كلية العلوم

القسم : علم الحياة

السنة : الرابعة

المادة : تغذية ونمو

المحاضرة : الرابعة/نظري/د.ريم

{{ مكتبة A to Z }}

Facebook Group : مكتبة A to Z

2026

يمكنكم طلب المحاضرات برسالة نصية (SMS) أو عبر(What's app-Telegram)على الرقم 0931497960

Syrian Arab Republic Ministry of Higher Education and Scientific Research		الجمهورية العربية السورية وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

مقرر التغذية والنمو

(العناصر المعدنية) –الامتصاص والعوامل المؤثرة

إعداد: د. ريم ابراهيم

قسم علم الحياة

كلية العلوم

العام الدراسي 2025–2026

التغذية النباتية

الدور العام للعناصر المعدنية – العناصر المفيدة والسامة

تحتاج النباتات إلى نسب محددة من العناصر الغذائية وتختلف حاجتها للتغذية المعدنية باختلاف أنواعها، بعضها يحتاج لعنصر الكبريت بكميات كبيرة مثل الفصيلة الصليبية وبعضها تتطلب عنصر البوتاسيوم مثل الفصيلة القرنية، وتوجد نباتات تميل لامتصاص عنصر الكالسيوم وشاردة النترات.

تستهلك بعض النباتات كميات كبيرة من العناصر المعدنية بينما تنمو أخرى في بيئات فقيرة بالمعادن. وتتكيف النباتات عموماً مع العديد من التغيرات ومنها وفرة أو ندرة العناصر المعدنية اللازمة لتغذيتها مثلا توجد نباتات تصنف بانها محبة للكالسيوم وأخرى كارهة للكالسيوم؛ تنمو النباتات المحبة للكالسيوم في الأراضي الكلسية وتثبّت كميات قليلة من الكالسيوم، بينما تنمو النباتات الكارهة للكالسيوم في الأراضي السيليسية، ويعد الكالسيوم ساماً للنوع الثاني حيث يقلل من نفوذية الأغشية الخلوية ويحد من امتصاص العديد من الشوارد الأخرى، **مثلا زيادة الكالسيوم يسبب فاقة أو عوز الحديد**.

ولفهم أهمية العناصر المعدنية في تغذية النبات إلى جانب المواد العضوية وأهمية الامتصاص وعلاقة تراكيز العناصر بعمليات الامتصاص لابد أولاً من فهم الدور العام الذي تلعبه العناصر المعدنية في النبات، نتذكر الدور الحيوي لكل عنصر، وأعراض النقص والتسمم، والعلاقات الأيونية (التضاد والتساند).

أولاً: تصنيف العناصر المعدنية بحسب الكمية والوظيفة

العناصر الكبرى (Macronutrients)

يحتاجها النبات بكميات كبيرة، وتشمل: النيتروجين (N) الفسفور (P) البوتاسيوم (K) الكالسيوم (Ca) المغنيسيوم (Mg) الكبريت (S)

العناصر الصغرى (Micronutrients)

يحتاجها النبات بكميات ضئيلة لكنها أساسية: الحديد (Fe) المنغنيز (Mn) الزنك (Zn) النحاس (Cu) البورون (B) الموليبدنوم (Mo) الكلور (Cl) النيكل (Ni) (اكتُشف دوره حديثًا).

ثانياً: الأدوار الحيوية لأهم العناصر

النيتروجين (N) يدخل في تركيب: الأحماض الأمينية، البروتينات، الكلوروفيل، الأحماض النووية.

نقصه يؤدي إلى: اصفرار الأوراق القديمة وضعف النمو الخضري.

الفوسفور (P) عنصر طاقي: مكوّن رئيسي لـ ATP وADP. ضروري لانقسام الخلايا ونمو الجذور.

نقصه يظهر بشكل تلون بنفسجي، ويسبب ضعف النمو، و تأخر الإزهار.

البوتاسيوم (K) عنصر "وظيفي" لا يدخل في تركيب عضوي لكنه ضروري: لتنظيم فتح/غلق الثغور وتنشيط الأنزيمات وتوازن الشحنات ونقصه يسب احتراق حواف الأوراق، ضعف تحمل الجفاف.

الكالسيوم (Ca) يدخل في: جدر الخلايا، أغشية البلازما، الإشارات الخلوية. نقصه يسبب تعفن الطرف الزهري في الطماطم، موت القمم النامية.

المغنيسيوم (Mg) المكوّن المركزي لجزيء الكلوروفيل. نقصه يسبب اصفرار العروق في الأوراق الكبيرة.

الكبريت (S) يدخل في تركيب بعض الأحماض الأمينية (Cys, Met). نقصه يشبه نقص N ولكن على الأوراق الحديثة.

العناصر الصغرى ووظائفها

الحديد (Fe) أساسي في تركيب السيتوكرومات والأنزيمات المؤكسدة. نقصه يسبب اصفرار شديد بين العروق على الأوراق الحديثة.

المنغنيز (Mn) مهم في عملية انشطار الماء في التركيب الضوئي وتحديدا عند انظام الضوئي الثاني (PSII). نقصه يسبب بقع صفراء مع بقاء العروق خضراء.

الزنك (Zn) منظم هرموني (يدخل في تصنيع الأوكسين). نقصه يسبب تقزم – صغر الأوراق – موت القمم.

النحاس (Cu) عنصر أنزيمي هام في الأكسدة والاختزال. نقصه يؤدي إلى ذبول القمم وظهور بقع نخرية.

البورون (B) له دور فريد في نقل السكريات تماسك الجدار الخلوي ونمو حبوب اللقاح نقصه يسبب تشقق الجذور، تساقط الثمار، موت القمم.

المولبيدنوم (Mo) أساسي لأنزيم nitrate reductase ولتثبيت النيتروجين في البقوليات. نقصه يسبب ضعف النمو.

الكلور (Cl) ضروري لتنظيم الضغط الأسموزي والتوازن الأيوني. نقصه نادر جدًا.

النيكل (Ni) يدخل في نشاط إنزيم urease. نقصه يظهر في النباتات التي تعتمد على اليوريا كمصدر نيتروجين.

التفاعلات الأيونية (التساند و التضاد)

تعد هذه النقطة مهمة جدًا في علم تغذية النبات: التساند (Synergism) هو ظاهرة يحدث فيها تحسن أو زيادة في امتصاص عنصرٍ معدني معيّن بوجود عنصر آخر، بحيث يعمل العنصران معاً بصورة تعاونية لتعزيز الامتصاص أو النقل أو الاستفادة الأيضية داخل النبات، وهو عكس ظاهرة التنافر Antagonism التي يحدث فيها تثبيط لامتصاص عنصر بزيادة عنصر آخر.

كيف يحدث التساند؟ تظهر خاصية التساند عبر ثلاثة مستويات:

أولاً: التساند عند مستوى الجذور (Root–level Synergy) يحدث عندما يساعد وجود عنصر معيّن على تنشيط بروتينات النقل Transporters الخاصة بعنصر آخر.

أمثلة: تكوين الأحماض العضوية (Root Exudates) : حيث أن بعض العناصر (مثل الفوسفور) تحفز إنتاج أحماض عضوية (Citrate – Malate) تقوم بإذابة عناصر أخرى في التربة مثل الحديد Fe^{+3} أو تحرير الزنك Zn^{+2} والمنغنيز Mn^{+2} من المعقدات بالتالي يساعد الفوسفور على امتصاص عناصر دقيقة. ويمكن أن نفهم التساند في تحسين نفاذية الأغشية، حيث يساهم الكالسيوم Ca^{+2} في الحفاظ على سلامة غشاء الخلية وتنظيم البنى البروتينية في غشاء الجذر وهذا يحسن دخول عناصر أخرى مثل NO_3^- و K^+.

