LJEEST
ISSN 2710-5237
www.srcest.org.ly/jou

المجلة الليبية لعلوم وتكنولوجيا البيئة

Libyan Journal of Ecological & Environmental Sciences and Technology(LJEEST)

DOI: https://doi.org/10.63359/acb0wk22

التوزيع المكاني والرأسي للحديد القابل للاستخلاص بالماء في ترب بعض مناطق وادي الشاطئ، جنوب غرب ليبيا

وجدان أبو القاسم المخزوم عائشة رمضان محمد[1،2]

ARTICLE INFO

Vol. 8 No. 2 August, 2026

Pages (A41- 48)

Article history:
Revised form 07 June 2026
Accepted 25 July 2026

Authors affiliation
1. Department of Environmental Sciences, Faculty of Environment and Natural Resources, Wadi Al-Shati University, Brak Al-Shati, Libya.
2. Libyan Center for Environmental Science and Technology Studies and Research, Brak Al-Shati, Libya.
Font & size
w.makzom@wau.edu.ly

Keywords:
water-extractable iron; chemical fractionation; arid soils; Wadi Al-Shati; atomic absorption spectrometry.

© 2026
Content on this article is an open access licensed under creative commons CC BY-NC 4.0.

الملخص

هدفت هذه الدراسة إلى تقييم التوزيع المكاني والرأسي للحديد القابل للاستخلاص بالماء في ترب ست مناطق من وادي الشاطئ بجنوب غرب ليبيا، هي أشكدة وبراك وأقار وقطة وتمسان وتاروت، وتفسير تباينه في ضوء الخواص الفيزيائية والكيميائية للتربة. جُمعت 18 عينة من أعماق 1 و2 و3 م. تراوحت الكثافة الظاهرية بين 1.42 و1.65 غم سم$^{-3}$، والمسامية بين 38 و49%، والسعة الحقلية بين 7.5 و18.5%، والمادة العضوية بين 0.30 و0.72%، وتدرجت النسجة من رملي خشن إلى رملي طيني. تراوحت قيم الأس الهيدروجيني بين 6.8 و8.0، والكربونات بين صفر و2.0 جزء في المليون، والبيكربونات بين 1.1 و4.2 جزء في المليون، بينما تراوحت تراكيز الصوديوم والكالسيوم والمغنيسيوم والبوتاسيوم بين 3.8–12.5 و2.2–8.5 و0.9–4.8 و0.1–1.2 جزء في المليون، على التوالي. استُخلص الحديد من 5 غ من التربة باستخدام 20 مل من الماء منزوع الأيونات، ثم قيس بمطياف الامتصاص الذري. تراوح الحديد القابل للاستخلاص بالماء بين 6.75 و16.75 ملغم كغم$^{-1}$، بمتوسط عام 9.60 ملغم كغم$^{-1}$. سجلت أشكدة أعلى متوسط للحديد بلغ 14.33 ملغم كغم$^{-1}$، في حين سجلت أقار أدنى متوسط بلغ 7.25 ملغم كغم$^{-1}$. ارتفع متوسط الحديد من 8.50 ملغم كغم$^{-1}$ عند عمق 1 م إلى 10.75 ملغم كغم$^{-1}$ عند عمق 3 م. وتشير النتائج إلى تداخل القوام والمادة العضوية والتفاعل الأرضي والكربونات وحركة المياه ومادة الأصل والظروف التأكسدية والاختزالية في التحكم بتوزيع الحديد.

Spatial and Vertical Distribution of Water-Extractable Iron in Soils of Selected Areas of Wadi Al-Shati, Southwestern Libya،

Wejdan Abu-Al.qasim Almakhzoom Aishah Ramadan Mohamed

Understanding the distribution of water-extractable iron (Fe) in arid soils is essential for evaluating soil fertility and nutrient availability. This study investigated the spatial and vertical distribution of water-extractable Fe in soils collected from six locations in Wadi Al-Shati, southwestern Libya (Ashkada, Brak, Agr, Qatta, Tmisan, and Tarout), and assessed its relationship with selected soil physical and chemical properties. A total of 18 soil samples were collected from depths of 1, 2, and 3 m. Bulk density ranged from 1.42 to 1.65 g cm^{-3}, porosity from 38 to 49%, field capacity from 7.5 to 18.5%, and organic matter content from 0.30 to 0.72%. Soil texture varied from coarse sand to sandy clay, while soil pH ranged from 6.8 to 8.0. Carbonate and bicarbonate concentrations ranged from 0–2.0 and 1.1–4.2 mg L^{-1}, respectively. The concentrations of Na, Ca, Mg, and K ranged from 3.8–12.5, 2.2–8.5, 0.9–4.8, and 0.1–1.2 mg L^{-1}, respectively. Water-extractable Fe was determined by extracting 5 g of soil with 20 mL of deionized water, followed by quantification using atomic absorption spectrophotometry (AAS). Water-extractable Fe concentrations ranged from 6.75 to 16.75 mg kg^{-1}, with an overall mean of 9.60 mg kg^{-1}. The highest mean Fe concentration was recorded in Ashkada (14.33 mg kg^{-1}), whereas the lowest was observed in Agr (7.25 mg kg^{-1}). Mean Fe concentrations increased with depth, from 8.50 mg kg^{-1} at 1 m to 10.75 mg kg^{-1} at 3 m. The observed spatial and vertical variability indicates that water-extractable Fe is controlled by the combined effects of soil texture, organic matter content, soil pH, carbonate content, water movement, parent material, and redox conditions. These findings provide valuable baseline information on Fe distribution in the arid soils of Wadi Al-Shati and contribute to a better understanding of the factors governing Fe availability in desert environments.

