جامعة حماه
كلية الهندسة الزراعية – السلمية
السنة الثالثة

المحاضرة النظرية السابعة في خصوبة التربة وتغذية النبات

The Sulfur

5/2026/20

مقدمة:

يرجع استخدام مركبات الكبريت في الزراعة إلى عام 1768في سويسرا، حيث لوحظ تأثير إيجابي لإضافتها (على شكل جبس) على زيادة الإنتاج. ولم تثبت أهمية عنصر الكبريت كأحد العناصر الكبرى الضرورية لنمو وتطور النبات إلا في بدايات النصف الثاني من القرن التاسع عشر.

وحتى وقت قريب جداً (منتصف القرن العشرين) لم يلقَ عنصر الكبريت الأهمية الكافية كعنصر أساسي من عناصر النمو، بسبب عدم ظهور أعراض نقصه على النبات، حيث كان يضاف بشكل غير مباشر مع أسمدة السوبر فوسفات الأحادية والأسمدة البوتاسية كسلفات البوتاسيوم، والنتروجينية كسلفات الأمونيوم. كما أن إضافة الأسمدة البلدية ساهمت بشكل جيد في إمداد التربة بهذا العنصر.

بالرغم من أعراض نقص عنصر الكبريت بدأت بالظهور على النباتات بعد عام 1900، إلا أن هذه الأعراض أصبحت تشكل مشكلة حقيقية على المحاصيل في معظم البلدان الأوربية وأمريكا وكندا وأستراليا، وأدت إلى انخفاض فى المحاصيل، الأمر الذى تطلب الاهتمام بالتسميد لهذا العنصر.

1-الكبريت في التربة:

يتذبذب المحتوى الطبيعي للترب من الكبريت تذبذباً كبيراً (من 0.01– 0.08%)، ويتأثر محتوى الترب منه بعوامل عديدة، كنوع ومنشأ التربة، والأساليب الزراعية المتبعة (كالتسميد المعدني والعضوي ....)، والبعد عن المصانع وغيرها. ويمكن أن يصل محتوى الترب غير العضوية لأكثر من 0.3%، أما في الترب العضوية فمن الممكن ارتفاع تركيزه إلى 1%.

وبشكل عام يلاحظ ارتفاع نسبي في محتوى ترب المناطق المعتدلة والرطبة من الكبريت مقارنة مع ترب المناطق الجافة وشبه الجافة. وتتميز الآفاق السطحية للترب عادة بارتفاع تركيز الكبريت مقارنةً مع الآفاق الأكثر عمقاً.

١ـ١ـ أشكال الكبريت في التربة:

أ- الكبريت الفلزي:

يُعد البيريت FeS2، والكالوبيريت CuFeS2 ، السفاليريت ZnS2 من أهم مصادر الكبريت في التربة بشكل عام، وهي مركبات غير ذوابة، ينخفض فيها رقم أكسدة الكبريت، ولا يستفيد منها النبات إلا بعد أكسدتها في التربة إلى **كبريتات**. وتتم عملية الأكسدة في ظروف هوائية وظروف لاهوائية.

ففي الظروف الهوائية يمكن تمثيل أكسدة البيريت كما يلي:

$$2\ FeS_2 + 7\ O_2 + 2\ H_2O \rightarrow 2\ Fe^{+2} + 4\ SO_4^{-2} + 4H^+$$

أمّا في الظروف اللاهوائية فيمكن لبعض الأحياء الدقيقة اللاهوائية مثل Thiobacillus ferro oxidant أن تؤكسد البيريت، ويلزم في هذه الحالة وجود مادة مؤكسدة مستقبلة للإلكترونات كشوارد الحديد الثلاثي مثلاً، ويمكن تمثيل التفاعل الحاصل كما يلي:

$$Fe^{+3} + e- \longrightarrow Fe^{+2}$$
$$FeS_2 - 14e^- + 8\ H_2O \longrightarrow 2\ SO_4^{-2} + 16\ H^+ + Fe^{+2}$$

بالجمع:

$$FeS_2 + 14\ Fe^{+3} + 8\ H_2O \longrightarrow 15\ Fe^{+2} + 4\ SO_4^{-2} + 4H^+$$

ويمكن أن يرتفع تركيز الكبريتات في ترب المناطق الجافة وشبه الجافة بسبب احتوائها على مركبات كبريتية يملك فيها الكبريت رقم أكسدة $^{+}6$، كما هو الحال في الترب الغنية بالجبس $CaSO_4.2H_2O$ (انحلاليته حوالي 2 غ/ل)، وكذلك الترب المالحة المحتوية على مركبات متبلورة كالميرابيليت $Na_2SO_4.10H_2O$ والأبسوميت $MgSO_4.7H_2O$ وهي تساهم في إمداد محلول التربة والنبات مباشرة بشاردة الكبريتات.

ب- الكبريت المدمص:

يتم ادمصاص شاردة الكبريتات على معادن الطين وأكاسيد الألمنيوم والحديد، وبشكل عام يزداد تركيز الكبريت المدمص والمتبادل في التربة بانخفاض درجة PH التربة من جهة، وزيادة نسبة الطين من جهة أخرى. وبالرغم من أن الآلية التي تدمص بها الكبريتات على الأكاسيد المائية ومعادن الطين، تتم بآلية مشابهة لادمصاص الفوسفور، إلا أنها أضعف من قوة ادمصاص الفوسفات، ويعد أوكسيد الألمنيوم من أكثر المعادن ادمصاصاً لشاردة الكبريتات، حيث يحصل هذا الادمصاص بالتبادل لشاردة الكبريتات مع مجموعات الهيدروكسيل على السطوح الخارجية. ومن ناحية أخرى يمكن أن يحصل ما يسمى انجذاب كهربائي للشوارد السالبة بما فيها الكبريتات على أسطح تحمل شحنات موجبة.

ج- الكبريت العضوي:

يساهم الكبريت العضوي بنحو ٦٠-٩٠% من الكبريت الكلي في التربة، ويمكن أن يصل التركيز في الترب العضوية إلى أكثر من ٩٠%، ويشكل حوالي ٠.٥% من وزن المادة العضوية في التربة.

تتحول المركبات العضوية بفعل ميكروبات التربة إلى الأشكال المعدنية، وتكون مركبات الكبريت المرتبط مع مركبات كربونية ارتباطاً غير مباشراً مثل: C-N-S (سلفاميت)، C-O-S (استرات عضوية)، أسرع تحللاً.

إنّ **تمعدن المادة العضوية** في التربة يترافق بتشكل غاز كبريت الهيدروجين حيث يتأكسد (في الترب جيدة التهوية) إلى حمض الكبريت، وتتم عملية الأكسدة على مرحلتين، تتم في المرحلة الأولى أكسدة كبريت الهيدروجين إلى الكبريت العنصري بواسطة بعض أجناس البكتريا الكبريتية كيميائية التغذية مثل Thiothrix، ثم تقوم بعض أنواع البكتريا التابعة لجنس Thibacilus بإتمام عملية الأكسدة إلى شاردة الكبريتات وذلك حسب التفاعلات التالية:

$$H_2S + O_2 \rightarrow 2H_2O + 2S + 510\ KJ \quad (1)$$

$$2S + 3O_2 + 2H_2O \rightarrow 2H_2SO_4 + 1180\ KJ \quad (2)$$

بالجمع ينتج:

$$H_2S + 4O_2 \rightarrow 2H_2SO_4 + KJ1690 \quad (3)$$

وعموماً يوجد كل من الكربون والنيتروجين والكبريت في المادة العضوية في التربة بالنسب التالية على التوالي: 100 : 10 : 1.

وتؤدي زيادة نسبة الكربون إلى الكبريت لأكبر من 200 :1، والآزوت إلى الكبريت لنسبة تتعدى 1:200 إلى التثبيت الحيوي (التعضد)، بينما يحصل تمعدن للمادة العضوية بانخفاض النسب السابقة.

يلاحظ التثبيت الحيوي عند إضافة مخلفات عضوية طازجة إلى التربة (كبقايا المحاصيل كالقش مثلاً)، وخاصة إذا لم يترافق ذلك بإضافة النتروجين المعدني.

د- الكبريت الذواب:

يتواجد **الكبريت الذواب** في محلول التربة على شكل **شاردة** SO_4^{-2}، ومن أهم مصادر هذه الشاردة في التربة:

الأسمدة المضافة: حيث يؤدي استخدام الأسمدة المحتوية على الكبريتات مثل K_2SO_4 ، $(NH4)_2SO_4$ وغيرها إلى ارتفاع تركيز هذه الشاردة.

مياه الري: إن استخدام مياه ري ذات محتوى مرتفع من **شاردة الكبريتات** تزيد من تركيز شاردة الكبريتات في التربة، إلا إن استخدام مياه ري **ذات PH مرتفعة** يؤدي إلى تحول بعض الكبريتات المدمصة إلى كبريتات ذائبة وهذا يجعلها أكثر عرضة للغسيل وبخاصة في التربة خفيفة ومتوسطة النسيج.