ثانياً: التساند عند مستوى النقل والنفاذية (Transport Synergy) التساند بين الكاتيونات والأنيونات لأن النبات يوازن شحنته الكهربائية، فإن امتصاص: الكاتيونات (K^{+1}, Ca^{+2}, Mg^{+2}) يقترن بامتصاص الأنيونات (NO_3^-, Cl^-, SO_4^{-2})

مثال مهم: امتصاص النترات NO_3- يحفّز امتصاص البوتاسيوم K^+ عبر ناقلات مشتركة في غشاء الجذر.

التساند عبر ناقلات مشتركة Co–transport هناك بروتينات نقل تعتمد على وجود عنصر لتحريك عنصر آخر مثل:

H^+/Fe transporters – H^+/PO_4 transporters

وجود البروتونات (الـ H^+) الناتجة من تنفس الجذر يساعد على امتصاص الحديد والفوسفور.

التساند عند مستوى التمثيل الغذائي Metabolic Synergy عناصر تعمل كمرافق إنزيمي (Cofactors)

المغنزيوم Mg^{+2} عنصر أساسي لتفعيل أنزيمات تثبيت الكربون و أنزيمات الفسفرة وهذا يعزز استخدام الفوسفور داخل النبات مما يزيد من طلبه وامتصاصه. وكذلك فكرة بناء مركبات معقّدة Chelation Facilitating حيث أنّ العناصر الدقيقة (كالزنك والمنغنيز) تساهم في تشكيل البروتينات المعدنية metalloproteins أو المركبات المخلبية chelates داخل الجذر وهو ما يزيد ذوبانية عناصر أخرى ويسهّل نقلها.

أمثلة للتساند بين العناصر:

1. التساند بين النيتروجين والبوتاسيوم : زيادة امتصاص NO_3^- يدفع زيادة امتصاص K^+ بسبب الحاجة لمعادلة الشحنات وتنشيط ناقلات مشتركة

2. التساند بين الفوسفور والحديد الفوسفور يحفز إنتاج مركبات عضوية في الرايزوسفير (شكل1) تعمل على إذابة الحديد.

3. التساند بين الكالسيوم والبورون يُعدّان "عناصر مترابطة"، وجود أحدهما يعزز امتصاص الآخر لأن:

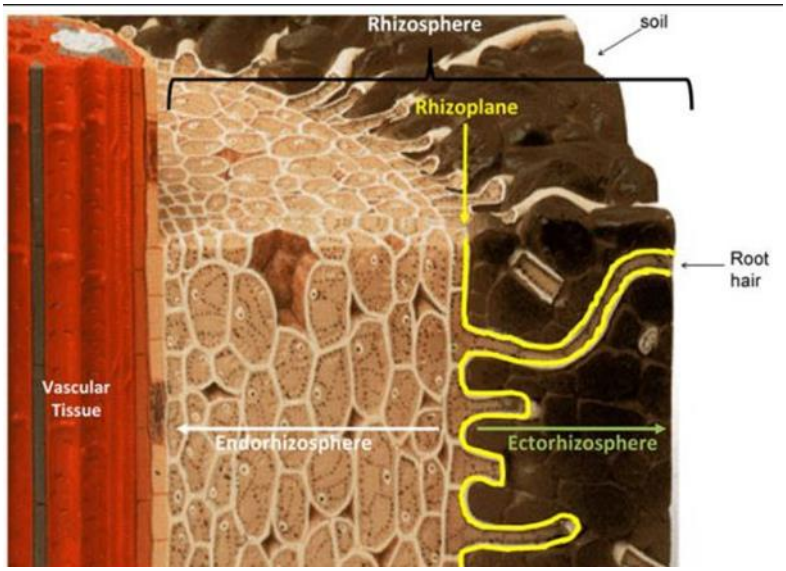
Ca مسؤول عن سلامة غشاء الخلايا

B مسؤول عن سلامة الجدر الخلوية

وبالتالي يسهلان مرور وتوزع بعضهما البعض.

4. التساند بين المغنزيوم والنيتروجين: وجود Mg يعزز تصنيع الكلوروفيل، مما يزيد معدل التمثيل الضوئي، ويزيد بدوره استيعاب واستخدام النيتروجين.

متى يختل التساند؟ يختل إذا زادت تراكيز عنصر واحد بشكل كبير (مثلاً البوتاسيوم العالي جداً يقلل تجدد التساند مع Mg). أو حدثت منافسة على ذات الناقلات. أو تحولت البيئة الجذرية إلى شديدة الحموضة أو القلوية. أو تغير نشاط الميكروبات المحفزة للامتصاص.



الشكل1: الرايزوسفير وهو مركز التحكم البيولوجي الكيميائي لامتصاص العناصر للنبات وهو نقطة التفاعل بين الجذر والتربة والميكروبات

التساند (Synergism) هو تعاون فيزيولوجي بين عنصرين أو أكثر يؤدي إلى:

- تسهيل ذوبانية العنصر الآخر في التربة.
- تنشيط بروتينات نقل مشتركة في غشاء الجذر.
- تحسين الشحنة الكهربائية عبر الغشاء.
- تسريع العمليات الأيضية التي تعتمد على العناصر.

وهو أحد المحددات الأساسية لـ كفاءة امتصاص العناصر المعدنية في النبات.

N يحسن امتصاص P عبر زيادة نمو الجذور.

K يحسن امتصاص Fe بتحسين حالة التمثيل الضوئي.

الميكوريزا تحسن امتصاص: P, Zn, Cu, N.

ما هي خاصية التضاد Antagonism؟

هي ظاهرة يحدث فيها تثبيط أو انخفاض في امتصاص عنصرٍ معيّن عند زيادة تركيز عنصر آخر، سواء بسبب التنافس على مواقع الامتصاص أو إعاقة النقل داخل النبات أو حدوث اختلال في توازن الشحنات عبر الغشاء. التضاد هو عكس خاصية التساند (Synergism).

كيف يحدث التضاد؟ (الآليات الأساسية)

توجد ثلاث آليات رئيسية تفسّر التضاد بين العناصر:

1- التنافس على نفس ناقلات الامتصاص (Competition for Transporters)

بعض العناصر تستخدم نفس البروتينات الناقلة في غشاء الجذر وبالتالي عندما يكون تركيز أحد العناصر مرتفعاً جداً، فإنه يحتل الناقلات، فيقل امتصاص العنصر الآخر. مثال: البوتاسيوم K^+ و المغنزيوم Mg^{2+} كلاهما يستخدمان ناقلات متقاربة وظيفياً، وزيادة K^+ تمنع دخول Mg^{+2}.

2- التأثير على التوازن الكهربائي (Charge Balance Interference) النبات يسعى دائماً للمحافظة على شحنته الداخلية متعادلة. لذلك فإن زيادة امتصاص كاتيونات (K^+, Ca^{2+}, Mg^{2}) يؤدي إلى تثبيط امتصاص كاتيونات أخرى. والعكس بالنسبة للأنيونات: زيادة NO_3^- قد تقلل من امتصاص Cl^- أو SO_4^{2-}

3- الإعاقة داخل النبات (Internal Antagonism) حتى بعد امتصاص العناصر، يحدث تضاد داخل الأنسجة عبر التنافس على مواقع الأنزيمات ويقوم أحد العناصر بإزاحة العنصر الآخر من مواقع الارتباط و إعاقة النقل عبر الخشب واللحاء. مثال: زيادة Mn^{+2} قد تمنع Fe^{+2} من القيام بوظيفته في الكلوروبلاست.

