جامعة حماه
كلية الهندسة الزراعية – السلمية
السنة الثالثة

المحاضرة النظرية الثامنة في خصوبة التربة وتغذية النبات

مقدّمة العناصر الصّغرى

Introduction to Microelements

إعداد: د. حيدر الحسن

3/6/2026

نباتات ذرة طبيعية، متوازنة المغذيات
(Zea mays L.) - الشاهد
نمو حيوي، محتوى عالٍ من الكلوروفيل، أوراق مورقة.

نباتات ذرة تعاني من نقص متعدد للعناصر
الصغرى (Zn، Mn، Fe) (Zea mays L.)
نمو متقزم بشدة، إصفرار حاد ومعقد بين العروق مع
خطوط بيضاء باهتة (Zn ، Mn ، Fe).

نباتات ذرة تعاني من نقص الحديد (Fe)
(نقص – (Zea mays L.)
إصفرار حاد بين العروق، نمو متقزم، أوراق صفراء باهتة.

تتطلب النباتات لإتمام دورة حياتها ستة عشر عنصراً غذائياً أطلق عليها تسمية عناصر التغذية الضرورية للنبات Essential Nutrient Elements For Plant Growth

حيث يحصل النبات على عنصرين من الهواء هما الكربون والأكسجين، وعنصرين من الماء (الهيدروجين والأكسجين) إضافة إلى العناصر الكبرى التي تم الحديث عنها في فصول سابقة (N – P – K – Ca – Mg - S)، وسبعة عناصر يحتاجها النبات بتراكيز منخفضة، وتتواجد في التربة أيضاً في حدود متدنية (من 1 -1000 مغ/كغ تربة)، أطلق عليها ما يسمى بالعناصر الصغرى Microelements أو Micronutrients وهي سبعة عناصر: (Fe – Mn – Cu – Zn – Mo – B – Cl).

تسلك العناصر الصغرى في أثناء وجودها في التربة وامتصاصها من قبل النبات سلوك العناصر الكاتيونية وذلك للعناصر (Fe – Mn – Cu – Zn)، والسلوك الأنيوني للعناصر (Mo – B). وبالرغم من أن النبات يحتاج لهذه العناصر في أثناء نموه وتطوره بكميات منخفضة جداً مقارنة مع العناصر الكبرى، إلا أنها لا تقل أهميةً عنها، وتبين الأبحاث أن هناك مجموعة أخرى من العناصر، أبدت بعض النباتات استجابة لوجودها في الوسط الغذائي مثل Na – V – Si – Cr – Ni – Co وغيرها.. حيث أطلق عليها تسمية العناصر النافعة (Beneficial Elements)، وهذه العناصر تندرج في بعض المراجع مع مجموعة العناصر الصغرى.

إن اكتشاف أهمية العناصر الصغرى بالنسبة للنبات كان في وقت متأخر جداً مقارنة مع اكتشاف أهمية العناصر الكبرى. فكان عنصر الحديد أول هذه العناصر التي أثبتت أساسيته للنبات عام ١٨٤٤. أما العناصر الصغرى الأخرى فتم اكتشافها منذ بداية القرن العشرين (المنغنيز عام ٩٠٥، الزنك عام ١٩١٤، البورون عام ١٩٢٣، النحاس عام ١٩٣٠، المولبدن عام ١٩٤٢). ومما سرّع بظهور أعراض نقص العناصر الصغرى، نظام الزراعة المكثفة، واستنباط هجن نباتية ذات متطلبات عالية من العناصر بشكل عام، وتطور طرائق تحليل التربة والنبات، وتصنيع أسمدة العناصر الكبرى بنقاوة عالية.

1. مصادر العناصر الصغرى في التربة:

١-١ مصادر معدنية:

تعد الصخرة الأم التي نشأت عنها التربة هي المصدر الأساس للعناصر الصغرى في التربة، ويتصف الحديد والمنغنيز بأنهما مكونين رئيسيين في التركيب البلوري للفلزات السيليكاتية، حيث يمكن أن يتم التبادل في بعض المواقع للزنك والكوبالت .

تخضع المعادن الأولية والثانوية لعمليات التجوية المختلفة مشكلة مركبات يمكن أن تزود محلول التربة بالعناصر الصغرى. ويبدو واضحاً تأثير محتوى القشرة الأرضية ببعض العناصر الصغرى في التربة الزراعية التي نشأت عنها. فكلما ارتفع تركيز العنصر في مادة الأصل، ارتفع تركيزه في التربة الناتجة عنها، وربما وصل تركيز العنصر في بعض الأحيان إلى حد التلوث به.

تعدّ الصخور الاندفاعية (البازلت، الغرانيت) مصدراً جيداً للعناصر الصغرى في التربة، ويكون البازلت أكثر غنىً بالعناصر الصغرى (Cu، Zn، Mn، Fe) كما تساهم الكبريتيدات (حيث يرتبط العنصر بالكبريت ذو رقم الأكسدة المنخفض S^{-2})، في أثناء تجويتها برفد التربة بهذه العناصر. ويعد الغرانيت أكثر غنىً بكل من البورون والمولبدن مقارنة مع البازلت، أما التركيز الأكبر لهذين العنصرين فيلاحظ في الصخور الرسوبية (صخر الشيل).

تتعرّض العناصر الصغرى الكاتيونية لعمليات الإدمصاص والترسيب، أمّا العناصر الصغرى الأنيونية كالبورات والمولبدات، فتسلك سلوكاً مشابهاً لشاردة الفوسفات من ناحية ادمصاصها وحركتها في التربة.

2 - مصادر عضوية:

تساهم المخلفات العضوية (نباتية، حيوانية) التي تضاف إلى التربة بشكل مباشر أو غير مباشر، بإغناء التربة بالمادة العضوية، وبالرغم من أن محتوى المادة العضوية من العناصر الصغرى ليس كبيراً، إلا أنها تعد المخزن الرئيس للعناصر الصغرى في التربة، ولهذا أهمية كبيرة في الترب **الرملية**.

حيث تتشكل معقدات عضوية معدنية تساهم في إتاحة هذه العناصر للنبات في أثناء تحللها في التربة.

ويلاحظ وجود ارتباط واضح بين محتوى التربة من المادة العضوية ومحتواها من العناصر الصغرى، ويعد عنصر **النحاس** من أكثر العناصر ارتباطاً بالمادة العضوية.

٢ - تفاعلات العناصر الصغرى المضافة إلى التربة:

تؤدّي إضافة أسمدة العناصر الصغرى إلى التربة إلى ارتفاع تركيزها، ولا يلبث أن ينخفض تركيز الشكل القابل للإفادة من قبل النبات، ويمكن تفهم ذلك من خلال العمليات التي تحدث ضمن مكونات التربة والتي تتمثل بالترسيب والادمصاص، وتكوين المعقدات العضوية.

٢-١ الترسيب Precipitation:

يحصل هذا النوع من التفاعلات عندما يكون **جداء تركيز الشوارد المشكّلة للراسب أكبر من جداء الانحلال للراسب أي:**

$$CM.CA > KSP$$

حيث:

CM : تركيز الشاردة المرسبة.

CA : تركيز العنصر.

KSP : جداء انحلال (ذوبان) المركب ضعيف الانحلال.

فمثلاً يحصل ترسيب للحديد على شكل $Fe(OH)_3$ عندما يزيد جداء تركيز الشوارد عن جداء انحلال الراسب $Fe(OH)_3$ أي:

$$C_{Fe^{+3}}.C^3_{OH^-} > 6.3 \times 10^{-29}$$

ويحصل هذا النوع من التفاعل بشكل عام في الترب التي يرتفع فيها الـ pH عن المتعادل.
ومن أهم العناصر الصغرى التي تترسب بهذه الطريقة: الحديد، الزنك، النحاس، حيث تترسب على شكل هيدروكسيدات، كربونات. أما في **الترب الغدقة**، فيمكن أن تترسب العناصر الصغرى على شكل كبريتيدات (مثل ZnS - CuS) وهذا يتوقف أساساً على جهد الأكسدة والإرجاع للتربة.

٢-٢ الادمصاص Adsorption:

ويحصل الادمصاص بشكل عام من خلال آليتين اثنتين:

تبادل كاتيوني Cation Exchange: ويتم هذا النوع من التبادل على سطوح معادن الطين السيليكاتية وجزيئات المادة العضوية.

ادمصاص كيميائي Chemisorption: ويحصل هذا الادمصاص على أسطح الأكاسيد المائية للحديد والمنغنيز والألمنيوم.

