراعة باستخدام نظام الري السطحي (الشرائح). كانت مياه الري غير مالحة وذات درجة حموضة متعادلة إلى حمضية خفيفة، تتراوح بين 6.78 و7.2. ونظراً لأن محصول الحمص (*Cicer arietinum* L.) المُستَخدم في هذه الدراسة هو محصول شتوي بعلي، فإنه يعتمد اعتماداً رئيساً على مياه الأمطار الموسمية، ولذلك لم يتم اتباع جدول ري محدد مسبقاً، وتم الاعتماد على الزراعة البعلية. وأذيبت العناصر السمادية (الزنك– الحديد– المولبيدنيوم) بكمية مناسبة من الماء ثمّ تم توزيعها بشكل متجانس على كافة القطع التجريبية.

. نُفذت جميع عمليات الخدمة الزراعية (كالتفريد والتعشيب والري والتسميد ومكافحة الآفات) في مواعيدها المناسبة وفقاً للحاجة. تم حصاد المحصول بعد اكتمال النضج في 16 من شهر أيار لعام 2024م.

استُخدمت الأسمدة المعدنية التالية: كبريتات زنك (22%) من شركة الرافدين، وشيلات الحديد (13%) من شركة Max Grow ، ومولبيدات الأمونيوم (54%) من شركة .Srichem

. طُبقت المعاملات السمادية بمعدلات: 5 كغ/هـ لكبريتات الزنك، 5 كغ/هـ لشيلات الحديد، و200 مل/هـ لمولبيدات الأمونيوم.

أُضيفت المعاملات على مرحلتين: الأولى بعد شهر من الزراعة، والثانية قبيل مرحلة الإزهار.

حُضِرَت المحاليل بإذابة العناصر (الزنك والحديد والموليبدينوم) في كمية مناسبة من الماء، ووزِّعت بشكل متجانس على جميع الوحدات التجريبية، ثم أُتبعت بعملية ري سطحي اعتيادية، ويوضح الجدول (2) تفاصيل معاملات البحث.

جدول (2): معاملات البحث المدروسة

المعاملة السمادية	كمية الإضافة الأرضية	رمز المعاملة
شاهد بدون إضافة	–	C
سماد الزنك	Zn (5 Kg/h)	Zn(M)
سماد الحديد	Fe(5 Kg/h)	Fe(M)
سماد المولبيدنيوم	Mo(200 ml/h)	Mo(M)
سماد الزنك مع سماد المولبيدنيوم	Zn (2.5 Kg/h)+ Mo(100 ml/h)	Zn+Mo (M)
سماد الحديد مع سماد المولبيدنيوم	Fe(2.5 Kg/h) + Mo(100 ml/h)	Fe+Mo(M)
سماد الزنك مع سماد الحديد	Zn (2.5 Kg/h)+ Fe(2.5 Kg/h)	Zn+Fe (M)
سماد الزنك والحديد والمولبيدنيوم معاً	Zn (1.66 Kg/h)+ Fe(1.66 Kg/h)+ Mo(66.6 ml/h)	Zn+Mo+Fe(M)

تم تصميم التجربة حسب القطاعات العشوائية الكاملة، وبثلاث مكررات للمعاملة الواحدة، مساحة القطعة التجريبية 6 م2، وتم تحليل نتائج البحث باستعمال برنامج SPSS v20 وذلك لحساب أقل فرق معنوي بين المتوسطات L.S.D عند مستوى 5%.

3-1- التحاليل المنفذة على التربة:

أجري التحليل الميكانيكي للتربة بطريقة الهيدروميتر حسب [1]، وحدد القوام بالاعتماد على المثلث الأمريكي للقوام .بالاعتماد على الخطوات الموضحة في دليل [6]. أُجريت التحاليل الكيميائية طبقاً للطرق القياسية [2]، فُقدِرَ الرقم الهيدروجيني pH التربة باستخدام جهاز pH meter في معلق تربة: ماء بنسبة 1:2.5 [31]، وقُدِّرت الناقلية الكهربائية EC باستخدام جهاز قياس الناقلية الكهربائية conductivity-meter في مستخلص مائي للتربة 5:1 [11]، وقُدّرت الكربونات الكلية بالمعايرة الحجمية (طريقة القياس بالمعايرة) [44]، كما قُدّرت المادة العضوية بطريقة الأكسدة الرطبة باستخدام ثنائي كرومات البوتاسيوم في وسط حمضي [51]، وتم تحديد محتوى التربة من العناصر الصغرى (الزنك والحديد والموليبدينوم) بطريقة مطيافية الامتصاص الذري (Atomic Absorption Spectrometry) بعد هضم العينات وفق الإجراء القياسي [38].

تم دراسة المجموعات الفيزيولوجية التالية للأحياء الدقيقة بطريقة الأطباق المصبوبة كما جاء في [4] وهي: البكتيريا المحللة للنتروجين العضوي (النشدرة) Ammonification bacteria : تم حساب أعدادها على بيئة الأغار المغذي ، والبكتيريا المستخدمة للنيتروجين المعدني Bacteria Assimilation Mineral Nitrogen: قُدرت على بيئة نشوية نشادرية، و *Azotobacter*: دُرست على بيئة Ashby's Mannitol Agar ، والأكتينومايسيتات Actinomycetes: قُدرت على البيئة المغذية Nystatin Agar ، والفطريات Fungi: تم حساب أعدادها على بيئة المالت المغذي، والبكتريا المتبوغة التابعة لجنس *Bacillus* : دُرست على بيئة الآجار المغذي Nutrient agar ، والبكتيريا المذيبة للفوسفور: دُرست على بيئة Pikovskaya's Agar.

