3- الكالسيوم Calcium:

وظيفته:

يقوم الكالسيوم بدوره أساساً خارج البروتوبلازم أى فى الفضاء الخارجى للنسيج النباتى apoplasm . يدخل الكالسيوم فى تركيب بكتات الكالسيوم المكون الأساسى للصفيحة الوسطى فى جدار الخلية. والكالسيوم كذلك هام لتكوين الأغشية الخلوية حيث يقوم بربط الدهون الفوسفورية مع بعضها ومع بروتينات الغشاء. وقد وجد أن نقص الكالسيوم يؤدى إلى فقد الغشاء البلازمى لخاصية النفاذية الاختيارية مما يؤدى إلى تسرب محتويات الخلية إلى الخارج، ويؤدى كذلك إلى زيادة ليونة الجدر الخلوية وهشاشتها. بالإضافة إلى ذلك فإن الكالسيوم يلعب أدوراً مهمة داخل السيتوبلازم ولكن بتركيزات ضئيلة تقارب تلك المميزة للعناصر الصغرى. فالكالسيوم أساسي لحدوث الانقسام الميتوزى بصورة طبيعية؛ وقد يحدث الانقسام الميتوزى الشاذ نتيجة نقص الكالسيوم. وينشط الكالسيوم أيضا بعض الإنزيمات مثل إنزيم الفوسفوليبيز phospholipase وإنزيم الأرجينين كينيز arginine kinase وإنزيم الأدنيل كينيز adenyl kinase، والإنزيم المحلل لـ ATP (ATPase). ويعتقد أن الكالسيوم أساسى للبناء الطبيعى للكروماتين، إذ تكثر التشوهات الكروموسومية عند نقص الكالسيوم.

أعراض نقصه:

من السهل تمييز نقص الكالسيوم فى النبات، فالمناطق المرستيمية فى الساق وكذلك الأوراق الحديثة وقمة الجذر تتأثر بشدة ثم لاتلبث أن تموت وربما يصير الجذر غليظاً وقصيراً وبنى اللون. ويحدث اصفرار على طول حافة الأوراق الأحدث عمراً، وغالباً ما تتحول هذه المناطق الى مناطق نخرية necrotic. ومن العلامات المميزة لنقص الكالسيوم أيضاً تشوه الأوراق الأحدث عمراً مع وجود قمة خطافية لها. وفى المناطق المرستيمية تصبح الجدر الخلوية هشة وضعيفة وتستطيل الخلايا وتتكون بها الفجوات مبكرا.

وأعراض نقص الكالسيوم فى النبات تظهر على الأوراق الأحدث عمراً ومناطق النمو الطرفية، ويرجع ذلك الى عدم تحرك الكالسيوم فى اللحاء إذ تحتفظ الأوراق المسنة بمحتواها من الكالسيوم فى حين تعانى المناطق المرستيمية من النقص إذ لا يصلها المدد الكافى من الكالسيوم عن طريق اللحاء.

4- المغنسيوم Magnesium:

وظيفته:

للمغنسيوم دوران هامان فى العمليات الأيضية للنبات، أولهما البناء الضوئى والثانى هو بناء البروتين. فالمغنسيوم مكون أساسى من مكونات جزئ الكلوروفيل والذى بدونه لا تحدث عملية التمثيل الضوئى، كما أنه ضرورى لتنشيط العديد من الانزيمات المصاحبة لأيض الكربوهيدرات. كذلك يدخل المغنسيوم فى تنشيط الإنزيمات التى تحفز تخليق DNA و RNA. وفى كل هذه التفاعلات سواء المتعلقة بأيض الكربوهيدرات أو تلك المتعلقة ببناء الأحماض النووية فإنه يحدث انتقال لمجموعة فوسفات ويعمل المغنسيوم كحامل وسيط لتلك المجموعة. وبالاضافة الى ذلك فإن المغنسيوم لازم لنشاط الإنزيمين الأساسيين فى تثبيت ثانى أكسيد الكربون وهما Phosphoenol pyruvate carboxylase و Ribulose 1,5-

bisphosphate carboxylase/oxygenase. والمغنسيوم أيضاً يعمل كعامل ربط هام لوحدتى الريبوزوم أثناء عملية بناء البروتين.

