الفصل الثالث

كيفية حصول النبات

على حاجته من العنصر الغذائى

كيفية حصول النبات
على حاجته من العنصر الغذائى

كما سبق القول بأن العنصر الغذائى الواحد يوجد فى أكثر من صورة فى النظام الأرضى، وأن النبات يمتص العنصر الغذائى فى صورته الايونية، وهذه الصورة تكون ذائبة فى المحلول الأرضى، إلا أن مقادير هذه الصورة قد تكون قليلة جداً، وقد لا تفى بحاجة النبات، بينما الجزء الأكبر منه على صورة غير ذائبة مرتبط بالطور الصلب من الأرض، وذلك إما داخلة فى تركيب المعادن الأرضية، أو مدمصاً على أسطح الغرويات الأرضية المعدنية منها والعضوية، أو داخله فى تركيب المادة العضوية.

بامتصاص العناصر الغذائية من المحلول الأرضى يقل تركيزها، وخاصة فى المناطق المحيطة بالجذر، ويتبع ذلك أن تنطلق كمية من العناصر المتبادلة على أسطح الجزء الصلب أو الموجودة داخله إلى المحلول الأرضى ليرتفع تركيزها مرة أخرى، وتتم **عملية حصول النبات على حاجته من العنصر الغذائى بالخطوات التالية:**

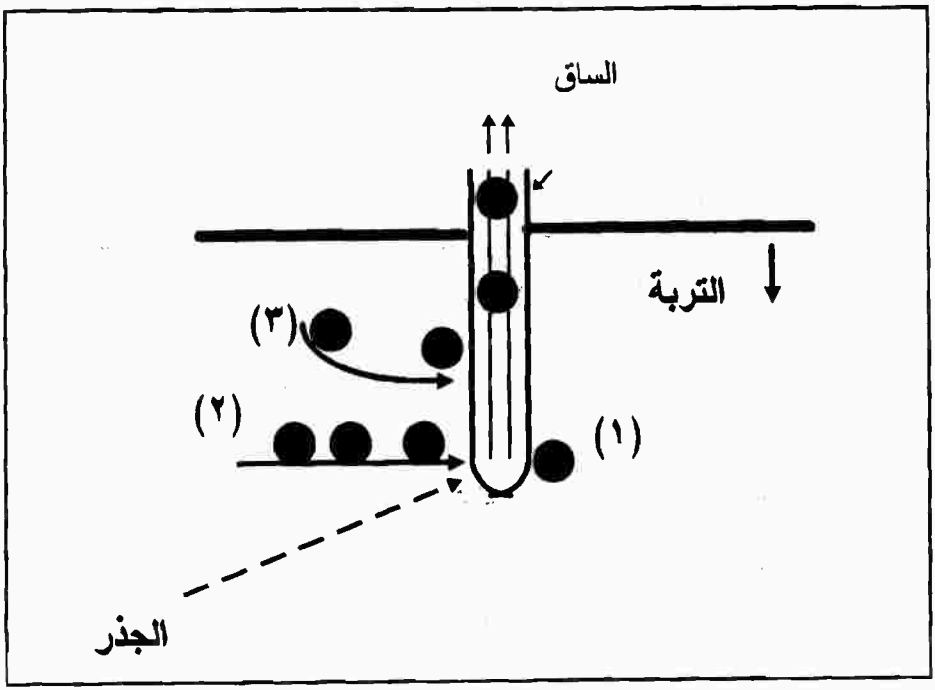
١ – انتقال العنصر الغذائى خلال المحلول الأرضى إلى جذر النبات.

٢ – امتصاص العنصر (الأيون) بواسطة الجذر.

٣ – انتقال العنصر داخل النبات من الجذر إلى الاجزاء الهوائية.

أولا: انتقال العنصر الغذائى خلال المحلول الأرضى إلى جذر النبات

أهمية انتقال العناصر المغذية فى التربة لجعلها فى صورة صالحة للنبات تم تأكيدها لأول مرة بواسطة Barber سنة ١٩٦٢، من خلال ثلاث وسائل أساسية وهى الاعتراض الجذرى، التدفق الكتلى والانتشار كما يوضحها شكل (٣ – ١).



شكل (٣ – ١) : يوضح انتقال العناصر المعدنية في التربة إلي سطح جذور النباتات النامية

١ – **الاعتراض الجذرى**: وفيه يتم إحلال الجذر محل حجم معين من التربة ويتوقف هذا الحجم على حجم الجذر (امتصاص العنصر يتم بدون انتقاله فى المحلول الأرضى) .

٢ – **التدفق الكتلى**: وفيه يحدث انتقال للمحلول الأرضى حسب المحتوى الرطوبى بالأرض (أى يصل العنصر إلى الجذر بالانتقال) .

٣ – **الانتشار**: وفيه ينتقل العنصر خلال المحلول الأرضى وذلك حسب تدرج التركيز.

● = العنصر الميسر (المقدر بواسطة اختبارات التربة) .

وأمكن توضيح وحساب مساهمة كل طريقة من هذه الطرق فى الكمية الممتصة من عناصر الكالسيوم، الماغنسيوم، البوتاسيوم، والفوسفور بواسطة نبات الذرة والمنزرع فى أرض طمية سلتية خصبة (جدول ٣ – ١)، ويلاحظ من هذا الجدول أن التدفق الكتلى يساهم بالجزء الأساسى من كمية الكاليسوم والماغنسيوم الممتصة، فى حين تتوقف

الكمية الممتصة من البوتاسيوم والفوسفور على الانتشار، بالإضافة إلى ذلك يلاحظ أن كمية الكالسيوم والماغنسيوم التى تصل إلى جذر النبات عن طريق التدفق الكتلى تفوق الكمية الممتصة، وهذا يعنى أنه قد يحدث تراكم لهذه الأيونات على السطح الخارجى للجذر.

جدول (٣ - ١): مساهمة الاعتراض الجذري والتدفق الكتلي والانتشار في الكمية الممتصة من بعض العناصر المغذية بواسطة نبات الذرة*

العنصر	الكمية الميسرة فى الطبقة السطحية (كجم/ هكتار)**	الكمية الكلية الممتصة (كجم/ هكتار)	الكمية (كجم/ هكتار) بواسطة:		
			الاعتراض الجذرى	التدفق الكتلى	الانتشار
كالسيوم	٤٠٠٠	٤٥	٤٠	٩٠	--
ماغنسيوم	٨٠٠	٣٥	٨	٧٥	--
بوتاسيوم	٣٠٠	١١٠	٣	١٢	٩٥
فوسفور	١٠٠	٣٠	١	٠,١٢	٢٨,٥

عن Marschner سنة ١٩٩٥.

* على أساس أن حجم الجذر يمثل ١٪ من حجم التربة.

** حسب الكمية المقدرة باختبارات التربة.

ويمكن توضيح هذه الطرق كما يلى:

١ - الاعتراض الجذرى والتبادل بالتماس

Root Interception and Contact Exchange

هناك عدة نقاط مهمة يجب معرفتها لكى يتضح لنا كيفية حصول النبات على ما يلزمه من العناصر المغذية بهذه الطريقة، فكما هو معروف أنه مع نمو النبات تنمو الجذور أيضاً وتتفرع الشعيرات الجذرية، ومع نموها تصل إلى أماكن من التربة لم يتطرق إليها الجذر من قبل بما فيها من عناصر غذائية ذائبة أو متبادلة، أى يحدث إمداد جديد

للنبات بالعناصر الغذائية (والماء) وهذه العملية تعرف باسم الاعتراض الجذرى Root interception وفيها يصل العنصر إلى الجذر عن طريق التلامس المباشر خلال المحلول الأرضى أو عن طريق تلامس الجذر مع الأيونات المتبادلة على أسطح الغرويات الأرضية، وهذه العملية الاخيرة تعرف باسم نظرية التبادل بالتماس Contact exchange theory، وتفترض هذه النظرية انتقال العناصر الغذائية من على أسطح التبادل (غرويات الأرض) إلى سطح جذر النبات مباشرة بدون المرور بالمحلول الأرضى، حيث تعتمد هذه النظرية على أن الأيونات المدمصة على أسطح الغرويات الأرضية أو على جذر النبات يكون لها حجم معين وحيز يحدث فيه تذبذب هذه الأيونات، وعند تداخل مناطق التذبذب هذه بعضها مع البعض يحدث تبادل فى مواقع الأيونات المدمصة على سطحى الغروى والجذر، والكمية المتبادلة تكون متكافئة وفى الغالب يكون التبادل بين أيونات الأيدروجين (H^+) الذى تفرزه الجذور والأيونات المتبادلة على أسطح الغرويات الأرضية، وهناك بعض الاعتراضات على هذه النظرية حيث إن حجم القمة النامية فى الجذر والمسئولة عن هذه العملية صغيرة جداً، وعموماً تكون كمية العناصر المغذية التى يحصل عليها النبات بهذه الطريقة صغيرة بالنسبة للكمية الكلية التى يحتاجها النبات، وذلك لأن كمية المغذيات التى يمكن أن تتلامس مباشرة مع الجذر هى الكمية الموجودة فى حجم من الأرض مساوٍ لحجم الجذر، فإذا افترضنا أن الجذر يشغل ١٪ من حجم الأرض، والمسافات البينية تشغل ٥٠٪ من حجم الأرض فإن الجذر يشغل ٢٪ من المسافات البينية، وعلى ذلك يمكن حساب الكمية الميسرة للجذر بهذه الطريقة، وفى هذه الحالة سوف تكون أقل من ٢٪ من الكمية الميسرة للعنصر فى الأرض، وبصفة عامة تتوقف مساهمة هذه الطريق فى إمداد النبات بالعناصر المعدنية على: تركيز العناصر فى منطقة حجم الجذر، حجم الجذر ونسبته من حجم الطبقة السطحية للأرض وهو يمثل حوالى ١٪ وأخيراً الحجم الذى تشغله المسافات البينية من الحجم الكلى للتربة وهو يمثل عادة ٥٠٪، ولذلك تلعب طريقتا التدفق الكتلى والانتشار دوراً كبيراً فى حركة وانتقال العناصر من مسافات ليست قصيرة إلى جذر النبات.