تبادل كاتيوني Cation Exchange:

تتصف الغرويات المعدنية السيليكاتية والعضوية بوجود شحنة سالبة تمكنها من جذب الكاتيونات إليها بقوى جذب كهرسالبة، ويمكن لهذه الكاتيونات أن تنزاح من على أسطح الغرويات لمعقد الادمصاص، ويحصل هذا الادمصاص في **الترب الحامضية**، **ويندر** انجذاب العناصر الصغرى الكاتيونية إلى سطح الغرويات في **الترب القاعدية** (إلا إذا ارتفع تركيزها ارتفاعاً كبيراً)، بسبب التنافس مع كاتيونات القواعد الأرضية على أسطح التبادل.

ب- ادمصاص كيميائي Chemisorption:

ويمكن أن يتم هذا النوع من الادمصاص بآلية الادمصاص الكاتيوني أو الأنيوني.

يحدث الادمصاص للعناصر النادرة على المجموعات الفعالة لأسطح الألومينوسيليكات غير المتبلورة، وعلى أسطح الأكاسيد والأكاسيد المائية للحديد والمنغنيز والألمنيوم، حيث تمتلك هذه المركبات مجموعات طرفية من شوارد الهيدروكسيل، ونميز في الادمصاص الكيميائي بين ادمصاص كاتيوني وادمصاص أنيوني.

- **ادمصاص كاتيوني:**

يحصل هذا النوع من الادمصاص للعناصر الصغرى الكاتيونية، حيث يتشرد الهيدروجين الطرفي لشوارد الهيدروكسيل المتوضعة على سطح الادمصاص، وتتشكل رابطة تساندية للعنصر مع الأوكسجين على سطح الأوكسيد في مجموعة الهيدروكسيل، ويمكن تمثيل ذلك كما يلي:

$$S-OH + M^{+n} \rightleftharpoons S-OM^{(n-1)+} + H^{+}$$

حيث S سطح الامتصاص.

ويمكن أن يتم ذلك لشاردتين من الأوكسجين:

$$2S-OH + M^{+n} \rightleftharpoons 2(S-O)M^{(n-2)+} + 2H^{+}$$

ويتصف هذا النوع من الادمصاص بأن التفاعل غالباً **غير عكسي**، كما ويتمتع بدرجة تخصص عالية للأوكسيد تجاه عنصر معين (كايتون) ويلاحظ أن شحنة الأكسيد تصبح أكثر كهرجابية.

يمكن ترتيب قوة ارتباط العناصر الصغرى ثنائية التكافؤ حسب ما يلي: $Ca > Ni > Co > Zn$

- **ادمصاص أنيوني:**

يحدث الادمصاص الأنيوني أيضاً للمعدن على أسطح المجموعات الفعالة(OH-) للفلزات الألومينو سيليكاتية غير المتبلورة والفلزات والأكاسيد المائية للحديد والمنغنيز والألمنيوم. ولكن هذا الادمصاص يتم بآلية أخرى، حيث تتشرد مجموعة الهيدروكسيل وتحل محلها شاردة المعدن السالبة كما في التفاعل:

$$S - OH + A^{-n} \rightleftharpoons S - A^{(n-1)^-} + OH^-$$

أو تنفصل شاردتي هيدروكسيل ليحل محلها المعدن:

$$2S - OH + A^{-n} \rightleftharpoons 2SA^{(n-2)^-} + 2OH^-$$

يتميز الادمصاص الأنيوني بأنه غير عكسي، وبدرجة تخصص عالية للأوكسيد تجاه أنيون معين، ويتصف هذا الادمصاص بأن شحنة سطح الأوكسيد تصبح أكثر كهرسلبية.

٣-٢- تشكّل معقّدات عضوية:

تشكّل المادة العضوية في التربة معقدات عضوية معدنية، والمجموعات الفعالة لتشكيل هذه المعقدات هي مجموعة الكربوكسيل والفينول والسلفونيل وغيرها، وإن كان أكثرها شيوعاً مجموعتي الكربوكسيل والفينول اللتان تشكلان المعقد العضوي المعدني **(الشيلاتي)**.

إنّ درجة ثبات المعقدات العضوية المعدنية يتأثر بعدة أمور من أهمها: ثابت التفكك أو التشكل للمعقد العضوي المعدني، ودرجة PHالتربة، وتركيز الكاتيونات الأخرى في محلول التربة.

ويمكن تمثيل التفكك بين المعقد العضوي والمعدن كما يلي:

$$MO \underset{k_2}{\overset{k_1}{\rightleftarrows}} M + O$$

حيث:

MO:المعقد العضوي المعدني (الشيلاتي).

M:الجزء المعدني.

O:الجزء العضوي.

K1: ثابت التفكك للمعقد العضوي المعدني

K2: ثابت التشكل للمعقد العضوي المعدني

ويلاحظ أن: إذا كان **ثابت التفكك K1 أصغر** من ثابت التشكل كلما اتجه التفاعل بالاتجاه العكسي (أي تشكل المعقد الشيلاتي).

إذا كان ثابت التفكك K1 أكبر من ثابت التشكل كلما اتجه التفاعل بالاتجاه المباشر (أي يتفكك المعقد الشيلاتي وتقل ثباتيته).

- يمكن أن يترسب العنصر عند ارتفاع pH الوسط على شكل هيدروكسيل مثلاً $M(OH)_n$ وبالتالي ينخفض تركيز **الشاردة M** وهذا يؤدي إلى أن جداء تركيز الشاردة مضروباً بتركيز المعقد العضوي تنخفض عن قيمة ثابت التشكل أي:

$$K_2 > C_M . C_O$$

- وبالتالي يمكن القول بأن ثبات المعقد العضوي يتعلّق بتركيز المعدن، وقدرته على المنافسة، وبقيمة كل من ثابتي التشكل والتفكك وpH التربة. ويمكن ترتيب ثبات المعقدات العضوية مع بعض العناصر الصغرى كما يلي: Cu > Ni > Co > Zn > Mn

٣- الترب التي يظهر فيها أعراض نقص العناصر الصغرى:

- **الترب الرملية:** تُعدّ هذه الترب فقيرة وراثياً بجميع العناصر (الكبرى والصغرى)، لأنها تتشكل أساساً من معادن أولية، كما ينخفض فيها تركيز المادة العضوية.
- **الترب الحامضية المغسولة:** **يرتفع** تركيز العناصر الصغرى عادةً في مثل هذه الترب **(عدا المولبدن)**، حيث تكون أكثر ذوباناً تحت هذه الظروف، ويرجع **فقر** هذه الترب بالعناصر الصغرى أساساً إلى حركة الماء ضمن مقطع التربة حيث **تُغسل** إلى الطبقات السفلى.
- **الترب الكلسية والقلوية والحامضية المستصلحة بإضافة الكلس إليها بكميات كبيرة:** إن ظهور أعراض نقص العناصر الصغرى في هذه الترب **(عدا المولبدن)**، لا يعزى لفقرها بالعناصر الصغرى، إذ تحتوي هذه الترب في معظم الأحيان على تراكيز مرتفعة من العناصر الصغرى، إلا أن معظمها يكون **غير قابل للامتصاص** من قبل النبات حيث يتم تثبيتها على شكل هيدروكسيدات وأكاسيد وكربونات.....

- **الترب العضوية:** ينخفض تركيز الأشكال المتاحة من العناصر الصغرى **(النحاس خاصة)**، بسبب تعرّض الأشكال الذائبة للمواد العضوية للغسل من جهة، ومن جهة أخرى ينخفض محتواها من الأشكال الفلزية التي تساهم في إمداد محلول التربة بالعناصر الصغرى.

إنّ عملية التوازن الكيميائي للعناصر الصغرى ما بين محلول التربة ومكوّنات التربة هي عملية معقدة، وإن تركيز العنصر في محلول التربة، أو ضمن مكونات أخرى في التربة، ما هو إلا محصلة لتوازنه بين كل من معادن الطين، والمادة العضوية، والأكاسيد المائية للحديد والمنغنيز والألمنيوم، والمعقدات الذائبة والتي تتأثر بعوامل عديدة منها:

٤-١- تأثير pH التربة:

تعدّ **درجة تفاعل التربة** من أهم العوامل تأثيراً في حركية العناصر الصغرى في التربة. ولا يقتصر دور الـ pH في التأثير المباشر في إذابة وترسيب العناصر الصغرى في التربة، وإنما لتأثيره غير المباشر أيضاً في كثير من تفاعلات تكوين معقدات المادة العضوية والادمصاص، وتفاعلات الأكسدة والإرجاع. **ويزداد ذوبان العناصر الصغرى الكاتيونية في الترب الحمضية**، ويمكن أن يصل تركيز هذه العناصر في بعض الأحيان إلى **حد السمية**. وبشكل عام **ينخفض** ذوبان جميع العناصر الصغرى (عدا المولبدن)، بارتفاع رقم تفاعل التربة، حيث تتشكل مركبات ضعيفة الذوبان في الماء (هيدروكسيدات، كربونات، فوسفات). **فمثلاً تتحول شاردة الحديد الثلاثي إلى مركب ضعيف الانحلال بالماء (هيدروكسيد الحديد)، من خلال المراحل التالية:**

$$Fe^{+3} + 2H_2O \rightleftarrows Fe(OH)^{+2} + H_3O^+$$

$$Fe(OH)^{+2} + 2H_2O \rightleftarrows Fe(OH)_2{}^{+} + H_3O^+$$

$$Fe(OH)_2{}^{+} + 2H_2O \rightleftarrows Fe(OH)_3 + H_3O^+$$

تشكّل جميع العناصر الصغرى الكاتيونية **هيدروكسيدات وكربونات العناصر** الموافقة لها، وهي مركبات **ضعيفة الانحلال بالماء**، إلاّ أن انحلاليتها تكون بدرجات مختلفة، وهذا الأمر يمكن ملاحظته حتى ضمن العنصر الواحد، فمثلاً تكون هيدروكسيدات المعادن (Mn، Fe)، عند أرقام أكسدتها المرتفعة أصعب ذوباناً من هيدروكسيداتها عند أرقام الأكسدة الأقل للعنصر المشكل لها، لذلك نجد أن انحلالية $Fe(OH)_3$ أقل بكثير من انحلالية $Fe(OH)_2$.