المقدمة

يعتبر الحديد من العناصر الانتقالية واسعة الانتشار في القشرة الأرضية، كما يمثل عنصرًا غذائيًا دقيقًا أساسيًا لنمو النباتات واستمرار وظائفها الفسيولوجية؛ إذ يدخل في تركيب العديد من البروتينات والإنزيمات المرتبطة بعمليات البناء الضوئي والتنفس ونقل الإلكترونات وتثبيت النيتروجين .وعلى الرغم من ارتفاع المحتوى الكلي للحديد في كثير من الترب، فإن توافره للنبات والكائنات الحية الدقيقة يكون محدودًا، لأن معظم الحديد يوجد في صور معدنية مستقرة وضعيفة الذوبانو لا يمثل الحديد الموجود في المحلول الأرضي إلا جزءًا صغيرًا وديناميكيًا من مخزونه الكلي.(Schwertmann, 1991; Colombo et al., 2014) .

يتوزع الحديد في التربة بين صور كيميائية ومعدنية متعددة تشمل الحديد البنيوي في المعادن الأولية والسيليكات، وأكاسيد وهيدروكسيدات الحديد الثانوية مثل الهيماتيت والجيوثيت والفريهيدريت، والحديد المرتبط بالمادة العضوية، إضافة إلى الحديد المدمص على أسطح معادن الطين والغرويات الأرضية .كما توجد كميات محدودة منه في المحلول الأرضي في صورة أيونات حرة أو معقدات عضوية وغير عضوية قابلة للحركة. ويتوقف إسهام هذه الصور جاهزية الحديد على درجة تبلور المعادن ومساحة أسطحها النوعية وحجم حبيباتها وطبيعة المادة العضوية.(Schwertmann, 1991; Colombo et al., 2014)

تتحكم العديد من العوامل الكيميائية والفيزيائية والبيولوجية في ذوبانية الحديد وحركته داخل قطاع التربة، ويأتي الأس الهيدروجيني والجهد التأكسدي–الاختزالي في مقدمة هذه العوامل . ففي الترب جيدة التهوية والمحايدة إلى القاعدية يسود الحديد الثلاثي(Fe(III ، الذي يميل إلى التحلل المائي والترسيب في صورة أكاسيد وهيدروكسيدات ضعيفة الذوبان .أما في الظروف المختزلة الناتجة عن ارتفاع الرطوبة أو ضعف التهوية، فقد يُختزل (Fe(III إلى الحديد الثنائي (Fe(II) (Gotoh & Patrick, 1974; Husson, 2013).

وتكتسب دراسة الحديد في ترب المناطق الجافة وشبه الجافة أهمية خاصة، لأن هذه الترب غالبًا ما تتصف بارتفاع الـ pH وتراكم الكربونات والأملاح وانخفاض معدلات الغسيل، وهي ظروف تساعد على تثبيت الحديد في صور قليلة الذوبان والتوافر الحيوي .وفي المقابل، يمكن لدورات الترطيب والجفاف وحركة مياه الري أو المياه الجوفية والصعود الشعري والتباين الموضعي في التهوية أن تنشئ بيئات دقيقة مختلفة في ظروفها التأكسدية–الاختزالية، بما يؤدي إلى ذوبان بعض أكاسيد الحديد أو إعادة ترسيبها واختلاف توزيع الحديد رأسيًا داخل قطاع التربة. ولا تقتصر الأهمية البيئية للحديد على دوره الغذائي؛ إذ تُعد أكاسيد وهيدروكسيدات الحديد من أكثر مكونات التربة نشاطًا في امتزاز الفوسفات والعناصر النزرة والمركبات العضوية وتثبيتها . ومن ثم، قد يؤدي ذوبان هذه المعادن تحت الظروف المختزلة إلى تحرير بعض العناصر أو المركبات، بينما يؤدي تأكسد Fe(II) وإعادة ترسيبه إلى تكوين أسطح معدنية جديدة قادرة على احتجازها .لذلك يمثل سلوك الحديد مؤشرًا مهمًا لفهم عمليات الخصوبة وديناميكية العناصر وجودة المياه الجوفية والتغيرات البيوجيوكيميائية في البيئة الأرضية (Colombo et al., 2014). ولا يكفي قياس الحديد الكلي وحده لتقدير حركته أو توافره البيئي، لأنه يجمع بين الحديد الموجود في الشبكات البلورية والجزء المتبقي شديد الثبات وبين الصور الأكثر نشاطًا وقابلية للتحرر .ولهذا طُورت إجراءات الاستخلاص المتتالي لتقسيم الحديد وفقا لصور تواجده، مثل الجزء الذائب في الماء والمتبادل والمرتبط بالكربونات والمادة العضوية والأكاسيد والجزء المتبقي (Tessier et al., 1979; Sposito et al., 1982) .ومع ذلك، ينبغي تفسير نتائج هذه الإجراءات بحذر، لأن الأجزاء المستخلصة تعتمد على نوع الكاشف وزمن الاستخلاص ونسبة التربة إلى المحلول، ولا تمثل أطوارًا معدنية نقية أو مستقلة بصورة مطلقة(La Force & Fendorf, 2000) .ويُعد الحديد القابل للاستخلاص بالماء مؤشرًا للجزء الأكثر قابلية للحركة في التربة؛ إذ يشمل الحديد الموجود في المحلول أو القابل للتحرر بسهولة تحت ظروف الاستخلاص المستخدمة، ويتميز بسرعة استجابته للتغيرات في بة والأس الهيدروجيني والملوحة والظروف التأكسدية–الاختزالية .ومع ذلك، فإن انخفاض تركيزه لا يعني بالضرورة انخفاض مخزون الحديد الكلي، بل قد يعكس تثبيته في أكاسيد وهيدروكسيدات أو كربونات أو معادن أولية وثانوية ضعيفة الذوبان.

