جامعة حماه
كلية الهندسة الزراعية – السلمية
السنة الثالثة

المحاضرة النظرية الثالثة في خصوبة التربة وتغذية النبات

امتصاص العناصر المغذية

Nutrients Uptake

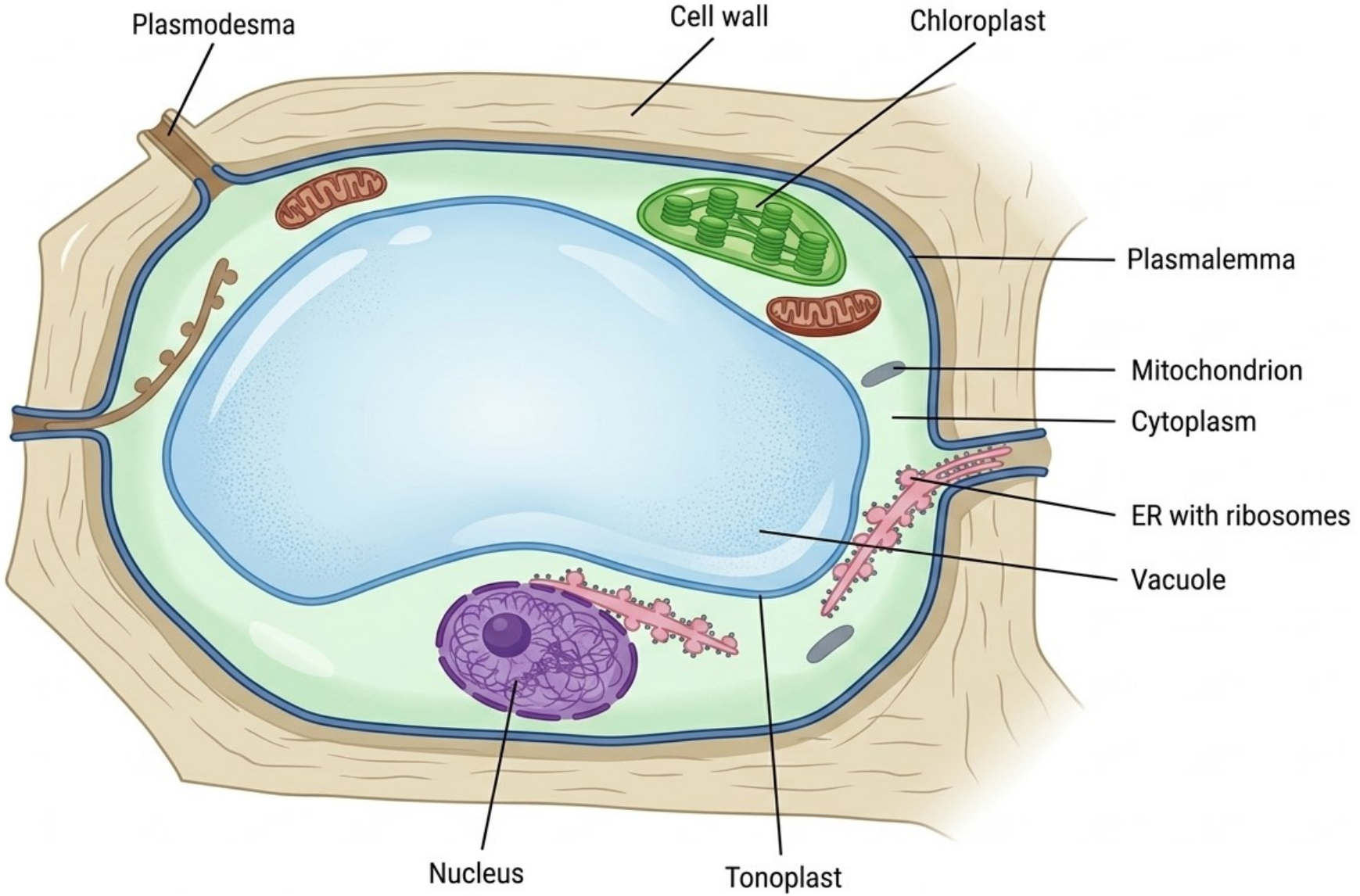
15/4/2026

تُعرَّف **التغذية Nutrition** بأنها عملية إمداد النبات وامتصاصه **للمغذيات Nutrients** اللازمة للمحافظة على حياته ونموه. ولقد شغل موضوع امتصاص العناصر المغذية ودخولها النبات اهتمام العديد من الباحثين والعلماء، وقُدّمت مجموعة من النظريات التي تفسّر آلية امتصاص العناصر المغذية.

ولقد كانت أغلب النظريات التي ظهرت خلال القرن التاسع عشر ومطلع القرن العشرين تفترض أنَّ امتصاص العناصر المغذية يتم بآليات فيزيائية. واعتباراً من منتصف القرن العشرين تقريباً بدأ العلماء بالربط بين الامتصاص الأيوني والعمليات الاستقلابية الجارية ضمن الخلية النباتية، معتمدين في ذلك على تقنية النظائر المشعة Radio Isotopes. ولكي ندرك الطريقة أو الآلية التي يمتص بها النبات العناصر المغذية، يجدر التنويه - ولو بإيجاز شديد- إلى تركيب الخلية النباتية، وبخاصة الجدار والغشاء الخلويان.

1-3 الخلية النباتية:

يبيّن الشكل (3-1) رسماً مبسطاً للخلية النباتية موضّحاً عليه الأجزاء الرئيسية المكوّنة لها. ويعد جدار الخلية Cell wall بمثابة الغطاء الخارجي للخلية الذي يفصلها عن المحيط الخارجي، الذي قد يتصل بالتربة كما في حالة خلايا البشرة Epidermic celles في الجذور، أو عن بقية الخلايا النباتية. ويتكون جدار الخلية من مواد بكتينية Pectic substances وسيللوز Cellulose، حيث تتجمع جزيئات السيللوز لتكوِّن بناءً شبيهاً بالسلاسل تسمح الفراغات الداخلية بينها بمرور الماء والأيونات والهواء.



الشكل (3-1): رسم مبسط للخلية النباتية (عن Mengel & Kirkby, 1987)

وبهذا التركيب تتقرّر الوظيفة الأساسية لجدار الخلية، ألا وهي توفير نوع من الصلابة أو المتانة الهيكلية للخليّة وجعلها تحتفظ بشكل أو هيكل ثابت تقريباً، فلولا جدار الخلية لما استطاعت الخلية مقاومة أي ضغط يقع عليها ولغيّرت شكلها تبعاً لذلك الضغط. وتقدَّر سماكة جدار الخلية بحوالي (1000) أنغستروم (Å)

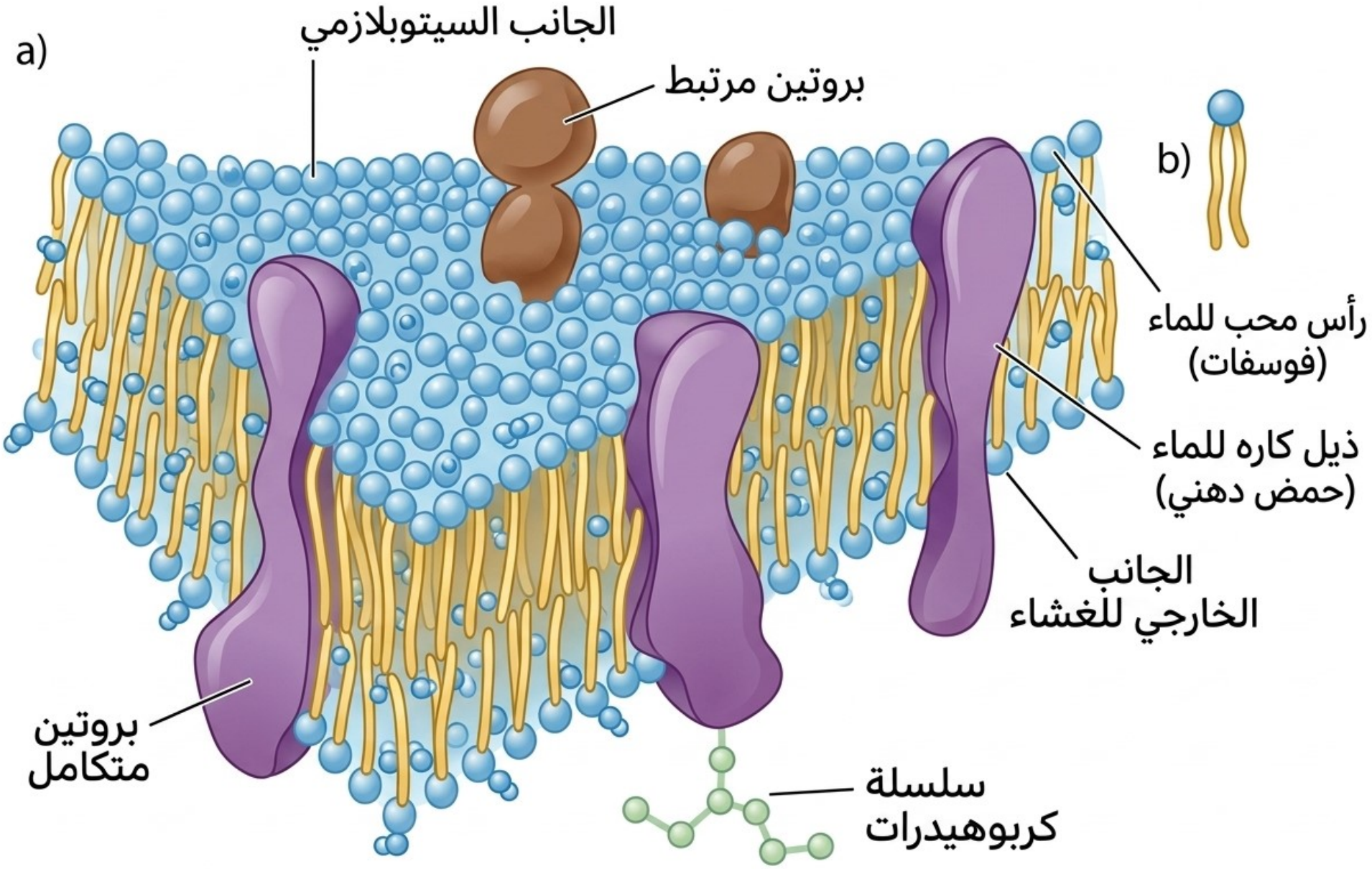
ولعلَّ أهم ما يميز الجدار الخلوي نفاذيته للماء والأيونات وفي كلا الاتجاهين (أي من خارج الخلية إلى داخلها وبالعكس)، ويُعتقد أن جدار الخلية يضم مواقع تبادل تحمل شحنات سالبة Electronegative exchange sites تُدمَصُ عيلها أيونات موجبة كنتيجة للقوة الكهربائية الساكنة Electrostatic force، تماماً كما يحدث لمواقع التبادل الموجودة في غرويات التربة. وتنتج هذه المواقع التبادلية السالبة في جدار الخلية عن مجاميع الكربوكيسل Carboxyl groups.