الأمطار الحامضية: تتشكل الأمطار الحامضية في الأماكن الصناعية التي تنفث أكاسيد الآزوت والكبريت إلى التربة، وتنحل هذه الغازات في الماء عند ارتفاع نسبة الرطوبة الجوية وتتساقط على شكل أمطار حامضية على النبات والتربة،

- ويمكن تمثيل ذلك في حالة أكاسيد الكبريت كما يلي:

$$SO_2 + H_2O \rightarrow H_2SO_3$$
$$2H_2SO_3 + O_2 \rightarrow 2H_2SO4$$

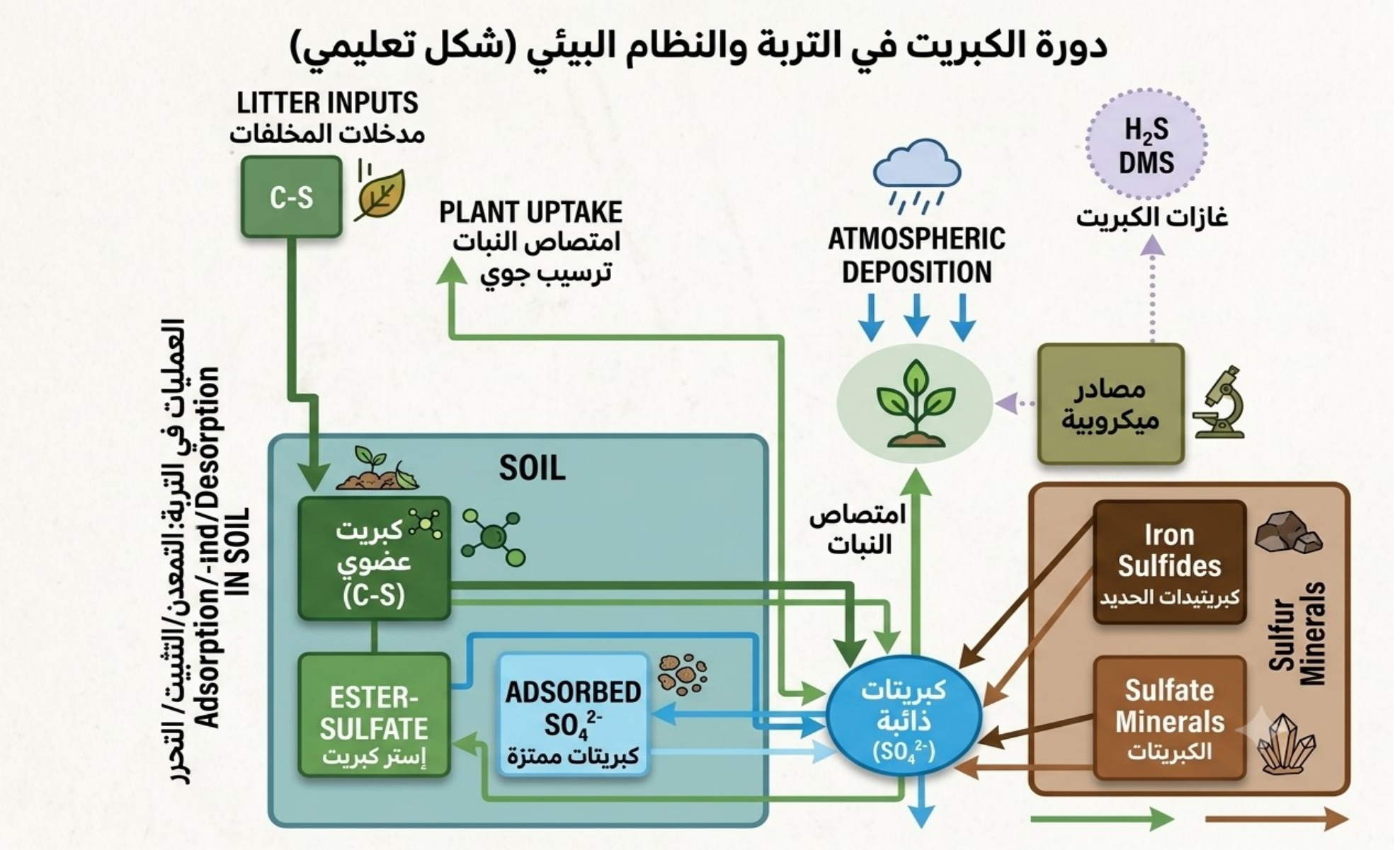
- **تحول الأشكال الفلزية:**

تتحول بعض الأشكال غير الذوابة للكبريت إلى مركبات ذوابة، ويمكن للمركبات الكبريتية ضعيفة الانحلال بالماء **كالجبس مثلاً** $\mathbf{CaSO_4.2H_2O}$ تزويد التربة بشكل مباشر بشاردة **الكبريتات** عن طريق الانحلال الجزئي له (انحلاليته حوالي ٢ غ/ل).

- **تحلل المادة العضوية:** حيث يؤدي تحلل المواد العضوية في التربة إلى توفير تركيز مقبول من هذه الشاردة.

- **شاردة الكبريتات المدمصة:** تشكل شاردة الكبريتات المدمصة في الترب الحامضية مصدراً جيداً لتزويد محلول التربة بهذه الشاردة.

١-٢ - ذوبان المركبات الرئيسية للكبريت وتحولاتها في التربة:



شكل رقم (٦-1): التحولات المختلفة لأهم أشكال الكبريت في التربة.

٢. الكبريت في النبات:

١. تركيز الكبريت وانتقاله ضمن النبات:

يختلف محتوى النباتات من عنصر الكبريت، وبشكل عام يتراوح **محتوى النبات بين ٠.٢-٠.٥ %** من المادة الجافة، ويمكن أن يصل إلى أكثر من ١ % في بعض نباتات العائلة **الصليبية**.

ويتقارب تركيز الكبريت في النبات مع كل من الفوسفور والمغنزيوم (عدا النباتات ذات الاحتياجات العالية)، والشكل الأساس لامتصاص الكبريت يتم بواسطة جذور النباتات على **شكل** SO_4^{-2} ويمكن أيضاً أن يمتص النبات عنصر الكبريت على شكل SO_2 من الهواء الجوي مباشرة عن طريق الثغور التنفسية لأوراق النبات، ويمكن أن يكون لهذا النوع من الامتصاص أهمية كبيرة في المناطق الزراعية القريبة من المصانع التي تنفث الكبريت إلى الوسط الخارجي في تزويد النباتات بهذا العنصر.

وتفضل النباتات بشكل عام امتصاص الكبريت **من التربة** عن امتصاصه على شكل SO_2 من الهواء الجوي.

وبالرغم من أن الشكل الرئيس للامتصاص يكون على شكل SO_4^{-2}، أي بدرجة أكسدة قصوى للكبريت (S^{+6})، إلا أنه يخضع في النبات لعملية إرجاع يتحول من خلالها معظم الكبريت الممتص إلى كبريت عضوي مرجع، ينخفض فيه رقم الأكسدة إلى (S^{+2})، ويكون ضمن مجموعات وظيفية مثل:

SH ، -S-S ، -N=C=S ....

أما تركيز الشكل المعدني للكبريت (SO_4^{-2})، فهو منخفض جداً، ومن المعتقد أنه يؤدي دوراً هاماً في عمليات الحلمهة في سيتوبلاسما الخلايا ضمن النبات.

تختلف النباتات فيما بينها في محتواها من عنصر الكبريت اختلافاً كبيراً، وبشكل عام تعد نباتات العائلة **الصليبية** من أكثر العائلات تطلباً **للكبريت**، تليها العائلة **البقولية**، أما العائلة النجيلية فتعد من أقل العائلات النباتية التي تحتاج إلى عنصر الكبريت.

وعموماً يرتفع تركيز الكبريت في **البذور والحبوب** مقارنة مع الأجزاء النباتية الأخرى في النبات (قش – أوراق – أغصان). وتستخدم بعض النباتات ذات المتطلبات العالية جداً لعنصر الكبريت كدلائل لرصد نقصه في التربة كنبات (Tropaeolum). ويبين الجدول (٦-١) محتوى بعض المحاصيل من عنصر الكبريت.

جدول(٦-١) تركيز الكبريت في بعض المحاصيل

النبات	تركيز الكبريت S (%) في المادة الجافة	
	حبوب – بذور – درنات	قش – أوراق – أغصان
اللفت الزيتي	حوالي 1.38	حوالي 0.25
الخردل الأبيض	0.49 – 1.24	0.09 – 0.52
الصويا	حوالي 0.34	حوالي 0.30
الحبوب (قمح - شعير)	0.10 – 0.18	0.06 – 0.22
البطاطا	0.10 – 0.18	حوالي 0.20

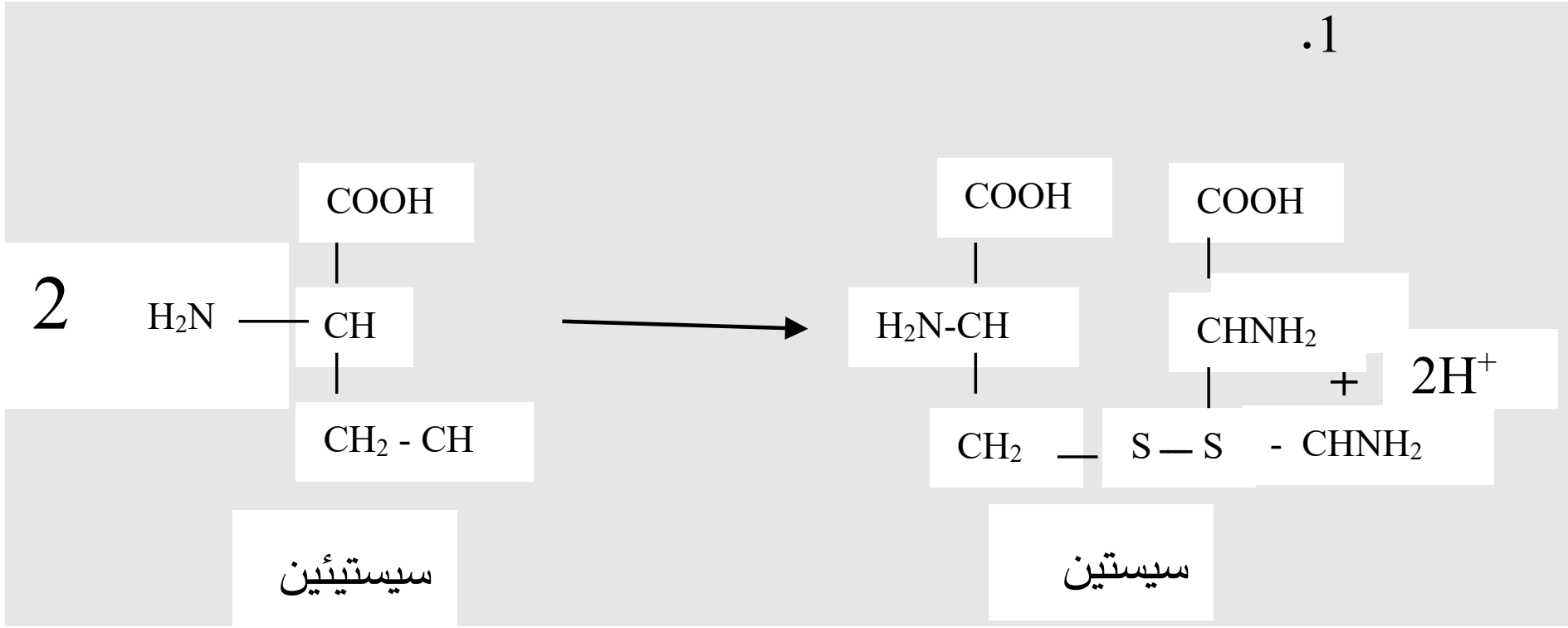
٢-٢ الدور الفيزيولوجي للكبريت في النباتات:

١. يعد الكبريت مكوناً لمعظم المركبات العضوية قصيرة السلسلة في الخلايا النباتية.