4- النتائج والمناقشة:

4-1- البكتيريا المحللة للنيتروجين العضوي (بكتريا النشدرة) و البكتريا المستخدمة للنيتروجين المعدني:

عند دراسة تأثير التسميد بالحديد والزنك والمولبيدنيوم على أعداد بكتيريا النشدرة والبكتيريا المستخدمة للنيتروجين المعدني (جدول– 3)، سجلت المعاملة المشتركة Zn+Fe(M) أعلى زيادة معنوية في الأعداد بين المعاملات المدروسة، إذ بلغت أعداد بكتيريا النشدرة 5.63 مليون خلية/غ تربة وبنسبة زيادة 10.1% عن الشاهد، بينما كانت أعداد البكتيريا المستخدمة للنيتروجين المعدني 4.14 مليون خلية/غ تربة، وبزيادة معنوية قيمتها36.6% مقارنة بالشاهد، ويمكن أن يُفسّر ذلك نتيجة التكامل الوظيفي بين آلية عمل كل عنصر حيث عملت شيلات الحديد على ضمان توافر سريع ومستقر للحديد في منطقة الجذور [27]، بينما استفادت هذه المجموعة البكتيرية من الذوبانية العالية لكبريتات الزنك $ZnSO_4$ – إحدى صور الزنك سريعة الذوبان في الماء– في الحصول على أيونات الزنك بشكل سريع وجاهز للاستخدام الحيوي [34]، ومن جهة أخرى من الممكن أن هذه الزيادة في أعداد بكتيريا النشدرة والمستخدمة للنيتروجين المعدني قد حفزت نمواً أفضل للنبات، مما يؤدي إلى إفرازات جذرية أعلى والتي شكلت بدورها مصدر طاقة مثالياً وداعماً لنمو وتكاثر هذه المجموعات البكتيرية في المنطقة الجذرية [22, 46]، وأظهرت النتائج تأثيراً سلبياً ملحوظاً للمعاملات المعدنية على أعداد هاتين المجموعتين البكتيريتين، بالنسبة لبكتيريا النشدرة، أدت جميع المعاملات المتبقية – ولا سيما المشتركة منها مثل Zn+Mo(M) و Fe+Mo(M) إلى انخفاض كبير في أعدادها بلغ حتى 39.9% مقارنة بالشاهد، وأما البكتيريا المستخدمة للنيتروجين المعدني فقد سجلت انخفاضاً معنوياً تحت تأثير المعاملات المنفردة، حيث بلغت نسبة الانخفاض 13% مع معاملة الحديد Fe(M) (2.68 مليون خلية/غ)، و 10.1% مع معاملة الزنك Zn(M) (2.75 مليون خلية/غ)، ووصل الانخفاض إلى 20.2% مع معاملة المولبيدنيوم Mo(M) المنفرد(2.52 مليون خلية/غ). وكذلك سجلت معاملتا Fe+Mo(M) و Zn+Fe+Mo(M) انخفاضاً تراوح بين (25.7–2)% عن الشاهد على التتالي، ويعكس هذا الانخفاض العام في أعداد هاتين

المجموعتين البكتيريتين احتمال حدوث تأثيرات تنافسية أو سمية تراكمية تُغيّر من تركيب المجتمع الميكروبي، وهو ما يتفق مع استنتاجات [21] بأن الإضافة المعدنية قد تُقلل من التنوع الميكروبي في التربة.

4-2- *Azotobacter*:

يتبين من نتائج (الجدول-3) عن استجابة معنوية للآزوتوباكتر للتسميد بالعناصر المعدنية للزنك والحديد والمولبيدنيوم، تجلى ذلك في المعاملة المشتركة لعنصري الزنك والحديد Zn+Fe(M) ، مسجلة أعداداً بلغت 1.34 مليون خلية/غ، وذلك بزيادة معنوية قدرها 30% عن الشاهد، وبذلك تستمر سلسلة الأداء التحفيزي الذي لاحظناه سابقاً مع مجموعتي النشدرة والبكتيريا المستخدمة للنيتروجين المعدني، ويمكن تفسير هذه الكفاءة بأن الشكل التقليدي عند صياغته بشكل أمثل (مثل استخدام شيلات الحديد عالية الكفاءة مع كبريتات الزنك سريعة الذوبان) يمكن أن يكون أكثر فعالية في توصيل العناصر بالصيغة الجاهزة للامتصاص والاستخدام الحيوي الفوري [34 ,27]، وفي هذه المعاملة، يكمل العنصران دوريهما؛ حيث يدعم الحديد (Fe^{+3}) سلاسل نقل الالكترون المنتجة للطاقة اللازمة لعمل النيتروجيناز [8]، بينما ينشط الزنك (Zn^{+2}) التمثيل الغذائي العام للبكتيريا، مما يخلق بيئة مثالية لنموها [3]، كما سجلت المعاملة المنفردة Fe(M) أعداداً بلغت 1.47 مليون خلية/غ بزيادة معنوية بلغت 42.7% مقارنة بالشاهد، بينما كانت زيادة معاملة Zn(M) متوسطة حوالي18% لكنها كانت معنوية مقارنةً بالشاهد، وعلى الجانب الآخر أكدت النتائج مرة أخرى على الطبيعة المثبطة للمولبيدنيوم عند استخدامه في المعاملات المشتركة المعدنية، فانخفضت أعداد الآزوتوباكتر انخفاضاً معنوياً تحت معاملة Zn+Mo(M) بنسبة -17% عن الشاهد، بينما انخفضت بشكل غير معنوي Fe +Mo (M) بنسبة -8.4% مقارنة بالشاهد، في حين كانت قيم Mo(M) قريبة من الشاهد (1.06 مليون / غ تربة جافة) بانحراف طفيف 2% غير معنوي، وأيضاً انخفضت

بشكل غير معنوي عند المعاملة المشتركة Zn+Fe+Mo(M)، و الجدير بالذكر أنه على الرغم من آليات الدفاع المتطورة الموجودة عند الآزوتوباكتر والمتمثلة بوجود الحويصلات Cystes والغلاف السكري sugar coat [3]، فإن سرعة وحدة تحرر الأيونات من الأشكال المعدنية التقليدية قد تسبب صدمة سمية فورية مثل معاملة Zn+Fe+Mo(M)، إذ أنها لا تمنح البكتيريا الوقت الكافي لتفعيل دفاعاتها آنفة الذكر.