٢ - التدفق الكتلى Mass Flow

عند امتصاص النبات للماء فى منطقة الجذور، تقل كمية الرطوبة فى هذه المنطقة، وعلى هذا ينتقل الماء من الأماكن ذات الرطوبة المرتفعة ببطء إلى سطح الجذور، وبالتالى تنتقل المغذيات النباتية الذائبة والمحمولة بهذا الماء إلى الجذور عن طريق التدفق الكتلى، وعلى ذلك تتوقف كمية المغذيات النباتية التى يحصل عليها النبات بهذه الطريقة على الاستهلاك المائى للنبات Water consumption of the plant وتركيز العناصر فى الماء وفى منطقة الجذور، تركيز العناصر قد يزداد أو يقل أو يظل ثابتاً ويتوقف ذلك على التوازن بين معدل الإمداد للجذور بواسطة التدفق الكتلى ومعدل الامتصاص بواسطة النبات.

وكمثال، فإن تركيز الكالسيوم فى الأرض يتراوح بين ٨ إلى ٤٥٠ جزءاً فى المليون، بينما تركيزه فى نبات الذرة هو ٢٢٠٠ جزء من المليون، وعلى ذلك عند التركيز المنخفض فى المحلول الأرضى من هذا العنصر لابد أن يمتص كمية ماء أكثر من وزنه بمقدار ٢٧٥ مرة لكى يحصل على هذه الكمية من الكالسيوم، وهذا لا يتأتى إلا عن طريق التدفق الكتلى، وبعبارة أخرى إذا كان معدل النتح لنبات الذرة هو ٢٧٥ وتركيز الكالسيوم فى المحلول الأرضى هو ٨ جزء فى المليون، فعند هذا التركيز تكون كمية الكالسيوم التى يمتصها نبات الذرة كافية لاحتياجاته، وفى الواقع أن معامل النتح Transpiration coefficient للنبات يتراوح بين ٣٠٠ - ٦٠٠ لتر ماء/كجم مادة جافة، وعلى ذلك نجد أن كمية أكبر من احتياجات النبات لعنصر الكالسيوم تنتقل إلى الجذر عن طريق التدفق الكتلى.

بالنسبة للفوسفور فإن الأمر يختلف تماماً عن الكالسيوم (جدول ٣ - ٢)، حيث يكون تركيز الفوسفور الذائب فى التربة منخفضاً بصفة عامة، كما هو واضح من الجدول السابق وعند التركيز المنخفض ٠,٠٣ جزء فى المليون نجد أن لكى يحصل النبات على احتياجاته من هذا العنصر ويصل تركيز الفوسفور به ٢٠٠٠ جزء فى المليون، لابد أن يكون معدل النتح هو ٦٦٦٦٦ وهذا غير منطقى، وعلى ذلك لابد وأن هناك طرقاً أخرى ينتقل بها العنصر إلى جذر النبات ومن أهم هذه الطرق هى الانتشار.

جدول (٣ - ٢): العلاقة بين تركيز بعض الأيونات في المحلول الأرضي وتركيزها في نباتات الذرة

العنصر	التركيز بالجزء فى المليون			النسبة بين تركيز العنصر فى النبات إلى تركيزه فى الأرض	
	التركيز المنخفض فى المحلول	التركيز المرتفع فى المحلول	متوسط تركيز العنصر فى النبات	النسبة إلى التركيز المنخفض	النسبة إلى التركيز المرتفع
الكالسيوم	٨	٤٥٠	٢٢٠٠	٢٧٥	٤,٩
البوتاسيوم	٣	١٥٦	٢٠٠٠٠	٦٦٦٦	١٢٨
الماغنسيوم	٣	٢,٤	١٨٠٠	٦٠٠	٨,٨
النيتروجين	٦	١٧٠٠	١٥٠٠٠	٢٥٠٠	٨,٨
الفوسفور	٠,٠٣	٧,٢	٢٠٠٠	٦٦٦٦٦	٢٧٨
الكبريت	١١٨	٦٥٥	١٧٠٠	١٥٥	٢,٦

عن Barber سنة ١٩٦٢.

٣ - الانتشار Diffusion

ويقصد به تحرك الأيونات خلال المحلول الأرضى وبين مواقع التبادل على أسطح الغرويات الأرضية. ويكون اتجاه الحركة من المنطقة ذات التركيز المرتفع للأيون إلى المنطقة ذات التركيز المنخفض لنفس الأيون محكومًا بطاقته الحركية وليست حركة الماء. فعند امتصاص الأيون بواسطة النبات يقل تركيزه فى منطقة الجذور، وعلى هذا يحدث تدرج فى التركيز لهذا الأيون بالمحلول الأرضى، وهذا التدرج يتبعه تحرك الأيون فى اتجاه الجذور من التركيز المرتفع إلى التركيز المنخفض، وبمعنى آخر انتقال مع تدرج التركيز. وهناك عدة عوامل تؤثر على معدل الانتشار فى الأرض منها:

١ - **محتوى الأرض من الرطوبة**: وهنا العلاقة طردية حيث يزداد معدل الانتشار فى نفس الأرض مع زيادة محتواها من الرطوبة.

٢ – **قوام الأرض**: عند نفس الجهد من الماء فى الأرض يزداد معدل الانتشار فى الأرض الطينية عنه فى الأراضى الرملية، وذلك لاحتواء الأرض الطينية على مستوى أعلى من الرطوبة عند نفس جهد الماء وأيضا لوجود غشاء متصل للماء حول حبيبات التربة.

٣ – **المسامية**: يزداد الانتشار بزيادة نسبة المسام، حيث إن الانتشار يتم خلال المسام المملوءة بالماء.

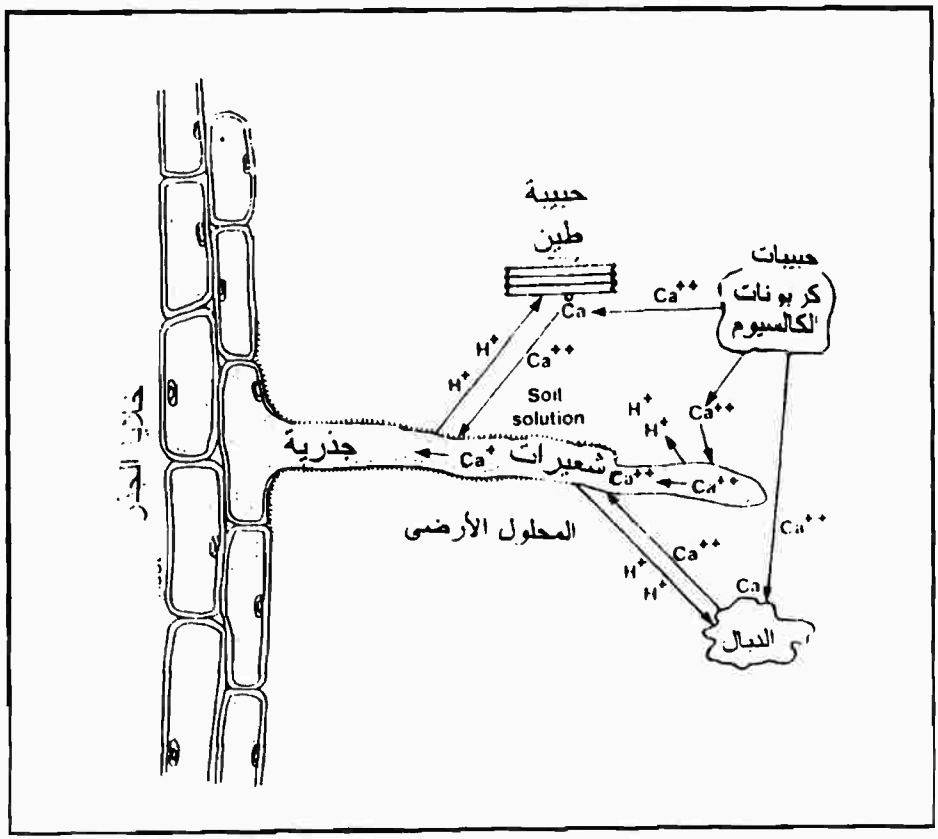
٤ – **مستوى العناصر فى الأرض**: يزداد معدل الانتشار كلما ارتفع محتوى الأرض من العناصر، حيث إن المستوى المرتفع من العناصر فى المحلول الأرضى يسمح بتدرج أكبر فى التركيز.

ثانيًا: امتصاص الأيونات بواسطة جذور النبات

Ions Uptake by Plant Roots

من المعروف بأن معظم الماء والعناصر المغذية المعدنية والتى يحصل عليها النبات من التربة تمتص بواسطة الشعيرات الجذرية والتى تكون مناطق الامتصاص الكبرى فى النباتات، ويرجع ذلك لأن جدر خلايا بشرتها خالية من المواد الشمعية والكيتينية والتى تعوق عملية الامتصاص. وعلى الرغم من صغر المساحة التى تشغلها منطقة الامتصاص فى الجذر إلا أن وجود الشعيرات الجذرية بهذه المنطقة يضاعف إلى حد كبير سطح الامتصاص، أيضا نتيجة تغلل الشعيرات الجذرية بين حبيبات التربة تعرض سطح الامتصاص لأكبر حجم ممكن من الوسط الخارجى. ويوضح شكل (٣ – ٢) كيفية وصول الأيونات من التربة سواء الذائبة فى المحلول الأرضى أو المتبادلة على أسطح الغرويات الأرضية المعدنية منها أو العضوية إلى سطح الشعيرات الجذرية وانتقالها داخل الشعيرة فى اتجاه خلايا الجذر.

ونظرًا لأهمية الجذر فى عملية الامتصاص فيكون من الضرورى الإشارة إلى تركيب جذر النبات والخلية النباتية كى يتسنى لنا تفهم النظريات التى تحاول تفسير عمليات الامتصاص.