ولا بدَّ من أجل فهم أعمق لعملية امتصاص العناصر الغذائية من دراسة سريعة لغشاء الخلية Cell membrane الذي يسمى Plasmalemma تمييزاً له عن أغشية مكونات الخلية الأخرى كغشاء الفجوة Tonoplast وغيره.

وتقدّر سماكة غشاء الخلية بـ(70 – 100 Å) ويتكوّن هذا الغشاء كبقية الأغشية الحيوية من جزئيات البروتين Protein (55%)، والدهون Liqids (40%)، والكربوهيدرات Carbohydrates (5%). ويعدّ هذا التركيب الأكثر قبولاً حتى الآن لدى علماء الفيزيولوجيا، وذلك على الرغم من عدم وجود تركيب متفق عليه لغشاء الخلية من قبل كافة المختصين

أمّا من حيث بنية Structure هذا الغشاء فيُعتقد أنها تتكون من طبقتين من الدهون الفوسفورية Phospholipids تحتوي على مناطق محبة للماء Hydrophilic (مجاميع وظيفية مختلفة مثل الهيدروكسيل OH، والأمين NH_2، والكربوكسيل COOH)، ومناطق أخرى كارهة للماء Hydrophobic (سلاسل هيدروكربونية)، بحيث تتجه النهايات الكارهة للماء لهاتين الطبقتين باتجاه الدخل وتكون مقابلة لبعضهما البعض، بينما تكون النهايات المحبة للماء متجهة نحو الخارج باتجاه الجدران الخارجية للغشاء (الشكل 3-2).

يمكن أن ترتبط الدهون والبروتينات بروابط كهرساكنة Electrostatic bonds، وروابط هيدروجينية Hydrogen bonds، وروابط كارهة للماء bonds Hydrophobic، كما يمكن للبروتينات المتجهة نحو خارج الخلية أن تتصل بسلاسل كربوهيدراتية.



الشكل (3-2): بنية الغشاء الخلوي (عن Mengel & Kirkby, 1987)

من المفيد، عند دراسة غشاء الخلية، من توضيح الأمور التالية:

1-**لا يعدّ** غشاء الخلية نفوذاً للأيونات بصورة حرة، فالأيونات تنتقل إلى الجانب الآخر للخلية أي إلى داخل الخلية **بصورة انتقائية Selectively**، أي أن غشاء الخلية يسمح بعبور أيونات معينة **دون** أيونات أخرى.

2-بمجرد دخول الأيونات إلى داخل الخلية **لا يسمح** غشاء الخلية بخروجها مرة أخرى إلى خارج الخلية، وبالتالي **يتوفر** الوقت الكافي للخلية للاستفادة من تلك الأيونات في العمليات الحيوية.

3 - يسمح غشاء الخلية للماء بالدخول والخروج من الخلية **بحرية تامة**.

4- يضم غشاء الخلية جزيئاً ذا طبيعة بروتينية يقوم بنقل الأيونات من خارج الخلية إلى داخلها (وليس العكس)، ويدعى هذا الجزيء **بالحامل(الناقل) Carrier**.

5- قد تتواجد بعض **الأنزيمات** في غشاء الخلية والتي لها علاقة مباشرة أو غير مباشرة بعملية الامتصاص.

2-3 - آليات امتصاص العناصر الغذائية Nutrient Uptake Mechanisms

منذ بدء اكتشاف أهمية العناصر الغذائية الأساسية للنبات والمحاولات جارية من أجل التعرّف على الآلية التي تمتص بموجبها هذه العناصر. ولقد كان الاعتقاد السائد حتى مطلع القرن العشرين أن النبات يمتص العناصر الغذائية بآليات فيزيائية Physical Mechanisms، واعتباراً من عام 1935 بدأ العلماء بالربط بين عملية الامتصاص والعمليات الاستقلابية باعتبارها المسؤولة عن عملية الامتصاص، ثم تبين لاحقاً أن عملية الامتصاص الأيوني تسهم فيها كل من الأليات الفيزيائية والأليات الايجابية في آن معاً.

1-2-3 - الامتصاص السلبي Passive Absorption

لقد وضعت نظريات عدّة تفسّر الآلية التي تمتص فيها العناصر الغذائية بمعزل عن العمليات الاستقلابية الجارية ضمن النبات، **وأبرز هذه النظريات:**

1-1-2-3 -اعتراض الجذور والتبادل بالتماس Contact Exchange Theory

هناك سؤال هام يطرح نفسه بخصوص جاهزية العناصر المغذية وامتصاصها من قبل النبات يتلخص بالآتي: ترى هل تحتاج المغذيّات للانتقال إلى جذور النبات، أو أنّها تلامس الجذور خلال امتدادها وتغلغلها في التربة؟ وتدعى الطريقة الأخيرة في انتقال المغذيات **باعتراض الجذور Root interception**، ولقد تمت الاشارة إلى هذه الطريقة لأول مرة من قبل Brewster and Tinker, 1970، وتأتي أعمال كل من Devaux و Jenny and Overstreetلتدعم هذه الطريقة في انتقال المغذيات من التربة إلى النبات.

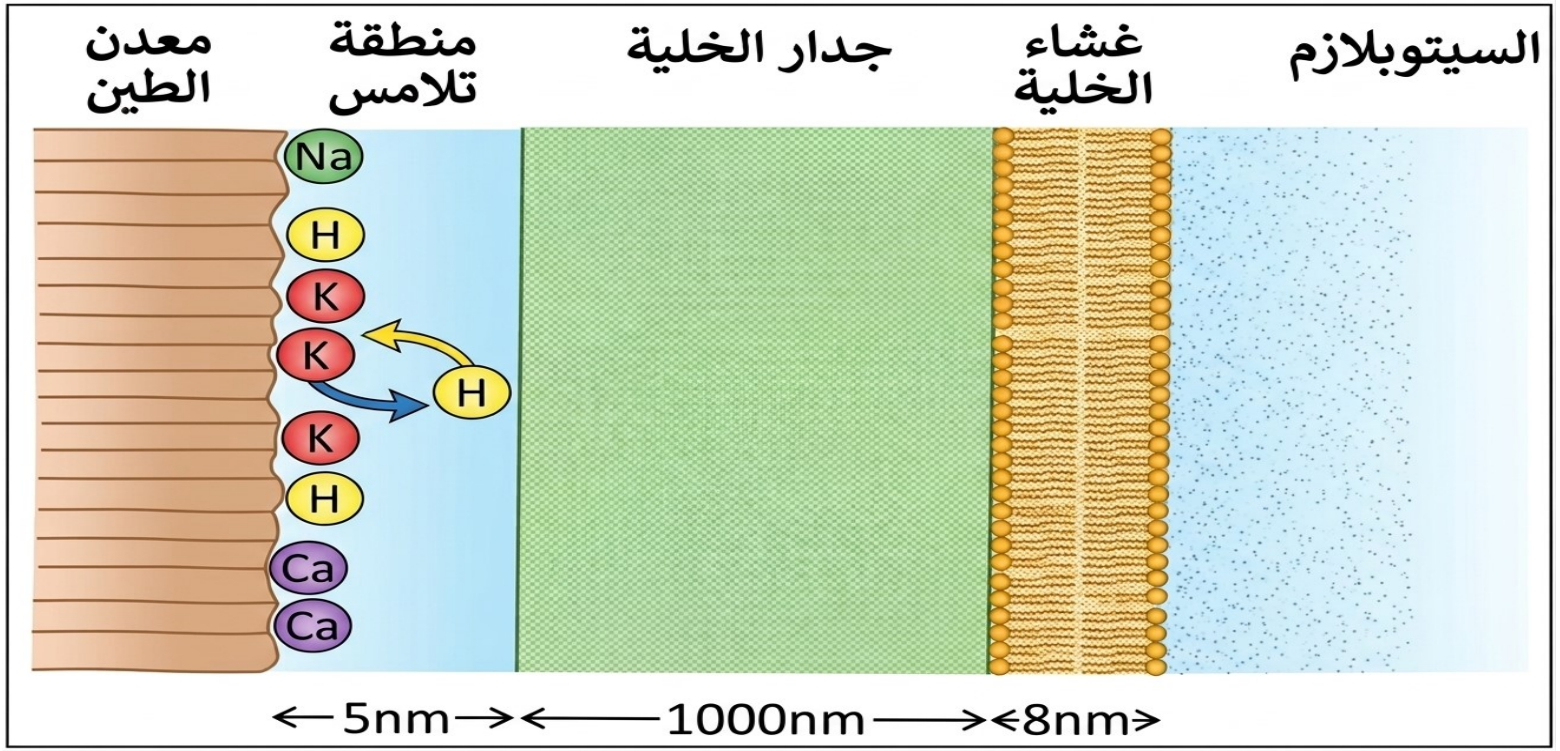
فلقد بيّنت أعمال Devaux في عام 1916 أنّ جذور النباتات- كما حبيبات الغضار في التربة- تمتلك قدرة على جذب الكاتيونات إلى سطحها الخارجي، أي أن لها سعة تبادل كاتيوني كما التربة تماماً.