ثالثاً: أمثلة مهمة وشائعة لظاهرة التضاد

1. التضاد بين $Mg^{+2} \leftrightarrow K^{+}$ أحد أشهر الأمثلة في تغذية النبات، حيث أن زيادة البوتاسيوم في التربة يؤدي إلى نقص مغنزيوم في الأوراق لأنهما يتنافسان على ناقلات متشابهة والنتيجة هي اصفرار بين العروق (Interveinal chlorosis) بسبب نقص Mg.

2. $Mg^{+2} \leftrightarrow Ca^{2+}$ زيادة الكالسيوم (خصوصاً في الترب الكلسية) يؤدي إلى تقليل امتصاص المغنزيوم وتثبيط وظائفه في تخليق الكلوروفيل

3. $Ca^{2} \leftrightarrow K^{+}$ زيادة K^{+} تمنع Ca^{+2} من الحركة إلى القمم النامية والثمار. **مثال واضح:** انخفاض الكالسيوم في ثمار الطماطم يؤدي إلى عفن الطرف الزهري Blossom-end rot رغم توفر Ca في التربة، لأن K^{+} العالي يمنع امتصاصه.

4. $Cu \leftrightarrow Zn \leftrightarrow Mn \leftrightarrow Fe$ (عناصر دقيقة بين بعضها) هذه العناصر الدقيقة تتنافس بقوة على ناقلات الامتصاص ومواقع الارتباط الإنزيمية.

مثال عملي: زيادة Mn^{+2} يؤدي إلى نقص Fe^{+2} – وزيادة Zn^{+2} يؤدي إلى نقص Cu^{+2}

5. $NH_4^{+} \leftrightarrow NO_3^{-}$ (**Nitrate vs. Ammonium**) امتصاص الأمونيوم بكميات كبيرة يؤدي إلى نقص في امتصاص الكالسيوم و المغنزيوم والبوتاسيوم بينما امتصاص النترات يزيد من امتصاص الكاتيونات (عكس NH_4^{+})، فتتغير توازنات الامتصاص جذرياً.

6. $K^{+} \leftrightarrow Na^{+}$ **في الترب الملحية:** زيادة Na^{+} تعيق بشدة امتصاص K^{+}لأنهما يستخدمان ناقلات مشتركة ولأن Na^{+} يثبط مضخة H^{+}-ATPase الضرورية لدخول K^{+}.

أولاً: أمثلة تطبيقية على ظاهرة التساند (Synergism)

مثال 1 — تساند K^{+} مع NO_3^{-}

عند إضافة سماد نترات البوتاسيوم (KNO_3)، يُلاحظ زيادة امتصاص NO_3^{-} بالتزامن مع زيادة امتصاص K^{+}

تطبيق: لماذا يتحسن امتصاص K^{+} بوجود NO_3^{-} ؟

الإجابة **المتوقعة:** لأن امتصاص NO_3^- يحتاج إلى موازنة شحنة موجبة، مما يحفز امتصاص K^+.

مثال 2 — تساند الفوسفور P مع الحديد Fe: زيادة توفر الفوسفور يحفز الجذر على إفراز أحماض عضوية (Citrate، Malate)، والتي تزيد ذوبانية الحديد Fe^{3+} في التربة مما يحسن امتصاص الحديد.

مثال 3 — تساند Ca مع B إن النباتات التي ينخفض فيها البورون تُظهر صعوبة في نقل الكالسيوم إلى القمم النامية وبالعكس فإنّ إضافة تراكيز من البورون تحسن بناء جدر الخلايا وثبات الروابط البكتينية فيسهل انتقال Ca إلى المناطق الغضة

نشاط: تفسير لماذا تظهر أعراض نقص Ca رغم وجوده في التربة عند نقص B.

مثال 4 — تساند Mg مع N: المغنزيوم عنصر مركزي في الكلوروفيل. تحسّن وفرة Mg النتح والتمثيل الضوئي، مما يزيد الطلب على: الأمونيوم NH_4^+ والنترات NO_3^- وبالتالي يزيد امتصاصهما.

نشاط: الربط بين ارتفاع Mg وارتفاع معدل التمثيل الضوئي.

ثانياً: أمثلة تطبيقية على ظاهرة التضاد (Antagonism)

مثال 5 — تضاد K^+ مع Mg^{2+}:عند إضافة كميات كبيرة من البوتاسيوم للتربة، يلاحظ: انخفاض امتصاص المغنزيوم وظهور اصفرار بين العروق على الأوراق

تفكير ناقد: لماذا يمنع K^+ امتصاص Mg^{2+} ؟ الإجابة: تنافس على نفس الناقلات في غشاء الجذر.

مثال 6 — تضاد Na^+ مع K^+ (في التربة الملحية): ارتفاع Na^+ يؤدي إلى تثبيط امتصاص K^+ اختلال إنتاج البروتينات وتأثر الإنزيمات الحساسة للـ K^+

مثال 7 — تضاد Ca^{2+} مع Mg: في الترب الكلسية، ارتفاع Ca^{2+} يمنع دخول Mg^{2+} إلى الخلايا فتظهر أعراض نقص Mg رغم وجوده في التربة.

تفكير ناقد: كيف تثبت من خلال تحليل ورقة نبات مصابة (صورة) وتستخلص أن السبب نقص Mg بسبب تضاد Ca.

مثال 8 — تضاد Fe مع Mn: زيادة Mn^{2+} في التربة (خاصة الترب الحامضية) تقلل امتصاص Fe، فتظهر أعراض نقص الحديد (كلوروز) و هو اصفرار أو فقدان اللون الأخضر في أوراق النبات، نتيجة انخفاض تركيز الكلوروفيل في الخلايا حيث يعد الكلوروز أحد أهم الأعراض الظاهرية لنقص العناصر الغذائية أو لوجود إجهاد بيئي.

ثالثاً: أمثلة تطبيقية لحل المشكلات Problem-Based Learning

مثال 9 — مشكلة: إضافة سماد غير مناسب

الحالة: مزارع أضاف سماد سلفات البوتاسيوم بكميات عالية لمحصول البطاطا. بعد أسبوعين ظهرت أعراض: اصفرار بين العروق ضعف النمو انخفاض التمثيل الضوئي.

السؤال: ما العنصر المرجح أن يكون قد نقص؟ الإجابة: المغنزيوم (بسبب تضاد K مع Mg).

مثال 10 — مشكلة: أعراض نقص Ca رغم وفرة Ca في التربة

الحالة: نباتات الطماطم تُظهر عفن الطرف الزهري (Blossom-end rot)، تحليل التربة يظهر وفرة Ca، لكن التسميد كان عالي البوتاسيوم.

السؤال: كيف يحدث نقص Ca رغم وفرته؟ الإجابة: تضاد K يمنع نقل Ca إلى الثمار.