٢-٤- تأثير ظروف الأكسدة والإرجاع في التربة:

ترتبط الظروف المؤكسدة والمرجعة في التربة ارتباطاً وثيقاً **بمحتواها من الرطوبة**، والتي تؤثر تأثيراً كبيراً في ذوبان وإتاحة العناصر الصغرى. وتسود عند ارتفاع محتوى التربة من الرطوبة عمليات الإرجاع (ظروف **غدقة**)، وينخفض جهد الأكسدة والإرجاع للتربة، بينما يرتفع جهد الأكسدة والإرجاع في الترب جيدة التهوية.

ويُعبّر عن جهد الأكسدة والإرجاع **بالميليفولت**، حيث يتراوح جهد الأكسدة والإرجاع من +700 ميليفولت في الترب جيدة التهوية، إلى -300 ميليفولت في الترب الغدقة جداً.

تتواجد العناصر الصغرى الكاتيونية **(Cu، Mn، Fe،)** في الظروف الغدقة، بدرجات أكسدة منخفضة، وتختلف درجة ذوبان العناصر الصغرى متعددة التكافؤ **(كالحديد والمنغنيز)**، حيث تزداد درجة ذوبانها مع انخفاض جهد الأكسدة والإرجاع، وربما وصل تركيزها إلى تركيزات سامة. وعلى العكس تماماً فإن العناصر الصغرى **(Cu، Ni، Co، Zn)** تنخفض إتاحتها حيث تترسب على شكل كبريتيدات ضعيفة الذوبان في الماء.

أمّا في ظروف التهوية الجيدة للتربة، فتتواجد العناصر الصغرى الكاتيونية بدرجات أكسدة أعلى، وتكون **غير متاحة للامتصاص** من قبل النبات وخاصة إذا ما ترافق ذلك **بارتفاع pH التربة**.

٣-٤- تأثير المادة العضوية:

يؤثر محتوى التربة من المادة العضوية تأثيراً كبيراً في حركية وإتاحة العناصر الصغرى للنبات. وقد اختلفت الآراء كثيراً حول تأثير المادة العضوية في إتاحة العناصر الصغرى، ويرجع هذا التباين في كثير من الأحيان، إلى سلوك مكونات المادة العضوية في التربة.

تتكوّن المادة العضوية في التربة من مجموعة من المركبات العضوية، غير المعروف تركيبها بشكل كامل. ومن المركبات العضوية التي تحظى بأهمية كبيرة في التربة: **الهيومين والحموض الهيومية** وهي ذات أوزان جزيئية مرتفعة، **والحموض الفولفية** ذات الأوزان الجزيئية المنخفضة نسبياً (مقارنة مع الأحماض الهيومية)، إضافة إلى مركبات أخرى ذات أوزان جزيئية منخفضة كالمركبات البروتينية، والأحماض الأمينية. وأحماض السيتريك والطرطريك وغيرها.

ترتبط كاتيونات العناصر النادرة الكاتيونية في هذه المركبات العضوية **مشكلة معقدات عضوية معدنية** والتي تدعى **بالشيلات أو المخلبيات Chelates** ويسمّى الجزء العضوي فقط من الشيلات **بالعامل الشيلاتي (Chelating agent).**

ترتبط المعادن في الشيلات ارتباطاً قوياً، حيث يشغل كاتيون العنصر **مركز جزيئة الشيلات، ويرتبط معها بروابط قوية (مشتركة وتساندية)**، إذ تمكن طريقة الربط هذه، حماية المعدن من الدخول في تفاعلات **تقلل من عدم إتاحته في التربة.**

تشكّل الأحماض **الفولفية** مع كاتيونات العناصر النادرة **مخلبيات تكون ذائبة** في الظروف الحمضية والقلوية على السواء، لذلك فهي تؤدي دوراً هاماً في تغذية النبات بالعناصر الصغرى الكاتيونية (بالإضافة إلى المركبات العضوية الأخرى الذوابة)، كما أن تجمعها لا يحدث إلاّ عند وجود تركيزات مرتفعة من الإلكتروليتات في محلول التربة، ولهذا تبقى **بحالة ذائبة في محلول التربة**، ويمكن أن تُغسل من التربة أيضاً.

أمّا **أحماض الهيوميك**، فهي تشكل أيضاً شيلات مع العناصر النادرة الكاتيونية، ويزداد ذوبانها عند pH أكبر من 7 ، إلاّ أن هذه المركبات تسلك سلوك الغرويات، وبذلك تكون قابليتها للتجمع كبيرة، بفعل أيونات الكالسيوم والمغنزيوم في الترب القاعدية، وبتأثير الحديد والألمنيوم في الترب الحامضية. لذلك يُنظر للحموض الهيومية على أنها **مخزن** للكثير من العناصر النادرة في التربة.

يتشكّل العامل الشيلاتي في التربة، كما ويتشكل في جذور النباتات، **وتتمثل الآلية الرئيسية لتزويد المركبات الشيلاتية النبات بالعناصر الصغرى**، بأن ينجذب المركب الشيلاتي باتجاه جذر النبات خلال حركته مع ماء التربة، إلى الفراغات البينية لخلايا الجذر حيث يتم امتصاص الكاتيون من خلال الأقنية الخلوية للجذر، ثم يرتبط ارتباطاً عضوياً على شكل شلات ضمن النبات، ثم ينتقل إلى جميع أجزاء النبات. بينما يتحرك العامل الشيلاتي بعيداً عن جذر النبات ليقوم بربط كاتيون آخر من جديد.

تنتج الصناعة حالياً أنواعاً عديدة من شيلات العناصر الصغرى الكاتيونية، وتتعلّق فعالية هذه الشيلات، بقدرتها على الثبات في ظروف التربة، **كما يؤثر في درجة ثبات هذه المركبات عوامل عديدة منها:** نوع الشاردة المعدنية، العامل الشيلاتي، درجة pH التربة. وتُعدُّ شلات الحديد هي الأكثر ثباتاً من بين شيلات كاتيونات العناصر الصغرى الأخرى، تليها شيلات النحاس والزنك، بينما لا تشكل المعقدات العضوية مع **المنغنيز** معقدات ثابتة بدرجة كافية من الناحية العلمية.

٤-٤- التوازن بين العناصر وتأثيرها المتبادل: تتطلب النباتات وجود تراكيز متوازنة من العناصر الأساسية في التربة لتحقيق نموها وتطورها بشكل أمثل. وقد يكون إيجاد نوع من التوازن بين العناصر الكبرى أمراً يمكن تحقيقه إلى حدٍّ ما. **أما في حالة العناصر الصغرى، فإن تحقيق التوازن يكون أكثر صعوبة لأسباب عديدة منها:** يكون تركيز هذه العناصر في التربة منخفض جداً، كما أنها تختلف كثيراً في حركتها وانتقالها في التربة. أمّا فيما يتعلق بظاهرتي التضاد Antagonism والتآزر Synergism، فيلاحظ وجود تأثير متبادل فيما بين العناصر الصغرى من جهة، وبين العناصر الصغرى والكبرى من جهة أخرى.

٥- العناصر الصغرى وتغذية النبات:

إن توفّر العناصر الصغرى في وسط النمو، يترافق بامتصاص النبات لهذه العناصر.

وتختلف النباتات اختلافاً كبيراً في احتياجاتها من العناصر الصغرى.

وتظهر أعراض نقص العنصر عند انخفاض تركيزه عن حد معين في أنسجة النبات.

ومع ارتفاع تركيزه في أنسجة النبات، تزول الأعراض الظاهرية للنقص، ويبقى النبات يعاني من نقص العنصر في أنسجته، وبالرغم من عدم ظهور أعراض النقص عليه؟،

ويسمى النقص في هذه الحالة **بالجوع الخفي Hidden Hunger**.