يمثل وادي الشاطئ أحد أهم الأقاليم الجيولوجية الحاملة لخامات الحديد في ليبيا؛ إذ توثق الدراسات الجيولوجية امتداد نطاقات رسوبية غنية بمعادن الحديد وتباينًا في تركيبها المعدني ودرجة تحررها والشوائب المصاحبة لها .وتضم الخامات بدرجات متفاوتة الهيماتيت والمغنتيت والجيوثيت والسيدريت إلى جانب الكوارتز والمعادن الطينية وبعض المعادن الفوسفاتية، وهو تنوع قد ينعكس على توزيع صور الحديد القابلة للذوبان والحركة بين أجزاء الوادي وأعماقه المختلفة.(Goudarzi, 1971; Tajouri et al., 2013) . ورغم الأهمية الاقتصادية والجيولوجية لهذه الخامات، فقد تركزت معظم الدراسات السابقة على تقدير الاحتياطيات وتحديد امتداد الخام وتوصيفه المعدني، في حين لا تزال المعلومات المتعلقة بالجزء القابل للحركة من الحديد في التربة وتغيره الرأسي بين مناطق الوادي محدودة .وتمثل هذه الفجوة جانبًا بيئيًا مهمًا، لأن المحتوى الكلي أو التركيب المعدني للخام لا يوضحان بالضرورة مقدار الحديد القابل للانتقال في المحلول الأرضي أو مدى تأثره بخصائص التربة وحركة المياه.

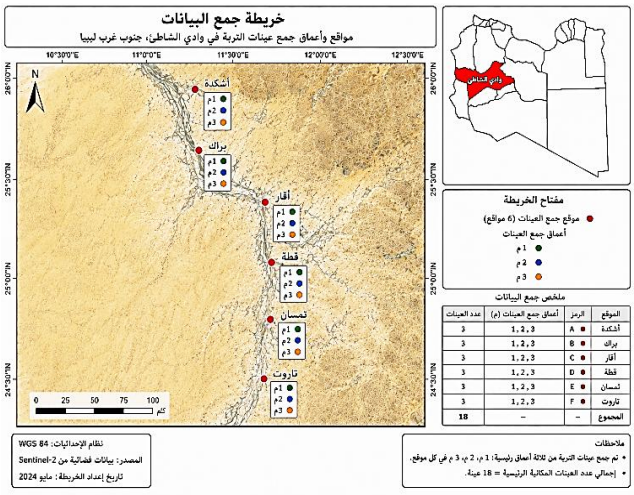
وانطلاقًا من هذه الفجوة المعرفية، تهدف الدراسة الحالية إلى تقدير تركيز الحديد القابل للاستخلاص بالماء في ترب ست مناطق من وادي الشاطئ، هي أشكدة وبراك وأقار وقطة وتمسان وتاروت، عند أعماق 1 و 2و 3م .كما تسعى إلى تحليل التباين المكاني بين مناطق الدراسة وتتبع التغير الرأسي في توزيعه داخل القطاع الأرضي، بما يسهم في توضيح أنماط حركته وإعادة توزيعه .وتهدف الدراسة كذلك إلى تفسير النتائج في ضوء المبادئ الأساسية الحاكمة لكيمياء الحديد، ولا سيما تأثير الأس الهيدروجيني والظروف التأكسدية–الاختزالية وحركة المياه والخواص المعدنية للتربة، مع بيان القيود المرتبطة بطريقة الاستخلاص المستخدمة وتحديد الاحتياجات البحثية اللازمة لدراسات مستقبلية أكثر شمولًا حول صور الحديد وتوافره البيئي في المنطقة.

المواد والطرق:

منطقة الدراسة وتصميم أخذ العينات

أُجريت الدراسة في وادي الشاطئ ضمن إقليم فزان بجنوب غرب ليبيا، وهو إقليم صحراوي يتميز بتباين محلي في الرواسب السطحية وتكوينات خام الحديد وظروف حركة المياه .شملت الدراسة ست مناطق هي أشكدة، وبراك، وأقار، وقطة، وتمسان، وتاروت .جُمعت عينات التربة من ثلاثة أعماق هي 1 و 2و 3م، بما مجموعه 18 عينة مكانية–رأسية

ثم نقلت عينات التربة إلى المعمل، وجُففت هوائيًا في درجة حرارة الغرفة، ثم أزيلت منها بقايا الجذور والمواد الغريبة، وفُتتت بلطف ومُررت خلال منخل قطر فتحاته 2 مم لإجراء التحاليل



الخصائص الفيزوكيميائية للترب تحت الدراسة:

قدرت الكثافة الظاهرية بطريقة الأسطوانة المعدنية غير المضطربة، إذ جُففت العينات عند 105°م حتى ثبات الوزن، ثم حُسبت الكثافة الظاهرية من قسمة كتلة التربة الجافة على حجم الأسطوانة، وفق Blake and Hartge (1986). وقُدرت الكثافة الحقيقية بطريقة البيكنومتر، وحُسبت المسامية الكلية من العلاقة:

المسامية (%) = [1 − (الكثافة الظاهرية ÷ الكثافة الحقيقية)] × 100

قدرت السعة الحقلية بعد تشبيع العينات تدريجيًا بالماء وتعريضها لجهد مائي ثم حُسب المحتوى المائي الوزني عند الاتزان (Dane and Hopmans, 2002) . حُدد التوزيع الحجمي للحبيبات بطريقة الماصة بعد تشتيت العينة بسداسي ميتافوسفات الصوديوم والرج الميكانيكي، ثم حُسبت نسب الرمل والطمي والطين وصُنفت النسجة باستخدام مثلث النسجة (Sing،1980). قُدرت المادة العضوية باستخدام طريقة الحرق الجاف (Loss on Ignition - LOI) في فرن الترميد (Muffle Furnace) عند درجة حرارة 600 درجة مئوية ولمدة 6 ساعات (Zhang and Wang , 2014)

قيس الأس الهيدروجيني باستخدام جهاز pH meter، وفق .Thomas (1996). وقُدرت أيونات الكربونات والبيكربونات في الراشح بالمعايرة الحجمية بحمض الكبريتيك القياسي؛ استُخدم دليل الفينولفثالين لتحديد نهاية معايرة الكربونات، والميثيل البرتقالي لتحديد نهاية البيكربونات، وفق Richards (1954)و(1982) Rhoades

. قدر الصوديوم والبوتاسيوم في المستخلص باستخدام جهاز اللهب الضوئي بعد إعداد منحنيات معايرة من المحاليل القياسية، بينما قُدر الكالسيوم والمغنيسيوم باستخدام المعايرة (Suarez, 1996).

استخلاص الحديد القابل للذوبان في الماء وقياسه

وُزن 5.0 غ من كل عينة تربة مجففة هوائيًا ووُضعت في أنبوب طرد مركزي سعة 50 مل . أضيف 20 مل من الماء منزوع الأيونات، ثم رُج المعلق لمدة 30 دقيقة ورُشح بعناية .قيس الحديد في الراشح باستخدام مطياف الامتصاص الذري .(AAS) لاستخلاص ص الجزء القابل للاستخلاص بالماءF1 (Sposito et al., 1982) .

تم التعبير عن التركيز على أساس كتلة التربة الجافة باستخدام لعلاقة:

$$Csoil = (Cextract \times V) / m$$

حيث يمثل Cextract تركيز الحديد في المستخلص ملغم لتر$^{-1}$، و Vحجم المستخلص (لتر)، و mكتلة التربة(كغم). وحسب متوسط كل منطقة عبر الأعماق الثلاثة.

جدول (1). الخواص الفيزيائية والمادة العضوية لترب مناطق الدراسة.

المنطقة	العمق (متر)	الكثافة الظاهرية غم/سم^3	المسامية %	السعة الحقلية %	النسجة	المادة العضوية %
براك	1	1.47	46	9.8	رملي	0.42
	2	1.46	47	9.2	رملي	0.40
	3	1.50	47	8.8	رملي	0.38
أشكدة	1	1.65	38	18.5	رملي طيني	0.72
	2	1.62	39	17.2	رملي طيني	0.68
	3	1.60	40	16.8	رملي طيني	0.65
قطة	1	1.50	45	11.5	رملي	0.48
	2	1.49	45	11.0	رملي	0.46
	3	1.48	46	10.5	رملي	0.44
تمسان	1	1.54	43	13.5	رملي	0.55
	2	1.52	44	12.8	رملي	0.52
	3	1.51	44	12.2	رملي	0.50
أقار	1	1.44	48	8.2	رملي خشن	0.35
	2	1.43	48	7.8	رملي خشن	0.32
	3	1.42	49	7.5	رملي خشن	0.30
تاروت	1	1.58	41	15.5	رملي	0.62
	2	1.56	42	14.8	رملي	0.58
	3	1.55	42	14.2	رملي	0.57

النتائج والمناقشة:

أظهرت النتائج (جدول ،1) وجود تباين مكاني ورأسي في الخصائص الفيزيائية للتربة بين المناطق المدروسة، كما أظهرت النتائج سيادة النسجة الرملية، مع تميز ترب منطقة أشكدة بنسجة رملية طينية وأقار بنسجة رملية خشنة. وتشير النتائج أن قوام التربة يمثل العامل الرئيس المتحكم في الخصائص الفيزيائية للترب المدروسة، من خلال تأثيره المباشر في الكثافة الظاهرية والمسامية والسعة الحقلية، إضافة إلى دوره في تنظيم حركة الماء وتوزيع العناصر الغذائية داخل قطاع التربة. ومن ثم، فإن هذه الخصائص تعتبر من العوامل الأساسية التي تتحكم في سلوك العناصر الصغرى، ومنها الحديد، وتؤثر في جاهزيتها للنبات في بيئات وادي الشاطئ الجافة. كما سجلت عينة ترب أشكدة أعلى سعة حقلية ومادة عضوية، بينما سجلت ترب منطقة أقار أدنى القيم. أظهرت المسامية علاقة عكسية مع الكثافة الظاهرية، إذ تراوحت بين (38–49%)، وسُجلت أعلى القيم في تربة أقار وأدناها في منطقة أشكدة. ويُفسر ذلك بزيادة نسبة المسامات الكبيرة في الترب الرملية الخشنة، مما يعزز حركة الهواء والماء داخل التربة، في حين تؤدي زيادة نسبة الحبيبات الدقيقة إلى انخفاض المسامية الكلية.