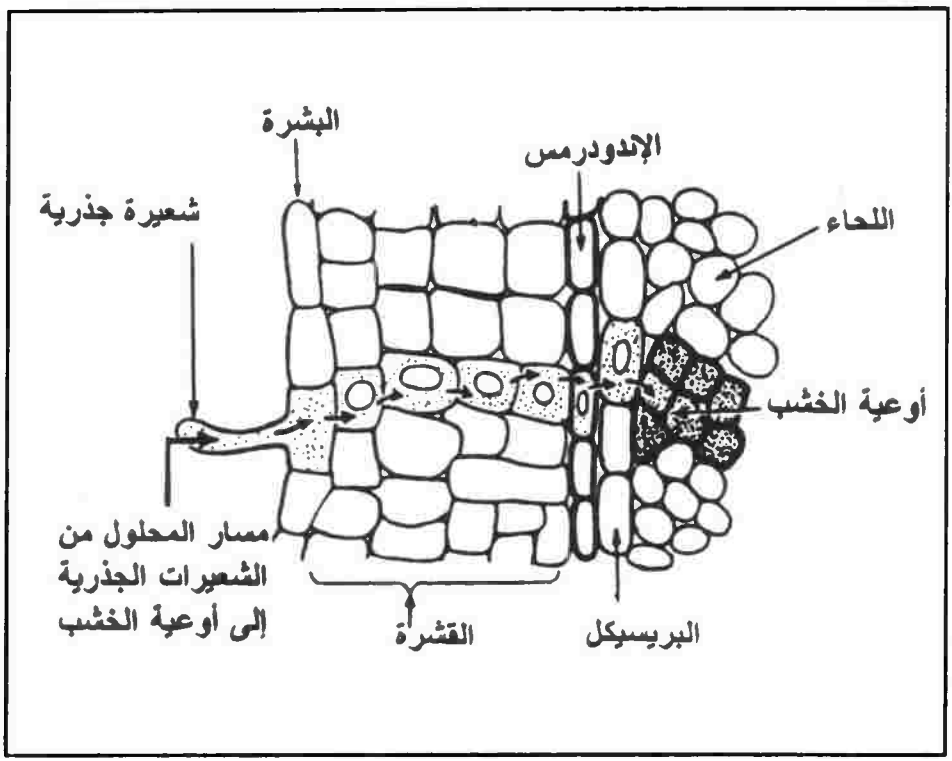
شكل (٣ – ٢): رسم تخطيطي يوضح كيفية امتصاص الشعيرات الجذرية للأيونات من التربة

تركيب الجذر Root Structure

عند فحص قطاع عرضى فى جذر حديث من منطقة الامتصاص ومن الخارج إلى الداخل شكل (٣ – ٣)، نجد أن أول طبقاته هى **البشرة** وتكون اسطوانة تغلف الجذر سمكها خلية واحدة، ويخرج من معظم خلاياها شعيرات جذرية جدرها خالية من أى تغليظ أو أى مادة تمنع نفاذ الماء أو الأيونات. وعلى ذلك ينتشر الماء بما يحويه من أيونات خلال جدرها بسهولة تامة، وتتميز خلايا هذه الطبقة باحتوائها على فجوات عصارية كبيرة، كما أن جدرها مغطاة بطبقة مخاطية لتزيد من قدرتها على الالتصاق بالتربة.

يلى طبقة البشرة طبقة **القشرة** والتى تتكون من عدة صفوف من خلايا بارنشيمية

ذات جدر رقيقة منفذة للماء بسهولة. ويلى ذلك **الإندودرمس** وهى طبقة من الخلايا والتى تتغلظ جدرها العليا والسفلى والجانبية ولكنها خالية من التغليظ فى الجدر المواجهة للقشرة وللاسطوانة الوعائية، وعلى ذلك يأخذ التغليظ شكل شريط أو حزام يسمى شريط كسبرى Casparian strip. وفى الجذور حديثة السن يتكون هذا الشريط من مادة فلينية متكوتنة، بينما فى الجذور المسنة تتغلظ كل جدر خلايا الإندودرمس، وعلى هذا يمنع مرور الماء فيما عدا بعض الخلايا التى تسمح بنفاذ الماء إلى الأوعية الخشبية وتسمى هذه الخلايات بخلايا المرور Passage cells.



شكل (٣ – ٣): رسم تخطيطى يوضح قطاعًا عرضيًا فى جذر النبات

الاسطوانة الوعائية: هى تلى طبقة الإندودرمس وأول طبقاتها هو نسيج البريسيكل، ويكون اسطوانة تغلف الاسطوانة الوعائية، وفى الغالب يكون سمكه خلية واحدة وخلاياه إسكلرنشيمية أو بارنشيمية، وينفذ الماء بسهولة خلال جدره إلى أوعية

الخشب. ويوجد الخشب فى المركز فى مجاميع مثلثة الشكل ومتبادلة مع مجاميع اللحاء مكونًا حزمًا وعائية قطرية. وأوعية الخشب خلايا ميتة تمتد بطول النبات أغلظت جدرها الجانبية بمادة اللجنين وهى مادة لا تمنع نفاذ الماء إلى الداخل.

تركيب الخلية النباتية Plant Cell Structure

بين شكل (٣ – ٤) رسمًا مبسطًا للخلية النباتية موضحًا أهم مكوناتها وهى:

أولاً: الجدار الخلوى Cell Wall

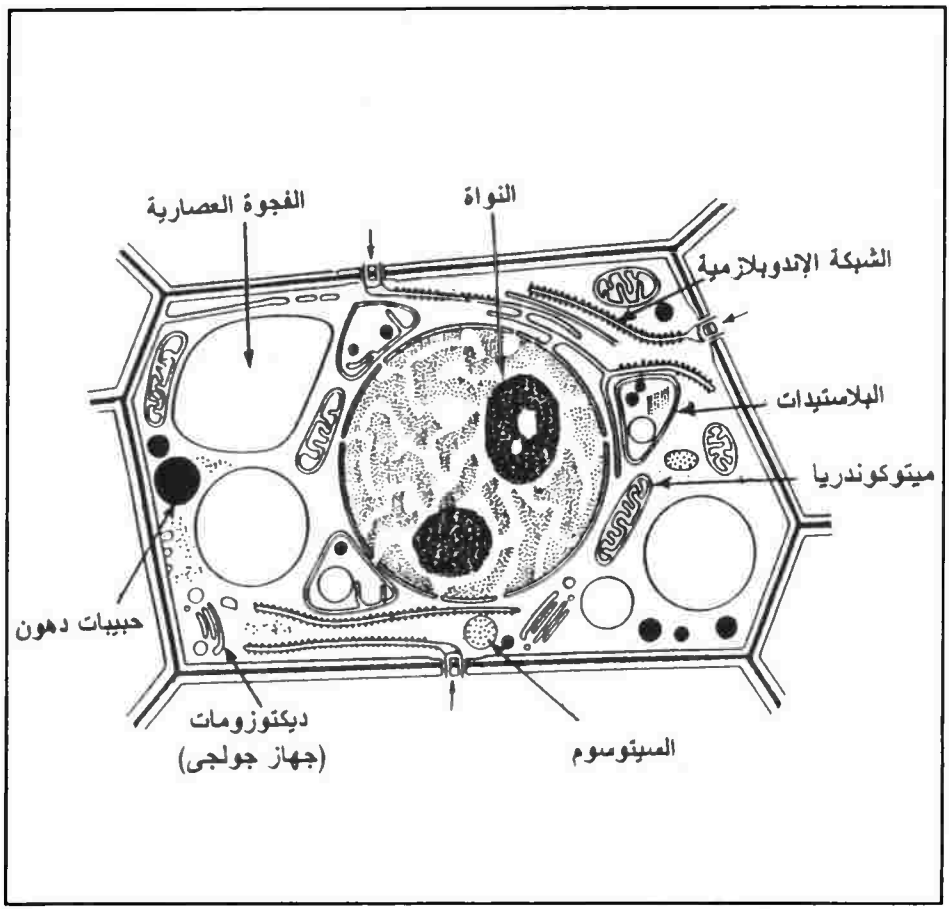
عبارة عن جدار صلب مسامى يغلف الخلية النباتية من الخارج ويحيط بجميع محتويات الخلية. ويفرز هذا الجدار أساسًا من البروتوبلاست. وعادة يتكون من مواد كيميائية خاملة حيث يدخل فى تركيبه مواد بكتينية مع السليلوز وبعض المواد الأخرى مثل الهيميسليولوز وقليل من البروتين والدهون. وبصفة عامة تختلف الجدر الخلوية من خلية إلى أخرى فى الشكل والسمك ووظيفتها وعمرها رغم أنها تمتاز بتماثلها فى التركيب. ويتميز الجدار الخلوى لأى خلية بالغة إلى:

- الجدار الأولى Primary Wall

يحيط بالصفيحة الوسطى ويتكون من السليولوز والهيميسليولوز مع وجود بعض المواد البكتينية والتى تتخلله كميات قليلة من البروتين والدهون. ويمتاز هذا الجدار بالمرونة العالية لاحتوائه على السليولوز، وهذا يؤدى إلى زيادة حجم الخلية مع النمو نتيجة امتلائها بالمواد الغذائية، ويمتاز بالقدرة العالية على التشرب بالماء نظرًا لطبيعته الغروية، أيضًا يمتاز هذا الجدار بمساميته والتى تنشأ من تشابك ألياف السليولوز المكونة له مع بعضها البعض وبطريقة مغزلية غير منتظمة، وهذه المسام الشعرية تسمح بمرور المحاليل من وإلى الخلية بسهولة. ومن هنا لا يستطيع الجدار أن يتحكم فى مرور المحاليل إلا إذا تم ترسيب بعض المواد الكارهة للماء على هذا الجدار. ومع قرب نهاية النمو للخلية يبدأ ترسيب مواد أخرى ثانوية مثل الكيوتين والسوبرين الشمعية وغير المنفذة للماء على الجدر الأولية لتكوين الجدر الثانوية.

- الجدار الثانوى **Secondary Wall**

ويتكون أساسًا من السليولوز الذى يوجد فى صورة طبقات يتخللها مواد تزيد من صلابته مثل: البكتين واللجنين وكذلك المواد الشمعية مثل السوبرين والكيوتين غير المنفذة للماء.