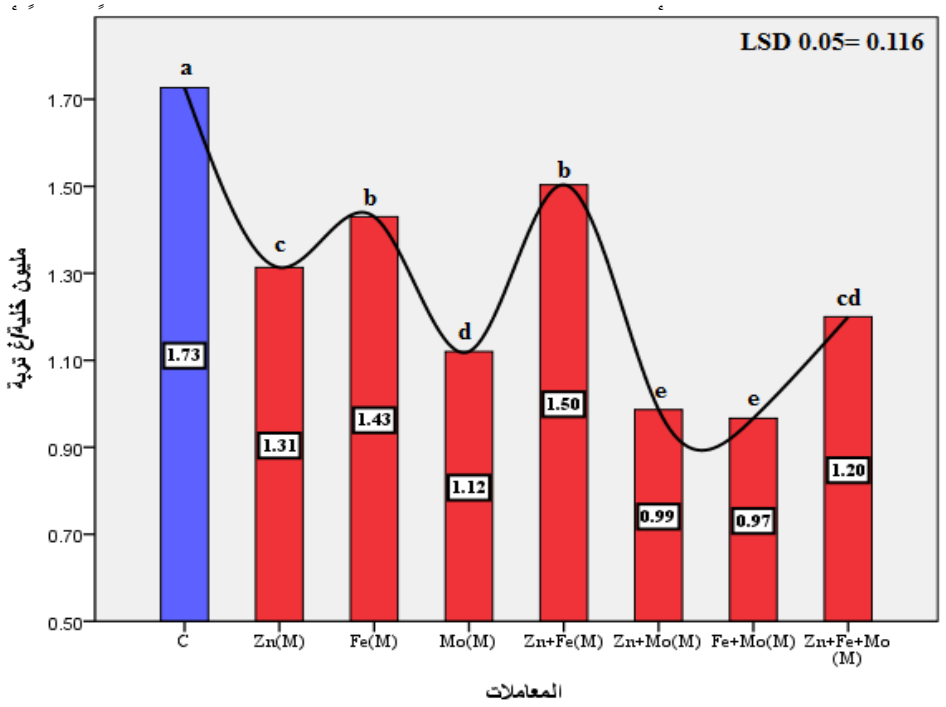
الجدول (3): تأثير التسميد بالزنك والحديد والمولبيدنيوم على : بكتيريا النشدرة– البكتيريا المستخدمة للنيتروجين المعدني– *Azotobacter*

المجاميع الميكروبية / المعاملات	بكتيريا النشدرة	البكتيريا المستخدمة للنيتروجين المعدني	***Azotobacter***
	مليون/1غ تربة جافة		
c	5.11^{b}	3.03^{b}	1.03^{d}
Zn(M)	4.22^{cd}	2.75^{c}	1.22^{c}
Fe(M)	4.43^{c}	2.68^{cd}	1.47^{a}
Mo(M)	4.12^{cd}	2.52^{de}	1.06^{d}
Zn+Fe(M)	5.63^{a}	4.14^{a}	1.34^{b}
Zn+Mo(M)	3.88^{d}	2.57^{de}	0.88^{e}
Fe+Mo(M)	3.92^{d}	2.41^{e}	0.95^{de}
Zn+Fe+Mo(M)	4.15^{cd}	2.97^{b}	0.98^{de}
LSD 0.05	0.469	0.172	0.118

4-3- البكتريا المتبوغة التابعة للجنس *Bacillus*:

يتبين من التحليل الإحصائي عن حساسية ملحوظة للبكتيريا المتبوغة تجاه الأشكال المعدنية لأسمدة الحديد والزنك والمولبيدنيوم مع تفاوت كبير في استجابتها (شكل- 1)، حيث انخفضت أعداد هذه المجموعة البكتيرية عند جميع المعاملات بنسب متفاوتة، إذ سجلت معاملة الحديد المعدني Fe(M) أعداداً بلغت 1.43 مليون خلية/غ، وبانخفاض معنوي 17.3% مقارنة بالشاهد، أما معاملة الزنك المعدني Zn(M) فسجلت انخفاضاً أكبر بلغ 1.31 مليون خلية/غ، وبنسبة انخفاض معنوي 24.3% عن الشاهد، بينما كانت معاملة المولبيدنيوم المعدني Mo(M) الأكثر تثبيطاً بين المعاملات المنفردة، حيث انخفضت معنوياً الأعداد إلى 1.12 مليون خلية/غ، وبنسبة انخفاض 35.3% مقارنة بالشاهد، ويمكن تفسير هذه النتائج من خلال آليات سمية مختلفة لكل مادة أولاً: قد تشارك أيونات الحديد داخل الخلية في تفاعلات شبيهة بفنتون- هي تفاعلات كيميائية تحدث في التربة والمياه والأنظمة البيئية- مع بيروكسيد الهيدروجين الداخلي، مما يولد جذور الهيدروكسيل (OH•) المدمرة للمكونات الخلوية مثل الحمض النووي والبروتينات[23]، ثانياً: سببت كبريتات الزنك المعدني انخفاضاً أكبر، قد يكون بسبب الذوبان السريع للزنك وإطلاق أيونات الزنك Zn^{2+} الحرة، والتي تعطل الوظائف الخلوية بشكل مباشر [21]، وعلاوة على ذلك، يبدو أن النمط التثبيطي الذي لوحظ للمولبيدنيوم في هذه الدراسة يُعزى إلى إضعافه غير المباشر للخلية، حيث قد يؤدي تعطيله لتخليق الجلوتاثيون - عبر حرمانها من الكبريت - إلى تقليص قدرتها على مقاومة الإجهاد التأكسدي، مما يقدم تفسيراً محتملاً لفعالية تثبيطه القوية [32, 47]، أما بالنسبة للمعاملات المشتركة، سجلت المعاملة الثنائية Zn+Fe(M) أداءً أقل تثبيطاً من بقية المعاملات المعدنية، إذ بلغت أعدادها 1.50 مليون خلية/غ، وبانخفاض معنوي نسبته 13.3% عن الشاهد، مما قد يشير إلى وجود توازن