٢. يدخل في تركيب الأحماض الأمينية الكبريتية كالميثيونين، والسيستيئين والسيستين.

٣. يؤدي دوراً هاماً في تشكيل السلاسل متعددة البيبتيد، التي تشكل البروتينات الكبريتية، عن طريق تشكيل رابطة سلفاهيدريل SH:

.1



٤. أحد مكونات بعض الفيتامينات مثل فيتامين B1 (الثيامين) وH (البيوتين).

٥. يدخل في تركيب بعض **الزيوت الطيارة المسؤولة عن الطعم والرائحة للجنس Allium كالبصل والثوم**، كما تدخل في تركيب بعض المواد الأخرى مثل ثيوغلوكوزيدات ومشتقاتها، **وزيت الخردل كما في العائلة البقولية.**

٦. أحد مكونات أنزيم الفيرودوكسين الضروري لعملية **التمثيل الضوئي** في النبات.

٧. يساهم في بناء **العقد الآزوتية** في نباتات العائلة البقولية، وبالتالي يزيد من تثبيت الآزوت الجوي.

٢-٣ العوامل المؤثرة على امتصاص الكبريتات من قبل النبات:

- **درجة الحرارة:** إن ارتفاع درجة الحرارة من 15^0C إلى 35^0C تزيد من امتصاص الشاردة **بطريقتين:**

أ- ازدياد شدة النتح والذي ينجم عنه ميل النبات لتعويض النقص بامتصاص الماء من التربة.

ب-زيادة نفاذية الأغشية السيتوبلاسمية الجذرية.

- نوع النبات: تمتص بعض النباتات كميات كبيرة من الكبريتات مقارنة مع نباتات أخرى وهذا الاختلاف يمكن أن يختلف باختلاف النوع والصنف والسلالة... .

- المحتوى من المادة العضوية: إن وجود **تركيز مرتفع من المادة العضوية** تزيد من تركيز أنزيم الفوسفاتاز الذي يساهم في حلمهة الكبريت العضوي وتحوله إلى **الشاردة** SO_4^{-2} القابلة للامتصاص من قبل النبات.

- **التنافس على الامتصاص:**

أ. يؤدي ارتفاع تركيز شاردة الفوسفات $H_2PO_4^-$ وكذلك شاردة المولبيدات MoO_4^{-2} في التربة إلى **انخفاض** قدرة النبات على امتصاص **شاردة الكبريتات**.

ب. إن ارتفاع نسبة الآزوت إلى الكبريت **S/N عن 1/20** في المادة العضوية للتربة يقلل من امتصاص النباتات للكبريتات.

- تركيز الكبريتات: يلاحظ زيادة قدرة النبات على امتصاص شاردة الكبريتات كلما ارتفع تركيزها في التربة، ثم ينخفض الامتصاص في التراكيز العالية (السامة).
- سرعة النمو: كلما كان النبات سريع النمو وكلما كان مجموعه الخضري كبيراً كلما زاد امتصاص شاردة الكبريتات من قبل النبات.

٤-٢- أعراض نقص الكبريت على النبات:

تتشابه أعراض نقص الكبريت على النباتات مع أعراض نقص الآزوت، إلا أن أعراض نقص الكبريت والتي تظهر بلون أصفر تظهر على **النموات الحديثة للنباتات** وذلك بعكس أعراض نقص الآزوت التي تظهر على **النموات القديمة للأوراق**. وفي مرحلة متقدمة من النقص، فإن أعراض النقص تشمل النبات بكامله ولا يمكن عند هذه المرحلة التمييز بين نقص الآزوت أو الكبريت على النبات. **ويمكن تمييز أعراض أخرى عند بعض النباتات:**

- نباتات العائلة الصليبية: يلاحظ اصفرار الأوراق يرافقه تطاول الأوراق وتشوهها.
- نباتات العائلة البقولية: يكون الاصفرار على شكل لون أخضر باهت مترافق مع حروق على حواف الأوراق.

ـ٢ـ٥ ـ التسميد بالكبريت:

إنَّ تقدير احتياجات النباتات من عنصر الكبريت يتعلفهو كعنصر النتروجين يتعرض للتثبيت والأكسدة والانغسال من التربة وامتصاص النبات له من الجوق بأمور عديدة،، وإضافة بعض الأسمدة الآزوتية والبوتاسية المحتوية على الكبريت، تزيد من تركيزه بشكل غير مباشر في أثناء عمليات التسميد.

وهذه الأمور بمجملها تجعل من الصعوبة بمكان تقدير الاحتياج المناسب من الكبريت. وبشكل عام لا يتم التسميد للترب القريبة من المصانع.

يؤدي انخفاض تركيز الكبريتات في محلول التربة **عن 5 مغ/كغ** لظهور أعراض نقص الكبريت على معظم النباتات. ويضاف الكبريت عادة بمعدل ١٠ـ٥٠ كغ /هـ مع الأخذ بالحسبان الكميات التي تغسل من التربة مع مياه الصرف.

ومن أهم الأسمدة المحتوية على الكبريت ما يلي:

جدول(٦-٢): بعض الأسمدة المحتوية على الكبريت

المركب	الصيغة الكيميائية	المحتوى من الكبريت (%)
كبريتات الأمونيوم	$(NH4)_2SO_4$	(24% S)
سوبر فوسفات أحادي	$Ca(H_2PO_4)_2.CaSO_4$	(12-14% S)
الجبس	$CaSO_4.\ 2H_2O$	(18-19% S)
كبريتات البوتاسيوم	k_2SO_4	(17% S)
كبريتات المغنزيوم	$MgSO_4$	(13% S)
زهر الكبريت	S	(100% S)
سماد بلدي	-	(0.5-0.6% S)

6-2 التسمم بالكبريت:

يمكن لبعض النباتات تحمل تراكيز مرتفعة من الكبريتات في التربة، وعموماً فإن انخفاض محتوى التربة عن ٠.٢% يعد غير ضار لمعظم المحاصيل، أما ارتفاعها عن ٠.٧% فيؤدي إلى أضرار على أغلب المحاصيل. أما فيما يتعلق بتركيز SO_2 في الهواء الجوي فإن ارتفاع تركيزه عن ١مغ/م٣، يسبب سمية لمعظم المحاصيل.

تظهر أعراض السمية نتيجة لارتفاع **تركيز شاردة الكبريتات** في التربة على شكل **لون أخضر داكن** يرافقه انخفاض في معدل النمو، **أما السمية الناجمة عن ارتفاع تركيز SO_2 في الهواء الجوي فيكون التأثير مختلفاً ونميز حالتين:**

ففي الحالة الأولى التي يصل فيها SO_2 إلى داخل الخلايا النباتية عن طريق الثغور التنفسية، تظهر أعراض السمية على شكل **لون أخضر باهت ناتج عن انحلال SO_2 في الخلايا** حيث تؤثر بذلك أيونات الكبريت سلباً على نشاط بعض الأنزيمات التي تقوم بعملية التمثيل الضوئي، كما تغيّر من تركيب الأحماض الأمينية، وتمنع تبادل المواد ضمن أغشية الخلايا.

أما الحالة الثانية للتسمم بغاز SO_2 فتلاحظ **عند ارتفاع الرطوبة الجوية وبالتالي انحلال غاز SO_2 وتحوله إلى H_2SO_3** الذي يتساقط على شكل أمطار حامضية (pH حوالي ٣)، مما يسبب حروقاً على النباتات، ويؤدي إلى خفض قدرتها على القيام بوظائفها الحيوية.

The Calcium

مقدمة:

يقدر محتوى القشرة الأرضية من الكالسيوم بحوالي 3.64 %، ويعد هذا المحتوى أعلى من محتوى القشرة الأرضية من معظم العناصر المغذية الأخرى. أما محتوى التربة من الكالسيوم فيقدر بـ **1.5%** وسطياً.

ويتأثر محتوى التربة من هذا العنصر بطبيعة الصخرة الأم التي نتجت عنها التربة، وبالظروف المناخية التي رافقت تشكلها.

فقد يصل محتوى التربة من الكالسيوم إلى أكثر من (10 %) في بعض الترب الكلسية، بينما يمكن أن ينخفض إلى ما دون الـ (1 %) في بعض الترب غير الكلسية.

عموماً يكون محتوى ترب المناطق الجافة وشبه الجافة من الكالسيوم أعلى من محتوى ترب المناطق الرطبة وشبه الرطبة.

بالإضافة إلى كون الكالسيوم من العناصر المغذية الأساسية الكبرى للنبات، فإن لهذا العنصر دوراً هاماً يلعبه في تحسين الخواص الفيزيائية والكيميائية للتربة من خلال تأثيره الإيجابي في بناء التربة وفي درجة تفاعلها (الـ pH). لذلك فإن المركبات الحاوية على الكالسيوم تعد من أفضل المواد لتحسين الترب الحامضية والترب القلوية واستصلاحها

١ – الكالسيوم في التربة Calcium in Soil

١-١ أشكال الكالسيوم Calcium Forms

يوجد الكالسيوم في التربة في أشكال كيميائية عدة، منها ما هو ذائب في محلول التربة، ومنها ما هو مدمص على السطوح الخارجية لغروياتها، ومنها ما هو مضمَّن في فلزات أولية وثانوية أو في أملاح معدنية.

١-١-١ الكالسيوم الفلزي Mineral Ca

يدخل الكالسيوم في تركيب العديد من الفلزات الأولية السيليكاتية كالفلدسبارات ومنها البلاجيوكلاز (أنورثيت Anorthite $CaAl_2Si_2O_8$)، والأمفيبولات (ومنها الهورنبلند Hornblende $(Ca)(Mg,Al,Fe)Si_2O_6$)، والبيروكسينات (ومنها الأوجيت Augite $(Ca)(Mg,Al,Fe)Si_4O_{11}$).

كما يدخل في تركيب العديد من الفلزات غير السيليكاتية كالأباتيت Apatite $[3Ca_3(PO_4)_2.CaX_2]$ والجبس Gypsum ($CaSO_4.2H_2O$)، والكالسيت Calcite ($CaCO_3$)، والدولوميت Dolomite ($CaMg(CO_3)_2$).