ومن الجدول (2) تراوحت قيم pH بين 6.8 و8.0، مما يشير إلى تدرج من تفاعل قريب من التعادل في أشكدة إلى تفاعل قلوي معتدل في أقار. سجلت أشكدة غياب الكربونات وارتفاع البيكربونات والكاتيونات الذائبة، بينما سجلت أقار أعلى الكربونات وأدنى الأيونات الذائبة. وقد يسهم انخفاض pH وغياب الكربونات في أشكدة في زيادة بقاء الحديد في صورة قابلة للاستخلاص، بينما يساعد ارتفاع pH والكربونات في أقار على تثبيته وترسيبه.

جدول (2). الخواص الكيميائية لترب مناطق الدراسة.

المنطقة	العمق (متر)	pH	CO_3	HCO_3	Na	Ca	Mg	K
			ppm					
براك	1	7.7	1.0	1.8	5.8	3.8	1.5	0.3
	2	7.8	1.2	1.7	5.5	3.5	1.3	0.3
	3	7.8	1.3	1.6	5.0	3.2	1.2	0.2

أشكدة	1	6.8	0.0	4.2	12.5	8.5	4.8	1.2
	2	6.9	0.0	4.0	11.8	8.2	4.5	1.1
	3	7.0	0.0	3.8	11.0	7.9	4.2	1.0
تارو ت	1	7.1	0.0	3.5	10.2	7.2	3.8	0.9
	2	7.2	0.0	3.3	9.8	6.8	3.5	0.8
	3	7.2	0.0	3.1	9.2	6.5	3.2	0.8
تمس ان	1	7.3	0.2	2.8	8.5	5.8	2.8	0.7
	2	7.4	0.3	2.6	8.0	5.5	2.6	0.6
	3	7.4	0.4	2.5	7.6	5.2	2.4	0.6
أقار	1	7.9	1.5	1.4	4.5	2.8	1.0	0.2
	2	8.0	1.8	1.2	4.2	2.5	0.9	0.1
	3	8.0	2.0	1.1	3.8	2.2	0.9	0.1
قطة	1	7.5	0.6	2.2	7.0	4.8	2.0	0.5
	2	7.6	0.7	2.1	6.5	4.5	1.8	0.4
	3	7.6	0.8	2.0	6.2	4.5	1.7	0.4

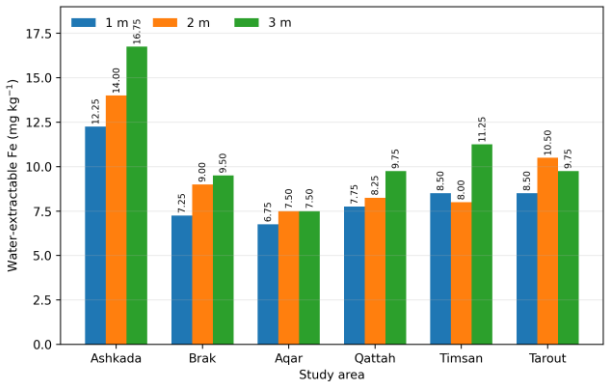
التوزيع المكاني للحديد القابل للاستخلاص بالماء

تراوحت تراكيز الحديد القابل للاستخلاص بالماء في جميع العينات بين 6.75 و16.75 ملغم كغم$^{-1}$، وبلغ المتوسط العام 9.60 ملغم كغم$^{-1}$ (الجدول 3). أظهرت البيانات تباينًا مكانيًا واضحًا، إذ سجلت أشكدة أعلى القيم في الأعماق الثلاثة، بينما سجلت أقار أدنى القيم أو قيمًا مقاربة للحد الأدنى في جميع الأعماق. وقد يعكس هذا التباين اختلافات بين المواقع في المادة الأصلية، ودرجة تفاعل التربة، ومحتوى الكربونات والمادة العضوية، إضافة إلى القوام وظروف حركة المياه. ويُعد الحديد المستخلص بالماء مؤشرًا على الجزء الأكثر ذوبانًا وحركة في التربة، إلا أن تركيزه يتأثر بدرجة كبيرة بارتفاع الرقم الهيدروجيني والظروف الجيرية التي تحد من ذوبانية الحديد وتزيد ترسيبه في صور قليلة الإتاحة. لذلك فإن ارتفاع القيم في أشكدة قد يرتبط بوجود ظروف أكثر ملاءمة لبقاء الحديد في الصورة الذائبة، في حين قد يعكس انخفاضه في أقار زيادة تثبيته أو انخفاض محتواه في المادة الأصلية.(Ivezić et al., 2011; Sahrawat, 2016)

الجدول 2. تركيز الحديد القابل للاستخلاص بالماء في مناطق الدراسة وعبر الأعماق المختلفة (ملغم كغم$^{-1}$).

الموقع	العمق			المتوسط
	م1	م2	م3	
أشكدة	12.25	14.00	16.75	14.33
براك	7.25	9.00	9.50	8.58
أقار	6.75	7.50	7.50	7.25
قطة	7.75	8.25	9.75	8.58
تمسان	8.50	8.00	11.25	9.25
تاروت	8.50	10.50	9.75	9.58

الموقع	العمق			المتوسط
	م1	م2	م3	
متوسط العمق	8.50	9.54	10.75	9.60



الشكل .1 التباين المكاني للحديد القابل للاستخلاص بالماء عند الأعماق 1 و 2و 3م

عند عمق 1 م، سجلت أشكدة 12.25 ملغم كغم$^{-1}$، تلتها تمسان وتاروت بقيمة 8.50 ملغم كغم$^{-1}$ لكل منهما، ثم قطة (7.75 ملغم كغم$^{-1}$) ، وبراك (7.25ملغم كغم$^{-1}$)، وأقار (6.75ملغم كغم$^{-1}$)وعند عمق 2 م، ظلت أشكدة الأعلى (14.00 ملغم كغم$^{-1}$)، تلتها تاروت 10.50 ملغم كغم$^{-1}$، وبراك9.00 ملغم كغم$^{-1}$ ، وقطة 8.25 ملغم كغم$^{-1}$، وتمسان(8.00) ، وأقار 7.50) ملغم كغم$^{-1}$).أما عند عمق 3 م فقد ارتفعت أشكدة إلى 16.75ملغم كغم$^{-1}$، ثم تمسان(11.25) ، وقطة وتاروت 9.75) لكل منهما(، وبراك (9.50)، وأقار 7.50) ملغم كغم$^{-1}$).