وينمو النبات نمواً طبيعياً، بوصول تركيز العنصر في النبات إلى حد (أو مجال)، الكفاية.

وبزيادة تركيز العنصر في أنسجة النبات، تبدأ معاناة النبات حيث ينخفض المحصول (دون ظهور أعراض تسمم ظاهرية عليه)،

فإذا ما زاد التركيز عن حد معين، تبدأ عندها **أعراض التسمم** على النبات بالظهور.

تختلف حساسية النباتات لظهور أعراض النقص أو التسمم بالعناصر الصغرى بحسب عوامل عديدة منها:

نوع العنصر – النوع النباتي – الصنف ضمن النوع النباتي. ويوضح الجدول (١٠-١) المحتوى القياسي للعناصر الصغرى ضمن أوراق النبات.

جدول رقم (١٠-١٠): المحتوى القياسي للعناصر الصغرى في أوراق النبات(مغ/كغ مادة جافة).

العنصر	مستوى النقص	مستوى الكفاية	مستوى السميّة	مستوى التحمّل
Fe	50-20	200-50	1000-300	200
Mn	30-10	300-30	1000-400	300
Zn	20-10	150-27	400-100	300
Cu	5-2	30-5	100-20	50
B	30-5	300-30	200-50	100
Mo	0.3-0.1	5-0.2	50-10	.....

المصدر: Kabate – Pendias and Pendias، 1992

الحديد

The Iron

تكمن أهمية عنصر الحديد، كأحد أهم العناصر الصغرى المغذية للنبات، في دوره الفيزيولوجي الهام في النبات، ولسلوكه المعقد في التربة من ناحية حركته وامتصاصه من قبل النبات. إن أعراض نقص عنصر الحديد تمت ملاحظتها في سورية في منتصف القرن الماضي على العديد من الأشجار المثمرة والمحاصيل، وبخاصة في الأراضي الكلسية، حيث شكلت مشكلة حقيقية تمثلت في انخفاض الإنتاج كماً ونوعاً.

١- الحديد في التربة:

يشكّل الحديد ما نسبته **34%** من كتلة الأرض، ومتوسط تركيزه في القشرة الأرضية حوالي 5.6%، أما متوسط تركيز **الحديد الكلي** في التربة فيساوي **حوالي 5% (0.5-10%)**، وتعد الصخور البازلتية غنية جداً بهذا العنصر، بينما يقل تركيز عنصر الحديد في الصخور الرملية.

وبالرغم من ارتفاع تركيز الحديد الكلي في التربة، إلا أن ذلك لا يُعد مؤشراً على توفره في التربة بأشكال متاحة للامتصاص من قبل النبات، إذ أن هناك العديد من العوامل الأرضية التي من شأنها خفض تركيز الحديد القابل للإفادة من قبل النبات.

١-١ أشكال الحديد في التربة:

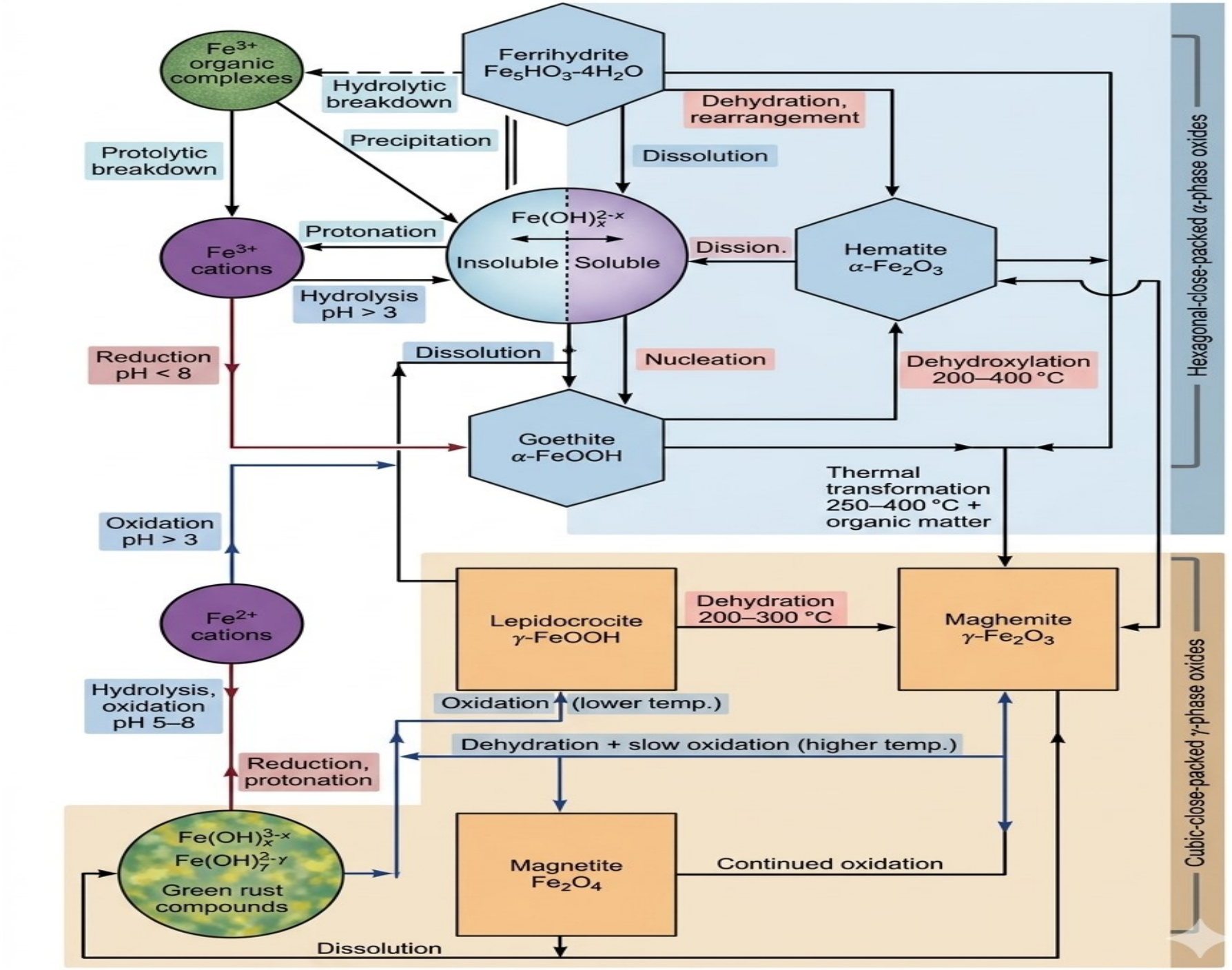
الحديد الفلزي:

يمثل هذا الشكل الجزء الأعظم من حديد التربة ويُعد من الأشكال غير القابلة للامتصاص من قبل النبات ويضم:

- **حديد الفلزات الأولية Primary minerals – Iron:** ويشمل الحديد الموجود في بعض الفلزات السيليكاتية مثل الأمبيفولات كالأوجيت (Augite) والهوربنلند (Hornblend)، والميكا كالميكابيوتيت (Meca - Biotite)، وكذلك في الأوليفينات مثل الأوليفين (Olivine). وبشكل عام تتوضع هذه الفلزات **في الجزء الخشن من التربة** وهي فلزات مقاومة للتعرية.

- حديد الفلزات الثانوية Secondary minerals – Iron: وتنتج عن تعرية مجموعة الفلزات الأولية، **وتتوضع بشكل عام في الجزء الناعم من التربة وأهمها:**
- الجيوتيت (α-FeOOH) ينتشر هذا الفلز عادةً في ترب المناطق الرطبة حيث يضفي اللون البني المصفر على هذه الترب.
- الهيماتيت Hematite (α-Fe2O3): يعد هذا الفلز صفة مميزة للترب المنتشرة في **المناطق الجافة وشبه الجافة** ذات الألوان الحمراء التي يتميز بها هذا الفلز.
- الماغميتMaghemit (-Fe2O3Y): يتشكل هذا الفلز في المناطق الاستوائية.
- الليبيدوكروسيت (Lipedocorocite) : يتشكل هذا الفلز في ظروف **الغدق** ومما يساعد على تشكله انخفاض pH التربة وانخفاض درجات الحرارة أيضاً ويعطي التربة **اللون البرتقالي.**
- فيريهدريت Ferrihydrite (Fe5HO8.4H2O): يتميز هذا الفلز بعدم استقراره في التربة، إذ يمكن أن يتحول إلى هيماتيت في ترب المناطق الحارة، وإلى غوتيت في ترب المناطق الباردة.
- ويمكن أيضاً أن يتواجد الحديد في التربة بأشكال أخرى (سلفيدات، فوسفات، كربونات) ويبين الشكل (١١-١) الطرائق الشائعة لتشكل أكاسيد الحديد وتحولاتها في التربة.