- لا تؤثر العناصر المعدنية في العمليات الفيزيولوجية إلا إذا كانت على شكل شوارد، أو كانت داخلة في تركيب جزيئات عضوية، ومن نقاط التأثير العام للعناصر المعدنية:

1. **تدخل في تكوين البروتوبلاسم والغلاف الخلوي:** يدخل الكثير من العناصر المعدنية في بناء البروتوبلاسم حيث يدخل الكبريت في تركيب البروتينات وبعض الفيتامينات ونجد الفوسفور في البروتينات النووية، والمغنزيوم في الكلوروفيل والحديد في الأنزيمات، ويوجد الكالسيوم على شكل بكتات في الجدار الخلوي.
2. **تأثير العناصر المعدنية على نفوذية الأغشية الخلوية:** تتأثر نفوذية الاغشية الخلوية بالشوارد الموجبة والشوارد السالبة التي توجد في بيئتها وعادة يخفِّض الكالسيوم وغيره من الشوارد الموجبة ثنائية أو ثلاثية التكافؤ من نفوذية الأغشية السيتوبلاسمية، بينما تزيد الشوارد الموجبة أحادية التكافؤ مثل الصوديوم والبوتاسيوم من نفوذية تلك الأغشية.
3. **تأثير الأملاح المعدنية على الجهد الحلولي في الخلايا النباتية:** يفسر الجهد الحلولي في الخلايا النباتية بعدة عوامل، يعود بعضها إلى المواد المعدنية المنحلة في العصارة الخلوية، بالرغم من أن هذا الدور ضئيل بالمقارنة مع الجهد الناتج عن وجود المواد العضوية مثل الحموض الأمينية والسكريات البسيطة .....الخ
4. **تأثير الأملاح المعدنية على حموضة الوسط:** تؤثر الأملاح المعدنية الممتصة من التربة إلى جانب المواد العضوية في النبات على حموضة العصارة الخلوية وبعضها تساهم في ثبات PH العصارة الخلوية ومنها أملاح الفوسفات والكربونات.

5. **تلعب المواد المعدنية دور الوسائط في التفاعلات الاستقلابية:** تلعب بعض العناصر المعدنية دور الوسيط الكيميائي في إسراع بعض التفاعلات مثل الحديد والنحاس والتوتياء التي تدخل كمجموعات مرافقة وبعضها الآخر مثل المغنزيوم والبوتاسيوم والكوبالت تلعب دور منشطات أو مثبطات لبعض الأنزيمات.

- **العناصر المفيدة والعناصر السامة:**

يمكن لبعض العناصر أن تكون مفيدة لنمو بعض الأنواع النباتية بالرغم من عدم حاجة النبات لها، ولفهم آلية تأثير العناصر المعدنية وتأثرها ببعض لابد من توضيح فكرة **العناصر المفيدة والسامة.**

تستطيع بعض العناصر أن تحسن نمو النبات **(عناصر مفيدة لنوع نباتي ما)** بالرغم من عدم الحاجة إليها مثل الصوديوم الذي يحسن من نمو النباتات البحرية والشمندر السكري ويحل محل البوتاسيوم في حال كان الوسط فقيرا بهذا الأخير.

وعلى العكس من ذلك يمكن لبعض العناصر أن توقف عمل بعض الجمل الأنزيمية مثل الزئبق **(عناصر سامة)**، كما أن بعض العناصر المفيدة تصبح سامة عندما تستخدم بتراكيز مرتفعة جداً، وكذلك يمكن لبعض العناصر المفيدة أن تتحول إلى سامة إذا لم نحسن اختيار المركبات التي تدخل في تركيبها.

على سبيل المثال يمكن للنبات الحصول على الكربون بسهولة من glutathione ولكن مصدر الكربون يصبح ساماً على هيئة taurine، وهذا ما يؤكد أهمية صيغة المركبات وتركيز العنصر المقدم للنبات.

مثلاً يوجد عدد من العناصر المعدنية التي تكون سامة بالنسبة للبروتوبلاسم عندما تكون بشكل شوارد، وقد تسبب اضطرابات شديدة وتؤدي لموت النباتات في بعض الظروف؛ نذكر منها الألمنيوم والسلينيوم والموليبيدينوم والرصاص والنيكل والفضة والتوتياء وبالرغم من أن بعضها هامة للنبات كما مر معنا سابقاً إلا أن زيادتها عن حد فيزيولوجي معين يصبح ساماً.

تصبح العناصر سامة عندما تتراكم في الأنسجة فوق مستوى التحمل سواء كانت أساسية أو غير أساسية. وقد يكون سبب السمية تعطيل الخاصية الأسموزية في النبات أو تكوين أنواع من الاوكسجين التفاعلي(ROS) Reactive Oxygen Speciees، أو تعطيل الأنزيمات. وفي هذه الحالة تقسم العناصر السامة إلى عناصر غير أساسية سامة، وعناصر أساسية قد تصبح سامة عند زيادتها.

أولاً: عناصر أساسية لكنها سامة (Heavy metals and toxic metalloids):

نذكر من هذه العناصر:

- **الكادميوم** والذي يعد الأكثر سمية للنبات، ويسبب توقف النمو وإغلاق الثغور وتثبيط الأنزيمات، ويزيح الكالسيوم Ca والزنك Zn من مواقعها الحيوية.
- **يمنع الرصاص (Pb)** تكوين الكلوروفيل ويثبط امتصاص الماء، ويتراكم في الجذور أكثر من المجموع الخضري.
- **يثبط الزئبق (Hg)** معظم الأنزيمات عبر الارتباط بمجموعة من السلفهيدريل (–SH)، ويؤدي إلى موت الخلايا النباتية.
- **يتشابه الزرنيخ (As)** مع الفوسفات في قابلية الامتصاص فيعطل الاستقلاب، ويؤدي إلى اصفرار الأوراق وموت القمم.
- **الكروم السداسي (Cr^{+6})** مؤكسد قوي يسبب أضرارا غشائية وأكسدة البروتينات.
- **النيكل (Ni)** بتراكيز عالية بالرغم من أنه عنصر أساسي بكميات ضئيلة، يصبح ساما عند وفرته، ويثبط انزيمات التنفس ويؤثر على استقلاب النتروجين.
- **يسبب زيادة Cu** تكون ROS وتلف الأغشية ويثبط النمو الميكروبي المفيد في التربة.
- **الألمنيوم Al** في الترب الحمضية يعيق استطالة الجذور ويعطل امتصاص Ca , p

أما العناصر الأساسية التي تصبح سامة عند زيادتها: البورون B الذي يسبب سمية عند تراكمه وينتج عن ذلك احتراق الأوراق وموت القمم النامية. يؤدي تراكم المنغنيز إلى تلف الصانعات الخضراء وظهور بقع بنية على الأوراق، كما يعيق امتصاص الحديد ويقلل التركيب الضوئي. اما زيادة الكلور فتؤدي إلى احتراق الأوراق خاصة في النباتات الحساسة مثل الكرمة والحمضيات.

توضيح: الأوكسجين التفاعلي (Reactive Oxygen Species – ROS)

الأوكسجين التفاعلي هو مجموعة من الجزيئات والذرات المشتقة من الأوكسجين تتميز بأنها عالية النشاط الكيميائي وتمتلك القدرة على أكسدة البروتينات والدهون والـDNA.

تشمل أهم الأنواع:

الأنيون فائق الأوكسيد (O^{-}_{2} – Superoxide) يُنتج عندما يكتسب جزيء الأوكسجين الكتروناً من جديد وهو يتشكل أولياً في البلاستيدات الخضراء، الميتوكوندريا، والبيروكسومات، شديد التفاعل لكنه يتحول سريعاً إلى بيروكسيد الهيدروجين.