شكل (٣ - ٤): رسم تخطيطى يوضح تركيب الخلية النباتية

وفى العادة توجد عدة ثقوب Pits فى الجدار الخلوى نتيجة لعدم ترسيب مواد من مكونات الجدار الثانوى فيها، وهذه الثقوب غير معروف وظيفتها بالخلايا. بالإضافة إلى ذلك يوجد فى كل من الجدارين الأولى والثانوى نوع آخر من الثقوب تسمح بمرور

شعيرات سيتوبلازمية من خلالها تسمى بالبلازموديزمات Plasmodesmata وهى تنشأ غالبًا كامتداد للشبكة الإندوبلازمية وهى تعمل على ربط بروتوبلاست الخلايا المتجاورة ببعضها لتكون مجتمع من الخلايا يسمىPymplast، وتعمل هذه الروابط على تسهيل مرور المواد الغذائية من خلية إلى أخرى بدون حدوث عوائق. وتعمل الجدر الخلوية بجانب تحديد شكل الخلية النباتية وتوفير الحماية الكافية لها على إمرار الماء عن طريق التشرب ورفع الماء والأملاح إلى داخل الخلايا فى اتجاه البرتوبلازم.

ثانيًا: البروتوبلاست Protoplast

وهو عبارة عن كل المكونات الحية بالخلية، وفيه تحدث جميع العمليات والأنشطة الحيوية والفسيولوجية: مثل عمليات البناء، التمثيل، التكاثر والنمو. ويقوم بتبطين الجدار الخلوى من الداخل وبذلك يغلفه غشاء حى سيتوبلازمى ذو نفاذية اختيارية Differentially permeable membrane. ويقسم البروتوبلاست إلى قسمين:

(١) **البروتوبلازم Protoplasm**: عبارة عن سائل لزج عديم اللون به عدة حبيبات دقيقة معلقة غير قابلة للذوبان فى الماء ومنها بروتينات، كربوهيدرات، مواد دهنية بجانب العناصر الغذائية غير العضوية مثل: البوتاسيوم، الفوسفور، الكالسيوم، الماغنسيوم، الكبريت، الحديد... وعند موت الخلية يفقد هذا السائل خاصيته السائلة، وينقسم البروتوبلازم إلى قسمين:

أ - **السيتوبلازم Cytoplasm**: وهو سائل شفاف عديم اللون يملأ معظم فراغ الخلية المرستيمية، ويحيط بالفجوة العصارية للخلايا البالغة، ويمتاز السيتوبلازم بأنه يجمع بين صفتى السيولة والمرونة، حيث يكون فى الخلايا النشطة فسيولوجيًا فى حالة شديدة من السيولة والانسياب حول الأسطح الداخلية لجدر الخلايا، والتى عن طريقها يتم نقل المواد الغذائية المختلفة والعمل على توصيل وربط الخلايا ببعضها البعض. ويوجد منغمسًا فى السيتوبلازم البلاستيدات بأنواعها، الميتوكاندريا، الليبوسومات، الشبكة الإندوبلازمية، الريبوسومات، السفيروسومات وجهاز جولجى. ومن أهم مكونات السيتوبلازم الأغشية السيوبلازمية Cytoplasmic membrane - وهى عبارة عن غشاء بلازمى خارجى يحيط بالسيتوبلازم ويسمى

Plasmalemma وغشاء آخر داخلى يحيط بالفجوة العصارية ويسمى Tonoplast. وتمتاز هذه الأغشية بالحيوية وقدرتها على تحديد واختيار نوع وكمية المواد الذائبة التى تمر من وإلى الخلية، وذلك لكونها أغشية حية شبه منفذة. وتتكون الأغشية السيتوبلازمية أساساً من طبقتين من البروتين بينهما طبقة من الدهون (الليبيدات) فلقد اقترح Overton سنة ١٩١١ أن هذه الأغشية تحتوى على مواد شبيهة بالدهون Fat - Like Substance، حيث لاحظ وجود علاقة طردية بين نفاذية الأغشية السيتوبلازمية ودرجة نفاذية المواد غير القطبية Nonpolar groups، حيث إنه من المعروف أن المواد غير القطبية تذوب فى الدهون ومذيباتها بسهولة. ولقد افترض Nathansohn أن الغشاء البلازمى ذو تركيب خليط من الدهون والبروتين، وتشير الدلائل على أنه تتواجد طبقتان من البروتين على الأسطح الخارجية والداخلية للغشاء البلازمى تعمل كغلاف لطبقتين دهنيتين من نوع الفوسفوليبيد. وتتميز طبقة البروتين بأنها تحمل شحنة كهربائية سالبة، حيث إنها تتكون من اتحاد لجزيئات أحماض أمينية مختلفة، فى حين أن طبقات الدهون الداخلية وحدة تركيبها جزيئات من الأحماض الدهنية المختلفة. ووجد أن الأحماض الدهنية لها طرفان أحدهما محب للماء Hydrophilic قطبية من الكولين والجلسرين، وطرف كاره للماء Hydrophobic غير قطبى ويتكون من أحماض دهنية طويلة السلسلة مشبعة أو غير مشبعة، وتتقابل نهاية الأحماض الدهنية الكارهة للماء داخل الغشاء فتمنع مرور أى مركبات قطبية من ماء وذائبات وأيونات غير عضوية، فى حين تُغطى الحواف الخارجية لطبقات الدهون بالبروتين. ويوجد تصور آخر مضمونه بأن طبقة الدهن المزدوجة لا تُغطى بطبقتى بروتين، بينما يوجد البروتين فى تكتلات ظاهرة وبارزة على السطح الخارجى، أو قد تكون منغمسة فى طبقة الدهن المزدوجة مكونًا بروتين داخلى، وهنا تعمل طبقة البروتين كقناة تسمح بمرور الماء والذائبات.

ومن السابق نجد أن الغشاء البلازمى يعمل كحاجز يمنع انتقال الذائبات والأيونات، على الرغم من مرور بعض الجزئيات من خلاله بسهولة، ومن المؤكد بأن مثل هذه

المركبات ذات خصائص معينة. أيضًا يكون من المؤكد وجود وسيلةٍ ما يتم بها اختراق الأيون لهذا الجدار، وهذا ما سوف نتعرض له لاحقًا. ويمكن إيجاز أهمية الأغشية السيتوبلازمية فى:

١ – تعمل على تنظيم تبادل المواد الذائبة بين الخلية والوسط المحيط بها.

٢ – تنظيم حركة الذائبات داخل وبين الخلايا.

٣ – عزل بعض التفاعلات الكيميائية عن بعضها داخل الخلية.

٤ – حمل بعض الإنزيمات المهمة للخلية.

٥ – الاحتفاظ بالمواد الذائبة الضرورية للخلية وأساسًا داخل الفجوة العصارية.

٦ – ربط واتصال الخلايا ببعضها.

ب – **النواة Nucleus**: وهى الجزء الثانى من مكونات البروتوبلازم وهى عبارة عن جسم بروتوبلازمى كروى أو بيضاوى كثيف لامع يوجد منغمسًا فى السيتوبلازم. وبصفة عامة تحتوى الخلية على نواة واحدة عدا بعض الحالات القليلة توجد أكثر من نواة فى الخلية الواحدة. وتحاط النواة بغشاء نووى يشبه فى تركيبه الأغشية البلازمية، ويمتاز هذا الغشاء بوجود ثقوب به تسمح بمرور المواد البروتينية والأحماض النووية (RNA) وغيرها من النواة إلى السيتوبلازم بالخلية. وتحتوى النواة بداخلها على السائل النووى Nuclear Sap، أو Nucleoplasm أيضًا تحتوى على الأحماض النووية RNA و DNA وبعض الإنزيمات الهامة بجانب الشبكة النووية، وتعتبر المادة الوراثية، والتى يتكون منها الكروموسومات نتيجة تكاثفها عند انقسام الخلية.

(٢) **المحتويات الخاملة Ergastic Substances**: وهو القسم الثانى من البروتوبلاست، وتشمل جميع المكونات غير النشطة حيويًا، وتحتوى جزءًا سائلاً والمتواجد فى الفجوة العصارية Vacuole، ويعرف باسم العصير الخلوى Cell Sap وهو عبارة عن محلول حامضى التأثير ذو رقم pH يتراوح بين ٥,٥ – ٥,٦. فى حين أن هذا الرقم لباقى مكونات الخلية يكون فى مدى من ٦,٨ – ٧ أى متعادل تقريبًا. ومن أهم

مكونات العصير الحلوى الغازات – السكريات – الأملاح المعدنية – القلويدات – أحماض عضوية – بروتينات ذائبة. وعمومًا تقوم الفجوة العصارية بدور هام فى تنظيم امتصاص الخلية للماء كما أنها تساعد على انتفاخها لتأخذ الشكل الخاص بها، هذا بجانب قيامها بعملية الإخراج للخلية. هذا ومن المكونات الحاملة فى الخلية الزيوت وبعض المحتويات الصلبة البلورية وغير البلورية.

نظريات الامتصاص Absorption Theories

بعد هذا الشرح المبسط لتركيب الجذر والخلية النباتية يجدر بنا الانتقال وإلقاء الضوء على كيفية امتصاص العنصر الغذائى والذى يعبر عنه بعدة مصطلحات مثل: Absorption أو Intake أو Uptake وهى لا تعنى إلى طريقة أو ميكانيكية محددة لامتصاص الأيونات، وإنما تشير كلها إلى معنى واحد وهو دخول الأيونات إلى داخل جذر النبات. كذلك يوجد اصطلاح تراكم Accumulation، والتى تشير إلى تحرك الأيونات ضد تدرج التركيز وهى عملية حيوية.

وعندما يصل عنصر ما فى صورته الأيونية إلى أسطح جذور النبات فإن هناك ثلاثة احتمالات يمكن أن تحدث له وهى:

١ – ادمصاصه على أسطح خلايا الجذر نتيجة لتوفر الشحنة الكهربائية على هذه الأسطح.

٢ – اختراقه خلايا الجذر عن طريق الحركة الحرة Passive movement، وذلك خلال الجزء من الخلية المسمى بالفراغ الحر Free Space.

٣ – تراكمه Accumulation داخل الخلايا عن طريق ما يسمى بالامتصاص النشط Active Uptake أو الامتصاص الحيوى Metabolic Uptake.

أى أن عملية الامتصاص للعناصر الغذائية إما أن تكون خلال وسيلة انتقال حُر، أى لا تحتاج إلى طاقة أو ميكانيكية انتقال حيوى وهو ما سنتناوله بشىء من الإيجاز.