الشكل (١): الطرائق الشائعة لتشكل أكاسيد الحديد وتحولاتها في التربة



Common pathways of iron oxide formation and transformation

الحديد الذواب:

ينخفض محتوى التربة من الحديد الذواب انخفاضاً كبيراً مقارنةً مع محتواها من الحديد الكلي، ويقع تركيز **هذا الشكل بين (0.001 -1 مغ/كغ تربة)**، ويعدّ هذا الشكل (العضوي واللاعضوي) من الأشكال المتاحة للامتصاص مباشرةً من قبل النبات (Hallen، 2000).

إنّ تركيز الحديد الذواب يتأثر سلباً بـ pHالتربة، ويتأثر الشكل الثنائي أو الثلاثي للحديد، بجهد الأكسدة والإرجاع للتربة. ويلاحظ **انخفاض** تركيز هذا الشكل بزيادة تركيز **المادة العضوية** في التربة، كما ويرتفع تركيزه في ترب المناطق ذات الهطولات المطرية المرتفعة مقارنةً مع ترب المناطق الأقل، ويلاحظ أيضاً **ارتفاع** تركيزه في الآفاق السطحية مقارنةً مع الآفاق الأكثر عمقاً. وتشير الدراسات إلى أن ظاهرة **الشحوب الكلسي** التي تظهر في **الأراضي الكلسية**، كانت مرتبطة إلى حد كبير بانخفاض تركيز هذا الشكل والمترافق مع ارتفاع تركيز **كربونات الكالسيوم** في التربة.

لا يشكّل الحديد اللاعضوي الذواب في التربة إلا نسبة قليلة جداً (0.01– 150 مغ/كغ)، ولا يعد وحده مصدراً لتغذية النبات بعنصر الحديد إلا في الأوساط الحامضية الشديدة (pH = 3)، إذ ينخفض تركيزه حوالي 100 مرة عند ارتفاع pH التربة بمقدار درجة واحدة (من3-4)، وينخفض انخفاضاً كبيراً في الأوساط الحامضية الخفيفة إلى المتعادلة بمقدار 100.000 مقارنة مع تركيزه عند pH = 3 والذي يساوي حوالي 10^{-6}مول/ل، وهو التركيز الملائم لنمو النبات (Linsay).

يوجد الحديد اللاعضوي الذواب في التربة على شكل أيونات ذائبة مثل $Fe(OH)^{+2}$، Fe^{+2}، Fe^{+3}، $Fe(OH)_4^-$، $Fe(OH)_2^+$ وهي في حالة توازن مع ماءات الحديد في التربة والتي بدورها تكون في حالة توازن أيضاً مع الأشكال المختلفة لمركبات الحديد في التربة، والتي تتأثر بمجموعة من العوامل.

تحولات الحديد اللاعضوي في التربة:

تعدّ **عملية تحولات الحديد اللاعضوي في** التربة من العمليات المعقدة جداً، **وترتبط بعوامل كثيرة لعل من أهمها:** pH التربة – جهد الأكسدة والإرجاع – وضغط CO_2 في التربة .... – **ومن الأمثلة على هذه التحولات نذكر:**

نظام تشرد ماءات الحديد $Fe(OH)_3$ وعلاقتها بـ pH التربة

يتواجد الحديد الثلاثي في الترب جيدة التهوية، وتكون الأشكال المختلفة لذوبان $Fe(OH)_3$ متعلقة بدرجة حلمهة $Fe(OH)_3$. **والتي تتم على ثلاث مراحل.**

-أكثر الشوارد تأثراً بارتفاع درجة الـ pH هي الشاردة Fe^{+3} لأن تركيزها يتناسب طرداً مع مكعب تركيز شوارد الهيدروجين. تليها الشاردة $Fe(OH)^{+2}$ أما أقل الشوارد تأثراً فهي الشاردة $C_{Fe(OH)_2^+}$

- ينخفض تركيز جميع الشوارد السابقة بانخفاض تركيز شوارد الهيدروجين (ارتفاع pH التربة).

يتواجد الحديد الثلاثي في الترب جيدة التهوية، وتكون الأشكال المختلفة لذوبان $Fe(OH)_3$ متعلقة بدرجة حلمهة $Fe(OH)_3$. والتي تتم على ثلاث مراحل ولكل مرحلة ثابت توازن k:

$$Fe(OH)_3 \leftrightarrows Fe(OH)_2^+ + OH^- \quad \ldots\ldots\ldots \quad (1)$$
$$k_1 = 6.5 \times 10^{-7}$$

$$Fe(OH)_2^+ \leftrightarrows Fe(OH)^{+2} + OH^- \quad \ldots\ldots\ldots \quad (2)$$
$$k_2 = 4.9 \times 10^{-10}$$

$$Fe(OH)^{+2} \leftrightarrows Fe^{+3} + OH^- \quad \ldots\ldots\ldots \quad (3)$$
$$k_3 = 2.6 \times 10^{-12}$$

من العلاقة (1) نجد أن:

من العلاقة (1) نجد أن:

$$k_1 = C_{Fe(OH)_2^+} . C_{OH^-} \Rightarrow C_{Fe(OH)_2^+} = \frac{k_1}{C_{OH^-}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (4)$$

وبما أن:

$$k_w = C_{H3O^+} . C_{OH^-} \Rightarrow C_{OH^-} = \frac{k_w}{C_{H3O^+}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (5)$$

نبدل قيمة C_{OH^-} في العلاقة (5) في العلاقة (4):

$$C_{Fe(OH)_2^+} = \frac{k_1 . C_{H3O^+}}{k_w} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (6)$$

من العلاقة (2) نجد أن:

$$k_2 = \frac{C_{Fe(OH)^{+2}} . C_{OH^-}}{C_{Fe(OH)_2^+}}$$

بتبديل C_{OH^-} بقيمتها في العلاقة (5) وبتبديل $C_{Fe(OH)_2^+}$ بقيمتها من العلاقة (6) نجد:

$$Fe(OH)^{+2} = \frac{k_1 . k_2 . c_{H3O^+}^2}{k_w^2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (7)$$

من العلاقة (3) نجد أن:

$$k_3 = \frac{C_{Fe^{+3}} . C_{OH^-}}{C_{Fe(OH)^{+2}}}$$

بتبديل C_{OH^-} بقيمتها في العلاقة (5) وبتبديل $Fe(OH)^{+2}$ بقيمتها في العلاقة (7) نجد:

$$C_{Fe^{+3}} = \frac{k_1 . k_2 . k_3 . c_{H3O^+}^3}{k_w^3} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (8)$$

نظام تشرد ماءات الحديدي $Fe(OH)_2$ وعلاقتها بـ pH التربة:

تتشرد ماءات الحديدي على مرحلتين كما يلي:

$$Fe(OH)_2 \leftrightarrows Fe(OH)^+ + OH^- \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (1) \quad k_1$$

$$Fe(OH)^+ \leftrightarrows Fe^{+2} + OH^- \quad \ldots\ldots\ldots\ldots (2) \quad k_2$$

من العلاقة (1) نجد: أن: $k_1 = C_{Fe(OH)^+}.C_{OH^-} \Rightarrow C_{Fe(OH)^+} = \frac{k_1}{C_{OH^-}}$ ..... (3)

وبتبديل قيمة $C_{OH^-} = \frac{k_w}{C_{H3O^+}}$ في العلاقة (3) نجد: $C_{Fe(OH)^+} = \frac{k_1.C_{H3O^+}}{k_w}$ ..... (4)

من العلاقة (2) نجد أن: $k_2 = \frac{C_{Fe^{+2}}.C_{OH^-}}{C_{Fe(OH)^+}}$ ..... (5)

بتبديل C_{OH^-} بقيمتها في (5) وقيمة $C_{Fe(OH)^+}$ من العلاقة (4) نجد:

$$C_{Fe^{+2}} = \frac{k_1.k_2.c_{H3O^+}^2}{k_w^2}$$

نستنتج مما سبق أن كلا الشاردتين تتأثران بارتفاع pH التربة ويكون تأثر الشاردة Fe^{+2} أكبر من تأثر الشاردة $Fe(OH)^+$.

نظام تشرد السيدريت $FeCO3$ (كربونات الحديدي):

يمكن كتابة ثابت التوازن كما يلي:

$$FeCO3 \leftrightarrows Fe^{+2} + CO3^{-2}$$

لكن تركيز الشاردة $CO3^{-2}$ يتعلق بتوازنه مع $CO2$ في محلول التربة أي:

$$CO3^{-2} + 2H^{+} \leftrightarrows CO2 + H2O$$

تبين التفاعلات السابقة أن انخفاض ضغط غاز $CO2$ يمكن أن يوجه التفاعل بالاتجاه المباشر أي نحو تشكيل Fe^{+2} بينما يتجه التفاعل بالاتجاه العكسي عند ارتفاع ضغط $CO2$.