ويلاحظ انتشار فلزات البلاجيوكلاز والهورنيلند والأوجيت في الترب غير الكلسية، وانتشار الكالسيت والدولوميت في الترب الكلسية.

وتتراكم كربونات الكالسيوم في ترب المناطق الجافة وشبه الجافة ويمكن أن تصل نسبتها في التربة إلى أكثر من 70%.

يمكن القول إن المصدر الأساسي للكالسيوم في التربة هو كربونات الكالسيوم، وبخاصة الجزء الناعم منها الذي يماثل في أبعاد حبيباته أبعاد حبيبات الطين (< 0.002 مم)، ويدعى بالكلس الفعال Active lime.

فصغر أبعاد هذه الحبيبات يجعلها تتمتع بسطح نوعي كبير يكسبها فعالية كيميائية واضحة، حيث تذوب في الماء بوجود غاز CO_2 على النحو التالي:

$$CaCO_3 + CO_2 + H_2O \longrightarrow Ca(HCO_3)_2$$

$$Ca(HCO_3)_2 \longrightarrow Ca^{2+} + 2HCO_3^-$$

ويمكن أن تعود بيكربونات الكالسيوم إلى الترسب من جديد في الطبقات تحت السطحية على شكل $CaCO_3$ إذا وقعت التربة تحت مناخ قليل الأمطار نسبياً.

يمكن أن ينتج عن وقوع التربة في منطقة تتصف بهطولات مطرية عالية عملية غسل Leaching للكالسيوم الناتج عن ذوبان الكالسيت، مما قد يؤدي مع مرور الزمن إلى تحول التربة إلى **حامضية** حتى ولو كانت ناشئة على صخور كلسية، كما هو حال ترب منطقة شين ورباح وكفرام في محافظة حمص وترب برشين في محافظة حماة.

كما يمكن أن يؤدي انخفاض pH التربة، وزيادة تركيز شوارد الهيدروجين (H^+) فيها نتيجة لتحلل المادة العضوية وإضافة بعض الأسمدة ذات التأثير الحامضي (مثل سلفات الأمونيوم وكلور الأمونيوم) إلى ذوبان كربونات الكالسيوم، وإلى إحلال الهيدروجين مكان الكالسيوم على سطوح غرويات التربة:

$$CaCO_3 + 2H^+ \longrightarrow Ca^{2+} + CO_2 + H_2O$$

$$\text{Colloid}\left]\!\!\right= Ca + 2H^+ \longrightarrow \text{Colloid}\left]\!\!\begin{matrix}H\\H\end{matrix}\right. + Ca^{2+}$$

في كافة الأحوال، يمكن للكالسيوم المتحرر من الفلزات الحاوية عليه بنتيجة التجوية يمكن أن يُفقد من التربة مع مياه الصرف، أو يُمتص من قبل النبات والكائنات الحية، أو يُدمص على سطوح غرويات التربة، أو يترسب من جديد على شكل مركبات كلسية أبرزها $CaCO_3$.

١-١-٢ الكالسيوم المتبادل Ca Exchangeable

يقصد به الكالسيوم المدمص على سطوح غرويات التربة المعدنية منها والعضوية. ويشكل الكالسيوم المتبادل عادة حوالي (80%)من سعة التبادل الكاتيوني للتربة، ويمكن أن تصل هذه المساهمة إلى أكثر من (90%) في الترب الغنية بالمركبات الكلسية وبفلزات الطين من نموذج (1:2) كالمونتموريونيت.

حين يمكن أن تنخفض هذه النسبة إلى أقل من (20%) من سعة التبادل الكاتيوني في التربة الغنية بفلزات طين من نموذج (1:1) كالكاؤولينيت، وفي الترب الحامضية حيث تسيطر أيونات الهيدروجين (H^+) والألمنيوم (Al^{3+})على معقد ادمصاص التربة Soil Adsorption Complex.

وينخفض محتوى التربة من الكالسيوم المتبادل في **الترب القلوية والترب المشتقة من صخر السربنتين** أيضاً، حيث تسيطر أيونات الصوديوم (Na^+) في النوع الأول والمغنزيوم (Mg^{2+}) في النوع الثاني من هذه الترب على الترتيب.

ويشكل الكالسيوم المتبادل الرصيد الأساسي للكالسيوم الذائب لوجود نوع من التوازن بين هذين الشكلين للكالسيوم في التربة:

$$\text{Exchangeable} - \text{Ca} \rightleftharpoons \text{Soluble} - \text{Ca}$$

١-١-٣ الكالسيوم الذائب Soluble Ca

تحتوي معظم الترب المعدنية على تراكيز عالية من **الكالسيوم الذائب** تؤمن متطلبات المحاصيل النامية فيها. وبشكل عام يتعلق محتوى التربة من الكالسيوم الذائب بعدد من العوامل أهمها تفاعل التربة (الـ pH)، والظروف المناخية السائدة.

حيث يمكن أن يصل تركيز الكالسيوم الذائب في محاليل الترب الكلسية إلى أكثر من 560 ملغ/ل، بينما ينخفض في محاليل الترب الحامضية إلى 136 ملغ/ل .

ويمكن القول إن الترب الحامضية تعاني نقصاً في الكالسيوم الذائب نتيجة لإحلال أيونات (H^+) مكان أيونات Ca^{2+} على سطوح الغرويات وتعرض أيونات Ca^{2+} للغسل. كما يمكن أن تعاني الترب العضوية أيضاً من نقصه نتيجة لادمصاص Ca^{2+} على الدبال وتكوين معقدات عضوية للكالسيوم غير ذائبة.

١-٢ -العوامل المؤثرة في قابلية الكالسيوم لإفادة النبات:

يتعلق محتوى التربة من الكالسيوم القابل لإفادة النبات بمجموعة من العوامل أهمها حسب رأي (Tisdale *et al.*, 1993):

أ- تفاعل التربة(Soil pH).

ب-سعة التبادل الكاتيوني (CEC).

ت-نسبة تشبع غرويات التربة بالكالسيوم.

ث-نوع فلزات الطين.

ج-نسبة كاتيونات الكالسيوم إلى الكاتيونات الأخرى في محلول التربة.

ح-الأيون المرافق.

فمع انخفاض درجة تفاعل التربة تزداد الفعالية الأيونية للهيدروجين مما يعيق امتصاص النبات للكالسيوم، لذلك يُعتقد بأن النباتات تتطلب تركيزاً أعلى للكالسيوم المتاح في التربة مع انخفاض (pH) التربة عن **(5.6)**.

تتصف **الترب الرملية الحامضية** ذات سعة التبادل الكاتيوني المنخفضة، بانخفاض مقدرتها على تأمين حاجة المحاصيل المختلفة من الكالسيوم بأشكال متاحة للنبات.

وتكون الحاجة ماسة في مثل هذه الظروف، لإضافة مركبات الكالسيوم بهدف تأمين حاجة النبات من هذا العنصر من جهة، ومن أجل استصلاح التربة من جهة أخرى.

في الواقع، **ليس للكميات المتبادلة من الكالسيوم** أهمية كبيرة في تغذية النبات بهذا العنصر بقدر ما لدرجة تشبع غرويات التربة به. فمع انخفاض درجة تشبع غرويات التربة بالكالسيوم تنخفض الكمية القابلة لإفادة النبات منه، وبالعكس.

ويُعتقد أن معظم المحاصيل تستجيب **لإضافة مركبات الكالسيوم** عندما تنخفض نسبة التشبع بالكالسيوم عن **(25%) من سعة التبادل الكاتيوني.**

ومن جهة أخرى، فإنَّ **سيادة الكالسيوم** على معقد ادمصاص التربة يترافق في الوقت ذاته مع محتوى منخفض من بعض الكاتيونات المتبادلة غير المرغوب فيها (كالألمنيوم Al^{3+} في الترب الحامضية، والصوديوم Na^{+} في الترب القلوية)، عدا عن كون هذا العنصر ضرورياً من أجل تأمين تفاعل تربة (pH) مفضل من أجل نمو معظم النباتات وللنشاط الحيوي أيضاً.

من ناحية أخرى، تتوقف **جاهزية الكالسيوم** في التربة على نوع فلز الطين السائد فيها. ففلزات الطين من نموذج (1:2) تتطلب درجة تشبع أعلى بالكالسيوم لتزويد النبات بمستوى مناسب منه بالمقارنة مع فلزات الطين من نموذج (1:1). **فالمونتموريونيت** مثلاً يتطلب درجة تشبع بالكالسيوم قدرها (70%) أو أكثر لتزويد النباتات بحاجتها من هذا العنصر المغذي، بينما يمكن لفلز **الكاؤولينيت** مثلاً أن يفي بحاجة معظم النباتات من الكالسيوم عند درجة تشبع تتراوح بين (40) و (50%).

كما تتأثر **جاهزية الكالسيوم وامتصاصه** من قبل النبات بنسبة كاتيون الكالسيوم إلى الكاتيونات الأخرى في محلول التربة أيضاً. فالنسبة ($Ca^{2+} / Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^{+}$) التي تتراوح بين (10) و(15%) مرغوبة لنمو وتطور مناسب لجذور القطن مثلاً، بينما تتطلب جذور فول الصويا نسبة تتراوح بين (10) و (20%) من أجل تحقيق نمو مناسب.

وتتعلق الكمية الممتصة من **الكالسيوم** بالكاتيون المرافق، وشكل النتروجين المعدني السائد في التربة. فمن المؤكد أن امتصاص النبات للكالسيوم يتأثر سلباً بتأثير كلٍ من الكاتيونات التالية: $NH^{4+}, K^{+}, Mg^{2+}, Al^{3+}$. بالمقابل لوحظ ازدياد في الكمية الممتصة من الكالسيوم عندما يكون النتروجين المعدني في التربة موجوداً على شكل نترات ($NO^{3-} - N$)أساساً.

٢- الكالسيوم في النبات Calcium in plant:

٢-١ محتوى النبات من الكالسيوم:

يتراوح محتوى النبات من الكالسيوم بين 0.5 و3% في المادة الجافة. ويختلف هذا المحتوى باختلاف النوع النباتي، والجزء النباتي، والعمر الفيزيولوجي. فالنباتات ثنائية الفلقة تتطلب كميات أكبر من الكالسيوم مقارنة بالنباتات أحادية الفلقة، كما أن محتوى الأوراق المسنة من الكالسيوم أكبر من محتوى الأوراق الفتية منه.