ويجب الأخذ فى الاعتبار أن يوجد تعارض شديد بين تركيز العناصر فى المحلول الأرضى من جهة، ومدى احتياجات النباتات لتلك العناصر. علاوة على ذلك نجد أن تركيز بعض العناصر يتضاعف عدة مئات المرات فى الأنسجة النباتية عنه فى المحلول الأرضى، وفى معظم الأحيان يكون التركيز داخل الأنسجة النباتية أكبر بكثير من احتياجات النباتات لهذه العناصر، وفى نفس الوقت نجد أن تركيز البعض الآخر من العناصر يكون أعلى فى المحلول الأرضى عنه فى الأنسجة النباتية. وعلى ذلك يمكن القول بأن عملية الامتصاص عملية اختيارية. وفى البداية تم دراسة ذلك باستخدام خلايا الفطريات وهى خلايا ذات جدارين (بلازما Plasms وتونوبلاست Tonoplast).

يعتبر العالم الأمريكى هوجلاند (Hoagland) ومعاونيه سنة ١٩٤٨ أول من أشاروا إلى ظاهرة التجمع والاختيارية فى الامتصاص، حيث قام ببعض التجارب التى أوضحت الكثير من جوانب عملية الامتصاص للأيونات بواسطة النبات. حيث استعمل فى دراسته طحالب ذات خلايا كبيرة الحجم حتى يتمكن من فصل مكونات العصارة الخلوية لها، ثم تقدير محتواها من الأيونات المختلفة. ففى تجربة عن امتصاص العناصر بواسطة طحلب النيتلا Nitella الذى ينمو فى المياه العذبة وطحلب الفالونيا Valonia الذى ينمو فى مياه البحار، ظهر أن تركيز الأيونات فى الفجوة العصارية لهذه الطحالب لا يتمشى مع تركيز الأيونات فى المياه التى تعيش فيها، حيث يتواجد فى الفجوة العصارية لطحلب النيتلا العديد من العناصر بتركيز مرتفع جداً عن تركيزاتها فى الماء الذى تنمو فيه، فمثلاً البوتاسيوم يتضاعف تركيزه ١٠٨٠ ضعفًا، الصوديوم ٤٥ ضعفًا، الكالسيوم ١٣ ضعفًا، والكلوريد ٩٨ ضعفًا. وعكس ذلك بالنسبة لطحلب الفالونيا الذى يعيش فى مياه البحار عالية الملوحة، فنجد أن تركيز كل من الصوديوم والكالسيوم قد انخفض فى العصير الخلوى فيما عدا البوتاسيوم الذى زاد تركيزه كثيراً فى الفجوة العصارية عن تركيزه فى ماء البحر، كما يتضح ذلك من جدول (٣ – ٣). ويمكن تلخيص نتائج هوجلاند ومساعديه فيما يلى:

١ – النبات يمتص الأيونات اختياريًا. ويتضح ذلك مع عنصر البوتاسيوم القليل التركيز جدًا فى مياه المستنقع بالمقارنة بباقى الأيونات الأخرى، حيث يُعتبر من أكثر الأيونات تجمعًا فى الفجوة العصارية لطحلب النيتلا. وعكس ذلك عنصر الصوديوم يظل تركيزه منخفضًا فى فجوة الفالونيا عن تركيزه المرتفع جدًا فى ماء البحر. أى أن خلايا النبات يمكن أن تمتص أيونات من وسط النمو وتنقلها إلى داخلها، بينما تستبعد أيونات أخرى. وتسمى هذه الظاهرة الامتصاص الاختيارى Selective ion Uptake.

٢ – من النتائج نجد أن هناك ارتفاعًا فى تركيز كثير من الأيونات فى الفجوة العصارية بالمقارنة بتركيزاتها فى المحلول الخارجى، وهذا يؤكد أن تجمع الأيونات بواسطة الخلية يتم ضد تدرج التركيز Against Concentration gradient.

جدول (٣ – ٣): العلاقة بين تركيز بعض الأيونات في العصير الخلوي للطحالب والوسط الخارجي

الطحلب ⇐ / الأيون ⇓	النيتلا التركيز (ملليمول).			الفالونيا التركيز (ملليمول)		
	(أ) فى ماء المستنقع	(ب) فى العصير الخلوى	النسبة (ب) على (أ)	(أ) فى ماء البحر	(ب) فى العصير الخلوى	النسبة (ب) على (أ)
البوتاسيوم	٠,٠٥	٥٤	١٠٨٠	١٢	٥٠٠	٤٢
الصوديوم	٠,٢٢	١٠	٤٩٨	٤٩٨	٩٠	٠,١٨
الكالسيوم	٠,٧٨	١٠	١٢	١٢	٢	٠,١٧
الكلوريد	٠,٩٣	٩١	٥٨٠	٥٨٠	٥٩٧	١

عن Marschner سنة ١٩٩٥.

٣ – أيضًا تشير النتائج بأن عملية الامتصاص تحتاج إلى طاقة ومصدر هذه الطاقة هو ناتج عمليات الميتابوليزم (التمثيل الحيوى) فى الخلية.

كل ما ذكر عن الطحالب من ناحية امتصاصها للعناصر المغذية ينطبق تمامًا على النباتات الراقية. حيث توضح نتائج إحدى الدراسات كما ذكرها **Marschner** سنة ١٩٩٥ على نوعين مختلفين من النباتات مثل: الذرة واللوبيا، تم تنميتها فى محلول مغذى محدد الحجم، وبعد أربعة أيام تم قياس تركيز العناصر فى المحلول المغذى فوجد أن تركيز البوتاسيوم، والفوسفور، والنترات قد انخفض بشدة. فى حين يظل تركيز الصوديوم والكبريتات كما هو أو يزداد قليلاً، وهذا يدل على أن معدل امتصاص النبات للماء أسرع من امتصاصه الأيونات يختلف من نبات إلى آخر وهذا واضح تماما بالنسبة لامتصاص البوتاسيوم والكالسيوم بواسطة الذرة واللوبيا. كذلك يتضح أن تركيز الأيونات فى العصير الخلوى للجذر أعلى بكثير منه فى المحلول المغذى وخاصة بالنسبة لأيونات البوتاسيوم، النترات والفوسفات.

ومن النتائج المعروضة بجدول (٣ – ٣، ٣ – ٤) سواء بالنسبة للطحالب أو النباتات الراقية يمكن توصيف عملية امتصاص النباتات للأيونات بما يلى:

١ – **اختيارية Selectivity**: حيث يتضح بأن هناك أفضلية لبعض العناصر من حيث امتصاصها بواسطة نبات معين عن البعض الآخر.

٢ – **تجميع أو تراكم Accumulation**: أى يُصبح تركيز العنصر داخل العصير الخلوى فى النبات أعلى بكثير منه فى المحلول الأرضى.

٣ – **وراثيًا Genotype**: حيث تختلف النباتات فيما بينهما فى صفة امتصاصها للأيونات.

جدول (٣-٤): التغير في تركيز الأيونات بالمحلول المغذي والعصير الخلوي لجذور نباتات الذرة واللوبيا

الأيون	تركيز المحلول المغذى (ملليمول)		تركيز الأيونات (ملليمول)	
	في البداية	بعد ٤ أيام	في عصير الجذور	
		الذرة	اللوبيا	الذرة	اللوبيا
البوتاسيوم	٢,٠٠	٠,١٤	٠,٦٧	١٦٠	٨٤
الكالسيوم	١,٠٠	٠,٩٤	٠,٥٩	٣	١٠
الصوديوم	٠,٣٢	٠,٥١	٠,٥٨	٠,٠٦	٦
الفوسفات	٠,٢٥	٠,٠٦	٠,٠٩	٦	١٢
النترات	٢,٠٠	٠,١٣	٠,٠٧	٣٨	٣٥
الكبريتات	٠,٦٧	٠,٦١	٠,٨١	١٤	٦

عن Marcshner سنة ١٩٩٥.

مما سبق نجد أن عملية انتقال الأيونات من المحلول الأرضى إلى داخل الخلية النباتية عملية معقدة وهو ما أوجد العديد من النظريات التى تحاول تفسير هذه العملية الحيوية. ولقد اتضح من دراسة هذه النظريات أن ميكانيكية واحدة للامتصاص لا تكفى.

من المتفق عليه الآن إنه لكى يدخل العنصر إلى داخل الخلية فلابد له أن يمر خلال غشاءين، الأول الجدار الخلوى وكما هو معروف يتركب من مواد سيلولوزية بينها فجوات مملؤة بالماء والغازات، وهذا الغشاء مُنفذ تماماً للماء والعناصر الذائبة، والغشاء الثانى هو غشاء البلازما لما والذى يفصل بين الجدار الخلوى والسيتوبلازم وهو غشاء شبه منفذ للعناصر المختلفة. وبالتالى تتم عملية امتصاص العنصر من المحلول الأرضى وتراكمه داخل الخلية على خطوتين:

الأولى: هى الامتصاص البسيط Passive uptake، والثانية: هى الامتصاص النشط

Active uptake وسوف نتناول الطريقتين بإيجاز :

أولاً : الامتصاص البسيط Passive Uptake

وفيه ينتقل الأيون أو الجزىء من المحلول الأرضي ذو التركيز المرتفع منها إلي الجدار الخلوى حيث تركيزها المنخفض نسبياً بدون أى عائق وبطريقة عكسية حتى يصل إلي حالة الاتزان، أى عن طريق الانتشار أو التدفق الكتلى. وقد أطلق العلماء على الجزء من الخلية (أو النسيج النباتي) والتى تتحرك فيه الأيونات بواسطة الانتشار اسم الفراغ الحر Free space والذى يشغل مساحة محسوسة من نسج الجذر حوالي ١٠٪ من حجم الجذور الحديثة، ويشمل الجدر الخلوية لخلايا طبقة البشرة، وطبقة القشرة، كذلك المسافات البينية بين خلايا القشرة ويتم انتقال الأيونات من المحلول الأرضي إلى الفراغ الحر فى الخلية بطريقتين هما :

أ- **الانتشار Diffiusion** : فمثلاً عند وضع الخلية أو نسيج نباتى في محلول ملحى، فنجد أن الأيونات تنتقل من المحلول حيث التركيز المرتفع إلى الفراغ الحر حيث التركيز المنخفض وذلك عن طريق الانتشار وتستمر هذه العملية حتى يتساوى التركيز داخل وخارج الفراغ الحر فيتوقف الانتشار.