بيروكسيد الهيدروجين (H_2O_2) أكثر أنواع ROS ثباتاً وبالتالي يمكنه الانتشار عبر الأغشية ويعمل كـ جزيء إشارِي (Signaling molecule) عند تراكيز منخفضة يصبح ساماً عند التراكيز العالية.

الجذر الهيدروكسيلي (•OH) أخطر أنواع ROS وأعلى قدرة أكسدة ينتج عن تفاعلات فينتون (Fenton reaction) بوجود الحديد أو النحاس و تفاعلات فِنتون (Fenton Reactions) هي واحدة من أهم التفاعلات الكيميائية المرتبطة بتكوين الجذر الهيدروكسيلي (•OH)، وهو أخطر أنواع الأوكسجين التفاعلي (ROS) في النبات.

هي تفاعلات تتم بين بيروكسيد الهيدروجين (H_2O_2) وأحد الأيونات المعدنية ثنائية التكافؤ مثل: الحديد (Fe^{+2}) النحاس (Cu^{+}) تؤدي هذه التفاعلات إلى تكوين الجذر الهيدروكسيلي (•OH) شديد السمية.

المعادلة الأساسية لتفاعل فنتون

$$Fe^{2+} + H_2O_2 \rightarrow Fe^{3+} + {\bullet}OH + OH^-$$

أي أن: آيون الحديد الثنائي Fe^{+2} يُختزل H_2O_2 لينتج جذر هيدروكسيلي (•OH) + أيون هيدروكسيد (OH^-) ويتحول الحديد إلى Fe^{+3}

لماذا تُعد تفاعلات فنتون خطيرة؟

لأن الجذر الهيدروكسيلي الناتج عنها: غير مستقر جداً شديد التفاعل يهاجم فوراً أي جزيء مجاور (دهون، بروتينات، DNA) ويسبب Lipid peroxidation وتلف الأغشية لذلك تُعد هذه التفاعلات أحد مصادر الإجهاد التأكسدي الحاد في الخلايا النباتية.
من أين يأتي الحديد الثنائي (Fe^{+2}) داخل الخلية؟ غالباً من: مخازن الحديد في البلاستيدات الخضراء بروتينات Fe–S الميتوكوندريا، ولتجنب خروج Fe^{+2} من مراكز البروتينات تحت الضغط البيئي يحاول النبات دائماً تقييد الحديد داخل بروتينات خاصة مثل: Ferritin – Ferric–chelate reductase regulators وذلك من أجل لتقليل حدوث تفاعلات فنتون.

أين تحدث تفاعلات فنتون في النبات؟ تحدث خصوصاً في: البيروكسومات(الجسيمات المؤكسدة) لكثرة إنتاج H_2O_2 أثناء عملية Photorespiration (التنفس الضوئي) في البلاستيدات الخضراء تحت الإجهاد الضوئين وفي الميتوكوندريا عند اضطراب السلسلة التنفسية وعند مناطق الإصابة الممرِضة كجزء من الـ oxidative burst.

كيف يحمي النبات نفسه من تفاعلات فنتون؟

يستخدم النبات عدة استراتيجيات لخفض احتمالية تكوّن •OH:

1. تقليل Fe^{+2} الحر عبر تخزينه في Ferritin.
2. تحطيم H_2O_2عبر:(Catalase – Ascorbate peroxidase APX)

3. الحفاظ على توازن الأكسدة والاختزال.

وأخيراً: تفاعل فنتون = $Fe^{2+} + H_2O_2 \rightarrow \bullet OH$ هو المصدر الأخطر للجذور الهيدروكسيلية داخل النباتات، ويُعد محورياً لفهم الإجهاد التأكسدي و الملوحة و الجفاف والسمية المعدنية وموت الخلايا المبرمج (PCD)

الأوكسجين الأحادي (O_2^1) يتكون في البلاستيدات الخضراء خلال الضوء الشديد. يتفاعل بسرعة مع الدهون والأغشية.

الآثار السلبية للأوكسجين التفاعلي (عند التراكيز العالية)

يحدث الضرر عند اضطراب التوازن بين توليد ROS وأجهزة الدفاع المضادة للأكسدة.

1. أكسدة الدهون (Lipid peroxidation) يؤدي إلى تدمير الأغشية الخلوية فقدان الاستقرار الغشائي.

2. أكسدة البروتينات تعطيل الإنزيمات تلف النقل الأيوني عبر الأغشية.

3. تلف الـDNA طفرات، تباطؤ الانقسام.

4. موت الخلايا (PCD) ناتج عن ارتفاع كبير في Hو O و•OH.

وتصنف السمية المعدنية وفق نوعين:

السمية المباشرة: وهي أن تظهر أعراض مباشرة على النبات مثل عنصر البورون B الذي يسبب نقص في معدلات النمو عندما يزيد تركيزه عن المطلوب.

السمية غير المباشرة: ظهور تأثير نقص أو زيادة عنصر ما من خلال تأثيره على فاعلية عناصر أخرى، مثلاً زيادة تركيز الزنك Zn تؤدي ظهور أعراض نقص الحديد لأن الزنك والحديد يتداخلان في التأثير، وكذلك تأثير الكلور الذي يتواجد في التربة بشكل CL− نتيجة وجود املاح كلوريد الصوديوم، على امتصاص الماء نتيجة التأثر على الضغط الحلولي للتربة.

طرائق تقديم الشوارد المعدنية للنباتات

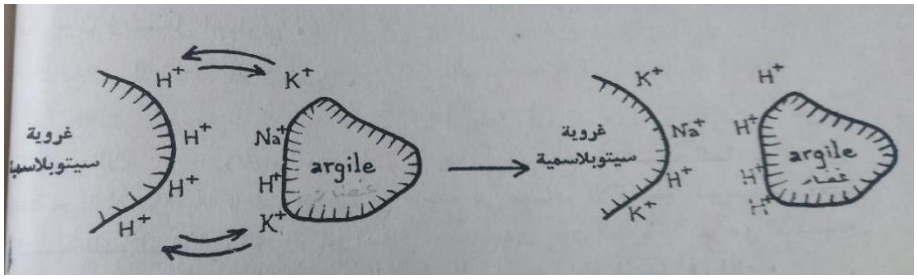
ذكرنا سابقاً أنه من بين العدد الكبير من العناصر المعدنية التي وجدت في النبات هناك عدد محدود من العناصر لا غنى عنه لنمو النبات وتطوره، وتسمى مثل هذه العناصر بالعناصر الأساسية، بينما تسمى العناصر التي توجد في النبات ولا دليل على أهميتها له بالعناصر غير الأساسية. بالإضافة إلى أهمية توفر مصدر الكربون والنتروجين للنباتات وبشكل أساسي لابد من توفر مصادر العناصر المعدنية، ولابد من تقديم هذه العناصر على شكل شوارد كي يستطيع النبات استخدامها ففي حالة البوتاسيوم مثلا نجد أن النبات لا يستطيع الاستفادة من المعدن وإنما من الشاردة +k والتي تنتج من تحلل KCL في الوسط.

يفسر ذلك سبب استخدام الأملاح مصدرا للشوارد مثل أملاح النترات والفوسفات والكبريتات...الخ، أو على هيئة حموض كما هو الحال بالنسبة لحمض البور H3BO3 وسبب تقديمه كحمض أنه حمض ضعيف لا يؤثر على قيمة PH الوسط.