يتوضع الكالسيوم أساساً في المنطقة الفاصلة بين السيتوبلازم والجدر الخلوية، ويوجد في الصفيحة الوسطى على شكل بكتات كالسيوم، كما يتواجد في الفجوات الخلوية على شكل أوكسالات أو فوسفات أو كربونات الكالسيوم، وفي الأنسجة النباتية المختلفة على شكل أيونات كالسيوم (Ca^{2+}) حرة أو مدمصة على المجاميع الوظيفية الكربوكسيلية والفينولية.

ويوجد الكالسيوم في **البذور** مرتبطاً مع حمض الفيتيك Phytic acid (اينوسيتول سداسي الفوسفات)، على شكل ملح فيتات الكالسيوم.

٢-٢ امتصاص الكالسيوم Calcium Uptake

يعزى المحتوى المرتفع نسبياً للكالسيوم في النبات أساساً إلى ارتفاع تركيز هذا الكاتيون في محلول التربة، وليس إلى كفاءة امتصاصه من قبل الخلايا الجذرية.

وعلى الرغم من كون تركيز الكالسيوم في محلول التربة يفوق بحوالي عشرة أضعاف تركيز البوتاسيوم فيه فإن معدل امتصاص النبات **للكالسيوم** أقل عادةً من معدل امتصاصه **للبوتاسيوم**.

ويمتص النبات الكالسيوم على صورة أيونية **(Ca^{2+})**. ويُعتقد أن امتصاص الكاليسوم يتم بواسطة القمم الجذرية الفتية بآليات سلبية Passive Uptake،عن طريق الانتشار والجريان الكتلوي. وينتقل الكالسيوم الممتص نحو الأجزاء العلوية للنبات بواسطة الأوعية الخشبية. ويعد هذا العنصر ضعيف الحركة ضمن النسغ اللحائي، لذلك تكون البذور والثمار **فقيرة به** نسبياً نظراً لكونها تتغذى **عن طريق النسغ اللحائي**.

٣-٢- الوظائف الفيزيولوجية للكالسيوم Functions of Calcium

يؤدي الكالسيوم العديد من الوظائف الفيزيولوجية الهامة في النبات، منها:

١. يدخل في تركيب الصفيحة الوسطى للجدار الخلوي على شكل بكتات كالسيوم، مما يساعد على زيادة متانة هذا الجدار. كما يساهم في تشكيل العديد من المركبات المخلبية Chelatesالتي تكسب الخلية المرونة.

وبالتالي تكون الخلايا قوية من جهة، ومرنة من جهة أخرى مما يجعل النبات أقل عرضةً لتأثير الرياح الأمر الذي يقلل من تعرض المحاصيل النجيلية **للرقاد**.

٢. يقوم الكالسيوم بتعديل الحموضة العضوية الناتجة عن أحماض الأوكزاليك والستريك والطرطريك، عن طريق الاتحاد مع أنيونات هذه الأحماض وتشكيل رواسب بلورية تتجمع في الفجوات الخلوية غالباً

٣. يعد هذا العنصر ضرورياً **لانقسام الخلايا المريستيمية ونمو حبوب اللقاح**، ويؤدي نقصه إلى تلوّن القمم النامية **باللون البني**.

٤. يساهم في نقل الكربوهيدرات من أماكن اصطناعها في الأوراق إلى أماكن تجمعها في الدرنات كما هو الحال في **البطاطا**، أو في الجذور كما هو الحال في **الشوندر السكري** على سبيل المثال.

٥. ضروري للنباتات البقولية، إذ يلعب دوراً مهماً في تكوين العقد الجذرية وزيادة كفاءتها في تثبيت النتروجين الجوي.

٦. يسهم الكالسيوم مع العناصر الأخرى (B, Mn, Cl, Na, K) في تنظيم **الجهد الأسموزي** للخلية النباتية.

٧. يشترك الكالسيوم مع المغنزيوم في تكوين **مركب الفيتين Phytin** من خلال تفاعله مع حمض الفيتيك. ويعد هذا المركب المصدر الأساسي للفوسفور أثناء مرحلة **إنبات البذور وتشكل البادرات**.

٨. يسهم في تنظيم pH العصارة الخلوية من خلال تشكيله لمركب فوسفات الكالسيوم.

٩. يؤدي دوراً مهماً في **الحد من سمية المعادن الثقيلة Heavy metals**، والألمنيوم (Al^{3+})في ظروف الترب الحامضية من خلال المنافسة على الامتصاص من قبل النبات، وعلى مواقع التبادل على سطوح غرويات التربة.

٢-٤ نقص الكالسيوم Calcium Deficiency

نادراً ما تظهر أعراض نقص الكالسيوم على النباتات المزروعة في **ترب المناطق الجافة وشبه الجافة** لغنى هذه الترب عموماً بالكالسيوم القابل لإفادة النبات. لكن من الممكن ظهور هذه الأعراض على النباتات النامية في الترب المشتقة من صخور السربنتين الغنية بالمغنزيوم، كنتيجة لمنافسة المغنزيوم للكالسيوم على الامتصاص من قبل النبات.

كما يمكن أن تظهر أعراض نقص الكالسيوم على النباتات النامية في **الترب الحامضية** التي غالباً ما تكون فقيرة بهذا العنصر، وفي الترب **الرملية** لانخفاض سعتها التبادلية الكاتيونية.

وقد ينتج نقص الكالسيوم عن ظروف أخرى لا تتعلق بمحتوى التربة من الكالسيوم القابل للإفادة، فالجفاف والملوحة والتسميد النتروجيني الأمونياكي يمكن أن يؤدي إلى انخفاض معدل انتقال الكالسيوم في النسغ الناقص وبالتالي ظهور أعراض النقص. كما أن سوء تهوية التربة وانخفاض درجة حرارتها.. وأي عامل آخر يعيق نمو الجذور، يمكن أن يؤدي إلى ظهور أعراض نقص هذا العنصر.

يعد الكالسيوم من العناصر **غير المتحركة** في النبات Immobile element، لذلك تظهر أعراض نقصه على النموات **الفتية** أولاً. وقد تحتوي الأوراق **المسنة** لنبات ما على كميات كبيرة من الكالسيوم، بينما تعاني الأوراق **الحديثة** للنبات ذاته نقصاً في هذا العنصر.

ويمكن إيجاز أهم الأعراض الناجمة عن نقص هذا العنصر بالآتي:

١. تشوه الأوراق الفتية وتقوس قممها وحوافها، وتلون العروق بلون أدكن من المناطق المحيطة بها.
٢. انخفاض معدل نمو النبات وضعف نمو المجموع الجذري.
٣. تعفن قمم الجذور وموتها بشكل تدريجي.
٤. ليونة في الأنسجة بسبب ذوبان الجدر الخلوية.
٥. موت القمم النامية، مما يؤدي إلى خروج عدد كبير من البراعم الجانبية الحديثة ويجعل مظهر النبات كثيفاً.
٦. يسبب نقصه على **التفاح** مرضاً فيزيولوجياً يدعى **"الندبة المرة" أو "التبقع الفليني Bitter pit".** حيث تظهر على الثمار، عند النضج أو أثناء التخزين، بقع فلينية بنية اللون تحت القشرة وتزداد مع مرور الزمن.
٧. يسبّب نقصه على **البندورة** إصابة الثمار بمرض يدعى **"تعفن الطرف الزهري Blossom-end rot".** حيث تتعفن قاعدة الزهرة نتيجة لتحلل الأنسجة الخلوية فيها.
٨. يمكن أن يؤدي نقص الكالسيوم، وبخاصةٍ عندما يكون معدل نمو النبات مرتفعاً، إلى مرض فيزيولوجي يسمى **" تراجع (التواء) الساق Bending down ".** إذ تظهر بقع متطاولة تحيط بالمنطقة الواقعة أسفل الحامل الزهري أو أسفل القمة النامية، لا تلبث أن تتحول إلى لون بني وتؤدي إلى التواء الساق أو الحامل الزهري وبقائه معلقاً لفترة قصيرة قبل أن يذبل ويموت.

٤-١ -علاج النقص:

يعالج نقص الكالسيوم في **الترب الحامضية** بإضافة المواد الحاوية عليه كمسحوق الحجر الكلسي Lime stone (الذي يتكون أساساً من كربونات الكالسيوم $CaCO_3$)،
وهيدروكسيد الكالسيوم $Ca(OH)_2$،
وأوكسيد الكالسيوم CaO.
وتتوقف الكمية المضافة من هذه المواد على **تفاعل التربة (الـ pH)**، وسعتها التبادلية الكاتيونية (CEC).
وتتراوح هذه الكمية عادة بين 3– 4 طن/هـ من CaO، أو 4– 6 طن/هـ من $CaCO_3$ تبعاً لخصائص التربة. وبحيث تضاف هذه الكمية مرة واحدة كل (3– 5) سنوات:

$$CaCO_3 + CO_2 + H_2O \longrightarrow Ca(HCO_3)_2$$

$$S.A.C.]^{-H}_{-H} + Ca(HCO_3)_2 \rightarrow S.A.C.]=Ca + 2H_2CO_3$$

$$CaCO_3 + 2H^+ \rightleftharpoons Ca^{2+} + H_2CO_3$$

$$CaO + H_2O \longrightarrow Ca(OH)_2$$

$$Ca(OH)_2 + 2H^+ \longrightarrow Ca^{2+} + 2H_2O$$

حيث: S.A.C تشير إلى معقد ادمصاص التربة Soil Adsorption Complex.

في **الترب القلوية والملحية** ينصح بإضافة **الجبس** ($CaSO_4.2H_2O$) بحدود (١٥-٤٠) طن/هـ،

تبعاً لمحتوى التربة من الصوديوم المتبادل Exchangeable Sodium (ESP %) Percentage، ودرجة التملح:

$$S.A.C.]^{-Na} + CaSO_4 \longrightarrow S.A.C]=Ca + Na_2SO_4$$

$$Na_2CO_3^{-Na} + CaSO_4 \longrightarrow CaCO_3 + Na_2SO_4$$

أمَّا في الترب المتعادلة، أو القريبة من ذلك، يمكن تعويض كمية الكالسيوم المفقودة من التربة بفعل امتصاص النبات أو الغسل بشكل غير مباشر، من خلال إضافة الأسمدة الفوسفاتية الحاوية على هذا العنصر.

