امتصاص وانتقال العناصر الغذائية

تمتص جذور النبات المواد العضوية والمعدنية بصورة أيونية او غير أيونية ، غير ان معظم العناصر الغذائية الضرورية لنمو النبات تمتص بشكل ايونات مثل النيتروجين بصورتي الامونيوم (NH_4^+) و النترات (NO_3^-) والفسفور على صورة $H_2PO_4^-$ او الفوسفات HPO^{2-}_4 والبوتاسيوم على هيئة K^+ والكالسيوم على شكل Ca^{2+} والكلور على صورة Cl^- ... الخ.

الخلية النباتية تتكون من جدار خلوي سليلوزي يحيط بمكونات الخلية من الخارج ، يوجد بداخله السيتوبلازم والفجوات العصارية وتنطمر فيه بقية العضيات المتخصصة في مختلف الوظائف الحيوية مثل البلاستيدات (مكان حدوث التمثيل الضوئي) والميتوكندريا (مكان حدوث التنفس) والرايبوسومات (مكان تصنيع البروتين) و النواة (الناقل للصفات الوراثية) وهذه العضيات محاطة بأغشية وجميعها محاطة بغشاء السايتوبلازم . كما تحاط الفجوة بغشاء يفصل مكوناتها العضوية والمعدنية عن السايتوبلازم .

من هذا التركيب يتضح لنا أن انتقال عنصر غذائي من محلول التربة الى داخل الخلية قد يمر بجميع او بعض هذه المكونات لكي يصل الى مقر التمثيل ليدخل في العمليات البنائية المختلفة.

الفراغ الحر او الفراغ الخارجي .

يحتوي الجدار الخلوي للخلايا على مسامات تسمح لجزيئات الماء والايونات من المرور من خلالها بحرية دون استهلاك طاقة بعملية الانتشار وقد أطلق على هذا الحيز أسم الفراغ الحر Free space او الفراغ الخارجي (Outer space)وهذا الفراغ يمثل حوالي 10% من حجم خلايا الجذر . أما الجزء الداخلي والذي يقارب 90% من حجم الخلية فهو يمثل الجزء الذي يواجه فيه الماء والعناصر المعدنية صعوبة في عملية الانتشار.

يتكون الجدار الخلوي من السليلوز بشكل أساس ، أما الغشاء البلازمي فيتكون من الفوسفات والدهون (الدهون المفسفرة phospholipid) وهذه التركيبة تعطي السطوح الخارجية للخلايا شحنة سالبة ، وقد ترجع هذه الشحنة السالبة الى مجاميع الكاربوكسيل في الجدار الخلوي ومجاميع الفوسفات في الغشاء البلازمي. وعليه فان هذه المجاميع السالبة تقوم بجذب الكتيونات إليها ومنعها من الخروج ثانيةً الى محلول التربة في حين أنها تتنافر مع الايونات السالبة الشحنة وتبقى خارج الخلية، وعلى اساس ذلك فأن توزيعا جديدا يطرأ على الايونات الداخلة الى الخلية والخارجة منها الى الوسط الخارجي وقد أطلق على هذا التوزيع بتوزيع دونان، كما أطلق على هذا الجزء من الفراغ الحر اسم فراغ دونان الحر (Donnan free space) وهو يمثل 2% من حجم الجذر الكلي أي حوالي 20% من حجم الفراغ الحر .

كما ان الكتيونات الملتصقة على سطح الجدار الخلوي قابله للتبادل مع الكتيونات الأخرى الموجودة في محلول التربة الخارجي وعلى هذا الأساس فأن لجذور النباتات سعة تبادل كتيونية خاصة وان هذه السعة تتوقف على نوع النبات الواحد على حسب عمره فهي عالية للنباتات البقولية ومنخفضة للنباتات النجيلية . كما أنها تختلف في النبات الواحد على حسب عمره ، فهي عالية للنباتات الحديثة وواطئة للنباتات المتقدمة بالسن . كما أنها تختلف حسب الـ PH لمحلول التربة وPH للمحلول الداخلي للنبات.