ولقد ساعد ذلك الباحثان Jenny and Overstreet في عام 1938 على وضع نظرية التبادل بالتماس Contact Exchange Theory والتي تتلخّص بأنّ الكاتيونات المدمصّة على سطوح معقد الادمصاص سواءً كان جذراً أو تربةً ليست **ثابتة** في مكانها بل تتحرك متذبذبة ضمن مجال معين، وعندما يحصل تداخل بين مجالي الحركة لكاتيونين مدمصين أحدهما على التربة والآخر على سطح الجذر فإن تبادلاً مباشراً بين هذين الكاتيونين يمكن أن **يحصل**.

ويمكن اعتبار **التبادل بالتماس** الخطوة الأولى في عملية امتصاص الكاتيونات من قبل النبات، ولا يمكن اعتباره عملية امتصاصية كون الكاتيونات لا تنتقل إلى داخل الخلية النباتية بل تحل عادةً محل كاتيون **الهدروجين** على السطح الخارجي للجذر بعملية تبادل كاتيوني Cation exchange.

وهذا يفسّر القول إن هذه العملية تعدّ بمثابة الخطوة الأولى في عملية امتصاص الكاتيونات. ولقد أصبح من الثابت الآن بأن عملية التبادل بالتماس عملية واقعية تحدث في التربة، ولكن ما المدى الذي تحدث فيه، وما مقدار مساهمتها في عملية الامتصاص الأيوني؟ هذا ما سوف نحاول الإجابة عنه في السطور القادمة.

يبين الشكل (3-3) مخططاً لعملية التبادل بالتماس موضّحاً عليه مواقع العملية وأبعادها حيث يقوم أيون (H^+) بالانتقال مسافة صغيرة جداً مقدارها ($50 Å^o$) وهي المنطقة الفاصلة بين الجذور وحبيبات التربة محرّراً أيون (K^+) الذي ينتقل باتجاه الجذر ويدمص على أحد مواقع التبادل السالبة، وفي هذه الحالة يكون أيون البوتاسيوم بعيداً جداً عن موقع الامتصاص الحقيقي وهو غشاء الخلية الذي يبعد ($10000 Å^o$) عن مكان ادمصاص البوتاسيوم وهذه المسافة تمثل سماكة جدار الخلية، أي أن على أيون البوتاسيوم أن ينتقل حوالي (8000) مرة بقدر قطره حتى يصل إلى **غشاء الخلية**.



الشكل (3-3): منطقة التماس بين سطح فلز طين وخلية بشرة جذرية (Mengel & Kirkby, 1987)

لا يوجد حتى الآن أي دليل على أنَّ الأيونات تقطع هذه المسافة بأي عملية تبادلية أخرى بل أنها تنتقل عبر جدار الخلية متجهة نحو الغشاء بواسطة الانتشار متّبعة منحدر التركيز، وهو ما يحصل بالنسبة للنباتات الراقية. ويُعتقد أن جدار الخلية المكتمل النمو يحوي عادة قنوات ممتلئة بالهواء ومحلول التربة (Free space)، ومن الطبيعي أن تشكل هذه القنوات **الطريق الطبيعي** للأيونات إلى غشاء الخلية.

3-2-1-2 - الانتشار Diffusion

يقصد به صافي حركة المواد أو الجزئيات أو الأيونات من الوسط الأعلى تركيزاً إلى الوسط الأدنى تركيزاً. ويعود سبب هذه الحركة إلى الطاقة الحرارية التي تحملها الذرات أو الجزيئات أو الأيونات. ويتبع الانتشار **قانون فيك Fick's low الأول**، الذي يعبَّر عنه بالعلاقة التالية:

$$F = -D.\frac{dc}{dx}$$

F = معدل الانتشار Diffusion rate، ويساوي الكمية المنتشرة في المقطع العرضي خلال وحدة الزمن

D =معامل الانتشار Diffusion coefficient

c=التركيز

x=المسافة

dc/dx = منحدر التركيز

بناء على هذا القانون فإنه يمكن للأيونات الموجودة في التربة أن تنتقل من نقطة إلى أخرى- بوجود الماء طبعاً- تبعاً لمنحدر تركيزها، أي تنتقل من النقطة التي يكون فيها التركيز **عالياً** إلى النقطة التي يكون فيها التركيز **منخفضاً**.

يحصل الانتشار عندما يكون تركيز الأيون على سطح الجذر أعلى أو أخفض من تركيزه في محلول التربة (أو المحلول المغذي) حيث يكون **باتجاه** الجذر عندما يكون التركيز على سطح الجذر **منخفضاً**، **وبعيداً** عن الجذر عندما يكون التركيز على سطح الجذر **مرتفعاً** مقارنةً بمحلول التربة.

وفي كافة الأحوال **يزداد** معدل سرعة الانتقال كلما كان الفرق بالتركيز **كبيراً**. وعادةً يؤدّي امتصاص الجذور للأيونات إلى خفض تركيزها في المنطقة المحيطة بالجذر (منطقة الريزوسفير Rhizosphere) مما يساعد على خلق منحدر تركيزي باتجاه الجذور، وهذا يشير إلى أن الجذور ذات القوة الامتصاصية Absorbing power **العالية** تكوّن منحدراً حادّاً يؤدي إلى زيادة حركة الأيونات في التربة نحو المجموعة الجذرية، وبالتالي يشير إلى **مساهمة الجذور بحدّ ذاتها-** كما العمليات الاستقلابية- في جاهزية Availability العناصر الغذائية.

يُعتقد أنَّ الأيونات التي تمتص بسرعة من قبل الجذور والتي تتواجد عادةً في محلول التربة ضمن تراكيز منخفضة مثل $(NH_4^+,\ K^+,\ H_2PO_4^-)$ تنتقل أساساً إلى جذور النبات بطريقة **الانتشار**. وينتج عن امتصاص جذور النبات للعناصر المغذية استنزاف لهذه العناصر من منطقة انتشار المجموعة الجذرية مما يؤدي إلى تكون ما يدعى بـ "منطقة استنزاف العناصر المغذية Nutrients Depletion Zone". ويكون الاستنزاف على أشده في المنطقة المحيطة بالجذر **ويقلّ** كلما ابتعدنا عنه، كما يكون حجم منطقة استنزاف العناصر المغذية وامتدادها في الترب الغنية بالعناصر المغذية **أكبر** من الترب الفقيرة بها نظراً لكون منحدر التركيز في الترب الخصبة أكثر حديةً مما هو عليه في الترب غير الخصبة.