فالسوبر فوسفات العادي يحوي على (18-21%)، والسوبر فوسفات الثلاثي (TSP) يحوي (12-14 %) كالسيوم. كما يمكن استخدام نترات الكالسيوم $Ca(NO_3)_2$ رشاً على الأوراق بتركيز (0.5%).

٣ ـ تحمل النباتات للظروف الكلسية

تـــــدعى التـــــرب التـــــي تحـــــوي علـــــى نســـــبة عاليـــــة مـــــن كربونـــــات الكالســـــيوم ($CaCO_3 > 10\ \%$) بالترب الكلسية Calcareous Soils. وتنتشر الترب الكلسية على نطاق واسع في المناطق الجافة وشبه الجافة من العالم. وتتصف هذه الترب عموماً بانخفاض مقدرتها على الاحتفاظ بالماء، وبالارتفاع النسبي لدرجة تفاعلها(pH) مما يؤدي إلى خفض جاهزية العديد من العناصر المغذية كالفوسفور والحديد والمنغنيز.

إضافة إلى ذلك تتصف الترب الكلسية أيضاً بارتفاع محتوى محاليلها الأرضية من أيونات البيكربونات والكربونات. ويتعرّض قسم لا بأس به من النتروجين الأمونيومي ($NH_4 - N$) فيها للفقد بالتطاير على شكل نشادر **(NH_3)**:

$$NH_4^+ + OH^- \longrightarrow H_2O + NH_3\uparrow$$

كل ذلك يسهم في إحداث ما يسمى **بـ "الشحوب الكلسيCalcareous chlorosis"**، الذي يظهر على بعض النباتات المزروعة في الترب الكلسية.

ويتجلّى بإصفرار صفيحة الورقة ما بين العروق، مع بقاء العروق خضراء اللون لفترة زمنية أطول. وتظهر هذه الأعراض على الأوراق **الفتية** أولاً ثم تنتقل تدريجياً لتشمل كامل النبات.

إنّ اختلاف الترب في محتواها من الكالسيوم، يؤدي إلى اختلاف الأنواع النباتية والأصناف في درجة تحملها للمستويات المرتفعة من الكالسيوم في التربة. **ويمكن، تبعاً لذلك، وضع الأنواع النباتية الشائعة في مجموعتين رئيسيتين:**

المجموعة الأولى: وتضم الأنواع النباتية أليفة (محبة) الكلس Calcicoles، مثل الشعير والشوندر السكري، ونباتات العائلة البقولية، والبندورة، والخضر الورقية، والزيتون، والتين، واللوز.

المجموعة الثانية: وتضم الأنواع النباتية كارهة الكلس Calcifuges، مثل الترمس وبعض الصنوبريات والحمضيات.

ويكمُن الخلاف بين هاتين المجموعتين النباتيتين في النقاط التالية (زيدان وآخرون، 1993):

١-لا تستطيع النباتات **الكارهة للكلس** تنظيم امتصاصها للكالسيوم عند ارتفاع تركيزه في وسط النمو وفي حال ارتفاع (pH) التربة، وذلك بخلاف النباتات أليفة الكلس.

٢. لوحظ وجود محفظة من كربونات الكالسيوم حول جذور النباتات **الكارهة للكلس** ناتجة عن إعادة ترسب بيكربونات الكالسيوم على شكل كربونات كالسيوم:

$$Ca(HCO_3)_2 \rightleftharpoons CaCO_3 + CO_2$$

حيث تشكل هذه المحفظة حاجزاً يمنع وصول الأيونات المعدنية إلى سطح الجذور، مما يسبب اضطرابات غذائية عند تلك النباتات.

٣. تطرح جذور النباتات **أليفة الكلس** كمية كبيرة من المفرزات الحامضية في وسط النمو، مما يؤدي إلى إذابة جزء لا بأس به من كربونات الكالسيوم الموجودة في منطقة المحيط الجذري (Rhizosphere). بينما تكون كمية هذه المفرزات الجذرية قليلة جداً عند النباتات **الحساسة للكلس**.

٤. يُعتقد أن النباتات **المحبة للكلس** تحرّر بعض المركبات العضوية القادرة على تشكيل معقدات حديدية-عضوية Organs – ferric Complexes ، مما يسهِّل امتصاص الحديد وانتقاله ضمن النبات.

هناك العديد من العوامل المؤثرة في إحداث الشحوب الكلسي والتي من أهمها ارتفاع محتوى التربة من كل من الكربونات الكلية والكلس الفعال Active lime وأيونات البيكربونات HCO^{3-}

يمكن القول أنّ الطريقة المثلى في الوقاية من الشحوب الكلسي على الأشجار المثمرة تكمن في استخدام الأصول المقاومة للكلس مثل الصنف (B41) للكرمة، والزفير للحمضيات، والأجاص البري للأجاص. **أمّا علاج هذا المرض الفيزيولوجي فيمكن الوصول إليه من خلال الوسائل التالية:**

١. حراثة ما تحت الطبقة السطحية للتربة لكسر الأفق الكلسي في حال وجوده.
٢. العمل على تحسين بناء التربة لتسهيل التبادل الغازي.
٣. استخدام المحسنات ذات التأثير الحامضي مثل الكبريت، واستخدام الأسمدة النتروجينية الأمونيومية مع الحرص على إضافة هذه الأسمدة على عدة دفعات، وخلطها مع التربة جيداً ثم الري منعاً لفقد النتروجين بالتطاير على شكل نشادر (NH_3).
٤. إضافة المواد والأسمدة العضوية المتحللة.
٥. التسميد الورقي بشيلات الحديد، وبخاصة (Fe-EDDHA) التي تدعى تجارياً باسم سيكوسترين 138.

The Magnesium

١- المغنزيوم في التربة Magnesium in Soil

١-١ - محتوى التربة من المغنزيوم:

يختلف محتوى التربة من المغنزيوم تبعاً لنوع مادة الأصل التي نشأت عنها ومحتواها من الطين والنوع السائد منه. ويتراوح هذا المحتوى عموماً بين (0.05%) في الترب الرملية و (0.5%) في الترب الطينية.

ويعزى ارتفاع محتوى الترب الطينية من المغنزيوم إلى سهولة تجوية الفلزات الحديدية المغنيزية Ferromagnesian minerals مثل البيوتيت Biotit والسربنتين Serpentine والأوليفين Olivine والهورنبلند Hornblend، ولدخول المغنزيوم في تركيب بعض الفلزات الثانوية كالكلوريت Chlorite والفيرميكيوليت Vermiculite والأيلليت Illite والمونتموريونيت Montmorillonite.

وتتصف ترب المناطق الجافة وشبه الجافة عموماً بارتفاع محتواها من المغنزيوم، الذي يمكن أن يصل إلى 1% أو أكثر يكون في معظمه على صورة سلفات مغنزيوم ($MgSO_4$)، وذلك بالإضافة إلى وجوده في مثل هذه الترب على شكل مغنزيت ($MgCO_3$) ودولوميت [$Ca\ Mg(CO_3)_2$].

١-٢ أشكال المغنزيوم Magnesium Forms

يمكن القول إن هناك ثلاثة أشكال رئيسة للمغنزيوم في التربة:

١-٢-١ المغنزيوم الفلزي Mineral- Mg

يشمل هذا الشكل المغنزيوم الموجود في الفلزات الأولية كالبيوتيت والسربنتين والأليفين، ومعظم المغنزيوم الموجود في الفلزات الثانوية كالإيلليت والفيرميكيوليت والمونتموريونيت.

ويكون معدل تحرّر المغنزيوم من هذه الفلزات قليلاً بالمقارنة مع احتياج النبات لهذا العنصر، ويزداد معدل التحرر مع زيادة تركيز أيونات الهيدروجين (H^+) في الترب الحامضية الذي يترافق مع تحطم هذه الفلزات، وعند احتواء التربة على نسبة عالية من الفلزات ذات القابلية للتمدد (كالمونتموريونيت)، الأمر الذي يؤدي إلى تحرر المغنزيوم من السطوح الداخلية للفلز إلى جانب السطوح الخارجية. ويبين الجدول (١-٩) أهم الفلزات الأولية والثانوية الحاوية على المغنزيوم في التربة.

الجدول (٩-١): أهم الفلزات الحاوية على المغنزيوم في التربة

Mg (%)	Mineral	الفلز
13	Dolomite	دولوميت
25	Olivine	أوليفين
49	Serpentine	سربنتين
2	Illite	ايليت
6	Montmorillonite	مونتموريونيت
23<	Chlorite	كلوريت
17 – 12	Vermiculite	فيرميكيوليت
29	Magnesite	مغنزيت
41	Brucite	بروسيت

2-2-1 المغنزيوم المتبادل Exchangeable– Mg

يقصد به المغنزيوم المدمص على السطوح الغروية المعدنية منها والعضوية. ويشكل المغنزيوم المتبادل حوالي (5%) من محتوى التربة الكلي من المغنزيوم، تمثل حوالي (4 – 20 %) من سعة التبادل الكاتيوني للتربة.

وتتراوح كمية المغنزيوم المتبادل في التربة بين (1)و(10) ميلي مكافئ / 100غ تربة، تبعاً لنوع مادة الأصل التي نشأت عنها التربة ولمحتوى التربة من فلزات الطين من النوع (1:2).

ويزداد محتوى التربة من المغنزيوم المتبادل في الترب الملحية، والقلوية، والترب الغنية بكربونات المغنزيوم.

بينما ينخفض في الترب الرملية لانخفاض سعة التبادل الكاتيوني فيها، وفي الترب الحامضية لزيادة معدل ذوبان المركبات الحاوية عليه وفقده من التربة مع مياه الصرف. وتعتبر التربة عموماً فقيرة بالمغنزيوم القابل للإفادة إذا انخفض محتواها من المغنزيوم المتبادل عن 40 مغ /كغ تربة.

علماً بأن هذا الحد الحرج Critical concentration يختلف باختلاف نسيج التربة ومحتواها من المادة العضوية، حيث يكون مرتفعاً في الترب الغنية بفلزات الطين من نموذج (1:2)كما في الترب الغنية بالمادة العضوية.