الانتقال الحيوي(السلبي) والانتقال الحر للايونات

ان انتشار جزيئات الماء والايونات الى الفراغ الحر وكذلك الامتصاص الحر او الامدصاص التبادلي هو ما يعبر عنه بالامتصاص الحر او الامتصاص السلبي (غير الحيوي) . أما عملية دخول جزيئات الماء والايونات عبر غشاء البلازما والسايتوبلازم وغشاء الفجوة ومنها الى الفجوة العصارية هو ما يعبر عنه بالامتصاص النشط او الفعال او الامتصاص الحيوي ، حيث ان اختراق واجتياز هذه الحواجز لا يكون بسهوله وتحتاج الى طاقة من قبل النبات. أحد الأدلة

على ان الانتشار خلال الفراغ الحر لا يحتاج الى طاقة هو حدوثها في الأنسجة الحية و الميتة على حد سواء وهذا ما أكده Epstein (1972).

تخضع الايونات المتواجدة في المحلول الى قوتين في حركتها الى داخل النبات أحداهما كيميائية ناتجة عن اختلاف بالتركيز والأخرى كهربائية (فيزيائية) ناتجة من اختلاف في الشحنات الكهربائية. فالايونات يمكن ان تتحرك من مناطق التركيز العالي الى التركيز الواطئ ، أما حركتها نتيجة للتغير بالجهد الكهربائي فهي انجذاب الكتيونات(الشحنات الموجبة) الى الجهد الكهربائي السالب وانجذاب الانيونات (الشحنات السالبة) الى الجهد الكهربائي الموجب . وعلى ذلك فأن الايونات تتحرك تبعا للتغير في الجهد الكهروكيميائي (Electrochemical potential gradient).

لذا فان حركة الايونات خلال الأنسجة تخضع الى فرق التركيز الكيميائي وشحنة الخلايا، ومحصلة هذه العملية للسيطرة على حركة الايونات تنتهي بحالة التوازن بين القوى الكهربائية وقوى الطاقة الحركية الكيميائية.

النفاذية والاختيارية في امتصاص العناصر المعدنية :

تتحرك العناصر المعدنية والماء بحرية ودون إعاقة من **الجدار الخلوي** بينما يكون **غشاء الخلية** اختياري النفاذية فيسمح لنفوذ بعضها ويمنع الأخرى مع الأخذ بنظر الاعتبار حالة التوازن بين داخل وخارج الخلية. ومثال على ذلك ان الغشاء البلازمي يسمح بنفاذ الايونات الأحادية (Monovalent) كالنترات NO_3^- والكلوريدات Cl^- والبوتاسيوم K^+ والصوديوم Na^+ والامونيوم NH^+_4 بشكل أسرع من الايونات الثنائية الشحنة كالكبريتات SO_4^{-2} والكالسيوم Ca^{+2} .

ان وجود ايونين متشابهة في نفس الوسط قد **يقلل** او **يزيد** امتصاص احدهما بسبب وجود الأخر ، وهذا ما يعبر عنه **بالتضاد الايوني Antagonism** او **التعاون (التشجيع) الايوني Synergism** . وعلى سبيل المثال وجد ان ايون البوتاسيوم يقلل امتصاص ايون الصوديوم والعكس صحيح حيث ان وجود الصوديوم يقلل امتصاص ايون البوتاسيوم. وبالمثل فأن كلا من أزواج الايونات (K^+ ، NH^+_4) و (Mg^{+2} , Ca^{+2}) ينافس احدهما الأخر في عملية الامتصاص. بينما وجد ان وجود الكالسيوم في وسط النمو يزيد من محصلة امتصاص البوتاسيوم.

النظريات المتعلقة بالامتصاص السلبي

1- نظرية الانتشار Diffusion theory

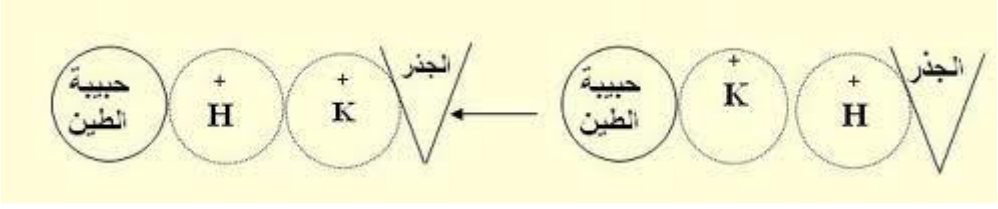
هي عملية انتقال ايونات العناصر الغذائية من التركيز العالي الى التركيز المنخفض الى ان يتساوى تركيز هذه الايونات في محلول التربة وفي الفراغ الحر للجذر التابع لهذه النباتات.