أعراض نقصه:

حيث أن المغنسيوم أحد مكونات جزئ الكلوروفيل لذلك فإن الأعراض العامة لنقص المغنسيوم فى النباتات الخضراء هى انتشار الشحوب فى المساحات بين عروق الأوراق. ويظهر الاصفرار على الأوراق السفلى أولاً ويتبع هذا ظهور صبغة الأنثوسيانين فى عروق الأوراق وربما تظهر بقع نخرية فى حالة النقص الشديد. وبالنسبة للتركيب الداخلى للنبات فقد وجد أن النقص الشديد فى المغنسيوم يسبب زيادة حجم النسيج الكلورانشيمي مع صغر الخلايا وزيادة عددها وامتلائها بالبلاستيدات وصغر حجم خلايا النخاع.

5- البوتاسيوم Potassium:

وظيفتة:

رغم أهمية البوتاسيوم لنمو النبات ورغم كمياته الكبيرة فى أنسجة النبات (تصل نسبته فى المادة الجافة إلى ما يقارب نسبة النيتروجين) إلا أن البوتاسيوم لا يدخل فى بنية أى من المركبات المعروفة فى الخلية، بل يوجد ذائبا فى السيتوبلازم أو فى العصير الخلوى على هيئة أيونات K^+. من اشهر وظائف البوتاسيوم دوره فى فتح وغلق الثغور. كذلك فإن البوتاسيوم منشط أساسى للانزيمات المصاحبة لبناء الروابط الببتيدية وهو يعمل كمنشط للعديد من الإنزيمات التى تصاحب تمثيل الكربوهيدرات. ويلاحظ أثناء المراحل المبكرة لنقص البوتاسيوم تراكم الكربوهيدرات فى أنسجة النبات وذلك بسبب ضعف بناء البروتين، حيث أن الهيكل الكربونى الذى يدخل فى بناء البروتين يتراكم على شكل كربوهيدرات. وأكبر تركيزات البوتاسيوم توجد فى المناطق المرستيمية للنبات؛ وتحت ظروف نقص البوتاسيوم تختفى السيادة القمية فى العديد من النباتات أو تكون ضعيفة بسبب الأضرار التى تقع على البرعم الطرفى.

أعراض نقصه:

من المظاهر الخارجية المميزة لنقص البوتاسيوم ظهور الاصفرار المبرقش mottled chlorosis على أوراق النبات أولاً ثم يعقبة تكوين مساحات نخرية على قمة وحافة الورقة، وبسب حركة البوتاسيوم السريعة فى اللحاء فإن تلك الأعراض تظهر أولا على الأوراق التامة النمو. ويلاحظ ميل قمة الأوراق إلى الانحناء إلى أسفل فى حين تلتف حواف الأوراق إلى أعلى. وبصفة عامة فان النباتات التى تعانى من نقص البوتاسيوم تكون قزمية وذات سلاميات قصيرة. ومن الناحية التشريحية فإن نقص البوتاسيوم يسبب تحلل خلايا النخاع وإلى تكشف الخلايا البارنشيمية اللحائية إلى خلايا مرافقة وأنابيب غربالية.

6- الكبريت Sulfur:

وظيفتة:

يتفاوت تركيز الكبريت فى الأنواع المختلفة من النباتات فقد يصل الى تركيز عالى جداً فى أنواع العائلة الصليبية Cruciferae or Brassicaceae مما يكسبها طعماً ورائحةً مميزيتين على عكس النجيليات والتى تتميز بتركيزات منخفضة من الكبريت. ومن أهم وظائف الكبريت أنه يشترك فى تركيب البروتين فى صورة الأحماض الأمينية الحاملة للكبريت وهى , methionine cysteine. كذلك الكبريت مهم للنشاط الأيضى للفيتامينات الحاملة للكبريت (البيوتين biotin، الثيامين thiamin و المرافق الانزيمى أ CoA-SH). يوجد الكبريت أيضاً فى مجموعات السلفهيدريل SH– والتى تكون لازمة لنشاط العديد من الانزيمات. ويكون الكبريت روابط ثنائية الكبريتيد disulfide linkages المتصالبة فى جزئ البروتين والتى تسهم بالإضافة إلى الروابط الببتيدية والروابط الهيدروجينية والروابط الملحية فى ثبات التركيب البروتينى. ويدخل الكبريت فى بناء مركب فيريدوكسين ferridoxin المهم فى تفاعلات الضوء للبناء الضوئى وفى أيض النيتروجين كناقل للإلكترون . كما يدخل فى بناء الدهون الكبريتية sulfolipids الأساسية لأغشية الثيلاكويد بالبلاستيدات الخضراء. بالإضافة إلى ذلك فإن الحمض الأمينى الحامل للكبريت سستيين cysteine يدخل فى تركيب بعض الببتيدات القصيرة مثل الجلوتاثيون glutathione وبعض البروتينات منخفضة الوزن الجزيئى مثل الفيتوكلاتين phytochelatins الفعالة فى مقاومة التلوث بالمعادن الثقيلة والإجهاد التأكسدى oxidative stress للخلايا الحية.

أعراض نقصه:

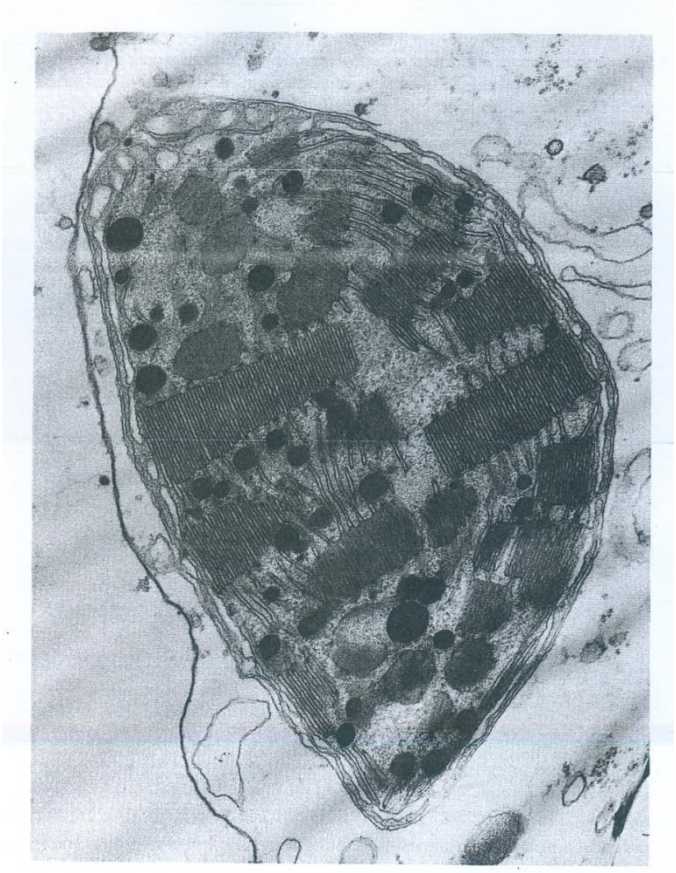
تتشابه أعراض نقص الكبريت إلى حدٍ ما مع أعراض نقص النيتروجين حيث يظهر علي النبات اصفرار عام مع تكون صبغ الأنثوسيانين. ولكن الفرق هو أن الاصفرار الناتج عن نقص الكبريت يظهر أولاً على الاوراق الأحدث عمرا حيث أن الكبريت عنصر متحرك نسبياً فى اللحاء بعكس النيتروجين والذى يكون متحركاً بسرعة بالاضافة الى صعوبة تحرر الكبريت من مركباته فى الاوراقة المسنة لكى يمكنه الانتقال فى اللحاء. وبالدراسة التشريحية وجد أن نقص الكبريت يؤدى الى نقص ملحوظ فى صفائح الاستروما فى البلاستيدات الخضراء والى زيادة فى تكدس صفائح الجرانا (شكل 9). ويؤدى نقص الكبريت كذلك إلى تراكم النشا والسكروز والنيتروجين الذائب وذلك بسبب تثبيط بناء البروتين مقترناً مع زيادة تحلله.