يعتمد انتقال العناصر الغذائية إلى الجذور بآلية الانتشار بصورة كبيرة على المحتوى الرطوبي للتربة. فالماء يعد الوسط الناقل للأيونات من جهة، ومن جهة أخرى فإنه كلما انخفضت رطوبة التربة فإن الهواء يحل محل الماء في مسامات التربة، مما يؤثر في حركة الماء في القنوات الصغيرة المنتشرة في التربة مانعاً جزيئات الماء من تشكيل كتلة متصلة فيما بينها. ولابد هنا من الإشارة إلى حقيقة هامة مفادها **أنَّ الانتشار يقلّ** بصورة ملحوظة مع **انخفاض** مستوى رطوبة التربة، حتى في الترب التي يكون محتواها الرطوبي كافياً لنمو النبات ولكنه غير كافٍ لحدوث الانتشار بسهولة ويسر. ويكون تأثّر النبات في هذه الحالة ناتجاً عن بطء حركة العناصر المغذية وليس ناتجاً عن قلة توفر الماء، لذلك ينصح بالمحافظة على رطوبة التربة عند مستوى **السعة الحقلية Field Capacity.**

الانتشار يكون باتجاه منحدر التركيز، وبالتالي فإنه يمكن أن يحصل من الجذر إلى التربة إذا ما حصل تراكم للأيونات في الجذر، حيث يمكن أن يتم الانتشار من منطقة الفضاء الحر Free space في الجذر إلى محلول التربة Soil Solution باعتبار أن المحلول في هذه المنطقة يعد امتداداً لمحلول التربة وتحكمه القوانين نفسها التي تحكم محلول التربة. يضاف إلى ذلك أن الانتشار يحصل بين نقطتين لا عائق بينهما.

3-1-2-3 التدفق الكتلوي Mass Flow

يحصل التدفق الكتلوي في التربة عندما تنتقل كتلة المياه من نقطة إلى أخرى داخل التربة كنتيجة للضغط الهيدروستاتيكي الناتج عن ضغط عمود أو كتلة الماء، وقد يحدث نتيجة للجاذبية الأرضية.

وبهذه الطريقة يمكن للأيونات أن تنتقل مع تيار الماء من التربة إلى **جذر النبات**. وتتوقّف كمية المغذيات التي تصل الجذر بهذه الطريقة على معدل جريان الماء، أو على معدّل استهلاك الماء من قبل النبات ومتوسط تركيز (العنصر) المغذي في الماء.

ويمكن أن يرتفع مستوى تركيز بعض العناصر المغذية حول الجذر أو ينخفض أو أنه يبقى كما هو، وهذا يتوقف على التوازن القائم بين معدّل تزويد الجذر بالعنصر المغذي المعني من خلال التدفق الكتلوي ومعدل الامتصاص من قبل النبات.

يؤدّي التدفق الكتلوي دوراً مهماً في حالة العناصر المغذية المتواجدة في محلول التربة بتراكيز عالية، وعندما يكون معدل النتح **عالياً**. فتحت هذه الظروف تنتقل كميات ملموسة من الماء إلى الجذر حاملة معها العناصر المغذية المختلفة. ويمكن أن يتم من وقت إلى آخر تراكم للأيونات حول الجذور كما هو الحال بالنسبة **لأيونات الكالسيوم**.

وفي حالة بعض الأيونات **كالنترات** (NO_3^-) فإن الانتقال يمكن أن يتم بالتدفق الكتلوي أو بالانتشار. ولقد وجد أنّ **الجريان الكتلوي** يشكّل الآلية الأساسية لنقل (NO_3^-) إلى جذور النبات في الظروف الحقلية، وبخاصة في بداية موسم النمو. بينما في المراحل الأخيرة من موسم النمو، وعندما يكون تركيز النترات في محلول التربة منخفضاً فإن **الانتشار** يصبح العملية الأساسية. والجدول التالي(الجدول 3-1) يبيّن الآليات الفيزيائية التي تُمتص من خلالها العناصر المغذية المختلفة.

الجدول(3-1): المساهمة النسبية للآليات الفيزيائية في امتصاص العناصر المغذية

العنصر المغذي	الاعتراض الجذري	التدفق الكتلوي	الانتشار
N	2	98	-
P	3	6	91
K	2	20	78
Ca	28	72	-
Mg	13	87	-
S	5	95	-
B	3	65	32
Cu	70	20	10
Fe	50	10	40
Mn	15	5	80
Mo	5	95	-
Zn	30	30	4

2-2-3 الامتصاص الفعّال Active Absorption

لا تستطيع الآليات السلبية إعطاء تفسير شامل لعملية الامتصاص الأيوني، والدليل على ذلك أنه لو وضعنا جذراً نباتياً في محلول ملحي مخفف، فإن امتصاص الأيونات بالآليات الفيزيائية (التبادل الأيوني والانتشار والجريان الكتلوي) يمكن أن يستمر لدقائق قليلة فقط، ومع ذلك يستمر سحب الأيونات من المحلول بآليات أخرى. ويمكن تقدير الكمية الممتصة وفق هذه الآليات من خلال تقدير الكمية الكلية الممتصة من الأيونات وطرح الجزء الممتص منها بالآليات الفيزيائية.

ولدراسة هذا النوع من الامتصاص بالارتباط مع الزمن نحصل على **علاقة خطية** بين الكمية الممتصة والزمن، وتبدأ هذه العلاقة بعد اشباع الفراغ الحر Free space في الجذر بالأيون المدروس. وبافتراض أنَّ الزمن مساوٍ للصفر، فإن الجزء المحصور بين محور الزمن ومحور الامتصاص في ذلك الوسط يعبّر عن مقدار الامتصاص بالآليات الفيزيائية، أمّا الفرق بين الجزء المحصور بين المحورين والامتصاص الكلّي في أي زمن لاحق، فإنّه يعبّر عن مقدار الامتصاص الحاصل بطرائق وآليات أخرى، يطلق عليها في كثير من الأحيان الطرائق الفعالة أو الامتصاص الفعال Active Absorption نظراً لاختفاء الأيونات الموجبة من الفراغ الحر إلى داخل الخلية كنتيجة **لفعالية الخلية الحية**.

يوجد حالياً اتجاهان رئيسيان لتفسير الانتقال أو الامتصاص الفعال للعناصر الغذائية، يفسّر الاتجاه الأول امتصاص الأيونات من خلال ارتباطها بحامل معين، وهذا ما يعرف بنظرية الحامل Carrier Theory، بينما يعتقد الاتجاه الثاني بأن الامتصاص الأيوني يتم من خلال الضخ الأيوني عبر الغشاء الخلوي بوجود مضخات خاصة بالأيون Ionic pumps

1-2-2-3 - نظرية الحامل The Carrier Theory

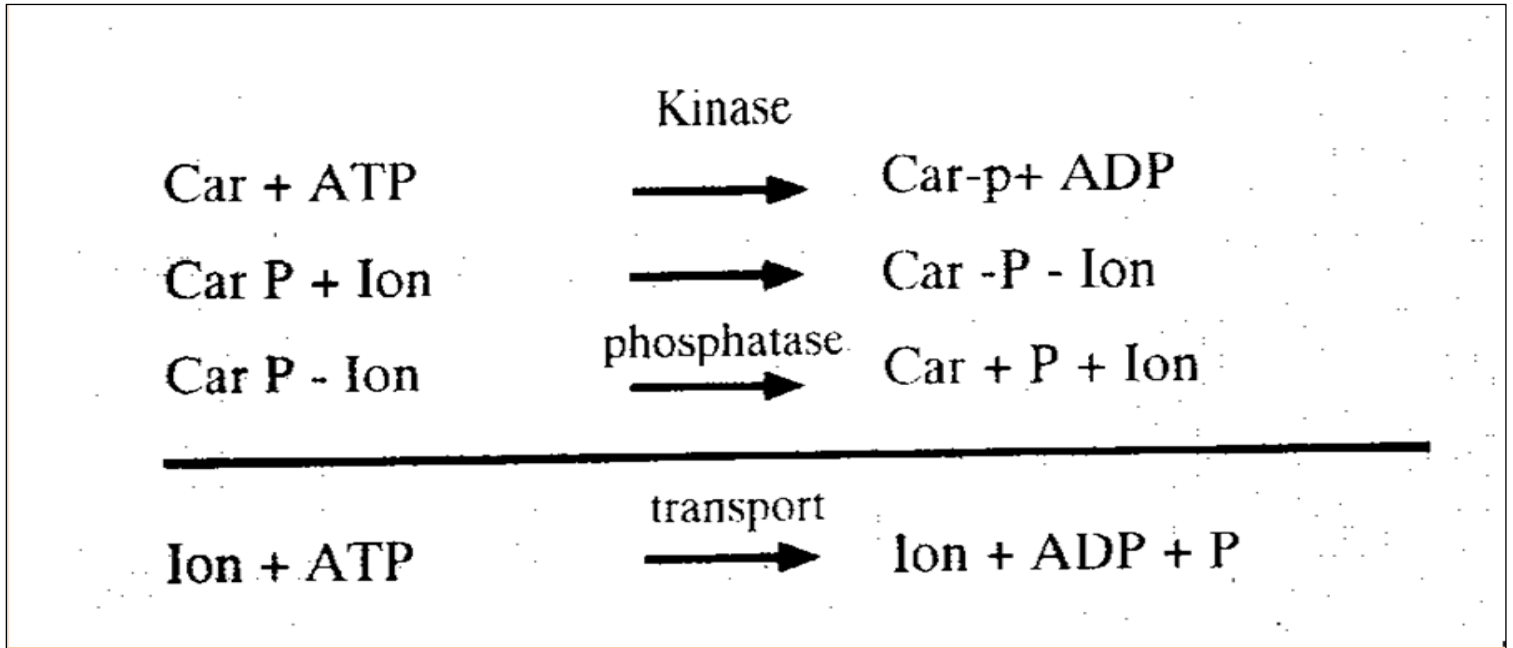
تفترض هذه النظرية بأن **الغشاء الخلوي (Plasmalemma)** يحتوي على جزيء معيّن قادر على نقل الأيونات من خارج الخلية إلى داخلها عبر هذا الغشاء ولقد سمي هذا الجزيء بالحامل (الناقل) Carrier. ويُعتقد بأن الحامل يمتلك موقعاً رابطاً Binding site ترتبط به الأيونات المنقولة، أو أن هذه الأيونات ترتبط بالحامل في ذلك الموقع. كما يُعتقد أيضاً بوجود حامل خاص بكل أيون أو عنصر غذائي، مما يعني أن هناك مواقع ربط خاصة بكل عنصر غذائي. إنَّ تخصّص المواقع الرابطة بربط أيونات معينة دون غيرها، وبالتالي تخصص حامل معين بأيون معين يؤدي إلى تقديم نظرية في تغذية النبات في غاية الأهمية، ألا وهي **نظرية الاختيار Selectivity Theory** التي تعني أنَّ النبات قادر على **اختيار** العناصر الغذائية والتحكم بها، بحيث يسمح بمرور ما يحتاجه **ويمنع** مرور ما لا يحتاجه.