- **تقدم الشوارد بثلاث طرق وهي:**

1- شوارد منحلة في الوسط المغذي وهي تقدم على شكل أملاح قابلة للانحلال في الماء ويمكن للنبات امتصاصها مباشرة بعد انحلالها مثل شاردة البوتاسيوم +k تقدم على هيئة فوسفات البوتاسيوم او كلو البوتاسيوم، وشاردة النترات التي تقدم على شكل أملاح نترات الأمونيوم أو نترات البوتاسيوم، وشاردة المغنزيوم على شكل كبريتات المغنزيوم ...الخ.

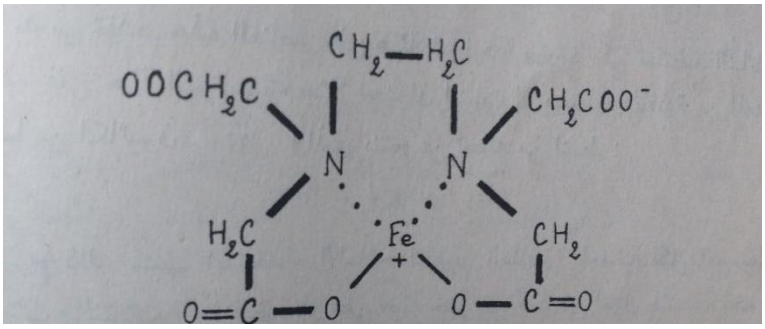
2- شوارد مدمصة على سطوح الغرويات (جزيئات الغضار أو الدبال ....الخ) في الزراعات العادية التقليدية التي تجري في الترب المختلفة، ويعني كلمة مدمصة أن الشوارد تتواجد على سطوح جزيئات التربة ذات الخواص الغروية ويمكن بسهولة ان تتبادل مع الشوارد الموجودة على الغشاء السيتوبلاسمي لخلية الوبرة الماصة ويساعدها في ذلك ان هذه الشوارد تتواجد في حالة من الحركية المستمرة في المكان مما يسمح لها بالتبادل معاً وهنا نذكر ان الصوديوم والبوتاسيوم من أكثر الشوارد قدرة على التبادل بهذه الحالة مع شوارد +H الموجودة على غشاء الوبرة الماصة لجذور النباتات، ونذكر ان لخواص التربة الدور الكبير في نجاح هذه العملية الحيوية.



الشكل 1: تبادل الشوارد المدمصة على الغرويات

3- متمخلبات مثل تمخلب الحديد مع ثنائي الأمين رباعي حمض الخل (EDTA.Fe)، وخاصة في الزراعة المائية.

المركبات المخلبية عبارة عن مركبات عضوية تمسك العنصر بأكثر من جهة وتمنع انفراده إلى محلول التربة، كما أن تكوين المركبات المخلبية لعدد من العناصر مثل الـ Fe و AL, Ca يزيد من فرصة تكوين مركبات معقدة مع الفوسفات مما يزيد في جاهزيتها للتربة.



الشكل 2: تمخلب الحديد مع الايتلين ثنائي الأمين رباعي حمض الخل.

العوامل المؤثرة في توفر العناصر الغذائية في التربة وامتصاصها من قبل النبات:

1- درجة PH التربة:

يعد PH التربة من أهم العوامل المؤثرة على جاهزية العناصر الغذائية في التربة، مثلاً عنصر الفوسفور يترسب تحت الظروف الحامضية على هيئة فوسفات الحديد والألمنيوم (FePO4 – ALPO4) وهذا الشكل من أملاح هذه العناصر قليل الذوبان وغير جاهز ليستفيد منها النبات، أما في الظروف التي تكون فيها PH ذات رقم أعلى من 7 أي ترب قاعدية وخاصة الترب الكلسية التي تحتوي على CaCO3 بكميات كبيرة ويرتفع فيها PH إلى اكثر من 7 مثلا 8.2 يمكن أن تترسب الفوسفور على شكل فوسفات الكالسيوم الثلاثية $Ca_3(PO4)2$ وهي أيضاً غير جاهزة للنبات، في حين نجد أن الفوسفور أكثر جاهزية للنبات في الترب معتدلة PH أي بحدود 7.

كما أن النترات تمتص بسهولة في الظروف الحامضية لقلة تواجد أيونات OH في حين HN4 يمتص بكفاءة أعلى تحت الظروف القاعدية لقلة المنافسة مع أيونات الـ H+ وعند PH بحدود 7 تتساوى لفرص لكلاهما.

وبناءاً على ذلك يفضل إضافة فوصفات ثنائي الكالسيوم CaHPO4.2H2O Di calcium phosphate (DCP) للترب القاعدية ويفضل إضافة الأسمدة النتروجينية بصورة الأمونيوم وليست النترات وذلك بهدف الحصول على شاردة الامونيوم NH4+ لأن النترات تفقد من التربة بعملية معاكسة للنترجة.

أما بالنسبة للترب الحامضية فيستحسن استخدام (MCP) Mono calcium phosphate – $Ca(H2PO4)_2.H2O$ ويفضل إضافة الأسمدة النتروجينية على شكل نترات في الترب الحامضية.

أما بالنسبة للعناصر الصغرى (Fe – Mn– Cu – Bo---) فتزداد جاهزيتها بانخفاض درجة PH وهي بشكل عام أكثر جاهزية في الوسط المعتدل.

كذلك قد تتسبب درجة PH في الحد من امتصاص بعض العناصر في الظروف الحامضية كما في امتصاص AL مما يتسبب في سمية للنباتات بهذا النقص، وكذلك تحدث سمية بالمنغنيز ونقص في الحديد في الترب الكلسية ذات الـ PH القلوية.

إن محتوى الخلايا من الـ K+ قد يخفض PH على درجة 4 مما يسبب ضعف الأغشية الخلوية وخروج K+ ويكون معدل امتصاص البوتاسيوم متعلقا بهذه الظروف حيث أن: محصلة امتصاص البوتاسيوم = البوتاسيوم الداخل – البوتاسيوم الخارج.

2- المادة العضوية:

إن للمادة العضوية تأثيراً مباشراً على درجة تفاعل التربة، حيث ينخفض PH التربة عند تحلل الحموض العضوية ، كما أن المادة العضوية هي مصدر جيد للكل من N,S,P. وتساهم المادة العضوية كذلك في تكوين متمخلبات مع شوارد العناصر الأمر الذي قد يساهم في زيادة جاهزية بعضها للنبات أو الحد من تواجد بعض منها في التربة بشكل منفرد وبالتالي الحد من تأثيره على خواص التربة، كما يمكن للمادة العضوية (الدبال) عند مشاركتها مع Ca++ أن تساهم في تكوين البناء الحبيبي للتربة مما يحسن من خواص التربة الفيزائية والبيولوجية ويزيد مساميتها مما ينعكس إيجاباً على أنواع من الترب كالترب الرملية والطينية.