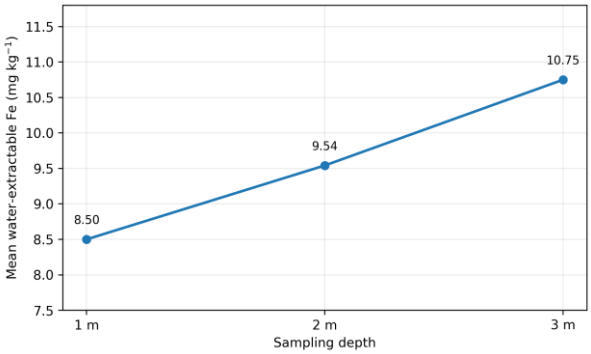
بلغ متوسط أشكدة عبر الأعماق 14.33 ملغم كغم$^{-1}$، وهو أعلى بنحو 97.7% من متوسط أقار البالغ 7.25 ملغم كغم$^{-1}$. وجاءت تاروت في المرتبة الثانية بمتوسط 9.58 ملغم كغم$^{-1}$، تلتها تمسان (9.25)، ثم براك وقطة بمتوسط متماثل قدره 8.58 ملغم كغم$^{-1}$. ويُلاحظ وصفيًا أن أشكدة جمعت بين أعلى الحديد ونسجة رملية طينية وسعة حقلية مرتفعة (16.8–18.5%) ومادة عضوية أعلى نسبيًا (0.65–0.72%)، بينما جمعت أقار بين أدنى الحديد ونسجة رملية خشنة وأدنى السعات الحقلية (7.5–8.2%) والمادة العضوية (0.30–0.35%). قد تسهم هذه الخواص في تعديل زمن مكوث الماء وامتزاز الحديد أو معقداته. كما يحتمل أن يعكس التباين اختلاف مادة الأصل ووفرة الأطوار الحاملة للحديد، وهو ما يتفق مع عدم التجانس المكاني لخامات وادي الشاطئ (Goudarzi, 1971; Tajouri et al., 2013).

التغير الرأسي مع العمق

أظهرت النتائج اتجاهًا عامًا نحو زيادة تركيز الحديد القابل للاستخلاص بالماء مع زيادة العمق. فقد ارتفع المتوسط المكاني من 8.50 ملغم كغم$^{-1}$ عند عمق 1 م إلى 9.54 ملغم كغم$^{-1}$ عند عمق 2 م، ثم بلغ 10.75 ملغم كغم$^{-1}$ عند عمق 3 م، بما يمثل زيادة كلية قدرها 26.5% بين العمقين 1 و3 م (الجدول 3؛ الشكل 2). وفي المقابل، انخفض متوسط السعة الحقلية والمادة العضوية قليلًا مع العمق، مما يستبعد تفسير الزيادة في الحديد بمجرد ارتفاع هذين المتغيرين. وقد يعكس الاتجاه انتقال جزء من الحديد القابل للحركة من الطبقات العليا وتراكمه النسبي في الطبقات الأعمق بفعل حركة المياه، أو اختلاف الظروف الكيميائية والمعدنية بين الأعماق. كما ارتفع معامل الاختلاف من 23.1% عند عمق 1 م إلى 29.5% عند عمق 3 م، مما يدل على اتساع التباين المكاني في الطبقات العميقة.

الجدول 3. الإحصاءات الوصفية لتركيز الحديد القابل للاستخلاص بالماء حسب العمق.

العمق	المتوسط	الانحراف المعياري	الحد الأدنى	الحد الأعلى	معامل الاختلاف (%)
م1	8.50	1.96	6.75	12.25	23.1
م2	9.54	2.42	7.50	14.00	25.4
م3	10.75	3.17	7.50	16.75	29.5



الشكل 2. المتوسط العام للحديد القابل للاستخلاص بالماء عند الأعماق الثلاثة عبر مناطق الدراسة.

وعلى الرغم من الارتفاع العام في المتوسطات مع العمق، فإن نمط التغير الرأسي لم يكن متماثلًا في جميع المواقع. فقد سجلت أشكدة وبراك وقطة زيادة تدريجية في التركيز مع زيادة العمق، في حين ارتفعت القيمة في أقار بين العمقين 1 و2 م ثم ظلت مستقرة تقريبًا عند العمق الثالث. أما تمسان فقد أظهرت انخفاضًا طفيفًا عند 2 م أعقبه ارتفاع عند 3 م، بينما سجلت تاروت أعلى قيمة عند 2 م قبل أن تنخفض بصورة محدودة عند 3 م. وتوضح الخواص الفيزيائية أن السعة الحقلية والمادة العضوية انخفضتا داخل كل موقع تقريبًا مع العمق، من دون أن يصاحب ذلك انخفاض مماثل في الحديد؛ لذلك يبدو أن العمق يتفاعل مع النفاذية ومسارات الرشح ومادة الأصل والتهوية والظروف الكيميائية، بدل أن يعمل من خلال خاصية فيزيائية واحدة.