ثانياً: العناصر الصغرى micronutrients

7- الحديد Iron:

وظيفتة:

للحديد العديد من الوظائف الهامة فى العمليات الأيضية للنبات. ويؤخذ الحديد على صورة Fe^{3+} أو Fe^{2+} . ويدخل الحديد مباشرة فى تركيب السيتوكرومات (المركبات الأساسية للانسياب الالكترونى فى الميتوكوندريا) وأيضاً الفريدوكسين ferridoxin وهو مركب لازم لتفاعلات الضوء فى البناء الضوئى ولأيض النيتروجين. وكذلك فان الحديد لازم لبناء بروتينات البلاستيدات كما يدخل فى تركيب الفلافوبروتين flavoprotein الذى يلعب دورا مهماً فى الأكسدة الحيوية. كما يوجد الحديد فى بعض الانزيمات مثل البيروكسيديز peroxidase والكاتاليز catalase.



شكل 9. صورة بالميكرسكوب الإلكترونى لبلاستيدة نبات الذرة تحت تأثير نقص الكبريت. لاحظ تكدس أكياس البذيرات وقلة أكياس ما بين البذيرات.

أعراض نقصه:

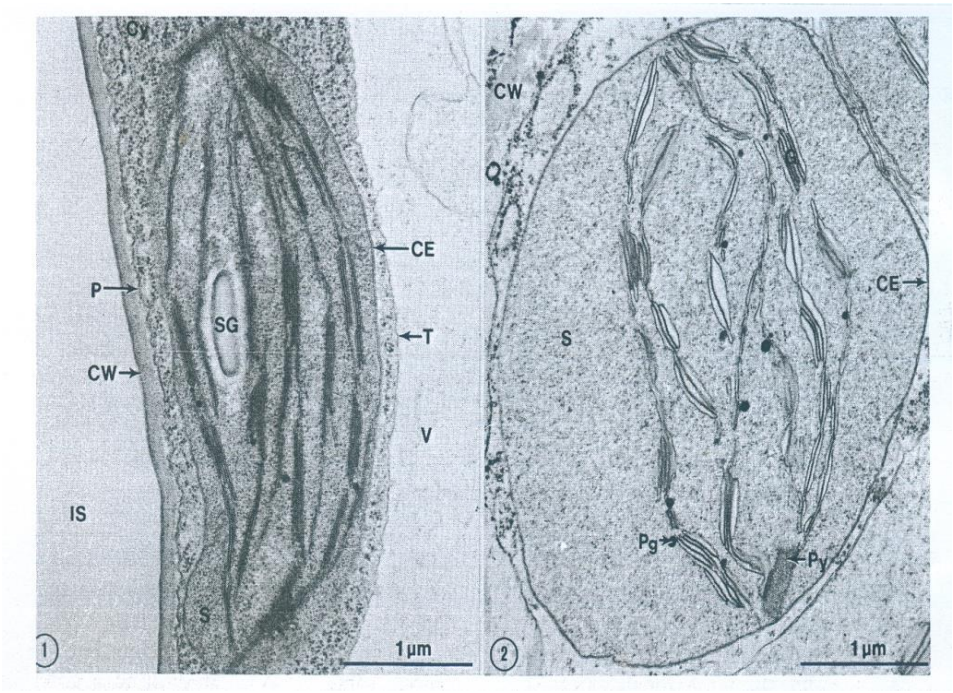
من الأعراض المميزة لنقص الحديد الشحوب الشديد للأوراق وخاصة الأوراق الأحدث عمراً أما الأوراق الناضجة فلا تعانى الاصفرار. ويرجع ذلك إلى أن عنصر الحديد غيرمتحرك نسبياً فى اللحاء؛ حيث لاتستطيع الأوراق الأحدث عمراً الحصول على كفايتها من الحديد بينما تحتوى الأوراق المسنة على تركيزات كافية منه. ومن المظاهر المميزة لنقص الحديد أيضاً وجود الاصفرار الشبكى بين العروق reticulate interveinal chlorosis ، حيث تكون شبكة العروق الأولية والثانوية خضراء بينما تكون المساحات الدقيقة المحصورة بينها باهتة اللون. وقد وجد الباحثون علاقة وثيقة بين محتوى الحديد ومحتوى الكلوروفيل فى الأوراق؛ ونظراً لأن الحديد لا يدخل مباشرة فى بنية جزىء الكلوروفيل فإن هذ التأثير ربما يرجع إلى دور الحديد فى بناء بروتينات البلاستيدة (شكل 10).