2 - الامتصاص التبادلي على سطح الجدار الخلوي وغشاء البلازما

ان وجود ايونات سالبة على سطوح غشاء البلازما يسبب امتصاص الكتيونات الموجبة المتواجدة في محلول التربة وهي أيضا بدورها يمكن ان تتبادل مع الكتيونات المتواجدة في محلول التربة بحسب السعة التبادلية الكتيونية للجذور.

3 - التبادل بالتماس Contact exchange

يحدث تبادل بين الكتيونات المتبادلة على سطح الجذر مع الكتيونات المتبادلة على غرويات التربة (الطين والدبال) ويحدث ذلك دون ان يكون لمحلول التربة أي دور ، ويتم ذلك عندما تتداخل حقول التذبذب (Field oscillation) لحبيبة الطين مع الجذر وعندما تكون الايونات التابعة لكل منها متواجدة في نهاية حقل التذبذب فيمكن ان يحدث تبادل لهذه الايونات مابين حبيبة الطين والجذر كما يتضح ذلك في الشكل الأتي:



4- امتصاص الكتيونات من التربة ودور غاز CO_2

وتتم العملية بما يلي:

1- ينبعث CO_2 من تنفس الجذور ويذوب في الماء مكون حامض الكربونيك H_2CO_3

2- انتشار الغاز من مناطق التركيز العالي (جدار الجذر) الى مناطق التركيز الواطئ (الطين الغروي)

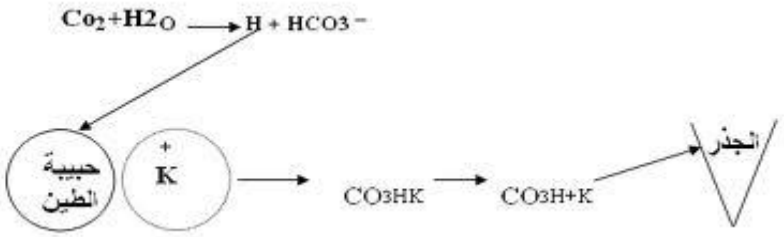
3- تأين الحامض الى H^+ و HCO^-_3

4- يحل ايون H^+ محل الكتيون المتبادل (K^+ مثلا) على سطح الطين الغروي مما يزيد من حموضة الطين.

5- الكتيون المتبادل مع H^+ يتفاعل مع HCO^-_3 ويتجه الى الجذر.

6- عند سطح الجذر يتبادل البوتاسيوم مع هيدروجين الجذر وينفرد الهيدروجين الى محلول التربة.

والشكل التالي يوضح خطوات انتقال الكتيونات المتبادلة على سطح الطين الغروي لكي تصل الى سطح الجذر:



1- التدفق (الجريان او الانسياب) الكتلي Mass Flow

يعتقد بعض الباحثين ان الايونات يمكن ان تتحرك خلال الجذور مع حركة تدفق الماء . وطبقا لذلك فأن زيادة تيار النتح لابد ان يسبب امتصاص الايونات . وهناك إشارات واضحة على ان امتصاص عنصر الكالسيوم يكون فقط عن طريق التدفق الكتلي مع تيار النتح وان أية إعاقة لعملية النتح كزيادة الرطوبة النسبية للهواء المحيط بالنبات فأنه يسبب ظهور أعراض نقص الكالسيوم على النبات بالرغم من وجوده بكميات جاهزة وكافية . كما ان هناك اعتقاد بأن التدفق الكتلي للايونات مع تيار النتح يلعب دور مهما في امتصاص عنصري البورون و المولبدنوم.