ب - **الادمصاص Adsorption** : نظراً لوجود شحنات سالبة على الجدار الخلوى للجذر نتيجة لوجود مجموعات الكربوكسيل ($R- COO^-$) فمن الممكن أن تدمص الكاتيونات عليها عن طريق قوى الجذب الإلكتروستاتيكية مما يساعد فى انتقال الكاتيونات من المحلول وتراكمها فى داخل الفراغ الحر، بينما يحدث تنافر للأنيونات، ويلاحظ أن هذه العملية لا تحتاج إلي أى عمليات حيوية.

جـ- **اتزان دونان Donnan Equilibirium** : وفيه يحدث حالة من الاتزان على جانبى غشاء ما بدون تساوى تركيز الأيون الواحد، ويحدث ذلك عندما يسمح غشاء يفصل بين محلولين لأيون واحد من زوج من الأيونات بالمرور خلاله ولا يسمح بمرور الأيون الآخر، وهنا يتم الاتزان بفرض أن الأيونات الداخلة فى النظام أحادية التكافؤ إذا كان حاصل ضرب التركيز الجزيئى **Molar Concentration** للكاتيونات والأنيونات على جانب من الغشاء يتساوى مع حاصل ضرب تلك الأيونات على الجانب الآخر من الغشاء. وقد وجد أن هذا الاتزان لايحدث غالباً كما شرحه

Donnan في خلايا النباتات الحية . حيث وجد بعد ذلك أن جذور النباتات الراقية لها القدرة علي أن تمتص الأيونات ضد تدرج التركيز بالرغم من أن اتزان دونان لا يحدث فى كثير منها، مما يدل على أن البروتوبلازم له قدرة اختيارية علي امتصاص العناصر. مما سبق يمكن إيجاز خصائص الامتصاص البسيط فيما يلى :

١- لايحتاج إلى طاقة أى لايعتمد على النشاط الحيوى للخلية (حيث إن عملية الانتشار والادمصاص يمكن أن تتم فى أنسجة النبات الحية أو الميتة، أيضاً يمكن أن تتم فى المواد المُخلقة صناعياً سواء بسواء) .

٢- الامتصاص يتم بطريقة عكسية .

٣- الامتصاص هنا ليس اختيارياً .

٤- الانتشار البسيط عملية بطيئة جداً ولا تفسر كيفية امتصاص النباتات للأيونات والعناصر الغذائية ضد تدرج التركيز، كما أنها لا تتميز بالسرعة اللازمة لحياة النبات ونموه .

وعلى ذلك يمكن القول بإن الانتشار البسيط واتزان دونان يعجزان عن تفسير الطريقة التى يمتص بها النبات العناصر الغذائية ويجمعها ضد تدرج التركيز .

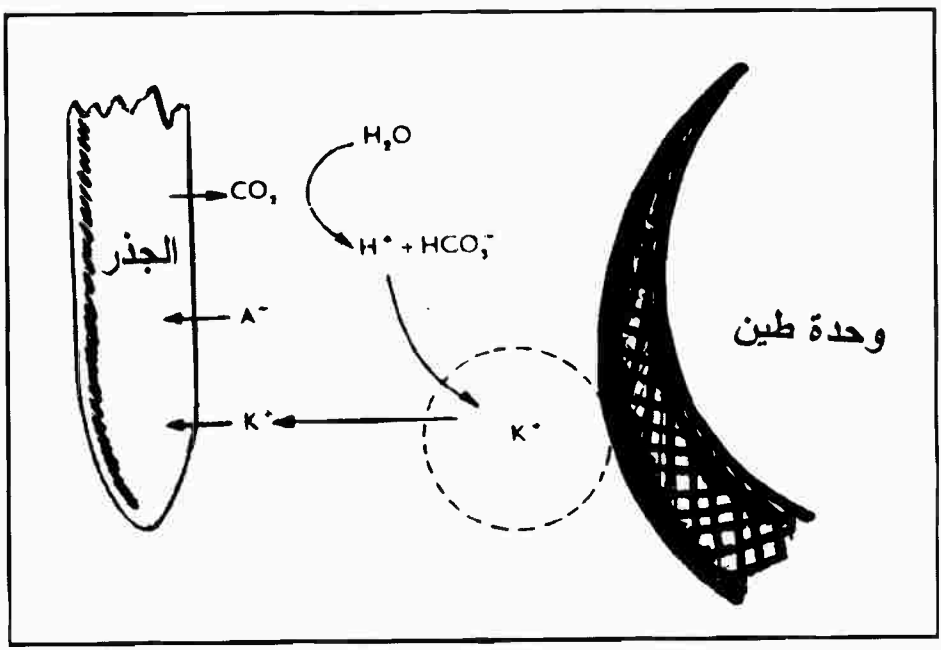
ثانياً : نظرية التحول الكيميائى

وتفترض هذه النظرية أن الأيونات الممتصة قد تدخل فى تفاعل كيميائى بمجرد دخولها الخلية، أى يحدث لها تحول إلى صورة أخرى، وعلي ذلك يستمر دخولها إلى الخلية رغم انخفاض تركيزها خارج الخلية . وتفسر نظرية التحول الكيميائى كيفية انتقال جزئيات السكر من أماكن تخليقها فى الأوراق إلى أماكن تخزينها فى الدرنات أو الثمار على صورة نشا، وبذلك يظل تركيز السكر منخفضاً فى أعضاء التخزين مما يشجع علي استمرار انتقاله إليها . ومع ذلك فهذه النظرية تعجز عن تفسير استمرار تجمع النترات والبوتاسيوم فى الفجوة العصارية بدون تحول كيميائى إلى أن بلغ تركيزها داخل الفجوة عشرات الأضعاف من تركيزها خارج الخلية .

ثالثا : نظرية الامتصاص التبادلى (نظرية ثانى أكسيد الكربون) CO_2

بنى أساس هذه النظرية على الملاحظة التى مؤداها أن كمية الأيونات التى يمتصها النبات تتناسب طردياً مع كمية CO_2 الناتجة من التنفس، وهنا يكمن الاعتقاد بوجود

علاقة بين امتصاص النبات لأيونات العناصر، وحمض الكربونيك Carbonic acid (H_2CO_3) ، وتعتمد هذه النظرية علي اعتبار سطوح جذور النبات سطوح فعالة ونشطة لها خاصية التبادل الأيونى، وسبق ذكر أن الأغشية السيتوبلازمية وهى أحد مكونات البروتوبلازم تحمل شحنات كهربائية غالبا تكون سالبة وعلى ذلك يكون من المتوقع وجود طبقة كهربائية مزدوجة علي هذا السطح، الداخلية منها سالبة بينما الخارجية تكون موجبة وتتكون من الكاتيونات المتبادلة، أى أن للجذور سعة تبادلية كاتيونية والتى تختلف حسب نوع النبات وعمره ودرجة تركيز أيون الأيدروجين.. إلخ، وفى العادة تكون الجذور الغليظة ذات سعة تبادلية كاتيونية عالية بالمقارنة بالجذور الرفيعة، وسبق الإشارة لها قبل ذلك. شكل (٣-٥) يفسر نظرية غاز ثانى أكسيد الكربون CO_2، وفيها يحدث ذوبان لغاز ثانى أكسيد الكربون المتكون من عملية التنفس فى المحلول الأرضى يتكون حامض الكربونيك وبتأين الحامض ينتج أيون الأيدروجين والذى يتبادل مع البوتاسيوم المتبادل على أسطح الغرويات الأرضية، وينطلق البوتاسيوم فى المحلول الأرضى أو يتفاعل مع أيون البيكربونات، ويعود إلى سطح الجذر ويتبادل مع أيدروجين سطح الجذر، وبالتالى يكون من السهل امتصاصه من قبل النبات.



شكل (٣-٥): رسم توضيحي لدور نظرية حمض الكربونيك في الامتصاص

ويجب ملاحظة أن الكاتيونات المتبادلة على أسطح الجذور لايمكنها أن تنفرد ثانياً إلى الخارج إلا بتبادلها مع كاتيونات أخرى متواجدة فى منطقة الريزوسفير، أما عملية تبادل الأنيونات فهى ضئيلة جداً بالمقارنة بعملية تبادل الكاتيونات السائدة على جذور النبات.

رابعاً: نظريات الامتصاص النشط Active Uptake

من النتائج المبوبة في جدول (٣-٤) يتضح جلياً انتقال الأيونات ضد تدرج التركيز، وعلى سبيل المثال نجد أن تركيز البوتاسيوم فى الفجوة العصارية لجذور نباتات الذرة يزيد حوالى ٨٠ مرة عنه فى المحلول المغذى. وعلى العكس نجد أن تركيز الصوديوم في العصير الخلوى لجذر نفس النبات يظل منخفضا بالمقارنة بالتركيز فى المحلول الخارجى، وهذا يؤكد بأن هناك مفاضلة فى امتصاص العناصر. ولايمكن أن يحدث ذلك تلقائياً بل يحتاج إلى طاقة وطبيعى أن يكون مصدر هذه الطاقة النشاط الحيوى بالخلية وعلى ذلك أُطلق على هذا الامتصاص اسم الامتصاص النشط أو الامتصاص الحيوى. وهناك بعض الشواهد التى تؤكد أن هذا الامتصاص يحتاج إلي طاقة منها:

١- يزداد معدل امتصاص الأيونات بارتفاع درجة الحرارة (حتى حدود معينة) وذلك لأن الحرارة تزيد من النشاط الحيوى للخلية.

٢- يزداد معدل الامتصاص مع زيادة ضغط الأكسيجين فى وسط نمو الجذور، أى أن الامتصاص مرتبط بعملية التنفس. وقد لوحظ أن عملية الامتصاص تقل بإضافة مثبطات لعملية التنفس.