معين في التحرر الأيوني قلل من الأثر السلبي، في حين أسفرت المعاملتان الثنائيتان Fe+Mo(M) , Zn+Mo(M) عن أدنى القيم على الإطلاق بين المعاملات المدروسة مسجلة انخفاضاً معنوياً بنسبة 42 و 43 % عن الشاهد، ويمكن تفسير هذه النتيجة من خلال تأثير تثبيطي تآزري يجمع بين الآليات المذكورة سابقا، حيث يجتمع التأثير المؤكسد للحديد [23] مع تأثير المولبيدنيوم الذي قد يعطل امتصاص الكبريت [47] في الحالة الأولى، بينما يتضاعف التأثير السام المباشر لأيونات الزنك [21] مع إضعاف المولبيدنيوم لدفاعات الخلية في الحالة



الشكل (1): تأثير التسميد بالحديد والزنك والمولبيدنيوم على البكتريا المتبوغة التابعة للجنس *Bacillus*

* حيث a الأكثر معنوية و e الأقل معنوية حسب قيم LSD

4-4- الأكتينومايستات:

أسفرت النتائج التي تم الحصول عليها (الجدول- 4) عن استجابة واضحة وذات دلالة معنوية لمجموعة الأكتينومايستات لمعاملات التسميد بالزنك والحديد والمولبيدنيوم، فقد تفوقت المعاملة الثنائية Zn+Fe(M) معنوياً على كافة المعاملات الأخرى، وهذا اتجاه مشابه لما دُرسَ سابقاً في بكتريا النشدرة والمستخدمة للنيتروجين المعدني والآزوتوباكتر، محققةً ذروة الأداء بأعداد بلغت 1.57 مليون خلية/غ، وبزيادة معنوية نسبتها 37.7% مقارنة بالشاهد، ويمكن تفسير هذا الأداء من خلال قدرة شيلات الحديد على توفير مصدر سريع الاستجابة للحديد في منطقة الجذور [27]، حيث يشكل الحديد عاملاً مساعداً أساسياً للعديد من الأنزيمات المسؤولة عن العمليات الاستقلابية، مما يدعم كفاءة التحلل الميكروبي للمواد العضوية التي تلعب الأكتينومايسيتات دوراً رئيساً في تمعدنها [5]، وفي المقابل قامت كبريتات الزنك بدور المحفز الفوري، حيث وفرت – بفضل سرعة ذوبانها – تركيزاً عالياً وفورياً من أيونات الزنك اللازمة لتنشيط أنزيمات استقلاب الطاقة شديدة الاعتماد على هذا العنصر (مثل أنزيمات تحلل السكر وتخليق ATP)، مما وفر الوقود الاستقلابي (ATP) اللازم للأنشطة البكتيرية ولبناء الكتلة الحيوية [10, 15]، وهكذا مثل التكامل بين مصدر الحديد سريع التوافر ومصدر الزنك عالي الذوبان نظاماً متكاملاً: حيث ساهم الحديد بدعم آليات التحلل، بينما كان للزنك دور في دفع

عمليات البناء والطاقة، وفيما يتعلق بباقي المعاملات المعدنية، فقد أظهرت النتائج تبايناً في الاستجابة، إذ حققت المعاملة المنفردة للزنك المعدني Zn(M) قيماً بلغت 1.28 مليون خلية/غ، مسجلةً زيادةً معنويةً بلغت نسبتها تقريباً 12 % مقارنة بالشاهد، بينما سجلت المعاملة المنفردة للمولبيدنيوم المعدني Mo(M) أداءً متواضعاً وقريباً من معاملة الشاهد، حيث بلغت الأعداد 1.20 مليون خلية/غ بنسبة تغير غير معنوية بلغت +5.2%، ولم يلحظ فروق معنوية بين المعاملة Zn+Mo(M) والشاهد، كما سجلت المعاملة الثنائية Fe+Mo(M) أداءً جيداً، حيث بلغت الأعداد 1.82 مليون خلية/غ) بزيادة معنوية نسبتها 18.2% عن الشاهد، وعلى النقيض من ذلك أدت المعاملة الثلاثية المعدنية Zn+Fe+Mo(M) إلى انخفاض في أعداد الأكتينومايستات، مسجلةً أدنى القيم على الإطلاق بين المعاملات المدروسة 1.09 مليون خلية/غ، وذلك بنقصان غير معنوي بلغ نسبته −4.6% عن الشاهد.

4−5− الفطريات:

بيّن التحليل الإحصائي عن تباين واضح بدلالة إحصائية ($P \leq 0.05$) (جدول− 4) في استجابة الفطريات لمعاملات التسميد بالحديد والزنك والمولبيدنيوم المعدنية، فقد تفوّقت هذه المعاملة Zn+Fe(M) أيضاً على جميع المعاملات الأخرى في تحفيز الفطريات، إذ سجلت أعداداً بقيم (22.74 ألف خلية/غ) بزيادة معنوية 69.7% مقارنة بالشاهد، ويمكن إرجاع هذا الأداء إلى تكامل وظيفي بين العنصرين، حيث وفر الحديد في صورة شيلات مصدراً سريع الامتصاص عمل على دعم السلسلة التنفسية وتحييد الإجهاد التأكسدي عبر تنشيط أنزيمات الميتوكوندريا المحتوية على الحديد، في حين يعمل سيتوكروم c أوكسيداز على إنتاج الـATP ، تعمل الكاتالاز و Superoxide dismutase معاً على حماية الخلية من الضرر التأكسدي [36, 50]، وهذا الدعم المزدوج−للطاقة والحماية− مكَّن الفطريات من تسريع النمو

الهيفي– وهو النمو الذي يشكل شبكة الخيوط الدقيقة (الميسيليوم) التي تمتص الغذاء وتستعمر التربة– وتخليق الجدار الخلوي بكفاءة أعلى، بالتوازي مع ذلك قام الزنك بتآزر حيوي على مستويات متعددة: فعلى المستوى الاستقلابي، عمل كعامل مساعد أساسي للأنزيمات المحللة للمركبات العضوية المعقدة مثل Peptidases, Oxidoreductases [48]، وعلى المستوى البنيوي ساهم في استقرار الأغشية والجدر الخلوية من خلال دعمه للبروتينات البنيوية والأنزيمات التركيبية [48 ,45]، وهذا التكامل وفر للفطريات طاقة سريعة عن طريق الحديد، بينما قدم الزنك دعماً استقلابياً وبنيوياً فورياً خلق بيئة فيزيولوجية مثالية لازدهار الفطريات.