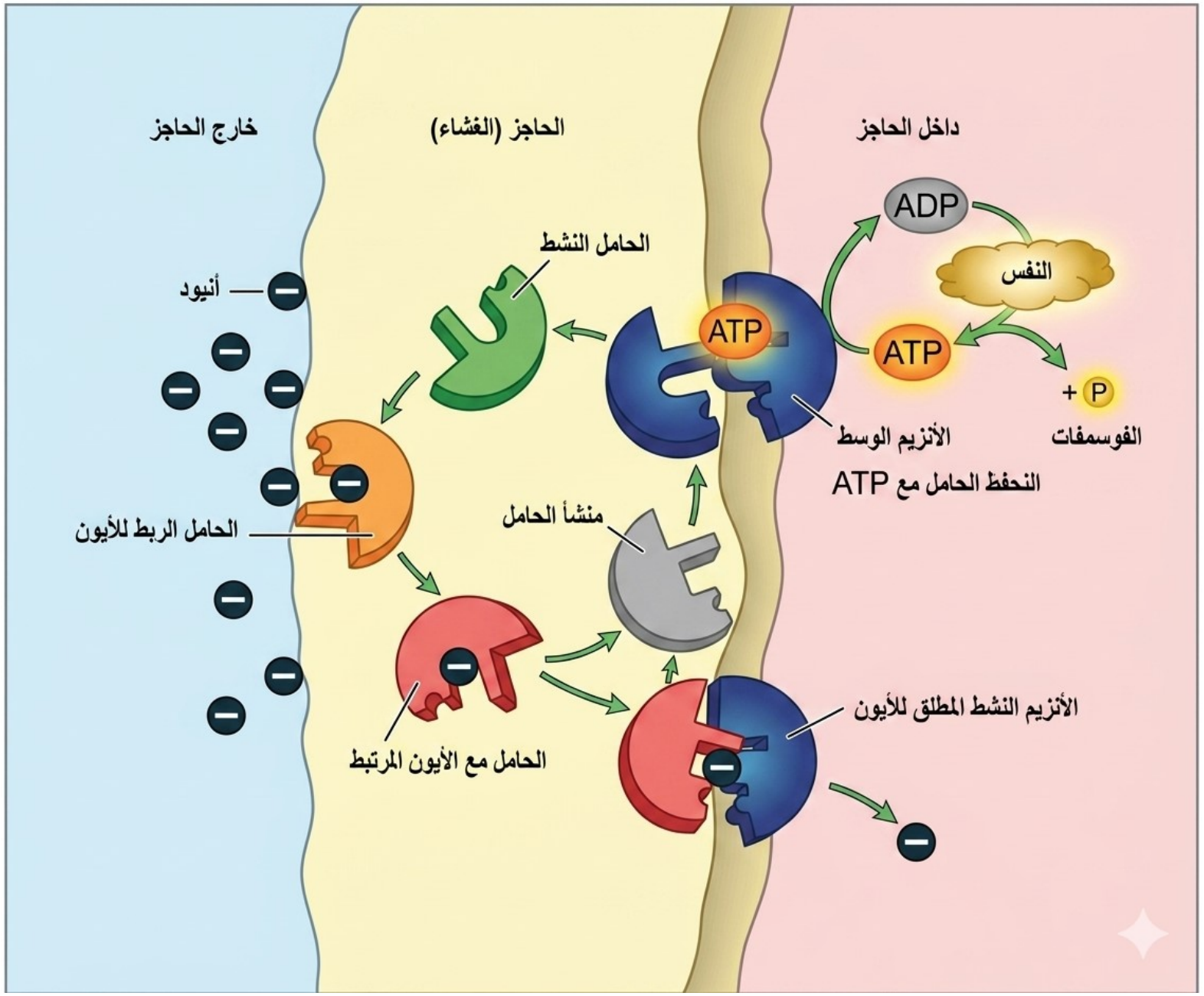
مما لا شكّ فيه أن انتقال العناصر الغذائية بواسطة الحامل يحتاج فيزيولوجياً إلى طاقة (ATP) سواء بطريقة مباشرة أو غير مباشرة. ويبيّن الشكل (3-4) كيفية عمل الحامل، فعند الجدار الخارجي للغشاء الخلوي يكون الجزيء الحامل مشحوناً بالطاقة (حامل نشط Active carrier) ومستعداً للارتباط بأيون محدَّد يتلاءم مع موقعه الرابط.

ثم يرتبط الحامل النشط بالأيون الذي يكون موجوداً في الجانب الخارجي للخلية ليتشكّل معقد حامل نشط -أيون. لا يلبث بعدها أن ينتشر هذا المعقد خلال غشاء الخلية متجهاً نحو الجانب الآخر للغشاء ليلتقي مع أنزيم (Phosphatase) على الجانب الداخلي للغشاء الخلوي، حيث يقوم هذا الأنزيم بفصل مجموعة الفوسفات المعدنية (PO_4^{3-}) من المعقد (حامل نشط – أيون).

وبهذه العملية يُعتقد أن الحامل يفقد إلفته للأيون، أو بتعبير آخر فإن تغيراً ما يطرأ على الموقع الرابط يجعله لا يستطيع الاستمرار في الارتباط بالأيون، مما يؤدي إلى انفصال الأيون إلى داخل الخلية وبهذه الطريقة تتم عملية نقل الأيون من خارج الخلية إلى داخلها.

أما إعادة شحن الحامل بالطاقة، أي إعادة تحويل جزيء (ADP) الفقير بالطاقة إلى جزيء (ATP) الغني بها فيُعتقد أنها تتم بواسطة أنزيم (Phosphokinase) الذي يتواجد على الجانب الداخلي للغشاء، ويعمل على ربط مجموعة فوسفات معدنية مع جزيء (ADP) ليحوله إلى جزيء (ATP) يرتبط بدوره مع الحامل ليشكل الحامل النشط الذي ينتشر في غشاء الخلية متجهاً نحو الجانب الخارجي للغشاء ليعيد الدورة مرة أخرى. ويمكن التعبير عن هذه النظرية على النحو التالي:





الشكل (3-4): نموذج مبسط لنظرية الحامل (عن: ديفلين وويذام، 1985)

3-2-2-2-الضخ الأيوني Ion Pumps

من المعلوم أن نشاط (ATP-ase) مرتبط بالبلازما والكاتيونات. وقد لوحظ وجود علاقة بين (ATP-ase) ومعدل الامتصاص الأيوني. حيث يعمل (ATP –ase) على تحليل جزيء الطاقة ((ATP الذي يوجد في غشاء الخلية إلى أيون سالب (ADP^-) وأيون موجب متفسفر Phosphoryl cation(الشكل 3-5). ويتصف الأيون الأخير بكونه غير مستقر حيث يتفاعل فوراً مع الماء مولداً أيونات الهيدروجين وفق المعادلات التالية:

$$ATP \longrightarrow ADP^- + [O=P(OH)_2]^+$$

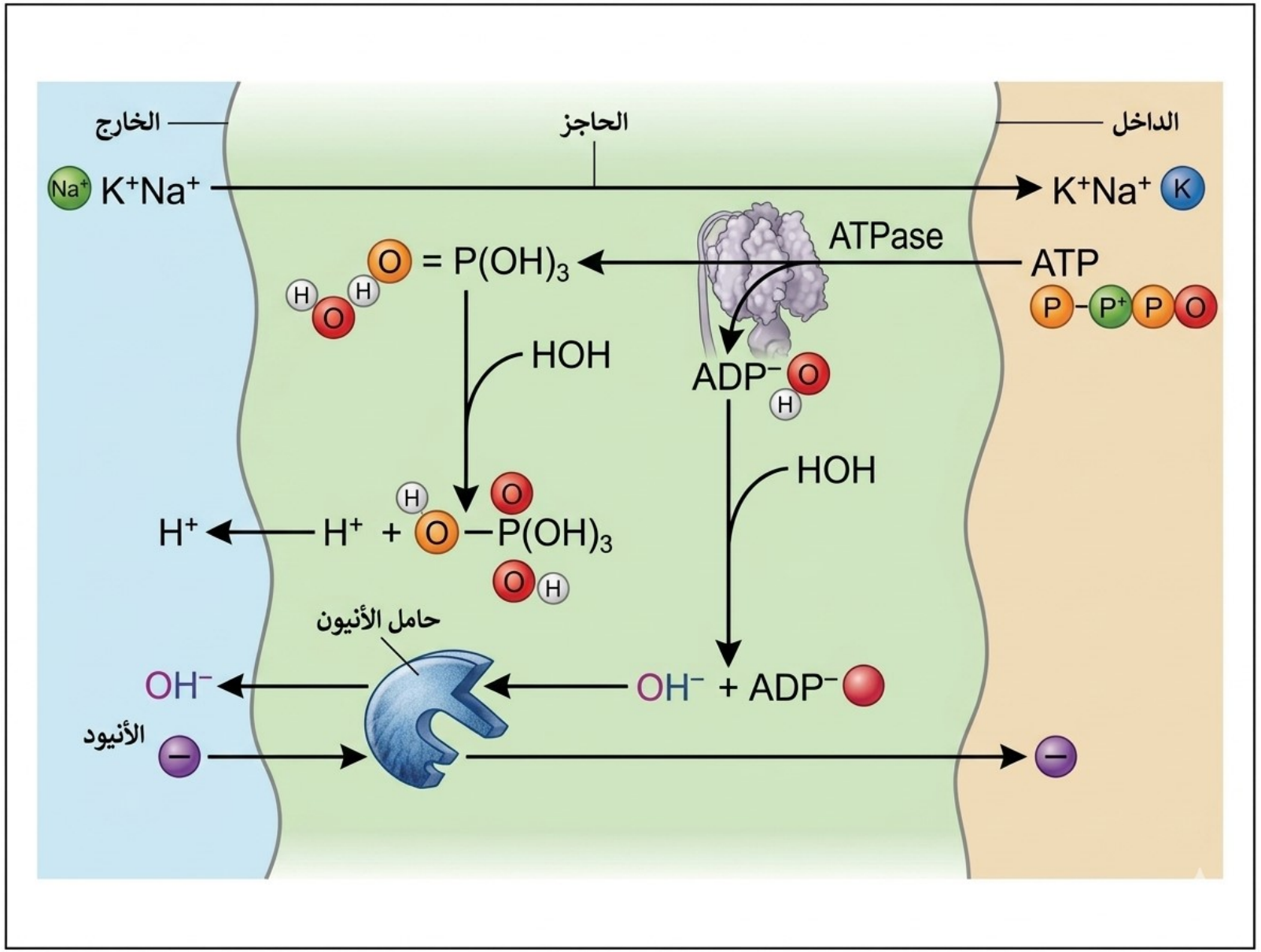
Phosphoryl cation

$$[O=P(OH)_2]^+ + HOH \longrightarrow OP(OH)_3 + H^+$$

$$OP(OH)_3 = H_3PO_4$$

ويُضخ أيون الهيدروجين (H^+) عبر الغشاء إلى خارج الخلية، بينما تبقى كميات متفاوتة من الأيونات السالبة داخل الخلية مسبّبة جهداً كهربائياً سالباً داخل الخلية النباتية مقارنة بالمحيط الخارجي.

وبعبارة أخرى فإن الخلية تحمل شحنات سالبة ناتجة عما أصبح يعرف الآن بمضخة توليد الالكترونات Electrogenic pump، حيث تقوم هذه المضخة بنقل الشحنات، أو بتعبير أدق صافي الشحنات Net charges عبر غشاء الخلية، ومضخة الهيدروجين آنفة الذكر خير مثال على ذلك.



الشكل (3–5): دور جزيء الـ ATP في الامتصاص الأيوني (عن: ديفلين وويذام، 1985)

ومن جهة أخرى يرى Hodges,1973 أن (ADP^-) الناتج عن انفصال (ATP) والمتحرر إلى السيتوبلازم يؤدي إلى زيادة تركيز أيونات الهيدروكسيل (OH^-)في الخلية:

$$ADP^- + HOH \longrightarrow ADP + OH^-$$

ويُعتقد بأن أيونات (OH^-) الناتجة تقوم بجلب حوامل الأيونات، وبذلك يتم تحفيز الامتصاص الأيوني الانتقائي عن طريق التبادل مع شوارد الهيدروكسيل.

يعتقد أن هناك علاقة بين امتصاص الأيون وما يسمى بالتنفس الأنيوني أو التنفس الملحي. حيث لوحظ أنَّ معدل التنفس يزداد عندما يُنقل النبات من الماء إلى محلول ملحي. وقد أطلق على الكمية التي يزداد بها التنفس فوق التنفس العادي (أو تنفس الأساس Ground respiration) تسمية تنفس الملح Salt respiration .

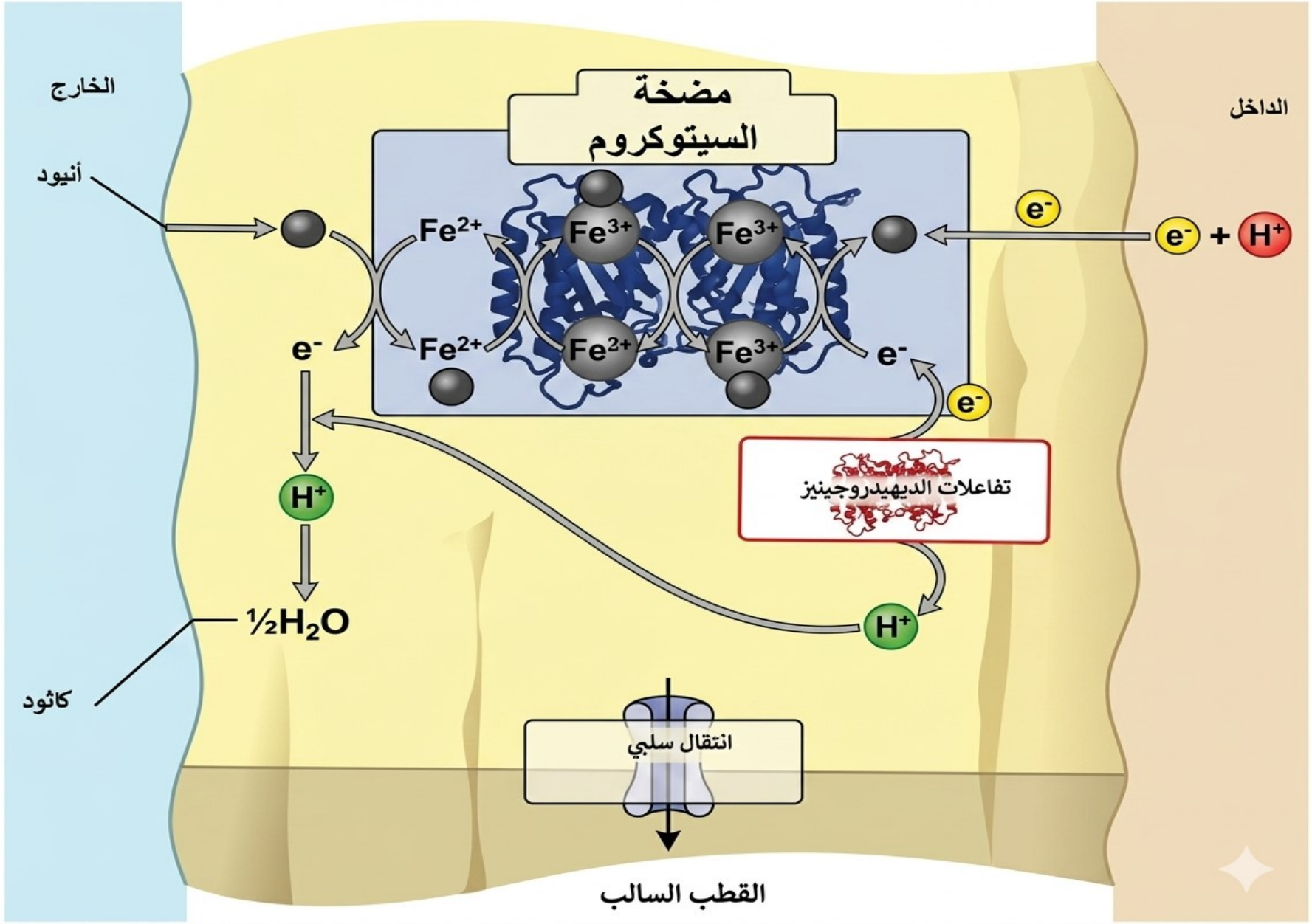
وانطلاقاً من هذه الملاحظات وضع Lundegardh نظريته التي قامت على الافتراضات التالية:

1. امتصاص الأنيون مستقل عن امتصاص الكاتيون ويحدث بآليات مختلفة.
2. ينشأ منحدر في تدرج تركيز الأوكسجين من السطح الخارجي إلى السطح الداخلي للغشاء مما يحفز الأكسدة على السطح الخارجي للغشاء والارجاع عن السطح الداخلي.
3. النقل الفعّال للأنيونات يحدث من خلال النظام السيتوكرومي.