نظام السيدريت $FeCO3$ والليمونيت Fe_2O_3

يتأثر التحول للحديد الثنائي في فلز السيدريت إلى ثلاثي في فلز الليمونيت **بظروف التهوية والغدق في التربة** ويمكن تمثيل هذا التحول كما يلي:

$$2FeCO3 + H2O \leftrightarrows Fe2O3 + 2CO2 + 2H^+$$

يجري التفاعل بالاتجاه المباشر في ظروف التهوية (انخفاض CO_2)، وكذلك ارتفاع pH التربة (انخفاض تركيز شوارد الهيدروجين)، بينما يؤدي ارتفاع ضغط CO_2 وانخفاض pH التربة إلى سيادة عملية الإرجاع (التفاعل العكسي)، والتي تسهم فيه بكتريا لا هوائية في التربة.

- **الحديد المتبادل:**

ينخفض محتوى التربة كثيراً من الحديد المتبادل بسبب **الانخفاض النسبي** لهذه الشوارد مع الكاتيونات المتبادلة في التربة (الكالسيوم والمغنزيوم في الترب القاعدية، والألمنيوم والهيدروجين في الترب الحمضية)، إلاّ أنه يمكن أن يحصل وجود تركيز مرتفع نسبياً من الحديد الثنائي بشكل متبادل عند ارتفاع تركيزه وخاصة في الترب الحامضية الغدقة.

- **الحديد العضوي:**

يتشكّل في التربة معقدات عضوية معدنية مع الحديد **(شيلات)**، وتنشأ هذه الشيلات بارتباط الحديد بشكل مخلبي مع المكونات العضوية للتربة من مادة عضوية ودبال من جهة، وكذلك ما تنتجه بعض أنواع البكتيريا والفطور وجذور النباتات من جهة أخرى.

وتختلف هذه المعقدات العضوية المعدنية اختلافاً كبيراً عن بعضها البعض في قوة تثبيتها لعنصر الحديد، وكذلك من حيث حركتها وقدرتها على إمداد جذور النباتات بعنصر الحديد.

ففي حين نجد أن **الحموض الهيومية** ذات الأوزان الجزيئية المرتفعة تميل لأن تترسب بفعل تأثير كهرليتات التربة، وتكون أحماض الفولفيك ذات الأوزان الجزيئية المنخفضة نسبياً مقارنة مع الحموض الهيومية، أكثر ذوباناً في محلول التربة، إلاّ أن الشكل العضوي للحديد القابل لإفادة النبات مباشرة، يكون مرتبطاً بسلاسل عضوية قصيرة السلسلة كالأوكزالات والسترات والطرطرات وغيرها.

إلاّ أن الأهم من هذه المركبات العضوية قصيرة السلسلة مع الحديد هي **مركبات sederophores**، المشتقة من ارتباط الحديد الثلاثي مع حمض الهيدروكساميك ذو الصيغة R-CO-NH-OH.

وتشكل مركبات sederophores معقدات ثابتة مع عنصر الحديد في **الأوساط القاعدية**، وهي مركبات ذوّابة سهلة الحركة وتنتشر مع حركة الماء في التربة ولهذه المركبات القدرة على إذابة الحديد حتى من مركباته اللاعضوية غير الذوابة. ويساهم في تشكيل هذه المركبات بعض مجموعات البكتيريا والفطور في التربة والمفرزات الجذرية للنباتات.

2.بعض العوامل المؤثرة في إتاحة الحديد في التربة:

أ- تأثير درجة تفاعل التربة (pH) وجهد الأكسدة والإرجاع (Eh):

يُعدّ هذان العاملان من أهم العوامل تأثيراً في ثبات واستقرار الأشكال المختلفة للحديد في التربة. وتأثيرهما سينعكس على أحياء التربة وتجوية الحبيبات الناعمة، حيث يزداد هذا التأثير بانخفاض درجة تفاعل التربة وانخفاض جهد الأكسدة والإرجاع فيها، ويمكن أن يزداد تركيز **الحديد الثنائي** تحت هذه الظرف ويمكن أن يصل تركيزه في بعض الأحيان إلى حد السمية للنبات

وذكر سابقاً، أن ارتفاع pH التربة بمقدار درجة واحدة (من ٣-٤)، يؤدي إلى خفض تركيز الأشكال الذوابة للحديد اللاعضوي (Fe^{+2} Fe^{+3}،) بمقدار ١٠٠ مرة، وهذا الانخفاض يزداد كثيراً جداً كلما **ارتفع pH التربة**، ويُفسّر ذلك بتشكيل الأكاسيد المائية المختلفة للحديد.

وفي حالة شوارد الحديد الثلاثي فإنها تترسب على شكل $Fe(OH)_3$ من خلال ثلاث مراحل كما يلي:

$$Fe^{+3} + OH^- \rightleftarrows Fe(OH)^{+2}$$

$$Fe(OH)^{+2} + OH^- \rightleftarrows Fe(OH)_2^+$$

$$Fe(OH)_2^+ + OH^- \rightleftarrows Fe(OH)_3$$

ومن ناحية أخرى، تؤدي ظروف الغدق المترافقة مع استهلاك لشوارد الهيدروجين في التربة، إلى إرجاع الأشكال غير المنحلة لأكاسيد الحديد المائية الثلاثية إلى أشكال منحلة على شكل حديد ثنائي:

$$Fe(OH)_3 + 3H3O^+ \rightleftarrows Fe^{+2} + 6H2O$$

ويمكن أن تتحول شوارد الحديد الثلاثي إلى حديد ثنائي حسب التفاعل:

$$Fe^{+3} + e^- \rightarrow Fe^{+2}$$

أما في ظروف الأكسدة، فيتحول الحديد الثنائي إلى ثلاثي كما يلي:

$$Fe^{+2} - e^- \rightarrow Fe^{+3}$$

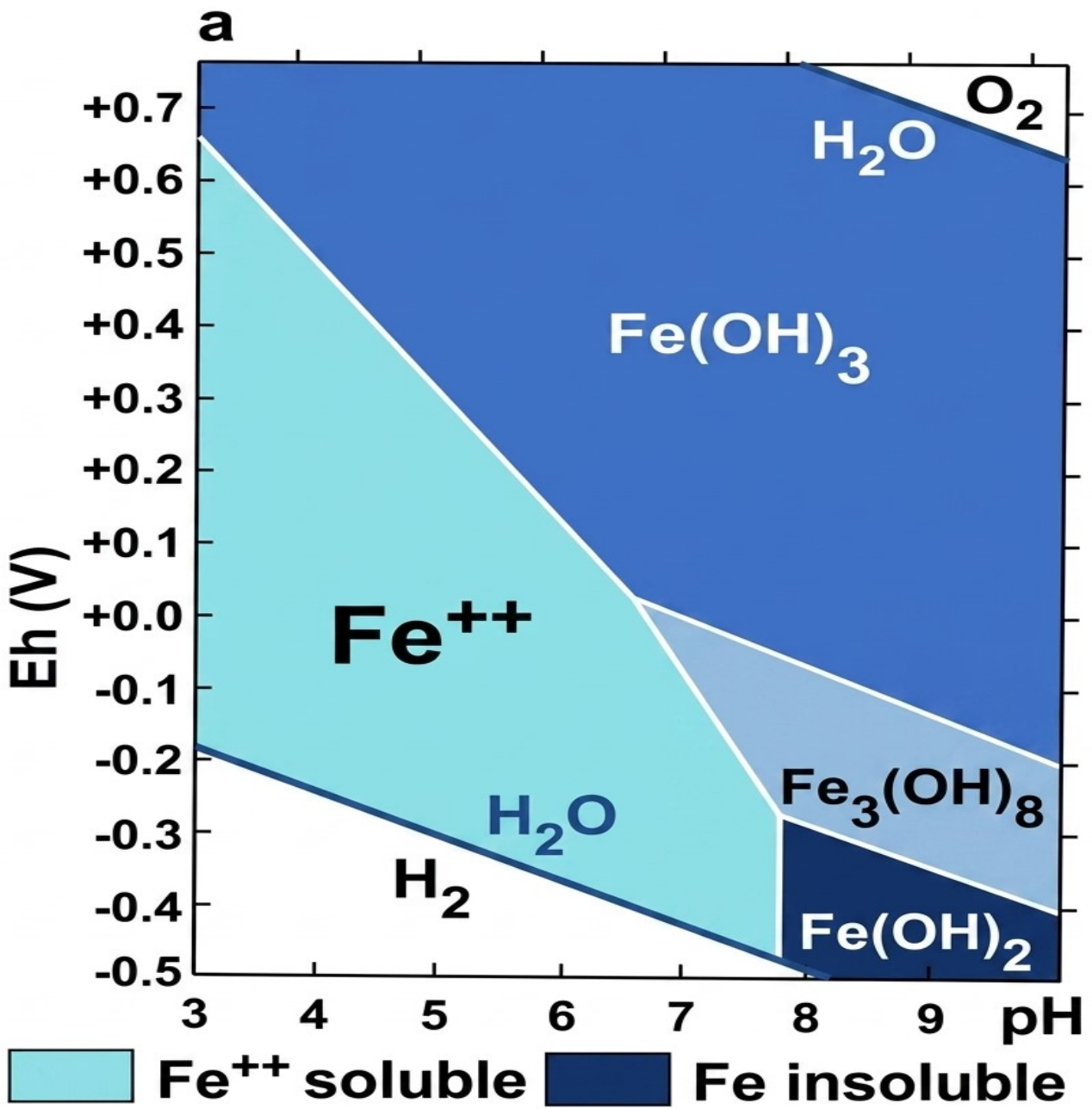
وتستخدم علاقة نيرست لقياس جهد الأكسدة والإرجاع لنصف الخلية $Fe^{+2}/_{Fe^{+3}}$، للتنبؤ بظروف الأكسدة والإرجاع لكلا الشاردتين حسب ما يلي:

$$E_h = 0.77 + 0.059 \log \frac{C_{Fe^{+3}}}{C_{Fe^{+2}}}$$

وأخيراً يمكن أن تساهم الظروف الهوائية في تحول مركبات قليلة الذوبان في الماء إلى مركبات أخرى أقل ذوباناً. كما هو الحال في تحول الأكاسيد المائية للحديد الثنائي إلى أكاسيد مائية للحديد الثلاثي حسب ما يلي:

$$2Fe(OH)_2 + H2O + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow 2Fe(OH)_3$$

ويبين الشكل (2–11) تأثير pH، E_h على توزع الحديد الثنائي.



ب- تأثير المادة العضوية:

يرتفع تركيز الحديد القابل لإفادة النبات في التربة بزيادة محتواها من **المادة العضوية**، حيث تعمل على حمايته من الترسيب عن طريق تثبيته بمعقدات عضوية معدنية، ليصبح أكثر إتاحة للنبات من خلال آليات مختلفة. وربما يكون لارتفاع محتوى الترب الكلسية من المادة العضوية أهمية كبيرة وأثر إيجابي في تجنب أو التخفيف من حدة نقص الحديد الناجم عن زيادة الكلس في تلك الترب.

وتؤكد بعض الأبحاث **زيادة محتوى التربة من الحديد القابل للإفادة**، وكذلك ارتفاع تركيز الحديد في النبات **بإضافة الأسمدة العضوية** (البلخي وآخرون، 2007).

ج- تأثير كربونات الكالسيوم:

تؤثر كربونات الكالسيوم في التربة على انخفاض إتاحة الحديد في التربة. وتظهر أعراض نقص الحديد على النباتات، وتسمى هذه الظاهرة **بالشحوب الكلسي (Lime indvced chlorsis)**، **ويتجلى التأثير السلبي لكربونات الكالسيوم في هذه الترب من خلال عدة آليات:**

- يرتفع pH الترب الكلسية (pH = 7.5 – 8.5) وينجم عن ذلك انخفاضاً في الأشكال المتاحة من عنصر الحديد.
- تكون الترب الكلسية عادةً غنية **بشوارد الكالسيوم** التي تنتج عن الانحلال الجزئي لكلس فيها **والذي ينافس الحديد على الامتصاص من قبل النبات حسب التفاعل:**

$$CaCO3 \rightleftarrows Ca^{+2} + CO3^{-2}$$

- يمكن أن ينشأ في ظروف الغدق أو الري الغزير في الترب الكلسية الشارد $HCO3^-$ حسب التفاعل:

$$CaCO3 + CO2 + H2O \rightleftarrows Ca(HCO3)_2$$
$$Ca(HCO3)_2 \rightleftarrows Ca^{+2} + 2HCO3^-$$

ترفع شاردة **البيكربونات** pH التربة وتزيد من ترسيب الحديد في التربة، كما أنها تثبط فعالية الجذور في إرجاع الحديد وامتصاصه من قبل النبات (Mangel et al.، 1984).

كما تسبّب شاردة البيكربونات **رفع pH العصارة الخلوية للنبات**، مسببة ترسب الحديد بأشكال غير فعالة ضمن النبات، ويعد وجود هذه الشاردة بتركيز عالي، المسبب الأكثر أهمية في ظهور الشحوب الكلسي لدى العديد من الأنواع النباتية النامية في **ترب كلسية** (Romheld.، 1987).

وتشير بعض الأبحاث إلى ما يسمى **ظاهرة (Iron Paradox)** أي اصفرار الأوراق رغم ارتفاع محتواها من عنصر الحديد والذي يمكن أن يُعزى إلى تثبيط فعالية الحديد في الأوراق بواسطة شاردة البيكربونات (Roimheld.، 1987، Morales et al.، 1998).

٢ - الحديد في النبات

٢-١ امتصاص الحديد من قبل النبات:

يمتص النبات عنصر الحديد على شكل ثنائي Fe^{+2}، **ويؤثّر في امتصاص النبات لعنصر الحديد عوامل عديدة:** أهمها pH التربة، ووجود حمض الفوسفور وكل من المنغنيز والنحاس، حيث يؤدي المنغنيز والنحاس دوراً هاماً في عمليات الأكسدة والإرجاع.

ففي الوسط الحامضي يزداد تركيز الأشكال المتاحة من عنصر الحديد، وأعراض نقص الحديد تظهر في **الترب الكلسية والقلوية** وبشكل عام عند درجة تفاعل للتربة (pH) أكبر من 6.

ومن العوامل التي يمكن أن تعيق امتصاص عنصر الحديد، هو وجود **حمض الفوسفور** الذي يؤدي إلى ترسيب الحديد ليس في التربة على شكل فوسفات حديد فحسب، وإنما ترسيب الحديد أيضاً ضمن النبات، حيث لوحظت أعراض نقص الحديد في أوراق النباتات رغم ارتفاع محتواها من الحديد، وهذه الظاهرة تمت ملاحظتها أيضاً في النباتات النامية في الزراعة المائية بوجود تركيز مرتفع من الفوسفور،

حيث لم تُؤَد إضافة الحديد لتلافي أعراض النقص، وقد أدى خفض تركيز الفوسفور في الوسط الغذائي لزوال أعراض نقص الحديد، وقد أكدت التجارب التي استخدم فيها نظير الحديد Fe^{55} هذه العلاقة.

يعد عنصري النحاس والمنغنيز من أهم العناصر الصغرى التي تؤدي دوراً هاماً في امتصاص الحديد من قبل النبات حيث توجد **علاقة تآزر بين الحديد والنحاس**، بينما تكون **علاقة الحديد بالمنغنيز هي علاقة تضاد نموذجي**، فبزيادة إضافة المنغنيز إلى التربة، ينخفض تركيز الحديد في النبات.

إن وجود تركيز مرتفع من المادة العضوية في الترب الكلسية والقلوية يزيد من إتاحة الحديد للنبات، حيث يتشكل معقدات عضوية معدنية (شيلات حديد).

إنّ هذا الارتباط على شكل مركبات عضوية مع الحديد يحمي الحديد من الترسيب بأشكال غير متاحة للامتصاص من قبل النبات وسواء كان هذا الارتباط العضوي المعدني بشكل مركبات عضوية ذوابة أو غير ذوابة،

فإن للمعقدات العضوية الذوابة للحديد دوراً هاماً في تغذية النبات، وبفضل هذه المركبات يمكن الاستفادة من الحديد الثلاثي Fe^{+3}،

بالإضافة إلى الشكل الثنائي Fe^{+2}،

حيث يتم إرجاعه على أسطح جذور النباتات عن طريق آلية الإرجاع ثم امتصاصه على شكل **حديد ثنائي** من قبل النبات،

ولهذا يمكن استخدام شيلات الحديد كأسمدة لتزويد النبات بهذا العنصر في الترب القاعدية.

وتعزى قدرة **النباتات النجيلية** بشكل عام على امتصاص الحديد من أشكاله غير المتاحة في الترب الكلسية لإمكانية إفراز جذورها **مركبات عضوية تدعى Phytosiderophores** من مناطق خلف القمم الجذرية مباشرة حيث تذيب الحديد من مركباته غير المنحلة وترتبط معه وتسهل امتصاصه من قبل النبات. وهذه المركبات يمكن أن يتم إفرازها بواسطة أنواع من البكتريا في التربة

أما في **ثنائيات الفلقة** فإن مقدرة النباتات على إتاحة الحديد في التربة ترجع إلى قدرة الجذور على إفراز **شوارد الهيدروجين** عن طريق مضخات بروتينية في إفراز بعض الحموض العضوية وإفراز مركبات عضوية قادرة على **إرجاع الحديد الثلاثي إلى ثنائي.**

كما أن تراكم الأحماض العضوية في الأنسجة النباتية الفقيرة بعنصر الحديد تسهل حركة الحديد وفعاليته ضمن النبات (بوعيس، علوش، ٢٠٠٦).