٣-2-1 المغنزيوم الذائب Soluble– Mg

يقدَّر محتوى محلول التربة من المغنزيوم بـ (2 – 5)ميليمول/ل. ويتراوح هذا المحتوى عادةً بين (0.2) و (150) ميليمول/ل. ويكون هذا المحتوى منخفضاً في الترب الحامضية (حوالي 2 ميليمول/ل)، ومرتفعاً في الترب الكلسية (حوالي 14 ميليمول/ل). وقد يصل محتوى التربة من المغنزيوم الذائب إلى أكثر من (200) ميليمول/ل فى بعض ترب المناطق الجافة الغنية بكبريتات المغنزيوم.

١- 3 -حركية المغنزيوم في التربة:

إن سلوك المغنزيوم في التربة يشبه إلى حدٍ بعيد سلوك الكالسيوم فيها. حيث يتحرر المغنزيوم من الصخور والفلزات الحاوية عليه عبر عملية التجوية، ويمكن للمغنزيوم المتحرر أن يُمتص من قبل النباتات النامية أو الكائنات الحية، أو يُدمص على سطوح غرويات التربة، أو يُفقد مع مياه الصرف، أو يعود للترسب من جديد. ويمكن للمغنزيوم أيضاً أن يرتبط مع المادة العضوية ليشكل معقدات عضوية – مغنيزيومية، لكن كمية المغنزيوم الداخل في تشكيل هذه المعقدات لا تتجاوز عادة الـ (1%) من محتوى التربة الكلي من هذا العنصر نظراً لضعف قوة ارتباط كاتيون المغنزيوم (Mg^{2+}) مع المادة العضوية مقارنة بالكاتيونات الثنائية الشائعة الانتشار في التربة.

ينتج عن ضعف المقدرة التبادلية للمغنزيوم في التربة مقارنة بالكالسيوم، تحرك المغنزيوم في التربة نحو الأسفل بسرعة أكبر من حركة الكالسيوم.

ولهذا السبب عادةً تكون النسبة (Ca / Mg) في الطبقة السطحية للترب الحامضية أكبر مما هي عليه في الطبقات تحت السطحية لهذه الترب. وتقدَّر كمية المغنزيوم المفقودة من التربة سنوياً بعملية الغسل Leaching بحوالي (2-30) كغ Mg / هكتار.

٢ المغنزيوم في النبات Magnesium in Plant

٢-١ محتوى النبات من المغنزيوم

تمتص النباتات المغنزيوم بكمية أقل من الكالسيوم والبوتاسيوم عموماً. ويقدر محتوى النبات من المغنزيوم بـ (0.5%) في المادة الجافة، وغالباً يكون محتوى الثمار والأنسجة التخزينية من المغنزيوم أعلى من محتواها من الكالسيوم نظراً لبطء حركة Ca^{2+} في النسغ اللحائي. ويدخل حوالي (20-30%) من محتوى النبات الكلي من المغنزيوم في تركيب الكلوروفيل. ويمكن أن يوجد المغنزيوم في النبات على صورة أيونية (Mg^{2+}) في العصارة الخلوية، ومرتبطاً بأيونات الحموض العضوية، أو بأيونات غير عضوية.

٢-٢- امتصاص المغنزيوم Magnesium Uptake

يمتص النبات المغنزيوم على شكل أيوني (Mg^{2+}) بواسطة القمم الجذرية الفتية فقط، وبآليات سلبية غالباً.

ويتأثر امتصاص النبات لهذا العنصر وانتقاله ضمن النبات بمجموعة من العوامل أهمها:

١. تؤثر النسبة (Ca/Mg) في التربة على معدل امتصاص كل من هذين العنصرين من قبل النباتات المختلفة. ويُعتقد أن ارتفاع هذه النسبة عن(٤/١) يمكن أن يؤدي إلى خفض الكمية الممتصة من المغنزيوم. وتزداد منافسة الكالسيوم للمغنزيوم على الامتصاص من قبل النبات حدةً مع **ارتفاع (pH) التربة**، وازدياد محتواها من كربونات الكالسيوم.

٢. لوحظ أن ارتفاع النسبة (K/Mg) في وسط النمو يمكن أن يؤدي إلى خفض معدل امتصاص المغنزيوم من قبل النباتات المختلفة. حيث يُعتقد أن هناك نوعاً من التضاد Antagonism بين البوتاسيوم والمغنزيوم. كما تبيّن أيضاً أن **إضافة الأسمدة البوتاسية** يمكن أن تؤدي إلى انخفاض تدريجي في معدل امتصاص عنصر المغنزيوم ينعكس انخفاضاً في محتوى النبات منه. وبناءً على ذلك، ينصح عند ظهور أعراض نقص المغنزيوم والبوتاسيوم معاً بإضافة أسمدة المغنزيوم أولاً لعلاج نقص هذا العنصر، ومن ثم إضافة الأسمدة البوتاسية. وعلى الرغم من أن رفع مستوى التغذية بالبوتاسيوم غالباً ما يؤدي إلى خفض عام في معدل امتصاص النبات للمغنزيوم فإن هذا التأثير يمكن أن يختلف من جزء نباتي لآخر وفق ما هو مبين في الجدول ٢-٩ (Viro, 1973).

٣. يتأثر امتصاص النبات للمغنزيوم بشكل مباشر بتفاعل التربة (pH). فلقد لوحظ أن معدل امتصاص النباتات للمغنزيوم يكون في حده الأعلى عند pH بحدود (5.0)، وقلما تظهر أعراض نقص المغنزيوم عند هذا الـ (pH) . لكن انخفاض رقم الـ (pH) عن ذلك، أو ارتفاعه غالباً ما يؤدي إلى خفض الكمية الممتصة من المغنزيوم نتيجة للمنافسة بين كاتيونات (Mg^{2+}) وكل من كاتيونات (H^+) و (Al^{3+}) عند انخفاض الـ (pH)، وبين كاتيونات (Mg^{2+}) وكاتيونات (Ca^{2+}) في حال ارتفاع الـ (pH).

٤. تؤثر طبيعة التغذية النتروجينية على معدل امتصاص المغنزيوم. فلقد لوحظ أن التسميد النتروجيني الأمونياكي ($NH_4 - N$) وارتفاع تركيز أيونات الأمونيوم (NH_4^+) في محلول التربة **يؤثر سلباً** في امتصاص النبات للمغنزيوم، بينما التسميد النتروجيني النتراتي (NO_3^-N) يحسِّن من امتصاص النبات لهذا العنصر. وربما كان ذلك عائداً إلى مساهمة الأسمدة الأمونياكية في خفض درجة (pH) التربة، ومساهمة الأسمدة النتراتية في رفعها.

٥. يتأثر امتصاص النبات للمغنزيوم بمستوى رطوبة التربة، حيث ينخفض معدل امتصاص هذا العنصر مع انخفاض نسبة الرطوبة في التربة وجفافها.

جدول(٩-٢): تأثير التغذية بالبوتاسيوم في محتوى نبات البندورة من العناصر المعدنية

Mg	Ca	Na	K	الجزء النباتي	المعاملة (m mole K^+/l)
في المادة الجافة (%)					
0.61	4.7	0.40	0.5	الأوراق	2
0.27	4.2	0.19	3.3		10
0.15	3.3	0.18	4.2		20
0.33	3.9	0.36	0.2	الجذور	2
0.31	3.2	0.25	2.2		10
0.26	3.3	0.13	2.4		20
0.07	0.09	0.10	1.6	الثمار	2
0.08	0.08	0.07	2.5		10
0.09	0.07	0.06	2.7		20

٣-٢ وظائف المغنزيوم Functions of Magnesium

يقوم المغنزيوم في النبات بالوظائف الفيزيولوجية التالية:

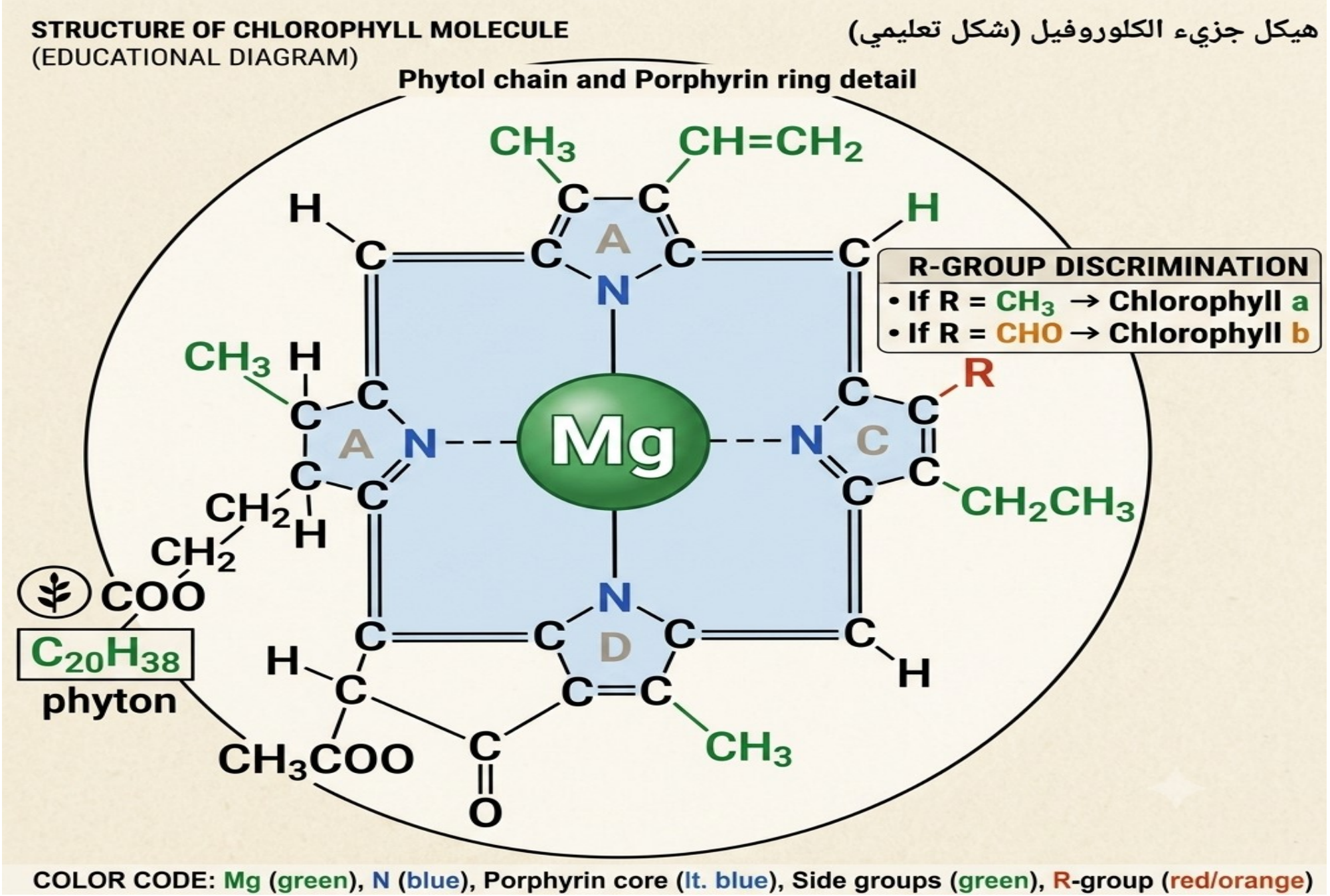
١. يدخل مع النتروجين في تكوين جزيء الكلوروفيل بنسبة تقدر بـ (2.7%)، **ولا يمكن للنباتات الخضراء القيام بعملية التمثيل الكلوروفيل بدونه** (الشكل ٩-١).