سجلت المعاملة المنفردة للحديد المعدني Fe(M) أداءً محفزاً، حيث بلغت الأعداد 16.71 ألف خلية/غ بزيادة معنوية نسبتها 24.7% عن الشاهد، فيما سجلت المعاملة المنفردة للمولبيدنيوم المعدني Mo(M) أداءً مشابهاً بأعداد 16.81ألف خلية/غ بزيادة معنوية قدرت بـ 25.4% عن الشاهد، وهذا يتفق مع نتيجة [42] الذي وجد أن اضافة المولبيدنيوم للتربة أدى لزيادة الفطريات، أما المعاملة الثنائية Fe+Mo(M) فقد سجلت أعداداً 16.15ألف خلية/غ بزيادة معنوية 20.5% عن الشاهد، ويعزى هذا الأداء المحفز بشكل عام إلى توافر هذه العناصر بالشكل الأيوني القابل للامتصاص مباشرة، وإن كان تحررها السريع قد يحد من استفادة الفطريات منها. على الجانب الآخر، أظهرت معاملات الزنك المعدني أداءً غير معنوي مقارنة بالشاهد، إذ سجلت المعاملة المنفردة Zn(M) أعداداً 14.15 ألف خلية/غ بزيادة طفيفة وغير معنوية نسبتها 5.6% مقارنة بالشاهد، ولم يلاحظ فروق معنوية عند المعاملة الثنائية M)Zn+Mo) والمعاملة الثلاثية المعدنية Zn+Fe+Mo(M) والشاهد.

4-6- البكتيريا المذيبة للفوسفور Phosphate Solubilizing Bacteria (PSB):

يلاحظ من نتائج (جدول-4)، تفوقاً ملحوظاً للمعاملة الثنائية Zn+Fe(M)، وهذه الديناميكية التحفيزية شابهت جميع المجاميع الفيزيولوجية الميكروبية السابقة، حيث سجلت أعلى قيمة بين المعاملات المعدنية بلغت 3.36 مليون خلية/غ، وذلك بزيادة معنوية قدرها 53.4 % مقارنة بالشاهد، ويفسر هذا الأداء بالتآزر الوظيفي بين مصدري العناصر، حيث وفرت شيلات الحديد تحفيزاً فورياً لسلسلة نقل الإلكترون أثناء التنفس الخلوي، بينما أسهمت كبريتات الزنك $ZnSO_4$- بفضل قابلية ذوبانها العالية - في توفير تركيز سريع وفعال من أيونات الزنك المنشطة لأنزيمات الطاقة (مثل الكحول ديهدروجيناز)، مما حفز نشاط هذه المجموعة البكتيرية بشكل ملحوظ [10, 15]، وأيضاً لوحظ زيادة معنوية في أعداد هذه المجموعة الميكروبية عند إضافة كبريتات الزنك المعدني بمفرده إذ بلغت 3.34 مليون خلية/غ، وبقيمة 52% مقارنة بالشاهد. في المقابل، أظهرت المعاملة المنفردة للحديد المعدني Fe(M) أداءً غير معنوي (2.21 مليون خلية/غ) مقارنة بالشاهد، فيما سجل المولبيدنيوم المعدني المنفرد Mo(M)، زيادة طفيفة غير معنوية نسبتها 9.1%، مما يعكس محدودية تأثير الصيغ المعدنية المنفردة، أما بالنسبة للمعاملات المعدنية المشتركة الأخرى كان تأثيرها متبايناً، فلقد سجلت المعاملة الثنائية Zn+Mo(M) أعداداً قريبة من الشاهد بلغت 2.32 مليون خلية/غ، وذلك بنسبة زيادة ضئيلة وغير معنوية عن الشاهد لم تتجاوز 4%، في المقابل أظهرت المعاملة الثنائية Fe+Mo(M) أداءً أفضل نسبياً، حيث سجلت أعداداً بلغت 2.96 مليون خلية/غ، محققةً زيادة معنوية عن الشاهد بنسبة 35.2%، ويمكن تفسير هذا التحسن في ضوء التكامل الوظيفي بين الآليتين الفيزيولوجيتين للعنصرين؛ فبينما يدعم الحديد عمليات إنتاج الطاقة عبر السلسلة التنفسية، يعزز المولبيدنيوم العمليات البنائية المرتبطة بتثبيت النيتروجين، مما يحفز النشاط الاستقلابي لهذه المجموعة البكتيرية [15, 24]، و قد أسفرت المعاملة الثلاثية المعدنية Zn+Fe+Mo(M) عن انخفاض طفيف غير معنوي في الأعداد بلغ (2.05 مليون خلية/غ)، وذلك بنقصان نسبته -

6.3% عن الشاهد، مما يؤكد مرة أخرى التأثير التثبيطي للتحرر السريع والمتراكم للأيونات في غياب آليات التحرر المنظم.