8- المنجنيز Manganese:

وظيفتة:

يعتبر المنجنيز عنصراً أساسياً فى التنفس وأيض النيتروجين حيث يعمل كمنشط للإنزيمات. والمنجنيز هو الأيون المعدنى السائد فى تفاعلات دورة كربس ؛ ومن إنزيمات هذه الدورة التى تحتاج المنجنيز كمنشط لها إنزيم malic dehydrogenase وإنزيم oxalosuccinic decarboxylase . كذلك يلعب المنجنيز دوراً هاماً فى اختزال النترات حيث ينشط انزيم nitrite reductase. وللمنجنيز دور هام فى عملية التمثيل الضوئى فى مرحلة إنتاج الأكسجين إذ يحفز انتقال الالكترون من الماء

الى الكلورفيل فى تفاعلات الضوء. وقد لوحظ أن نقص المنجنيز يؤدى الى الهدم الضوئى للكلوروفيل فى الطحالب والذى يؤدى الى اصفرار الطحلب.



شكل 10. بلاستيدة من نبات سبانخ يعانى من نقص الحديد (على اليمين) وأخرى من نبات عادى (على اليسار)

أعراض نقصه:

يتميز نقص المنجنيز بظهور تبقع شحوبى أو نخرى فى المساحات بين العروق للورقة، وتظهر تلك الأعراض على الأوراق الأحدث سناً و ذلك لعدم قدرة المنجنيز على الحركة فى اللحاء. وقد تظهر بقع بنية على فلقات بذور البسلة والفاصوليا. ولنقص المنجنيز أيضا تأثير واضح على البلاستيدات الخضراء حيث تفقد البلاستيدة الكلوروفيل وحبيبات النشا ويظهر بها فجوات وفى النهاية تتحلل.

9- النحاس Copper:

وظيفتة:

يعمل النحاس كمكون لإنزيم phenolase والذى يحفز أكسدة الفينولات الأحادية إلى الفينولات العديدة ثم إلى الكينونات و إنزيم laccase الذى يؤكسد الفينولات العديدة فقط إلى الكينونات. وهذان الإنزيمان مهمان لكثير من التفاعلات داخل النبات خاصة عملية تخليق اللجنين. والنحاس أيضاً مكون لإنزيم ascorbic acid oxidase والذى يحفز أكسدة حمض الأسكوربيك إلى ديهيدرو حمض الأسكوربيك. والنحاس مهم فى عمليات التمثيل الضوئى للنبات؛ إذ تحتوى البلاستيدات الخضراء على بروتينات بها نحاس تسمى البلاستوسيانين plastocyanin وهى أساسية كحاملات للالكترونات فى البناء الضوئى. وأيضا إنزيمات البلاستيدات وخاصة الفينوليزات تحتوى على النحاس لأداء وظيفتها.

أعراض نقصه:

من أوضح أعراض نقص النحاس على أشجار الفاكهة مرض التصمغ gummosis حيث يتميز بإسالة الصمغ من جذوع الأشجار ويكون ذلك مصحوباً بموت القمم dieback وبظهور مناطق ميتة وتبقع بنى على الأوراق. وهناك مرض آخر يظهر على النجيليات في الأراضى الحديثة الاستصلاح ويسمى مرض الاستصلاح reclamation، ويتميز هذا المرض باصفرار قمم الاوراق وعجز النباتات عن انتاج البذور، وكذلك تأخذ الأوراق فى الذبول. وفى حالة النقص الشديد يحدث نخر فى قمم الأوراق الحديثة والذى يمتد الى حواف الأوراق ثم لا تلبث أن تموت الأوراق ويأخذ النبات كله مظهراً ذابلاً.