٢. يعزّز المغنزيوم من قدرة النبات على امتصاص الفوسفور، كما ينشّط حركة هذا العنصر في النبات من خلال قيامه بدور حامل للفوسفور، وله دور هام في تحويل الفوسفور المعدني الممتص إلى فوسفور عضوي.

٣. يساهم في نقل المواد الكربوهيدراتية من الأوراق إلى باقي الأجزاء النباتية.

٤. يلعب دوراً في اصطناع البروتينات وفي إرجاع النترات في النبات، كما يحفز التثبيت التكافلي للنتروجين الجوي بواسطة نباتات العائلة البقولية.

٥. ينشط عمل عدد من الأنزيمات مثل Enolase , corboxylase Pyruvic، والأنزيمات المسؤولة عن حلمهة الـ (ATP).



الشكل (٩-١): نموذج لجزيء الكلوروفيل

٤-٢ نقص المغنزيوم Magnesium Deficiency

يمكن أن تظهر أعراض نقص المغنزيوم في الترب الكلسية، والرملية، وفي الترب الحامضية، كما في الترب الحامضية المستصلحة بإضافة كميات كبيرة من المركبات الكلسية. ويمكن أن تظهر هذه الأعراض أيضاً عند إضافة كميات زائدة من الأسمدة البوتاسية أو الأمونيومية، وعند زراعة محصول متطلب للمغنزيوم في تربة لا تعاني أساساً من نقص في محتواها من المغنزيوم القابل للإفادة.

تبدأ أعراض نقص المغنزيوم بالظهور عندما ينخفض محتوى النبات منه عن (0.2 %) في المادة الجافة، وتتباين هذه الأعراض تبعاً للنوع النباتي. ونظراً لتمتع هذا العنصر بحركية عالية داخل النبات، فإن أعراض النقص تبدأ بالظهور **على الأوراق المسنة أولاً**، **وتتجلى هذه الأعراض بالآتي:**

١. اصفرار صفيحة الورقة مع بقاء العروق خضراء اللون لفترة أطول، وتصبح الأوراق قاسية وهشة وتتساقط قبل أوانها عند النباتات ثنائية الفلقة كالشوندر السكري، والكرمة، والفاصولياء، والبطاطا.

٢. ظهور بقع مرمرية تمتد بموازاة عروق الورقة عند النباتات أحادية الفلقة. وقد تظهر بقع أو خطوط صفراء اعتباراً من قمة وحواف الأوراق يتصل بعضها ببعض وتنتشر باتجاه قاعدة الورقة.

٣. يؤدي استمرار النقص إلى تخريب تام للكلوروفيل، وتوقف لتصنيع الكربوهيدرات، وتظهر أنسجة ميتة بلون بني، أو بني داكن داخل المساحات المصفرة. وقد تظهر على بعض النباتات تلونات برتقالية أو حمراء أو أرجوانية.

٤. تصبح الأوراق قاسية نتيجة لتجمع النشاء فيها بسبب إعاقة نقل نواتج عملية التمثيل الكلوروفيل.

٥. ينخفض محتوى الثمار والبذور والدرنات من البروتين والكربوهيدرات والليبيدات.

٦. يسبّب نقص المغنزيوم عند الكرمة مرضاً يدعى بـ " شلل أعناق أوراق وعناقيد الكرمة ".

٢-٥ إضافة المغنزيوم

تضاف المركبات الحاوية على المغنزيوم، كالدولوميت والسربنتين والمغنيزيت إلى التربة لتعويض الكميات المستنزفة منه عن طريق امتصاص النبات والتي تقدر وسطياً بـ 30-50 كغ Mg/هـ (الجدول ٩-٣)، وللوقاية من ظهور أعراض نقص هذا العنصر على النبات.

الجدول(٩-٣): كمية المغنزيوم المستنزفة من التربة بواسطة بعض المحاصيل

المحصول	الكمية المستنزفة (kg MgO / ha)
محاصيل نجيلية	14- 8
شوندر سكري	56 – 47
شوندر علفي	36 – 25
بطاطا	28 – 25
محاصيل بقولية	43 – 21

يمكن علاج نقص المغنزيوم على النباتات بإضافة أحد الأسمدة الحاوية عليه والمبينة في الجدول (٩-٤). حيث ينصح باستخدام الدولوميت والمغنيزيت في الترب الحامضية، أما في الترب المتعادلة فيفضل استخدام الأسمدة السلفاتية والنتراتية كملح أبسوم، وسلفات البوتاسيوم والمغنزيوم، ونترات المغنزيوم نظراً لسرعة ذوبانها. ويمكن استخدام المركبات الأخيرة كتسميد أرضي Soil application، أو ورقي Foliar application.

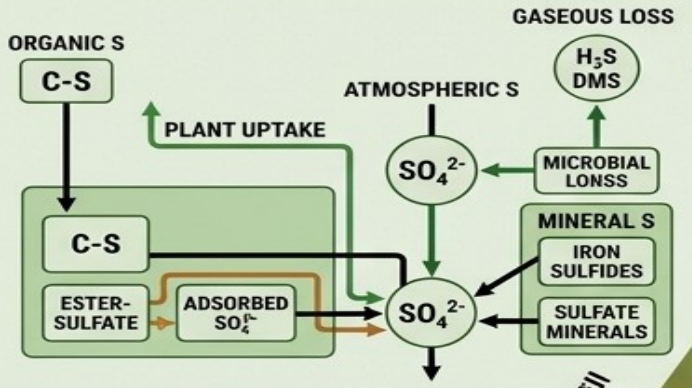
الجدول (٩-٤): الأسمدة المعدنية الحاوية على المغنزيوم

اسم السماد	الصيغة الكيميائية	MgO(%)
دولوميت	$Ca\ Mg(CO_3)_2$	13
مغنيزيت	$MgCO_3$	29
كيسيريت	$MgSO_4 .H_2O$	16
ملح ابسوم	$MgSO_4 .7H_2O$	9.6
سلفات البوتاسيوم والمغنزيوم	$K_2SO_4.MgSO_4$	7.7

ملخص العناصر المغذية الثانوية: الكبريت، الكاسيوم، المغنيسيوم (دورة، وظيفة، تشخيص)

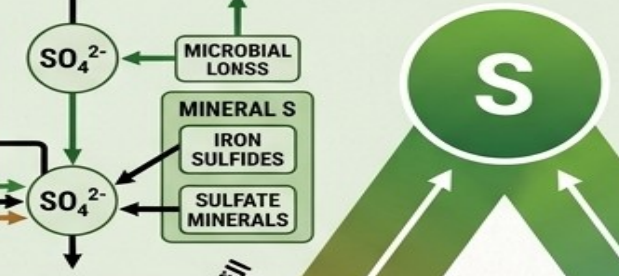
SUMMARY OF SECONDARY NUTRIENTS: SULFUR, CALCIUM, MAGNESIUM (CYCLE, FUNCTION, DIAGNOSIS)

الكبريت (S)

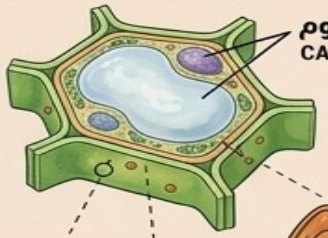


صيغة الامتصاص الأيوني:
SO_4^{2-}

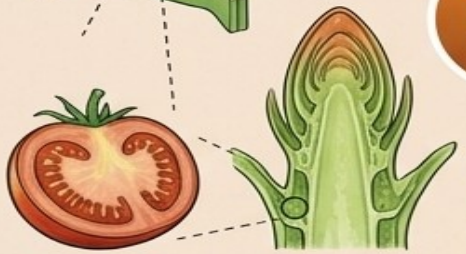
أعراض النقص: اصفرار كامل الأوراق الحديثة



الكالسيوم (Ca)



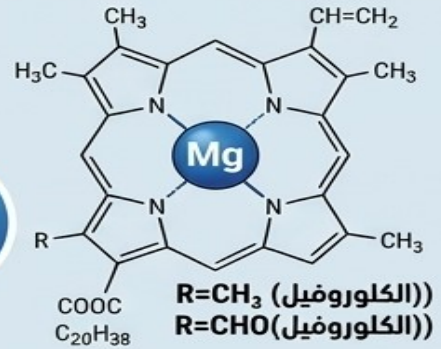
بكتات الكالسيوم
CALCIUM PECTATE



صيغة الامتصاص الأيوني:
Ca^{2+}

أعراض النقص: عفن الطرف الزهري وتيبس القمم
DEFICIENCY: BLOSSOM-END ROT AND TIPBURN

المغنيسيوم (Mg)



R=CH_3 ((الكلوروفيل
R=CHO((الكلوروفيل

الوظيفة: النواة المركزية للكلوروفيل والتمثيل الضوئي
FUNCTION: CENTRAL NUCLEUS OF CHLOROPHYLL AND PHOTOSYNTHESIS

أعراض النقص: اصفرار بين العروق على الأوراق القديمة
DEFICIENCY: INTERVEINAL CHLOROSIS ON OLD LEAVES

صيغة الامتصاص الأيوني:
Mg^{2+}

المهندس الزراعي الناجح: يفهم حركة العناصر في النبات والتربة، ويوازن بين هذه الثلاثة لإنتاجية زراعية مستدامة!

إلى اللقاء في المحاضرة القادمة