ومن المنظور البيئي والجيوكيميائي، قد تسهم حركة مياه الرشح في نقل صور الحديد الذائبة أو المرتبطة بالغرويات الدقيقة من الطبقات العليا إلى الطبقات الأعمق، ولا سيما في المواقع ذات النفاذية المرتفعة أو التي تتعرض لدورات متكررة من الترطيب والجفاف .كما قد يؤدي انخفاض الجهد التأكسدي–الاختزالي في الطبقات الرطبة أو ضعيفة التهوية إلى اختزال الحديد الثلاثي Fe(III)إلى الحديد الثنائي Fe(II) ، الذي يتميز بارتفاع ذوبانيته وحركته النسبية في المحلول الأرضي.

وفي المقابل، تؤدي الظروف المؤكسدة وارتفاع الأس الهيدروجيني إلى التحلل المائي للحديد الثلاثي وترسيبه في صورة أكاسيد وهيدروكسيدات ضعيفة الذوبان، مما يخفض تركيزه في الجزء المستخلص بالماء .وقد أوضح Gotoh and Patrick (1974) أن ذوبانية الحديد وتوزيعه بين الصور المختلفة يتأثران بصورة مباشرة بالتفاعل بين الجهد التأكسدي–الاختزالي والأس الهيدروجيني، خصوصًا في الترب المغمورة، كما أكد Husson (2013) أن تفسير ديناميكية الحديد في التربة يتطلب دراسة متكاملة للعلاقة بين متغيري Eh و pHلما لهما من دور مشترك في تحديد حالة أكسدة الحديد وذوبانيته وتوافره البيئي.

وبناءً على ذلك، ينبغي التعامل مع الزيادة المسجلة في الحديد القابل للاستخلاص بالماء مع العمق بوصفها اتجاهًا وصفيًا يعكس تداخل عمليات جيولوجية وهيدرولوجية وكيميائية متعددة، وليس كنتيجة مباشرة لتأثير العمق وحده. وقد أسهمت بيانات القوام والكثافة الظاهرية والمسامية والسعة الحقلية والمادة العضوية في تضييق نطاق التفسير، لكنها لا تعوض الحاجة إلى قياسات الأس الهيدروجيني والجهد التأكسدي–الاختزالي والكربونات والرطوبة الفعلية، إلى جانب توصيف أكاسيد الحديد ودرجة تبلورها.

الدلالة البيئية وحدود الاستدلال

يمثل الحديد القابل للاستخلاص بالماء جزءًا صغيرًا لكنه نشط نسبيًا من مخزون الحديد، ويمكن أن يكون أكثر قابلية للحركة والانتقال إلى المحلول الأرضي من الحديد الموجود في الأكاسيد البلورية أو المعادن السيليكاتية .ومع ذلك، لا ينبغي مساواة ارتفاع هذا الجزء بالتلوث مباشرة، ولا سيما في منطقة ذات مصدر جيولوجي غني بالحديد .يتطلب الحكم البيئي قياس الحديد الكلي، وتحديد الخلفية الجيوكيميائية، ونسبة الجزء الذائب إلى الحديد الكلي، ودراسة علاقته بالنبات والمياه الجوفية .كما أن الأنواع الحرة والمعقدة من الحديد لا تتساوى في التوافر الحيوي، وتتأثر بالمادة العضوية والأيونات المصاحبة والأس الهيدروجيني (Silveira et al., 2003; Colombo et al., 2014).

الخلاصة

اتسمت ترب الدراسة بسيادة النسجة الرملية، وتراوحت الكثافة الظاهرية بين 1.42 و1.65 غم سم$^{-3}$، والمسامية بين 38 و49%، والسعة الحقلية بين 7.5 و18.5%، والمادة العضوية بين 0.30 و0.72%. كما تراوحت قيم الحديد القابل للاستخلاص بالماء بين 6.75 و 16.75ملغم كغم$^{-1}$، بمتوسط عام قدره 9.60 ملغم كغم$^{-1}$، كما سجلت منطقة أشكدة أعلى القيم في الأعماق الثلاثة ومتوسطًا مكانيًا قدره 14.33 ملغم كغم$^{-1}$، بينما سجلت أقار أدنى متوسط بلغ 7.25 ملغم كغم$^{-1}$. أظهر المتوسط العام اتجاهًا تصاعديًا مع العمق من 8.50 ملغم كغم$^{-1}$ عند 1 م إلى 10.75 ملغم كغم $^{-1}$عند 3 م، بزيادة قدرها 26.5%. وتزامنت أعلى تراكيز الحديد في أشكدة مع النسجة الرملية الطينية وارتفاع السعة الحقلية والمادة العضوية، بينما تزامنت أدنى القيم في أقار مع النسجة الرملية الخشنة وانخفاض هاتين الخاصيتين؛ غير أن زيادة الحديد مع العمق رغم انخفاضهما توضح أن مادة الأصل وحركة الماء والظروف الكيميائية عوامل أساسية موازية وتعد النتائج خط أساس أوليًا للتوزيع المكاني والرأسي.