10- الزنك Zinc:

وظيفتة:

يدخل الزنك فى التخليق الحيوى للأوكسين النباتى إندول حمض الخليك indole acetic acid ، حيث أن أعراض نقص الزنك على النبات تكون مصحوبة بنقص فى تركيز IAA .ويكون ذلك عن طريق أن الزنك يحفز تصنيع الحمض الأمينى التربتوفان tryptophan والذى يعتبر منشىء الأوكسين auxin precursor؛ وبالتالى يؤثر الزنك على نمو النبات. والزنك منشط للعديد من الانزيمات مثل انزيم carbonic anhydrase الذى يساعد على تحليل حمض الكربونيك، وإنزيم pyridine nucleotide dehydrogenase الذى يحفز أكسدة NADH و NADPH وكذلك إنزيم alcohol dehydrogenase. كما أنه يلعب دورا فى تنشيط الانزيمات الناقلة للفوسفات، وله أيضاً دور فى بناء البروتين. والدليل على ذلك هو تراكم المركبات النيتروجينية الذائبة مثل الأحماض الأمينية والأميدات فى أنسجة النباتات التى تفتقر إلى الزنك.

أعراض نقصه:

أولى علامات نقص الزنك هى ظهور الشحوب بين عروق الأوراق الأكبر عمراً مبتدئاً من القمة والحواف ثم يعقب ذلك ظهور بقع نخرية بيضاء. ومن المظاهر الواضحة لنقص الزنك وجود أوراق صغيرة وسلاميات قزمية ينتج عنها قصر وتقزم النبات حيث تكون الأوراق أصغر فى الحجم و مشوهة الشكل و تعرف هذه الظاهرة بالتورد rosette. ويسبب غياب الزنك أيضا تأثيراً سلبياً على إنتاج البذور و نمو الثمار فى بعض النباتات. كما وجد أن نقص الزنك يؤدى إلى تراكم الفسفور الغير عضوى وتراكم المركبات النيتروجينية الذائبة مثل الأحماض الأمينية والأميدات فى أنسجة النبات.

11- البورون Boron:

وظيفتة:

دور البورون فى الأيض النباتى غير محدد على وجه الدقة ؛ فهو يلعب دوراً فى انتقال الكربوهيدرات داخل النبات حيث يعتقد أنه يكون مع السكر معقد بوراتى يسهل نقله عبر الأغشية الخلوية. والدليل على ذلك هو أن المظهر العام لنقص البورون فى النبات هو موت قمم السيقان و الجذور وتساقط الأزهار وهى الأعضاء ذات النشاط الأيضى العالى وهى نفس أعراض نقص السكر، وهذه الأعضاء هى أول ما يعانى من نقص البورون. وقد أجمع العلماء بصفة عامة على أن دور البورون ينحصر فى انتقال السكر فى اللحاء وفى بناء الحمض النووى DNA فى المرستيمات، ومن خلال هذا الدور يكون

له تأثير غير مباشر على كثير من العمليات الحيوية مثل نمو الخلايا وأيض النيتروجين والإخصاب و امتصاص الاملاح و تمثيل الهرمونات و العلاقات المائية و تمثيل الدهون و التمثيل الضوئى والتنفس.

اعراض نقصه:

إن أول أعراض نقص البورون والتى تظهر بعد بضع ساعات فقط من الحرمان من البورون هى موت قمة المجموع الخضرى ، وتموت قمم الأفرع الجانبية كذلك وذلك نظراً لاحتياج هذه المناطق النشطة لكميات عالية من السكر و لبناءDNA. كما لا تتكون الأزهار ويتوقف نمو الجذور وقد تظهر الأوراق بمظهر نحاسى سميك. وتتأثر أعضاء التخزين والأنسجة الداخلية للثمار ومن أمثلة ذلك مرض مثل عفن القلب heart rot فى بنجر السكر والقلب المائى water core فى اللفت وتكوين الفلين داخلياً internal cork formation فى التفاح.