الجدول (4): تأثير التسميد بالزنك والحديد والموليبدنيوم على (الأكتينومايستات– الفطريات– البكتيريا المذيبة للفوسفور)

المجاميع الميكروبية / المعاملات	الأكتينومايستات	الفطريات	البكتيريا المذيبة للفوسفور
	مليون /1 غ تربة جافة	ألف / 1غ تربة جافة	مليون /1 غ تربة جافة
c	1.14^{ef}	13.40^{c}	2.19^{cd}
Zn(M)	1.28^{d}	14.15^{bc}	3.34^{a}
Fe(M)	1.49^{b}	16.71^{b}	2.21^{cd}
Mo(M)	1.20^{e}	16.81^{b}	2.39^{c}
Zn+Fe(M)	1.57^{a}	22.74^{a}	3.36^{a}
Zn+Mo(M)	1.13^{f}	13.74^{c}	2.32^{c}
Fe+Mo(M)	1.42^{c}	16.15^{bc}	2.96^{b}
Zn+Fe+Mo(M)	1.09^{f}	13.70^{c}	2.05^{d}
LSD 0.05	0.062	2.962	0.263

* حيث a الأكثر معنوية و f الأقل معنوية حسب قيم LSD

5- الاستنتاجات:

1. أظهرت النتائج اختلافاً واضحاً في استجابة كل مجموعة ميكروبية للإضافات المعدنية، حيث تفوقت بعض المعاملات المشتركة (خاصة الزنك مع الحديد) في تحفيز مجموعات معينة، بينما كان للمولبيدنيوم تأثير مثبط عند تداخله مع الزنك.
2. أدت المعاملة المشتركة بالزنك والحديد Zn+Fe(M) لزيادة أعداد غالبية المجاميع الفيزيولوجية للكائنات الحية الدقيقة المدروسة (بكتيريا النشدرة، والبكتيريا المستخدمة للنيتروجين المعدني، والآزوتوباكتر، والأكتينومايسيتات، والفطريات، والبكتيريا المذيبة للفوسفور) بالنسب التالية (10.1، 36.6، 30، 37.7، 69.7 ،53.4)% على الترتيب، وذلك مقارنة بمعاملة الشاهد.
3. سجّل الحديد المعدني أعلى تأثير تحفيزي على الآزوتوباكتر، وكان هذا التأثير واضحاً في صورتين: عند استخدام الحديد منفرداً، وعند تداخله مع الزنك.
4. أظهر المولبيدنيوم تأثيراً مثبطاً عند تداخله مع كل من الزنك والحديد كلٌ على حدة؛ فبينما أدت المعاملة المشتركة للزنك والمولبيدنيوم (Zn+Mo) إلى انخفاض معنوي في أعداد بكتيريا النشدرة والبكتيريا المستخدمة للنيتروجين المعدني والبكتيريا المتبوغة التابعة لجنس *Bacillus*، لوحظ تأثير تثبيطي مماثل عند دمج المولبيدنيوم مع الحديد (Fe+Mo) على نفس المجموعات الميكروبية سابقة الذكر.
5. كانت بكتيريا *Bacillus* الأكثر حساسية ما بين المجاميع الفيزيولوجية للكائنات الحية الدقيقة المدروسة، إذ انخفضت أعدادها تحت جميع المعاملات، خاصة عند إضافة المولبيدنيوم منفرداً أو مع الحديد أو الزنك، مما يدل على ضعف قدرتها على تحمل الإجهاد الناتج عن الإضافات المعدنية السريعة الذوبان.

6- المقترحات:

– التركيز على التسميد المشترك بالزنك والحديد لتعزيز التنوع والوفرة الميكروبية في التربة، خاصة في الأراضي الفقيرة بهذين العنصرين.

– إجراء دراسات طويلة الأمد لرصد التأثير التراكمي لهذه العناصر المعدنية على بنية المجتمع الميكروبي ووظائف التربة.

8-المراجع العلمية:

1- الجردي، أحمد. (1992). فيزياء الأراضي – الجزء العملي. قسم التربة واستصلاح الأراضي، كلية الزراعة، جامعة حلب.

2- عودة، محمود؛ وسمير شمشم. (2008). **خصوبة التربة وتغذية النبات**. منشورات جامعة حمص - كلية الهندسة الزراعية.

3- العيسى، عبد الله (2005). **علم الأحياء الدقيقة**. منشورات جامعة حمص- كلية الهندسة الزراعية.

4- العيسى، عبد الله - وعلوش، ميساء(2006). **أساسيات علم الأحياء الدقيقة**،(الجزء العملي)،جامعة البعث، مديرية الكتب والمطبوعات.

5- العيسى، عبد الله (2007). ميكروبيولوجيا التربة. منشورات جامعة البعث- كلية الهندسة الزراعية.

6- راين، جون.اسطفان، جورج . والرشيد، عبد . (2003) .**دليل مخبري لتحليل التربة والنبات**، المركز الدولي للبحوث الزراعية في المناطق الجافة ، الإصدار الأول بالغة –123.العربية، حلب ، سورية، ص134 .

7. Ai, C., Zhang, S., Zhang, X., Guo, D., Zhou, W., & Huang, S. (2018). Distinct responses of soil bacterial and fungal communities to changes in fertilization regime and crop rotation.

Geoderma, 319, 156–166. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.01.011