٣- يزداد معدل الامتصاص مع زيادة محتوى الجذر من الكربوهيدرات حيث تعمل هذه المركبات كمصدر للطاقة.

وتحاول نظريات الامتصاص النشط (الحيوى) تفسير ما عجزت عنه النظريات السابقة من إمكانية امتصاص النبات للعناصر وتراكمها فى الفجوة العصارية ضد تدرج التركيز وكذلك كيفية امتصاص النبات للأنيونات السالبة الشحنة واختراقها لسطح الجذر ذات الشحنة السالبة، ومن هذه النظريات:

١- نظرية الناقل (المواد الحاملة) Carrier Theory

بجانب نتائج تجارب هوجلاند السابق ذكرها على الطحالب، نجد أن النباتات تعتمد فى حياتها على تفضيل نوع معين من الأيونات على حساب أنواع أخرى إذا ما وجد الجميع معا فى وسط نمو الجذور كما يتضح ذلك مع نباتات الذرة (جدول ٣-٢). ويعنى هذا أن النظام الناقل للأيونات إلى داخل الكائن الحى يمكنه التمييز بين أنواع الأيونات الموجودة خارج هذا الكائن حتى ولو كانت هذه الأيونات على درجة كبيرة من التشابه، أى أن هذا الانتقال اختيارى وفى نفس الوقت حيوى. وهنا يكون من المؤكد وجود مادة أو مواد معينة داخل جسم النبات لها القابلية لحمل أيون معين دون آخر، حيث يُحمل الأيون عليه مكونا معقد الحامل والأيون، ويتحرك هذا المعقد من الخارج إلي الداخل فقط ويتحرر الأيون فى داخل الفجوة العصارية ويستعيد الحامل نشاطه وقدرته على نقل أيون معين آخر.. وهكذا. وتختلف الآراء حول طبيعة المواد الحاملة فيرى البعض بأنها عبارة عن مادة السيتوكروم كما اقتراح لونداجارد، أو مواد عضوية مشابهة للمواد التى اكتشفت فى البكتريا، فى حين قرر أوتسر هاوات بأنها كحوليات عضوية في حين يرى البعض الآخر أنها أحماض عضوية أو البروتوبلازم نفسه قد يعمل حاملاً للأيونات، إلا أنه وجد أن الخاصية الاختيارية في كثير من الاحيان تكون غير كاملة وخاصة مع الأيونات المتماثلة فى الشحنة والتكافؤ. وكما سبق ذكر ان خاصية عدم نفاذية بعض الأغشية للمواد المحبة للماء (الأيونات) إلى احتواء هذه الأغشية على جزئيات الليبدات. ومن هنا يكون من المحتمل أن تكون المواد الحاملة هى جزئيات من الليبدات، وفي كل الأحوال يجب أن تكون على المواد الحاملة مواقع لها درجة كبيرة من التخصص لربط الأيونات المختلفة مما يساعد على الامتصاص الاختيارى للأيونات.

ويمكن القول بوجه عام إن هناك اتفاق بين معظم الباحثين في هذا المجال على أن المواد الحاملة غير ثابتة التركيب حيث يتغير تركيبها الكيميائى أثناء حملها للأيونات المختلفة، نتيجة تكوين مواد وسطية ناتجة من عمليات التحولات الغذائية، وقد تعمل كمعقدات مخلبية Chelating complexes.

ويمكن تفسير طريقة النقل (الامتصاص) النشط للأيونات خلال الأغشية كما يوضحها شكل (٣-٦) بما يلى:

١- يتم تخليق مواد بالغشاء تعرف بالمواد الحاملة Carriers.

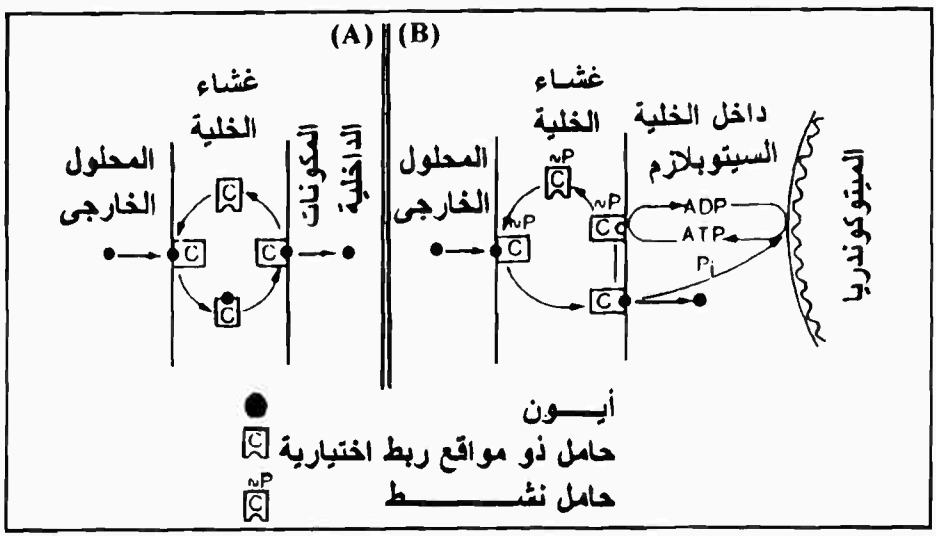
٢- ترتبط المواد الحاملة مع الأيون عند السطح الخارجى للغشاء وتكون معقد بين الأيون والحامل.

٣- انتقال معقد الأيون والحامل داخل الغشاء الخلوى.

٤- عند السطح الداخلى للغشاء ينفرد الأيون عن الحامل ويتجه إلى داخل العصير الخلوى حيث يتم تراكمه.

٥- تتحرك المادة الحاملة مرة أخرى تجاه السطح الخارجي لحمل أيون جديد وهكذا.

وتحتاج المواد الحاملة إلى طاقة لكى تقوم بعملها ويكون مصدر الطاقة هو مركب (Adenosine triphosphate ATP) الذى يقوم بتزويد الحامل بعنصر الفوسفور فيحوله إلى حامل نشط Active carrier (نتيجة تفاعل إنزيم فوسفات كينيز الموجود على السطح الداخلى للغشاء مع ATP حيث يتحول إلى ADP + فوسفات غير عضوية)، وبالتالى يتمكن هذا الحامل من الحركة خلال الغشاء والارتباط مع الأيون. وعند الجدار الداخلي للغشاء يصبح الحامل غير نشط بفقده للفوسفور، وفى هذه الحالة لا يستطيع المرور خلال الغشاء أو حمل الأيون.



شكل (٣-٦): انتقال الأيونات خلال الجدار الخلوي للخلية بواسطة الحامل

- **فى نموذج A يلاحظ توسط المواد الحاملة للأيونات للجدار.**
- **وفى نموذج B يلاحظ مدي مساهمة مركبات الطاقة فى عملية انتقال الأيون**

وعلى ذلك نجد أن الأيون غير حر في تحركه خلال الغشاء بمفرده، ولكنه يتحرك بعد أن يصبح جزءاً من مكونات مواد معينة (الحامل)، ثم يصبح أيون حر مرة أخرى عند انفصاله عن الحامل عند السطح الداخلى للغشاء. ولا يمكن للأيون الرجوع مرة أخرى إلى حيث كان، نظراً لقلة نفاذية الغشاء، وكذلك لأن الحامل فقد نشاطه وأصبح خاملاً وفقد الارتباط بالأيون.

ومن الجدير بالذكر بأن على كل مادة حاملة مواقع ربط Binding sites متخصصة لكل نوع من الأيونات، مما يساعد علي الامتصاص الاختيارى Selective transport للأيونات.

٢- نظرية لونداجارد Lundegardh Theory

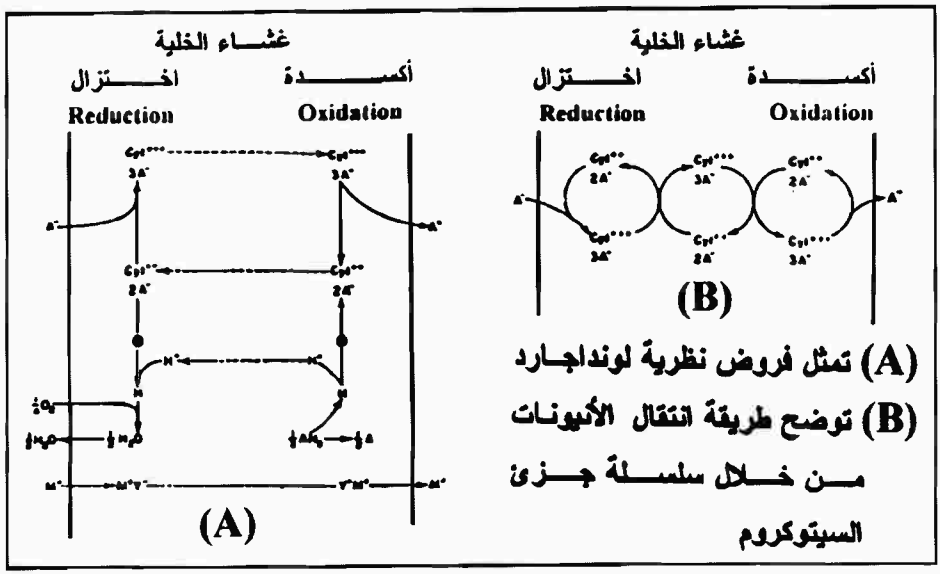
وتعرف أيضاً بنظرية التنفس الأنيونى Anion respiration أو نظرية مضخة السيتوكروم Cytochrome pump وتفترض هذه النظرية أن عملية الامتصاص تخضع للأسس الآتية:

١- هناك انفصال تام بين كل من عمليتى امتصاص الأنيونات والكاتيونات.

٢- امتصاص الكاتيونات عملية طبيعية بحتة وتتم على خطوتين: الأولي فيها يتحرك الكاتيون من خارج الخلية إلى داخل السيتوبلازم، وهنا تعتبر علي أنها عملية تبادل أيونى بين الكاتيون والأيدروجين المتأين من بعض المركبات العضوية في البروتوبلازم. والثانية يتم فيها انتقال الكاتيون من سيتوبلازم الخلية إلى داخل الفجوة العصارية ويطلق على هذه الخطوة عملية التجمع أو التراكم Accumulation، كذلك عملية امتصاص الكاتيون عملية عكسية بمعنى أن الكاتيون يمكن أن يتحرك بحرية خلال السيتوبلازم في اتجاه الداخل أو الخارج نحو جدار الخلية.