التوصيات

- إجراء برنامج رصد موسمي، ولا سيما في أشكدة، وربط النتائج بأعماق المياه الجوفية واتجاه حركة الماء.
- دمج الاستخلاص الكيميائي مع XRD و XRFو SEM-EDSأو تقنيات طيفية مناسبة لتحديد الأطوار المعدنية الحاملة للحديد.
- عدم استخدام مصطلح التلوث إلا بعد المقارنة بخلفية جيوكيميائية محلية ومؤشرات المخاطر والتوافر الحيوي

المراجع:

Blake, G. R., & Hartge, K. H. (1986). Bulk Density. In A. Klute (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 1: Physical and Mineralogical Methods* (2nd ed., Agronomy Monograph No. 9, pp. 363–375). American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA.

Richards, L. A. (Ed.). (1954). *Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils*. USDA Agriculture Handbook No. 60. United States Department of Agriculture, Washington, DC.

Sahrawat, K. L. (2016). Soil and plant testing for iron: An appraisal. *Communications in Soil Science and Plant Analysis, 47*(3), 280–283. DOI: 10.1080/00103624.2015.1122805.

Saxton, K. E., & Rawls, W. J. (2006). Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. Soil Science Society of America Journal, 70(5), 1569–1578. https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0117

Schwertmann, U. (1991). Solubility and dissolution of iron oxides. Plant and Soil, 130, 1–25. https://doi.org/10.1007/BF00011851

Silveira, M. L. A., Alleoni, L. R. F., & Guilherme, L. R. G. (2003). Biosolids and heavy metals in soils. Scientia Agricola, 60(4), 793–806. https://doi.org/10.1590/S0103-90162003000400029

Sing, R. A. (1980). *Soil Physical Analysis*. Kalyani Publishers, New Delhi, India.

Slimani, I., Zhu-Barker, X., Lazicki, P., & Horwath, W. (2023). Reviews and syntheses: Iron – a driver of nitrogen bioavailability in soils? Biogeosciences, 20, 3873–3894. https://doi.org/10.5194/bg-20-3873-2023

Sposito, G., Lund, L. J., & Chang, A. C. (1982). Trace metal chemistry in arid-zone field soils amended with sewage sludge: I. Fractionation of Ni, Cu, Zn, Cd, and Pb in solid phases. Soil Science Society of America Journal, 46(2), 260–264. https://doi.org/10.2136/sssaj1982.03615995004600020009x

Suarez, D.L. (1996). Beryllum, Magnesium, Calcium, Strontium, and Barium. Ik D. L. sparks (Ed.), methods of siil analysis: Part 3, chemical methods (SSSA Book Series No. 5, pp. 575-601). Soil Science society of America, Madison, Wi.

Tajouri, A. M., Taylor, P. R., Anderson, C., & Abozbeda, M. M. (2013). QEMSCAN analysis of Wadi-Shatti iron ore (Libya). In Materials Processing Fundamentals (pp. 243–247). Wiley. https://doi.org/10.1002/9781118662199.ch27

Colombo, C., Palumbo, G., He, J.-Z., Pinton, R., & Cesco, S. (2014). Review on iron availability in soil: Interaction of Fe minerals, plants, and microbes. Journal of Soils and Sediments, 14, 538–548. https://doi.org/10.1007/s11368-013-0814-z

Dane, J. H., & Hopmans, J. W. (2002). Water Retention and Storage. In J. H. Dane & G. C. Topp (Eds.), *Methods of Soil Analysis. Part 4: Physical Methods* (pp. 671–720). Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA.

Gotoh, S., & Patrick, W. H., Jr. (1974). Transformation of iron in a waterlogged soil as influenced by redox potential and pH. Soil Science Society of America Journal, 38(1), 66–71. https://doi.org/10.2136/sssaj1974.03615995003800010024x

Goudarzi, G. H. (1971). Geology of the Shati Valley Area iron deposit; Fezzan, Libyan Arab Republic. In Symposium on the Geology of Libya (pp. 489–500). University of Libya. https://pubs.usgs.gov/publication/70205367

Husson, O. (2013). Redox potential (Eh) and pH as drivers of soil/plant/microorganism systems: A transdisciplinary overview pointing to integrative opportunities for agronomy. Plant and Soil, 362, 389–417. https://doi.org/10.1007/s11104-012-1429-7

Ivezić, V., Singh, B. R., Almås, Å. R., & Lončarić, Z. (2011). Water extractable concentrations of Fe, Mn, Ni, Co, Mo, Pb and Cd under different land uses of Danube basin in Croatia. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B—Soil & Plant Science, 61*(8), 747–759. DOI: 10.1080/09064710.2011.557392

La Force, M. J., & Fendorf, S. (2000). Solid-phase iron characterization during common selective sequential extractions. Soil Science Society of America Journal, 64(5), 1608–1615. https://doi.org/10.2136/sssaj2000.6451608x

Rhoades, J. D. (1982). Soluble Salts. In A. L. Page, R. H. Miller, & D. R. Keeney (Eds.), *Methods of Soil Analysis. Part 2: Chemical and Microbiological Properties* (2nd ed., Agronomy Monograph No. 9, pp. 167–179). American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA.

475_490). Soil science society of America, Madison, Wl.

Zhang, H., & Wang, J. J. (2014). Loss on ignition method. In F.J. Sikora & K. P. Moore (Eds), soil test methods frim the Southeastern United States (Southern cooperative series bulletin No. 419, pp. 155-157).

Tessier, A., Campbell, P. G. C., & Bisson, M. (1979). Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals. Analytical Chemistry, 51(7), 844–851. https://doi.org/10.1021/ac50043a017

Thomas, G. W. (1996). Soil ph and soil acidity. In D. L. sparks (Ed), Methods of soil analysis: part 3-chemical methods (SSSA Book Series No. 5, pp.