8. Andrews, S. C., Robinson, A. K., & Rodríguez-Quiñones, F. (2003). Bacterial iron homeostasis. *FEMS Microbiology Reviews, 27*(2-3), 215–237. https://doi.org/10.1016/S0168-6445(03)00055-X
9. Ashworth, A. J., DeBruyn, J. M., Allen, F. L., Radosevich, M., & Owens, P. R. (2017). Microbial community structure is affected by cropping sequences and poultry litter under long-term no-tillage. *Soil Biology and Biochemistry, 114*, 210–219. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.07.019
10. Barak, P., & Helmke, P. A. (1993). The chemistry of zinc. In A. D. Robson (Ed.), *Zinc in Soils and Plants* (pp. 1–13). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-011-0878-2_1
11. Baruah, T. C., & Barthakur, H. P. (1997). *A text book of soil analysis*. Vikas Publishing House.
12. Birkhofer, K., Bezemer, T. M., Bloem, J., Bonkowski, M., Christensen, S., Dubois, D., Ekelund, F., Fließbach, A., Gunst, L., Hedlund, K., Mäder, P., Mikola, J., Robin, C., Setälä, H., Tatin-Froux, F., Van der Putten, W. H., & Scheu, S. (2008). Long-term organic farming fosters below and aboveground biota: Implications for soil quality, biological control and productivity. *Soil Biology and Biochemistry, 40*(9), 2297–2308. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.05.007
13. Cassman, N. A., Leite, M. F. A., Pan, Y., de Hollander, M., van Veen, J. A., & Kuramae, E. E. (2016). Plant and soil fungal but not soil bacterial communities are linked in long-term fertilized grassland. *Scientific Reports, 6*, 23680. https://doi.org/10.1038/srep23680
14. Chai, R., Ye, X., Ma, C., Wang, Q., Tu, R., Zhang, L., & Gao, H. (2019). Greenhouse gas emissions from synthetic nitrogen manufacture and fertilization for main upland crops in China. *Carbon Balance and Management, 14*(1), 20. https://doi.org/10.1186/s13021-019-0130-z

15. Chandrangsu, P., Rensing, C., & Helmann, J. D. (2017). Metal homeostasis and resistance in bacteria. *Nature Reviews Microbiology*, *15*(6), 338–350. https://doi.org/10.1038/nrmicro.2017.15
16. Chu, H., Lin, X., Fujii, T., Morimoto, S., Yagi, K., Hu, J., & Zhang, J. (2007). Soil microbial biomass, dehydrogenase activity, bacterial community structure in response to long-term fertilizer management. *Soil Biology and Biochemistry*, *39*(11), 2971–2976. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2007.05.031
17. Cui, X., Zhang, Y., Gao, J., Peng, F., & Gao, P. (2018). Long-term combined application of manure and chemical fertilizer sustained higher nutrient status and rhizospheric bacterial diversity in reddish paddy soil of Central South China. *Scientific Reports*, *8*, 16554. https://doi.org/10.1038/s41598-018-34685-0
18. Doran, J. W., & Zeiss, M. R. (2000). Soil health and sustainability: Managing the biotic component of soil quality. *Applied Soil Ecology*, *15*(1), 3–11. https://doi.org/10.1016/S0929-1393(00)00067-6
19. Food and Agriculture Organization. (2018). *The World Bank Data, Food and Agriculture Organization*. Retrieved November 10, 2021, from https://data.worldbank.org/indicator/AG.LND.AGRI.K2
20. Francioli, D., Schulz, E., Lentendu, G., Wubet, T., Buscot, F., & Reitz, T. (2016). Mineral vs. organic amendments: Microbial community structure, activity and abundance of agriculturally relevant microbes are driven by long-term fertilization strategies. *Frontiers in Microbiology*, *7*, 1446. https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01446
21. Franklin, N. M., Rogers, N. J., Apte, S. C., Batley, G. E., Gadd, G. E., & Casey, P. S. (2007). Comparative toxicity of nanoparticulate ZnO, bulk ZnO, and $ZnCl_2$ to a freshwater microalga (*Pseudokirchneriella subcapitata*): The importance of particle solubility. *Environmental Science & Technology*, *41*(24), 8484–8490. https://doi.org/10.1021/es071445r

22. Goyal, S., Mishra, M. M., Hooda, I. S., & Singh, R. (1992). Organic matter-microbial biomass relationships in field experiments under tropical conditions: Effects of inorganic fertilization and organic amendments. *Soil Biology and Biochemistry, 24*(10), 1081–1084. https://doi.org/10.1016/0038-0717(92)90060-D
23. Imlay, J. A. (2013). The molecular mechanisms and physiological consequences of oxidative stress: Lessons from a model bacterium. *Nature Reviews Microbiology, 11*(7), 443–454. https://doi.org/10.1038/nrmicro3032
24. Kaiser, B. N., Gridley, K. L., Brady, J. N., Phillips, T., & Tyerman, S. D. (2005). The role of molybdenum in agricultural plant production. *Annals of Botany, 96*(5), 745–754. https://doi.org/10.1093/aob/mci226
25. Kang, G. S., Beri, V., Sidhu, B. S., & Rupela, O. P. (2005). A new index to assess soil quality and sustainability of wheat-based cropping systems. *Biology and Fertility of Soils, 41*(6), 389–398. https://doi.org/10.1007/s00374-005-0857-4
26. Liu, Y. M., Cao, W. Q., Chen, X. X., Yu, B. G., Lang, M., Chen, X. P., & Zou, C. Q. (2020). The responses of soil enzyme activities, microbial biomass and microbial community structure to nine years of varied zinc application rates. *Science of The Total Environment, 737*, 140245. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140245
27. Lucena, J. J. (2006). Synthetic iron chelates to correct iron deficiency in plants. In L. L. Barton & J. Abadía (Eds.), *Iron nutrition in plants and rhizospheric microorganisms* (pp. 103–128). Springer. https://doi.org/10.1007/1-4020-4743-6_5
28. Lu, M., Shi, Y., Qi, D., Wang, Q., Zhang, H., Feng, Y., He, Z., Dong, C., Yang, X., & Yuan, C. (2025). Integrated microbiology and metabolomics analysis reveal responses of soil bacterial communities and metabolic functions to N-Zn co-fertilization in the rhizosphere of tea plants (*Camellia sinensis* L.). *Plants, 14*(12), 1811. https://doi.org/10.3390/plants14121811