الآراء والفرضيات المتعلقة بالامتصاص الحيوي (النشط)

1- فرضية التنفس الملحي او ألايوني

لاحظ العالم السويدي Lundegardh عام 1954 زيادة معدل التنفس العام عند إضافة الملح للماء وهذه الزيادة تتناسب مع كمية الايونات السالبة والموجبة الممتصة من قبل الجذور. وقد لاحظ من خلال قياس تنفس النبات أثناء امتصاص الماء و **الكتيونات** يظل تنفس النبات ثابتاً ، أما عند امتصاص **الانيونات** فيلاحظ زيادة في معدل التنفس أي زيادة خروج CO_2 وهذه الزيادة تعبر عن التنفس **الملحي الانيوني** .

ميكانيكية عملية التنفس الملحي الانيوني (امتصاص الانيونات)

افترض ان وجود مادة السايتوكروم في الخلية هي المسئول عن عملية الامتصاص ألايوني . والعنصر الفعال في هذه المادة هو عنصر الحديد الذي يتغير تأكسده إثناء عملية الأكسدة والاختزال وذلك بفقدها او اكتسابها للالكترونات على التوالي وكالاتي:

$Fe^{+3} + e^-$ ---------- Fe^{+2} اختزال

$Fe^{+2} - e^-$ ---------- Fe^{+3} أكسدة

ويتضح من ذلك ان مادة السايتوكروم هي المادة الحاملة او الناقلة للالكترونات. وعندما يكون الحديد في تركيب السايتوكروم ثلاثي التكافؤ فأنه يكون مستعد لاستقبال الإلكترون او أي ايون سالب الشحنة وبالتالي يصبح الحديد بعد اخذ الإلكترون او الانيون في صورة مختزلة أي في صورة الحديد الثنائي التكافؤ. كما يمكن للحديد الثنائي التكافؤ ان يفقد

الإلكترون او الانيون ويصبح في حالة مؤكسدة أي في صورة الحديد الثلاثي التكافؤ من جديد . وهكذا بتوالي عمليات الأكسدة والاختزال لذرات الحديد الداخلة في تكوين السايتوكروم يمكن انتقال وامتصاص الانيونات من محلول التربة عبر غشاء البلازما فالسايتوبلازم فغشاء الفجوة ومنها الى الفجوة العصارية مقترحاً ان حبيبات السايتوكروم تترتب داخل السايتوبلازم على شكل سلسلة او قنطرة تكون بدايتها عند الغشاء الداخلي الملاصق للفجوة ونهايتها عند الغشاء الخارجي الملاصق للغشاء البلازمي.

من الاعتراضات على فرضية لونديكارد

1- وجد ان استخدام مادة (DNP) 2,4-Dinitrophenol والمثبطة للفسفرة التأكسدية قد قللت او أوقفت عملية امتصاص الانيونات في نفس الوقت الذي لم يكن لها أي تأثير على تيار الالكترونات ، كما أنها أدت الى زيادة عملية التنفس وهذا يدل على أهمية الطاقة في صورة الـ ATP في أي تراكم للانيونات في المحلول الداخلي للنبات

2- وجد ان كلا من ايونات البوتاسيوم والصوديوم وهي كتيونات موجبة كذلك تحفز التنفس ليس فقط الانيونات السالبة حسب رأي لونديكارد.

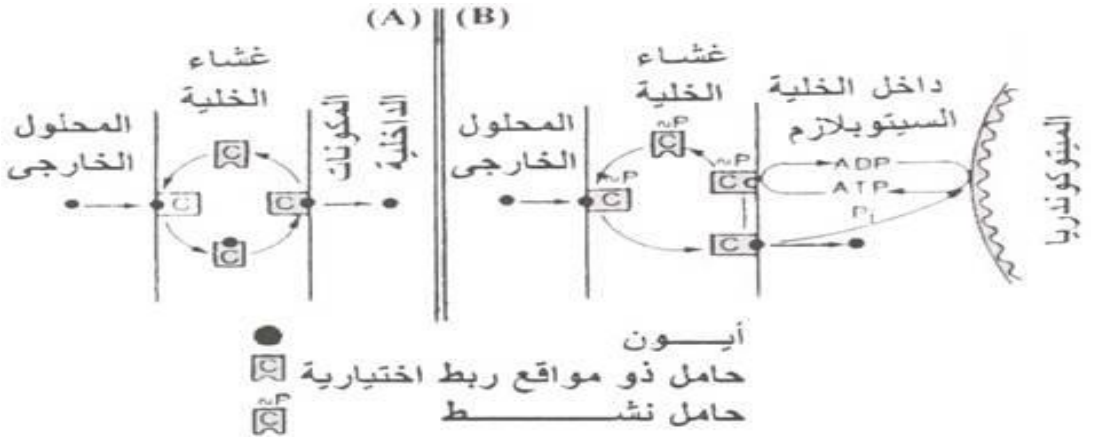
3- إذا كان هناك حامل واحد لجميع الانيونات (كما تنص الفرضية) فأن التنافس على مواقع الارتباط بين الانيونات لابد ان يكون ظاهراً هناك، غير انه تبين ان ايونات الكبريتات و النترات والفوسفات لا تظهر مثل هذا التنافس أثناء الامتصاص.