٣- امتصاص الأنيونات عملية كيميائية بحتة تتم عن طريق جزئيات حاملة من السيتوكروم، كما أنها عملية غير عكسية، وتتم عملية امتصاص الأنيونات ضد تدرج التركيز وكذلك ضد تشابه الشحنة.

٤- يكون التنفس الأنيونى مسئولاً عن كمية الطاقة اللازمة لعملية امتصاص الأنيونات ضد تدرج التركيز وضد تشابه الشحنة. وقد تمكن لونداجارد من تثبيط هذا النوع من التنفس بإضافة أول أكسيد الكربون أو السيانيد، حيث تعمل هذه المواد على إيقاف عمل إنزيم Cytochrome oxidase، وكان ذلك أحد الأدلة التى اعتمد عليها فى إثبات أن نظام السيتوكروم هو المسئول عن عملية امتصاص الأنيونات وقيامها بعمل المادة الحاملة لها.



شكل (٣-٧): رسم يوضح كيفية انتقال الأنيونات بواسطة السيتوكروم (نظرية لونداجارد)

وتعتمد ميكانيكية امتصاص الأنيونات بواسطة مضخة السيتوكروم علي عملية التنفس التى تعتبر مصدر الإمداد بالإلكترونات الناتجة من تحول الأيدروجين عند السطح الداخلى إلى بروتونات الأيدروجين H^+، والإلكترونات e^- ومصدر الأيدروجين هنا هو الأحماض العضوية بفعل إنزيمات الديهيدروجينيز. ينتقل الإلكترون المتكون إلى وحدة السيتوكروم ويختزل الحديديك Fe^{3+}، إلى حديدوز Fe^{2+} ، ثم ينتقل من وحدة إلى أخرى فى تتابع مستمر حتى يصل إلى غشاء السيتوبلازم الخارجى البلازمالما Plasmalemma وعندها يفقد حديد السيتوكروم

الإلكترون المُكتسب ويتحول إلى حديديك الذى يكون مستعد لاستقبال إلكترون آخر من الداخل ، أو أنيون من الخارج ويأخذ الصورة حديد – أنيون ($Fe\text{-}A^-$)، وينتقل هذا الأنيون إلى داخل الخلية في تتابع مماثل حتى الوصول إلى الفجوة العصارية وعندها يتم تبادل الأنيون مع إلكترون جديد (شكل ٣–٧) . ويلاحظ أن الإلكترونات التى فقدت من حبيبة السيتوكروم الأخيرة والمتبادلة مع الأنيونات تتجه إلي الأكسجين الداخل للخلية للتنفس وتحوله إلى أنيونات O^{2-} أكسيجين. وأخيراً يتحد مع الأيدروجين الناتج من دورة كربس ويتكون جزىء الماء كما يتضح من المعادلة :

$$2H^+ + 2\,e^- + 1/2\,O_2 \Rightarrow H_2O$$

وهنا نجد أن جزىء الأكسجين يحتاج إلى ٤ إلكترونات :

$$4H^+ + 4e^- \Rightarrow H_2O$$

ونتيجة لامتصاص الأنيونات السالبة بهذه الكيفية وتراكمها داخل الخلية يترتب عليها أن يتكون فرق جهد سالب على الجانب الداخلي للخلية يعمل على جذب الكاتيونات الموجبة الشحنة ضد تدرج التركيز. وتعتبر هذه النظرية من أوائل النظريات التى أعطت أهمية لدور الطاقة فى عملية الامتصاص.

الاعتراضات على نظرية لونداجارد :

يوجد عدة اعتراضات لهذه النظرية ذكرها صادق وآخرون سنة ١٩٩٧ عن الباحث Sutcliffe سنة ١٩٦٢ وتتمثل فى :

١– فى حالة وجود حامل واحد للأنيونات فيكون من المتوقع وجود تنافس بين الأنيونات على هذا الحامل، وهذا لم يثبت إلا بين Cl^-, Br^- دون NO_3^- ، $H_2PO_4^-$ كذلك لم يحدث تنافس بين الهاليدات (F^- , Cl^- , Br^-) والكبريتات SO_4^{2-} مما يؤكد وجود أكثر من حامل.

٢– فى بعض الحالات يكون امتصاص الملح مرتبط مع الأسكوربيك أوكسيديز بدلاً من السيتوكروم أوكسيديز، حيث ثبت أن السيتوكروم أوكسيديز غير موجود أصلاً فى الغشاء.

٣- وجد أن بعض الكاتيونات مثل Na^+ و K^+ لها القدرة على أن تحفز التنفس، وبالتالى فإن ظاهرة التنفس الملحى ليست مقصورة على الأنيونات فقط، ولكن قد تكون مرتبطة بالكاتيونات أيضاً.

٤- وجد أن مركب DNP وهو مثبط للأكسدة الفوسفورية قد شجع التنفس إلى أقصاه، ولكن قلل امتصاص KCl، وهنا يجب أن تتوقف عملية الامتصاص فى حالة صحة افتراض لوندا جارد.

٥- وجد أن تحت الظروف المناسبة أكثر من أربعة إلكترونات يمكن أن تنتقل إلى خارج الخلية لكل جزىء O_2 يُستهلك، وهذا عكس افتراض لونداجارد والذى يحدد أن أقصى عدد للأنيونات يمكن انتقاله مع استهلاك جزىء O_2 هو أربعة فقط. وبالتالى فإن مبدأ انتقال الأيون معتمداً على الارتباط المباشر مع الالكترون ومضخة الاختزال يعتبر غير صحيح.

٦- عجزت هذه النظرية فى تفسير الاختيارية لامتصاص الأيونات، ووضح ذلك مع كثير من النباتات.

ومن هنا نجد أن أهم ما أضافته نظرية لوندا جارد هو لفت الانتباه إلي دور الطاقة فى عملية الامتصاص الحيوي.

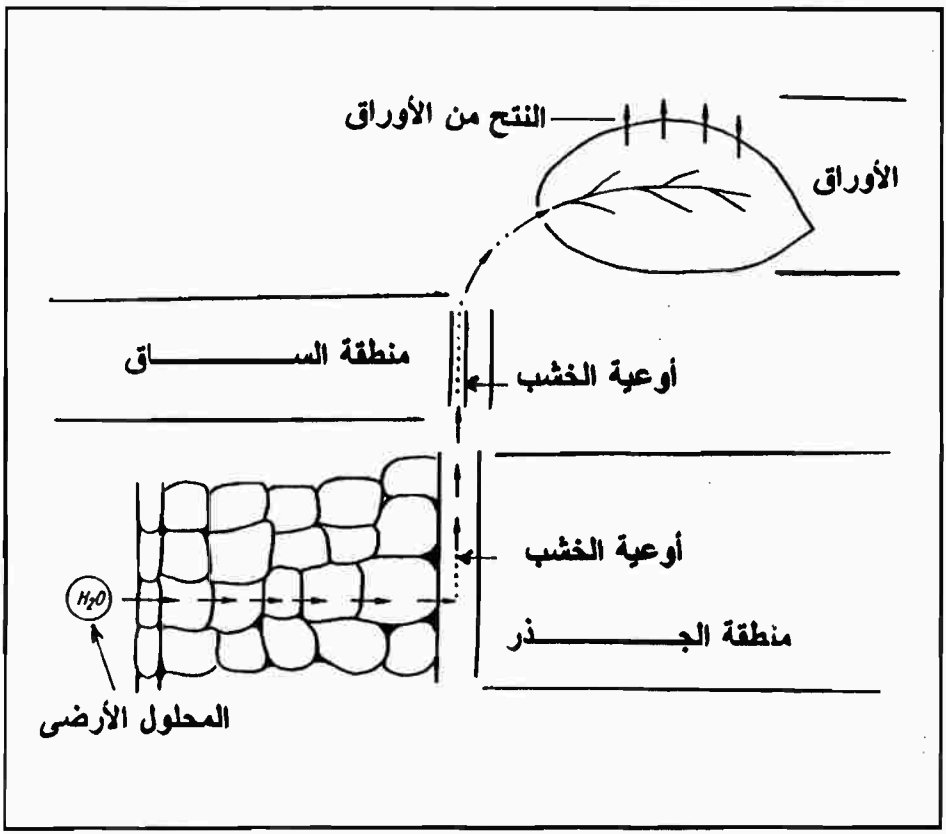
ثالثا: صعود الأيونات من الجذر إلى الأجزاء الهوائية

بعد امتصاص الأيونات بواسطة خلايا البشرة فى الجذر تنتقل هذه الأيونات خلال خلايا نسيج الجذر فى اتجاه الداخل حتى تصل إلى الأوعية الناقلة (شكل ٣-٨)، وتتحرك هذه الأيونات إلى داخل الجذر بوسيلتين:

الأولى: تحرك الأيون من سيتوبلازم إلى سيتوبلازم الخلية المجاورة جهة الداخل عن طريق الخيوط البلازمودزمية التى ترتبط سيتوبلازم الخلايا مع بعضها البعض حتى يصل إلى الأوعية الخشبية.

الثانية: هى تحرك الأيون في الفراغ الحر Free space فى جدرخلايا القشرة وفى هذه الحالة تتوقف حركة الأيون عند طبقة الإندودرمس لوجود الشرائط الكسيبرية التى تقلل

من نفاذ الجدار الخلوى، وتمنع انتقال الأيونات خلاله مما يُحتم وسيلة حيوية تحمل هذا الأيون وتمر به خلال الإندودرمس لكى يستمر فى طريقه إلى أوعية الخشب. وبمجرد وصول الأيونات إلى الأوعية الخشبية فإنها ترحل بسرعة إلى الأجزاء الهوائية مع تيار الماء الصاعد إلى أعلى حيث تدخل هذه الأيونات فى عمليات التمثيل الغذائى فى الأوراق.



شكل (٣-٨): رسم تخطيطي يوضح كيفية انتقال المحلول الأرضي من الجذر إلي الأوراق