3- نوع التربة:

يتحكم نوع التربة إلى حد كبير بمحتواها وبجاهزية العناصر الغذائية فيها للامتصاص من قبل النبات وذلك بسبب تركيب التربة، حيث أن التربة ذات المحتوى العالي من الطين تسود فيها ظاهرة الاختزال مما يؤدي إلى تواجد بعض العناصر مثل Fe^{+2}, Mn^{+2} بشكلها هذا الجاهز للامتصاص من قبل النبات مما يؤدي إلى توافرها إلى حد السمية وذلك في الظروف الهوائية، بينما في الظروف اللاهوائية يكون العكس حيث يتواجد Fe^{+3} والمنغنيز بالتكافؤ الرباعي أو السداسي وهي غير جاهزة للامتصاص كما أن الترب الرملية الطينية ذات سعة أيونية تبادلية أعلى من الترب الرملية مثلاً والتي تتميز بمحتوى أقل من Ca++, Mg++, K+, Na+.

4- أحياء التربة:

مر معنا في محاضرة سابقة أهمية أحياء التربة لتثبيت العديد من العناصر المغذية والاستفادة منها كما في حالة البكتيريا المثبتة للآزوت Nitrofication والمحررة للآزوت Dentrofication والتي تساهم في دورة الآزوت بين الهواء الجوي والتربة والمركبات العضوية، وكذلك الميكوريز والتي تمثل تعايش بين فطر جذور النبات كما في نبات الأوركيد أو بكتيريا وجذور النبات كما في العقد الآزوتية لنبات الفول ودورها الهام في زيادة امتصاص العناصر المعدنية ودورها في تهديم المادة العضوية وتحللها بعملية المعدنة وتحرير العناصر الغذائية الجاهزة للنبات إلى محلول التربة.

5- تأثير عدة عوامل في عملية الامتصاص أكثر من التأثير على جاهزية العنصر للامتصاص:

نذكر من هذه العوامل التنافس التضاد والتداخل، درجة الحرارة، الرطوبة النسبية، الضوء، التكافؤ. إن نسبة بعض العناصر إلى بعضها الآخر في المحلول له أهمية كبيرة على الامتصاص والنمو عند النباتات، مثلاً عندما نزيد نسبة عنصر المغنزيوم فإن النسبة الفضلى من الكالسيوم تقل والعكس صحيح عندما يكون المغنزيوم بتركيز منخفض يجب أن يضاف الكالسيوم بتراكيز مرتفعة. ويفسر ذلك بظاهرة **التضاد في النفوذية** حيث أن الكالسيوم يوقف دخول المغنزيوم و بناءاً على ذلك يصبح من الطبيعي أن نزيد من إضافة المغنزيوم كلما زدنا من الكالسيوم.

وكذلك الأمر بالنسبة لعنصري الحديد والمنغنيز ذلك أن الزيادة في المنغنيز تؤدي إلى حالة فاقة في عنصر الحديد، وكذلك إن الشحوب الكلسي الذي يحدث للنباتات الكارهة للكالسيوم هو ناتج عن خلل في امتصاص أو نقل عنصر الحديد. ويتم التضاد بين هذين العنصرين بناءاً على ما يسمى **التضاد الاستقلابي**، أي أن العنصرين يتنافسان على الوظيفة لاستقلابية ذاتها وهذا ما يسمى التضاد التنافسي.

إن وجود عنصر ما في التربة قد يساعد على زيادة إتاحة عنصر آخر (تساند) أو يعاكس ذلك (تضاد). ويقصد بالتضاد وجود عنصر مغذ في التربة قد يساعد على توفير عنصر مغذي أخر او بالعكس لذا عند إضافة عنصر كيميائي لمحلول التربة على شكل أملاح سماد قد يؤدي ذلك لتغير توازن محلول التربة، مثلاً إن زيادة التسميد بالأسمدة الفوسفاتية يؤدي إلى زيادة الإنتاجية وبنفس الوقت إلى خفض جاهزية عنصر الزنك في الأراضي الفقيرة بهذا العنصر، بالإضافة إلى ذلك فالفوسفات عند إضافتها للتربة فإنها قد تكوّن مع الحديد والزنك والمنغنيز مركبات غير قابلة للذوبان مما يؤدي إلى ظهور علامات النقص في النبات.

ومن أهم الأمثلة على ظاهرة التضاد (Ca++/ Fe+3 , Na+, Mg+2) أما ظاهرة التساند ($I-/K+, Mg^{+2}/PO4^{-3}$)

بينما بالنسبة للمولبيديوم والمنغنيز فقد وجد أنه يجب زيادة العنصرين معاً لتحقيق أفضل استفادة للنبات من كليهما.

فعل الجرعات المختلفة من العنصر نفسه:

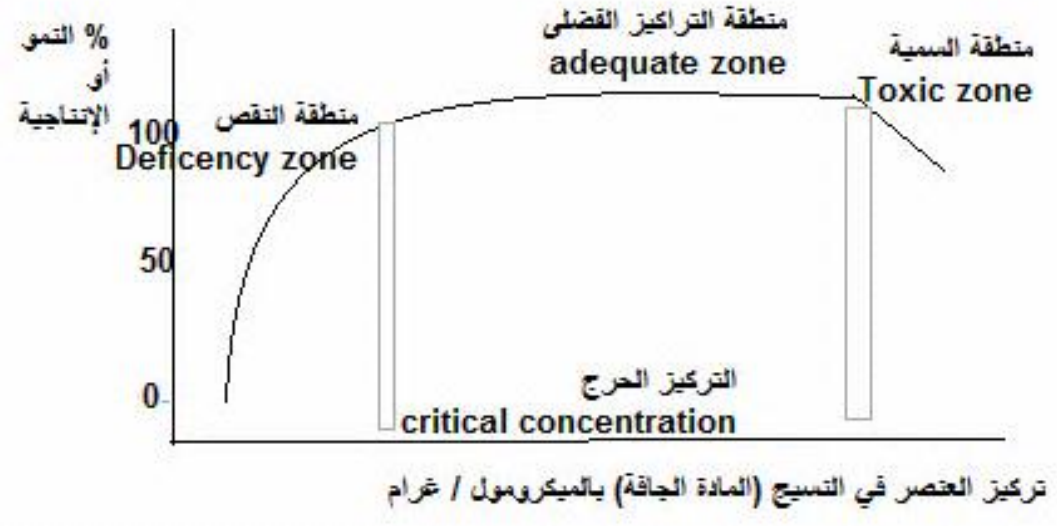
ويتم اللجوء لمعرفة فعل الجرعات المختلفة من العنصر إلى طريقة العامل الوحيد والتي تعتمد على اختيار المركب الذي يحتوي على العنصر ومن ثم إدخال هذا المركب بتراكيز متفاوتة في الوسط المغذي ومن ثم قياس النمو المقابل لكل التراكيز المستخدمة، ويتم اختيار شاردة مرافقة ذات تأثير ضئيل مثل اختيار الكلور شاردة مرافقة للشوارد الموجبة والصوديوم شاردة مرافقة للشوارد السالبة. ويقدم الشكل 4 فكرة عن تفسير العلاقة بين النمو وتراكيز الشاردة المدروسة عموماً حيث يمر تدريجياً بعدد من المجالات وهي:

العلاقة بين النمو ومحتوى النبات من عنصر معين هي علاقة تناسبية حتى نقطة التشبع (قانون «الحد الأدنى»)؛ فكلما زاد العنصر الضروري، زاد النمو، ولكن إلى حد معين، ثم يتوقف النمو (سميَّة) أو يتضرر إذا زاد العنصر بشكل مفرط، مثل النيتروجين (N) الذي يعزز النمو الخضري لكن زيادته تضر النمو الثمري، والفوسفور (P) والبوتاسيوم (K) الضروريين، ونقص أي منهما يؤدي لاصفرار الأوراق أو ضعف النبات، بينما العناصر الصغرى كـ الحديد (Fe) والزنك (Zn) ضرورية بكميات قليلة جداً لعمليات حيوية

التراكيز غير الكافية (النقص): عندما يكون تركيز العنصر الأساسي منخفضاً جداً يعاني النبات من نقص في العنصر المدروس قد يصل إلى حالة فاقة (حالة مرضية للنبات) وتترافق هذه التراكيز بعلامات مرضية قد تؤدي للموت إذا تجاوزت الحد الحرج للعنصر.