29. Luo, P., Han, X., Wang, Y., Han, M., Shi, H., Liu, N., & Bai, H. (2015). Influence of long-term fertilization on soil microbial biomass, dehydrogenase activity, and bacterial and fungal community structure in a brown soil of northeast China. *Annals of Microbiology, 65*(2), 533–542. https://doi.org/10.1007/s13213-014-0889-9
30. Lv, H. H., Ji, C. C., Zhang, L., Jiang, C. C., & Cai, H. M. (2022). Zinc application promotes nitrogen transformation in rice rhizosphere soil by modifying microbial communities and gene expression levels. *Science of The Total Environment, 849*, 157858. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157858
31. Maclean, E. O. (1982). Soil pH and lime requirement. In A. L. Page (Ed.), *Methods of soil analysis, part 2: Chemical and microbiological properties* (2nd ed., pp. 199–244). American Society of Agronomy, Soil Science Society of America.
32. Masella, R., & Mazza, G. (Eds.). (2009). *Glutathione and sulfur amino acids in human health and disease*. John Wiley & Sons. https://doi.org/10.1002/9780470475973
33. Mendel, R. R. (2013). The molybdenum cofactor. *Journal of Biological Chemistry, 288*(19), 13165–13172. https://doi.org/10.1074/jbc.R113.455311
34. Mortvedt, J. J., & Gilkes, R. J. (1993). Zinc fertilizers. In A. D. Robson (Ed.), *Zinc in Soils and Plants* (pp. 33–44). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-011-0878-2_3
35. Murugan, R., & Kumar, S. (2013). Influence of long-term fertilisation and crop rotation on changes in fungal and bacterial residues in a tropical rice-field soil. *Biology and Fertility of Soils, 49*(7), 847–856. https://doi.org/10.1007/s00374-013-0782-x
36. Nelson, D. L., & Cox, M. M. (2017). *Lehninger principles of biochemistry* (7th ed.). W.H. Freeman.
37. Onet, A., Dincă, L. C., Grenni, P., Laslo, V., Teușdea, A. C., Vasile, D. L., Enescu, R. E., & Crișan, V. E. (2019). Biological indicators for evaluating soil quality improvement in a soil degraded by erosion processes. *Journal of Soils and Sediments, 19*(5), 2393–2404. https://doi.org/10.1007/s11368-019-02258-x

38. Page, A. L., Miller, R. H., & Keeney, D. R. (Eds.). (1982). *Methods of soil analysis. Part 2: Chemical and microbiological properties* (2nd ed.). American Society of Agronomy, Soil Science Society of America.
39. Pan, H., Chen, M., Feng, H., Wei, M., Song, F., Lou, Y., Cui, X., Wang, H., & Zhuge, Y. (2020). Organic and inorganic fertilizers respectively drive bacterial and fungal community compositions in a fluvo-aquic soil in northern China. *Soil and Tillage Research, 198*, 104540. https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104540
40. Peng, X., Yan, X., Zhou, H., Zhang, Y. Z., & Sun, H. (2015). Assessing the contributions of sesquioxides and soil organic matter to aggregation in an ultisol under long-term fertilization. *Soil and Tillage Research, 146*, 89–98. https://doi.org/10.1016/j.still.2014.04.003
41. Poorna Chandrika, K. S. V., Prasad, R. D., Sing, A., & Gopalan, B. (2025). Fe and Zn citrate nanoparticles: Effect on soil enzyme activities and microbiome. *RSC Advances*, *15*(18), 24058–24073. https://doi.org/10.1039/D5RA02986D
42. Qin, X., Yu, M., Du, H., Hu, C., Wu, S., Tan, Q., Hu, X., Shabala, S., & Sun, X. (2023). Effects of molybdenum supply on microbial diversity and mineral nutrient availability in the rhizosphere soil of broad bean (*Vicia faba* L.). *Plant Physiology and Biochemistry, 201*, 108203. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.108203
43. Ren, J., Liu, X., Yang, W., Yang, X., Li, W., Xia, Q., Li, J., Gao, Z., & Yang, Z. (2021). Rhizosphere soil properties, microbial community, and enzyme activities: Short-term responses to partial substitution of chemical fertilizer with organic manure. *Journal of Environmental Management, 299*, 113650. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113650
44. Richard, L. A. (1954). *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. U.S. Department of Agriculture, Agriculture Handbook No. 60.

45. Robinson, J. R., Isikhuemhen, O. S., & Anike, F. N. (2021). Fungal–metal interactions: A review of toxicity and homeostasis. *Journal of Fungi, 7*(3), 225. https://doi.org/10.3390/jof7030225
46. Sasse, J., Martinoia, E., & Northen, T. (2018). Feed your friends: Do plant exudates shape the root microbiome? *Trends in Plant Science, 23*(1), 25–41. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2017.09.003
47. Self, W. T., Grunden, A. M., Hasona, A., & Shanmugam, K. T. (2001). Molybdate transport. *Research in Microbiology, 152*(3), 311–321. https://doi.org/10.1016/S0923-2508(01)01200-8
48. Staats, C. C., Kmetzsch, L., Schrank, A., & Vainstein, M. H. (2013). Fungal zinc metabolism and its connections to virulence. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology, 3*, 65. https://doi.org/10.3389/fcimb.2013.00065
49. Styla, K., & Sawicka, A. (2010). Microbiological activity of soil against the background of differentiated irrigation and fertilization in apple (*Malus domestica*) orchard after replantation. *Agronomy Research, 8*(Special Issue III), 827–836.
50. Takemura, K., Kolasinski, V., Del Poeta, M., Vieira de Sa, N. F., Garg, A., Ojima, I., Del Poeta, M., & Pereira de Sa, N. (2025). Iron acquisition strategies in pathogenic fungi. *mBio, 16*(6), e01211-25. https://doi.org/10.1128/mbio.01211-25
51. Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science, 37*(1), 29–38. https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003
52. Wang, R., Zhang, H. C., Sun, L. G., Qi, G. F., Chen, S., & Zhao, X. Y. (2017). Microbial community composition is related to soil biological and chemical properties and bacterial wilt outbreak. *Scientific Reports, 7*(1), 343. https://doi.org/10.1038/s41598-017-00472-6
53. Winkler, K., Fuchs, R., Rounsevell, M., & Herold, M. (2021). Global land use changes are four times greater than previously

estimated. *Nature Communications*, *12*(1), 2501. https://doi.org/10.1038/s41467-021-22702-2