12- الموليبدينم Molybdenum:

وظيفتة:

يلعب الموليبدينم دوراً هاماً فى تثبيت النيتروجين وفى تمثيل النترات. ولقد لوحظ أن نقص الموليبدنيوم يؤدى إلى نقص حاد فى تركيز حمض الأسكوربيك فى النبات، ويحدث إختلال فى تركيب البلاستيدات الخضراء وتتخذ الأوراق شكل الذيل السوطى whiptail. ويبدو أن الموليبدينم يلعب دوراً فى تمثيل الفوسفور.

أعراض نقصه:

تبدأ الأعراض المرئية لنقص الموليبدنيوم باصفرار مبرقش بين عروق الأوراق السفلى interveinal mottled chlorosis يعقبه نخر حافى والتفاف للأوراق و قد تذبل الأوراق كما قد لا تتكون الأزهار أو تسقط قبل عقد الثمار. وقد عرف مرض مميز لنقص الموليبدينم هو مرض الذيل السوطى فى القرنبيط حيث تتبرقش الورقة وتتلون الحواف باللون الرمادى و تذبل و لا يتبقى من الورقة إلا العرق الوسطى وكمية قليلة من النصل فتظهر بمظهر الذيل أو السوط.

العناصر المفيدة Beneficial elements

بالإضافة إلى العناصر الكبرى والصغرى السابق ذكرها هناك مجموعة من العناصر الغير ضرورية non-essential بمعنى أن النباتات لا تبدى إحتياجاً خاصاً لها ولا تعانى من غيابها ولكن إضافة هذه العناصر إلى وسط النمو يحسن من نمو النبات. وهناك عناصر من هذه المجموعة تكون أساسية وتعتبر فى عداد العناصر الصغرى micronutrients لنباتات معينة. ومن أمثلة هذه العناصر:

أ- الصوديوم Sodium: عنصر أساسى للنباتات الملحية الإجبارية obligate halophytes والنباتات رباعية الكربون C_4 plants ولكن بكميات قليلة فى حدود تلك المميزة للعناصر الصغرى؛ كما أنه قد يحسن نمو الكثير من النباتات عن طريق قيامه ببعض وظائف البوتاسيوم الغير متخصصة مثل ضبط الجهد المائى للخلية.

ب- الكوبلت Cobalt: عنصر ضرورى فقط للنباتات التى تعتمد فى تغذيتها النيتروجينية على تثبيت النيتروجين تكافليا مع البكتيريا مثل البقوليات. ولكن فى حالة إمداد النبات بالنيتروجين المثبت فلا ضرورة للكوبلت.

ت- السيليكون Silicon: عنصر أساسى لبعض النجيليات وللدياتومات إذ يدخل فى التراكيب السليكية فى جدر خلايا هذه الكائنات. والسيليكون يحسن من نمو كثير من النباتات إذ بترسبه على الجدر الخلوية يزيدها صلابةً ويجعل النبات قائماً وغير معرض للسقوط كما أنه يخفف من الآثار السامة لكثير من المغذيات عند تواجدها فى الوسط بتركيزات عالية مثل النيتروجين والمنجنيز والحديد ويحسن إمتصاص بعضها مثل الزنك.

ث- الكلورين Chlorine : أصبح الآن من المغذيات الصغرى إذ اتضح دوره فى تفاعلات الضوء فى عملية البناء الضوئى لجميع النباتات.

ج- الألومنيوم Aluminium: عنصر معروف بآثاره السامة غير أن هناك بعض التقارير تشير إلى أهميته لبعض النباتات. وقد يكون الأثر المفيد للألومنيوم من خلال معادلة الآثار السامة للتركيزات المرتفعة من الفوسفور والزنك والنحاس.

ح- النيكل Nickel: عنصر مكون لإنزيم اليوريز urease ولذلك فهو أساسى للنباتات التى تعتمد على اليوريا فى تغذيتها النيتروجينية. ونظراً لأن اليوريا تتكون بصورة طبيعية كمركب وسطى للأيض النيتروجينى للنبات فإن النيكل بذلك يعتبر من المغذيات الصغرى ويقوم بدوره فى حفز تفكيك اليوريا ومنع تراكمها فى أنسجة النبات إلى مستويات سامة.