التراكيز الفضلى: وتقابل مرحلة نمو مستقرة للنبات ونذكر هنا أن أحد العناصر قد يمر بمرحلة عدم الكفاية عندما يكون مستواه أقل من متطلبات النمو المثالية أو يكون في حالة عدم توازن مع العناصر الأخرى فقد يكون أكبر من متطلبات النمو المثالية، والأعراض هنا تكون نادرة الوضوح.

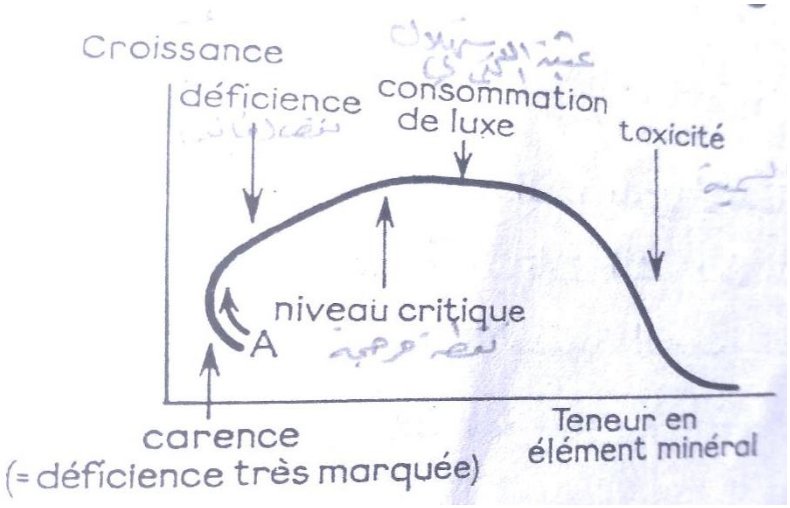
السمية Toxic: تؤدي زيادة عنصر ما أو عناصر متعددة إلى نقص واضح في النمو وانخفاض الإنتاجية وتؤدي السمية الشديدة إلى موت النبات.



الشكل 3: الشكل العام لمنحنيات ردود الفعل.

العلاقة بين النمو ومحتوى النبات من عنصر معين:

سنوضح هذا المفهوم باستخدام تجربة العالم بريفو الذي قارن النمو لنباتات الفستق المزروعة في أوساط تحوي معايير مختلفة من الأسمدة وحصل على منحني النمو العام (الشكل 7).



الشكل 4: منحني عام (النمو/ المحتوى من عنصر معدني)

يمكن أن نشرح هذا المنحني بحسب اتجاه إضافات السماد المتزايدة بدءاً من النقطة A حيث النمو وتركيز العنصر ضعيفين وقد ميز بريفو الأجزاء التالية:

- كلما كان النقص في العنصر واضحا (فاقة) فإن إضافة العنصر المغذي إلى الوسط المغذي تزيد من النمو بشكل أكبر على حساب نسبة العنصر الداخلية، فالمنحني يعود لمحور العينات.
- بما أن التحسن في النمو في تناقص فإن فعل التمديد لهذا العنصر يتناقص كذلك، في حين أن الكمية الممتصة تتابع ازديادها مع زيادة الكمية المضافة من السماد إلى التربة. وبذلك يوجد لحظات يقترن فيها ازدياد النمو مع زيادة الامتصاص وبالتالي تبقى نسبة العنصر داخل النبات ثابتة بالرغم من ازدياد النمو ويصعد المنحني بشكل عمودي.
- وباستمرار إضافة الأسمدة (الأملاح) يزداد النمو بنسبة تقل عن زيادة نسبة العنصر في النبات ويتجه المنحني نحو اليمين.
- اعتبارا من درجة معينة نجد ان المنحني يصبح أفقيا موازياً للمحور X وذلك أن التركيز الداخلي للعنصر يزداد دون أن يرافقه زيادة في النمو. يطلق على هذه الدرجة اسم **المستوى الحرج** وهو ما يقابل نقطة الاستهلاك الكمالي وكل زيادة في إضافة العنصر بعد هذا المستوى هي هدر ودون فائدة للنبات.

- وأخيرا وفي منطقة السمية فإن نسبة العنصر المعدني تتابع زيادتها بينما يتناقص النمو بشكل ظاهر حتى ينعدم نتيجة لظهور أعراض مميتة.

العلاقة بين محتوى النبات من عنصر غذائي والنمو

لكل عنصر غذائي (مثل النيتروجين، الفوسفور، البوتاسيوم، الحديد... إلخ) دور محدد في نمو النبات، وغالبًا ما يصفه العلماء باستخدام منحنى الاستجابة الغذائية للنبات:

المرحلة المحدودة (Deficiency Zone): عند انخفاض محتوى النبات من العنصر، يكون النمو محدودًا بشكل واضح. النبات يظهر أعراض نقص، مثل اصفرار الأوراق أو تأخر النمو.

المرحلة المثلى (Optimal Zone):

في هذه النقطة، يكون محتوى النبات من العنصر كافيًا لتحقيق أقصى معدل نمو. لا توجد أعراض نقص أو تسمم، والنمو يكون في أفضل حالاته.

مرحلة الإفراط أو التسمم (Toxicity Zone): عند تجاوز محتوى العنصر حدًا معينًا، قد يبدأ النبات بإظهار أعراض التسمم، مثل احتراق أطراف الأوراق أو تثبيط النمو.

2. النقطة الحرجة (Critical Level)

التعريف: النقطة الحرجة هي أدنى محتوى من العنصر في النبات عنده النمو لا يزال عند مستوى مرضٍ (عادة 90–95% من أقصى نمو).

أهمية النقطة الحرجة:

تساعد في تشخيص نقص العناصر الغذائية قبل ظهور أعراض واضحة.

تستخدم لتوجيه التسميد والتخطيط الغذائي للنبات.

مثال: إذا كانت محتويات النيتروجين في ورقة الذرة عند 3% هي النقطة الحرجة، فهذا يعني أن أي انخفاض عن 3% سيؤثر سلبًا على النمو، وأي قيمة أعلى توفر فرصة للنمو المثالي.

3. العوامل المؤثرة على محتوى النبات والنمو

التوافر في التربة: حتى لو كان هناك سماد، قد لا يمتصه النبات بسبب pH أو تفاعل مع عناصر أخرى.

نوع النبات والمرحلة العمرية: احتياجات النبات تختلف بين مرحلة النمو الخضري والإنتاج الثمري.

العوامل البيئية: ضوء، حرارة، رطوبة، ملوحة التربة، كلها تؤثر على امتصاص العناصر.

4. طريقة التقييم

تحليل النبات: أخذ عينات أوراق أو أجزاء نباتية وتحليل محتواها من العناصر.

مقارنة بالقيم المرجعية: معرفة إذا كان المحتوى أقل من النقطة الحرجة، مثالي، أو زائد.