وطبقاً لنظرية **Lundegardh** فإنَّ تفاعلات الـ Dehydrogenase تحصل على السطح الداخلي للغشاء منتجة البروتونات (H^+) والإلكترونات (e^-) (الشكل 3-6). وتتحرك الالكترونات الناتجة نحو الخارج (خارجياً) باتجاه سلسلة السيتوكروم، بينما تتحرك الأنيونات داخلياً، وتتم عند السطح الخارجي للغشاء أكسدة حديد السيتوكروم المرجع (Fe^{2+})ويترافق ذلك بفقده لإلكترون والتقاطه لأنيون. وتتحد الالكترونات المنطلقة مع البروتون والأوكسجين لتشكل الماء. ويحصل عند السطح الداخلي للغشاء إرجاع للحديد المؤكسد (Fe^{3+}) للسيتوكروم بضمه الكتروناً ناتجاً عن تفاعلات Dehydrogenase، بينما ينفرد الأنيون على الجانب الداخلي للغشاء. أما الكاتيونات فتمتص بآلية سلبية لتعادل اختلاف الجهد الكهربائي الناشئ عن تراكم الأنيونات على السطح الداخلي للغشاء.

3-3 الامتصاص الطاقي والامتصاص اللاطاقي:

يتطلب طاقة، وعادة يكون باتجاه منحدر الجهد الكهركيماوي. ويعتقد أن الأيونات في أي محلول تكون عادة تحت تأثير ظاهرتين فيزيائيتين تنتج الظاهرة الأولى **عن منحدر الجهد الكيميائي**، بينما تنتج الأخرى عن منحدر **الجهد الكهربائي** حيث تنتقل الأيونات تلقائيا تبعاً لمنحدر الجهد الكيميائي من المحلول ذي التركيز الأيوني العالي إلى المحلول ذي التركيز الأيوني المنخفض. أما الأيونات المعرضة لمنحدر الجهد الكهربائي فإن الموجبة الشحنة منها تنجذب نحو الجهد الكهربائي السالب، بينما تنجذب السالبة منها نحو الجهد الكهربائي الموجب. وبتوحيد المنحدرين يكون انتقال الأيونات من نقطة إلى أخرى معتمداً على منحدر الجهد الكهركيماوي.



الشكل (3-6): نظرية السيتوكروم لـ Lundegardh(عن: ديفلين وويذام، 1985)

ومن المعلوم أن الخلية الحية تكون مشحونة بشحنات سالبة مقارنة بالمحيط الخارجي وبالتالي فإن أي انتقال للأيونات من خارج الخلية إلى داخلها يجب أن يأخذ بعين الاعتبار ليس فقط الفرق في التركيز بين داخل الخلية وخارجها، بل كذلك منحدر الجهد الكهربائي الذي يتأثر بسيادة الشحنات السالبة داخل الخلية مقارنة بخارجها، ويكون الانتقال من المنطقة ذات الجهد الكهركيميائي العالي إلى المنطقة ذات الجهد الكهركيميائي المنخفض. أما إذا حصل العكس فإن الانتقال يتطلب صرف طاقة وعندئذ يدعى **بالانتقال الطاقي**، ويتوقف الانتقال بمجرد الوصول إلى حالة **توازن كهركيميائي** بين الخلية وخارجها.

وأنَّ تركيز **الأيونات الموجبة** يمكن أن يصل في داخل الخلية عدة أضعاف تركيزها خارج الخلية دون أن يتطلب انتقالها من خارج الخلية إلى داخل الخلية صرف أي مقدار من الطاقة. وعلى الرغم من كون هذا الأمر يبدو مخالفاً للقوانين الفيزيائية التي تنص على أن الأيونات تنتقل من المناطق الأعلى تركيزاً إلى المناطق الأخفض تركيزاً، أي باتجاه المنحدر الكيميائي وليس ضده، ولكن كون الخلية مشحونة عادة بشحنات سالبة مقارنةً بالمحيط الخارجي فإن المنحدر الكهركيميائي وليس المنحدر الكيميائي هو الذي يتحكم بانتقال الأيونات في مثل هذه الحالة.

ولو افترضنا كمثال على ذلك أن تركيز أيون البوتاسيوم داخل الخلية كان أعلى من تركيزه خارج الخلية بمقدار عشر مرات، هذا يقابل فرقاً في الجهد الكهربائي بين جانبي غشاء الخلية يبلغ مقداره (-58 mV)

توضّح المناقشة السابقة حقيقة هامة مفادها، أن الخلية النباتية تكون دائماً مشحونة سلباً لذلك فإن الأيونات السالبة (Anions) غالباً تنتقل **طاقياً**، وأن على النبات أن يوفر الطاقة اللازمة لهذا الانتقال. إن تراكم كل من أنيونات ($H_2PO_4^-, SO_4^{2-}, Cl^-, NO_3^-$) في الخلية يتم ضد المنحدر الكهركيميائي وبالتالي فإن هذا التراكم يتطلب طاقة.

أمّا بالنسبة (Cations) فإن الحالة مختلفة تماماً، فنظراً لكون الخلية النباتية ذات شحنة سالبة عادة فإن انتقال الأيونات الموجبة وتراكمها داخل الخلية يكون غالباً **انتقالاً لاطاقياً**، حيث لا يحتاج النبات لبذل أي جهد من أجل ذلك، ولا يعدو هذا الانتقال كونه ظاهرة فيزيائية بحتة. إن امتصاص كاتيونات (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+) من قبل النبات غالباً يكون امتصاصاً لا طاقياً ولا يتخطى حدود التوازن الفيزيائي، أما بالنسبة لأيون البوتاسيوم فيمكن أن يكون امتصاصه طاقياً أيضاً.

4-3 - جاهزية العناصر المغذية Nutrients Availability

يجب أن تزود النباتات بكمية كافية من العناصر المغذية المختلفة خلال موسم نموها، ولهذا السبب فإنه لابد من المحافظة على تركيز العناصر المغذية في محلول التربة عند مستوى مناسب للنمو النباتي. ومن هنا نجد أن جاهزية Availability العنصر المغذي لا تعتمد فقط على تركيزه في محلول التربة في أي فترة زمنية، بل تعتمد أيضاً على **قدرة التربة على المحافظة على هذا التركيز**. ولاشك أن مقدرة التربة على تنظيم Buffering تركيز العنصر الغذائي في محلول التربة هو العامل الأهم في جاهزية العنصر الغذائي وقابليته لإفادة النبات.

عموماً تكون العناصر المغذية التي تتطلبها النباتات بكميات كبيرة متواجدة في محلول التربة بتراكيز صغيرة نسبياً، وتنطبق هذه الحالة على الفوسفور والبوتاسيوم بشكل خاص. فعلى سبيل المثال يحتوي محلول التربة عادة على (0.5 – 1.0) كغ/هكتار من الفوسفور و(10-30) كغ/هكتار من البوتاسيوم بينما الطلب الكلي على هذين العنصرين هو أكبر من ذلك بكثير، فمحاصيل الحبوب مثلاً تحتاج إلى (20)كغ/هكتار من الفوسفور و(100) كغ/هكتار من البوتاسيوم.

ولما كان نمو محاصيل الحبوب في ظروف التربة آنفة الذكر **لا يترافق** حتماً مع ظهور أعراض نقص عنصري الفوسفور والبوتاسيوم، فإنَّ هذا دليلاً على أن إزاحة هذين العنصرين من محلول التربة بواسطة المحصول النامي لا بد أن يكون مترافقاً مع تعويض مستمر لمحتوى التربة من هذين العنصرين عن طريق تحررهما من الطور الصلب Solid phase للتربة.

ولهذا السبب لا بد من التمييز بين مفهومين أو عاملين مهمين في التربة: الأول هو عامل الكمية Quantity factor (Q)، والثاني هو عامل الشدة Intensity factor (I). ويشير عامل الكمية إلى الكمية من العنصر المغذي الموجودة بحالة جاهزة أو قابلة لإفادة النبات Available، بينما يعِّبر عامل الشدة عن القوة أو الشد الذي تحتفظ بموجبه التربة بالعنصر الغذائي.