٢-٢ تركيز الحديد وحركته ضمن النبات:

يختلف تركيز النباتات من عنصر الحديد حسب: نوع النبات وطور النمو، والجزء النباتي، والصنف ....

وبشكل عام يتراوح تركيز الحديد بين **٥٠- ٢٠٠ مغ/كغ مادة جافة**، وتحوي الأجزاء الخضراء للنباتات بين ١٠٠- ٢٠٠، ويمكن أن يصل تركيزه إلى أكثر من ٤٠٠ مغ/كغ مادة جافة. وعموماً يرتفع تركيز عنصر الحديد في الأوراق، بينما ينخفض محتوى الحبوب والبذور والجذور والدرنات من هذا العنصر.

إنّ معظم الحديد في النبات (٨٠-٩٠% منه)، يكون بشكل عضوي غير ذواب، ويتواجد معظمه في الجسيمات الكوندريه والكلوروبلاست.

وبالرغم من أن الشكل الأساسي لامتصاص الحديد من قبل جذور النباتات يتم بشكل **معدني (Fe^{++})**، إلا أن انتقاله ضمن النبات يتم عبر **الأوعية الخشبية**، بالشكل الثلاثي المرتبط مع حمض السيتريك، وضمن **الأوعية الغربالية** على شكل ثنائي مرتبط مع النيكوتين أمين.

يتواجد عنصر الحديد ضمن النبات **بشكلين ثلاثي مؤكسد وثنائي مرجع**
ومن المعتقد أن الشكل المرجع هو الأكثر أهمية من الشكل المؤكسد غير الفعال حيوياً والذي يميل **لأن يترسب** في مركبات ضعيفة الانحلال
وذلك بخلاف الحديد الثنائي(المُرجع)، الذي يؤدي دوراً فعالاً في العمليات الحيوية في النبات.

٢-٣- دور الحديد في النبات:

أ- يؤدي دوراً هاماً في عمليات الاصطناع الضوئي.
ب-يدخل في تركيب بعض الأنزيمات كأنزيمات التنفس وأنزيمات السيتوكروم في السلسلة التنفسية:
Peroxidase، Cytochrome Catalase، Cytochrome Oxidase
ت-يؤدي دوراً هاماً في اصطناع البروتينات، حيث يلاحظ انخفاض نسبة الآزوت البروتيني نسبة إلى الآزوت الكلي في النباتات التي تعاني من أعراض النقص.
ث-يؤدي دوراً هاماً في تنشيط أكسدة الفوسفوسكريات.

٤-٢- أعراض نقص الحديد:

يعدّ الحديد عنصراً **قليل الحركة** في النبات لذلك فإن أعراض نقصه تظهر أولاً على الأوراق الفتية.

وتبدأ أعراض النقص بالظهور على النباتات عند انخفاض **تركيزه عن ٢٠-٤٠ مغ/كغ مادة جافة**.

وتتمثل أعراض النقص التي تظهر عند ثنائيات الفلقة على النموات الحديثة أولاً على شكل اصفرار بين العروق الرئيسة مع بقاء العروق خضراء ثم تمتد الإصابة لتشمل الأوراق الأكبر سناً. وفي مرحلة متقدمة من النقص، يعم الاصفرار المجموع الخضري (بما في ذلك العروق) ويصبح النبات بلون أبيض عاجي.

تتشابه أعراض نقص الحديد مع أعراض نقص المغنيزيوم، بسبب تأثيرهما في عمليات التمثيل الضوئي واصطناع اليخضور،

مع ملاحظة أن أعراض نقص المغنيزيوم تظهر أولاً على الأوراق المسنة أولاً بعكس أعراض نقص الحديد، ويصعب في مرحلة متقدمة لأعراض النقص التمييز بين نقص كلا العنصرين.

أما أعراض النقص **على النباتات أحاديات الفلقة** فتبدو على شكل خطوط صفراء تتناوب مع خطوط خضراء على طول نصل الورقة.

نباتات ذرة تعاني من نقص الحديد (*Zea mays* L.) - (نقص Fe)

إصفرار حاد بين العروق، نمو متقزم، أوراق صفراء باهتة.

إصفرار حاد بين العروق، نمو متقزم، أوراق صفراء باهتة.

نباتات ذرة صحية، كافية المغذيات (*Zea mays* L.) - الشاهد

نمو حيوي، محتوى عالٍ من الكلوروفيل، أوراق مورقة.

نمو حيوي، محتوى عالٍ من الكلوروفيل، أوراق مورقة.

٢-٥ التسميد بعنصر الحديد:

أ- **التسميد الأرضي:** يندر حدوث نقص لعنصر الحديد في **الترب الحامضية**،
ويمكن معالجة النقص في حال وجوده بإضافة **سلفات الحديدي**، بينما لا يكون لإضافتها أي تأثير في الترب **الكلسية والقلوية** حيث يتم تثبيتها بأشكال غير متاحة.
ويمكن أن تؤدي إضافتها بوجود **التسميد العضوي والأخضر**، وكذلك إضافتها المترافقة مع إضافة **الكبريت** إلى معالجة النقص.

تعدّ **شيلات الحديد** من المركبات المستخدمة لتلافي ظهور أعراض نقص عنصر الحديد على النباتات.
وتختلف كفاءة شيلات الحديد المضافة إلى التربة في قدرتها على معالجة أعراض النقص في **الترب الكلسية والقاعدية**، ويعتمد ذلك على قدرتها على تشكيل معقدات ثابتة مع عنصر الحديد في درجات مختلفة لتفاعل التربة،
ويلاحظ أن **شيلات الحديد Fe- EDDHA** كانت **ثابتة** عند درجات لتفاعل التربة (pH:4-10) وبالتالي أكثر كفاءة في معالجة النقص من **Fe-EDTA** ، التي تنخفض كفاءتها في هذه الترب.
لذلك تستخدم عادة مركبات شيلات الحديد وخاصة Fe- EDDHA لتسميد أشجار الفاكهة بمعدل ٢-٣ غ لكل ١ سم من محيط الشجرة،
ومن الضروري إضافتها عند عمق مناسب وتحت تاج الشجرة وعند بعد مناسب عن الساق، ولا تعد إضافتها للمحاصيل مناسبة من الناحية الاقتصادية لارتفاع أسعارها.

ب- التسميد الورقي: يتم التسميد الورقي باستخدام **مركبات الحديد اللاعضوية** على شكل سلفات حديدي $FeSO_4.7H_2O$ بمعدل ٣-٥ غ/ل، و٠,٥ غ/ل من مركبات شيلات الحديد.

ومن الضروري إجراء عملية الرش لعدة مرات خلال فصل النمو مع التركيز على ضرورة الرش في فترتي بداية النمو والنضج،

وتحقيق ابتلال كلي للأوراق والتركيز على النموات الحديثة.

ويمكن التقليل من التأثيرات الموضعية لعدم تجانس توزيع الرش باستخدام مواد ناشرة تخفض التوتر السطحي لمحلول الرش.

ج- التسميد مع مياه الري: يمكن استخدام **سلفات الحديدي $FeSO_4.7H_2O$** مع مياه الري بمعدل ١-٤ كغ/هـ، حيث توزع الكمية على عدد الريات.

٦-٢- التسمم النباتي بعنصر الحديد:

تظهر عدة أعراض التسمم بعنصر الحديد في **الترب الحامضية الغدقة**، وكذلك بتأثير إضافات كبيرة منه في **الترب الحامضية**، وكذلك في الترب الحامضية القريبة من مصانع تعدين الخامات الحديدية.

ومن النادر حدوث تسمم نباتي بالحديد في الترب الكلسية والقاعدية. **وتظهر أعراض التسمم:** بتلون الأوراق باللون الأخضر الداكن وتتقزم الجذور وتتلون بالبني ويضعف نمو النبات بشكل عام.

جدول مقارنة أسمدة الحديد

نوع السماد	الصيغة الكيميائية أو الرمز	النسبة المئوية للحديد
سلفات الحديدي	$FeSO_4.7H_2O$	20
سلفات الحديد	$Fe_3(SO_4)_2.4H_2O$	23
سلفات الحديد النشادرية	$FeSO_4(NH_4)_2\ SO_4.6H_2O$	14
شيلات الحديد	Fe- EDDHA	6
شيلات الحديد	Fe- EDTA	9-12
شيلات الحديد	Fe- DTPA	10
شيلات الحديد	Fe- HEDTA	5-9

شكراً لحضوركم!
نهاية محاضرة العناصر الصغرى والحديد
Zn
Mn
B
Mo
Cl
Ni
Fe
Fe
Fe-EDDHA
Cu
Cu
Fe
Fe
Fe
Zn
Mn