4- ان مادة السايتوكروم غير متواجدة في السايتوبلازم وأنها ترتبط بصفة أساسية بالتركيب الغشائي الداخلي للجسيمات الخلوية في البلاستيدات الخضراء والمايتوكندريا .

2-فرضية الحامل أو الناقل

تقترح هذه الفرضية أن الغشاء البلازمي يحتوي جزيئات خاصة قادرة على نقل الايونات عبر الغشاء ومثل هذه الجسيمات أطلق عليها بالحوامل أو النواقل (Carriers) ويعتقد حاليا بأن هذه الحوامل تمتلك صفة التخصص (Specificity) للايون المعين أي أن لها القدرة فقط على نقل هذا الايون المعين دون غيره ولو حدث ان كان الحامل متخصص لنقل ايونين فهنا يحدث تنافس بين هذين الايونين على الموقع الفعال للحامل وبالطبع فأيهما أكثر تركيز في وسط النمو فأنه يستطيع أن ينافس الايون الآخر ويمتص هو على حساب الايون الآخر . وبالفعل فقد وجد أن هناك حاملا متخصصاً لنقل أزواج الايونات مثل (K^+, Rb^+) و (Ca^{+2}, Sr^{+2}) او (SO^{-2}, SeO^{-2})

ينشط الحامل بالطاقة من قبل ATP ويتكون الحامل المنشط activated carrier (AC) وهذا يرتبط مع الايون ويكون ما يسمى بمعقد الحامل ولايون Carrier Ion complex وهذا المعقد يكون قابل للانتشار عبر الغشاء الى الانزيم phosphatase الذي يقع عند الحدود الداخلية للغشاء . يقوم هذا الانزيم بفصل مجموعة الفوسفات من الحامل المعقد (H_3PO_4) وبهذه الكيفية يعتقد ان الحامل يفقد صلته بالايون الذي بدوره يتحرر وينطلق الى الوسط المجاور وهو السايتوبلازم ولتحقيق الخاصية الاختيارية مرة ثانية فإنه يحتاج ATP . هذه العملية تحدث بواسطة انزيم Phosphokinase والذي يتواجد ايضاً عند حدود الغشاء الداخلي. ان مركب الحامل المفسفر ربما يعود الى حدود الغشاء الخارجي لحمل ايون اخر وهكذا تعود الدورة من جديد. والشكل الاتي يوضح العملية:



مصادر الطاقة التي تصرف في النقل الحيوي للايونات

1- عملية التمثيل الضوئي :

يتم في هذه العملية تحويل الطاقة الضوئية إلى طاقة كيميائية في صورة (ATP) و ($NADPH_2$) والطاقة الناتجة من كسر الأواصر لهذه المركبات تستغل لنقل الايونات وحفظها في الخلية.

2- **التنفس Respiration**

وتتلخص عملية التنفس التي تحدث في المايتوكندريا بالمعادلة التالية:

$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 + 38ADP + 38Pi$ ---------- $6O_2 + 6H_2O + 38ATP$

أن 90% من ATP المتكون ناتج من الفسفرة التأكسدية لعملية التنفس وان 10% فقط من ATP ناتج من الفسفرة الضوئية لعملية التركيب الضوئي.