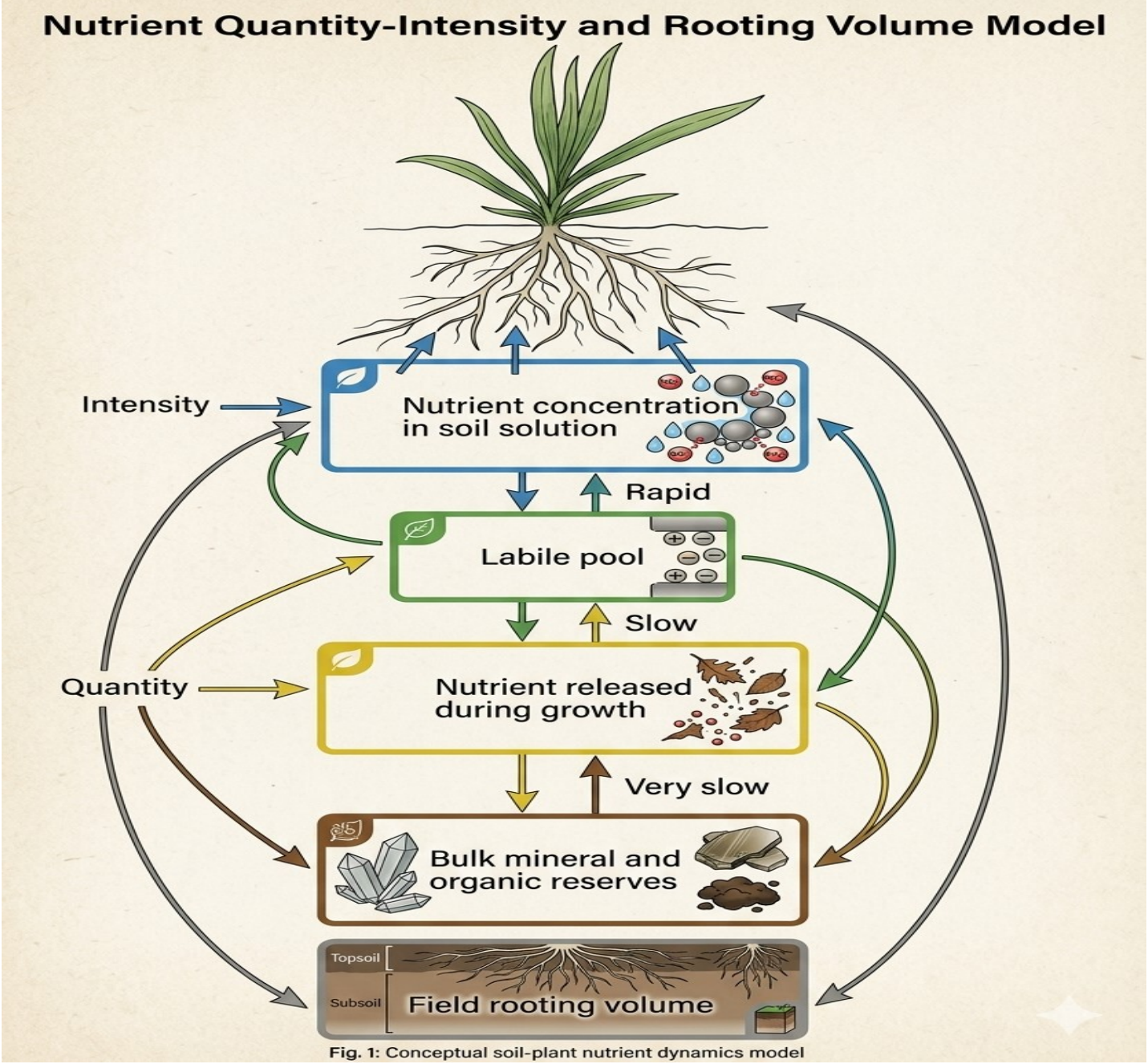
فالكمية الكلية لعنصر مغذٍ ما لا تعد وحدها مؤشراً على جاهزية هذا العنصر ما لم تعرف القوة أو الشدة التي من خلالها تحتفظ التربة بذلك العنصر. وهذا يشبه إلى حد بعيد جاهزية الماء في التربة، فالكمية الكلية للماء في التربة لا تحدد جاهزيته، بل يتم تحديد ذلك من خلال قوة مسك التربة للماء. وهناك تداخل بين عاملي الكمية والشدة كما هو موضّح في الشكل رقم (3-7).

إنّ امتصاص جذور النبات لعنصر مغذٍ ما يعتمد أساساً على شدة هذا العنصر أو تركيزه في محلول التربة والتي يتم تنظيمها بواسطة الجزء المتحرك Labile pool للعنصر موضوع الدراسة الذي يكون عادةً سهل التبادل.
وعموماً يمثل هذا الجزء من العنصر الغذائي المكوّن الأساسي لعامل الكمية، مع الإشارة إلى أن هذه الحالة لا تحدث دائماً إذ أن تحرّر العنصر المغذي من الأشكال البطيئة الجاهزية يمكن - في بعض الأحيان- أن يكون مصدراً هاماً في تجهيز العنصر.
كما أن حصول هذه الحالة لا يعتمد على العنصر المغذي فقط، بل على ظروف وخصائص التربة أيضاً كالـ (pH)، ودرجة الحرارة، ومستوى التهوية والرطوبة... الخ. وبالإضافة إلى ما سبق، يعتمد عامل الكمية أيضاً على حجم التربة الذي يشغله المجموع الجذري للنبات.

5-3 العوامل المؤثرة في امتصاص العناصر المغذية Factors Affecting Nutrients Absorption

يتأثّر امتصاص النبات للعناصر الغذائية بمجموعة كبيرة من العوامل التي يمكن وضعها في مجموعتين رئيستين هما: مجموعة العوامل الداخلية، ومجموعة العوامل الخارجية. فالتباين الملاحظ بين الأنواع النباتية والأصناف فيما يخص امتصاص العناصر المغذية يعود أساساً إلى الاختلاف في التركيب الوراثي، إذ يشكل التركيب الوراثي للنبات أحد أهم العوامل الداخلية المسؤولة عن امتصاص النبات للعناصر المغذية.

وبالإضافة للعوامل الداخلية، يتأثر امتصاص النبات أيضاً بمجموعة من العوامل الخارجية (البيئية) كالحرارة والضوء وغاز ثاني أوكسيد الكربون والـpH وضغط الأوكسجين. **فيما يلي سنستعرض أهم هذه العوامل:**



الشكل (3-7): الشدة والكمية، ومصادر العناصر المغذية

1-5-3 الحرارة Temperature

يزداد امتصاص النبات للعناصر المغذية مع **ارتفاع** درجة الحرارة ضمن الحدود الفيزيولوجية. ويؤدي **ارتفاع** درجة الحرارة عن (40ºم) إلى **انخفاض** ملحوظ في معدل الامتصاص عند معظم الأنواع النباتية، ويعزى هذا الانخفاض إلى تعطيل النشاط الإنزيمي المسؤول عن ذلك، يضاف إلى ذلك أن درجات الحرارة المرتفعة **تزيد** من نفاذية الأغشية الخلوية للأملاح مما يؤدي إلى تسربها إلى خارج النبات.

أمّا انخفاض درجة الحرارة فيؤدي إلى انخفاض وتيرة التفاعلات الحيوية المتعلقة بالامتصاص، كما أنه يعمل على زيادة لزوجة الأغشية الخلوية الأمر الذي يؤدي إلى انخفاض معدل الامتصاص. ويمكن لدرجة حرارة التربة أن تؤثر بشكل غير مباشر في امتصاص العناصر المغذية من خلال تأثيرها في نشاط الكائنات الحية الدقيقة في التربة وفي (pH) التربة كما في ذوبان الأملاح الحاوية على العناصر المغذية.

2-5-3 الضوء Light : يؤثر الضوء في امتصاص العناصر الغذائية بصورة غير مباشرة من خلال تأثيره في مختلف العمليات الفيزيولوجية الجارية في النبات، وعلى رأسها عملية التركيب الضوئي. ولقد لوحظ أن النباتات الخضراء ينخفض معدل امتصاصها للعناصر الغذائية عند وضعها في الظلام، بينما يزداد هذا المعدل عند إعادتها للضوء الطبيعي. فتوفر الضوء يعد أساساً لإنتاج الطاقة التي تؤثر بدورها في عملية الامتصاص.

3-5-3 غاز ثاني أكسيد الكربون CO_2 : يؤدي غاز ثاني أوكسيد الكربون دوراً أساسياً في العمليات الحيوية التي تتم داخل النبات فهو يثبَّت بصورة كيميائية في مركبات عضوية من خلال عملية التركيب الضوئي. ومما لا شك فيه أن كل ما يؤثر إيجاباً في عملية التركيب الضوئي يزيد من معدل امتصاص العناصر المغذية عموماً. بالمقابل لوحظ أن زيادة تركيز غاز ثاني أوكسيد الكربون في وسط النمو يمكن أن يقلل من امتصاص النبات للعناصر المغذية، ربما للتأثير السلبي لزيادة تركيز هذا الغاز في نشاط أنزيم السيتوكروم المؤكسد.

4-5-3 الأوكسجين Oxygen : يعدّ وجود الأوكسجين ضرورياً لتقديم الطاقة اللازمة لعملية الامتصاص الأيوني في النباتات الراقية. فباعتبار أنّ جزيء (ATP) الغني بالطاقة يتولد من خلال عمليتي التنفس والتركيب الضوئي، ونظراً لكون عملية التركيب الضوئي لا تتم في الجذور، فإن المصدر الأكثر أهمية لتوليد الطاقة في الجذور هو التنفس. ومن هنا تبرز أهمية الأوكسجين في الامتصاص الأيوني فلقد لوحظ أن عملية امتصاص النبات للأيونات المختلفة تنخفض بشدة وقد تتوقّف عند حصول نقص شديد في الأوكسجين في المحاليل المغذية، أو عند سيادة الظروف اللاهوائية.

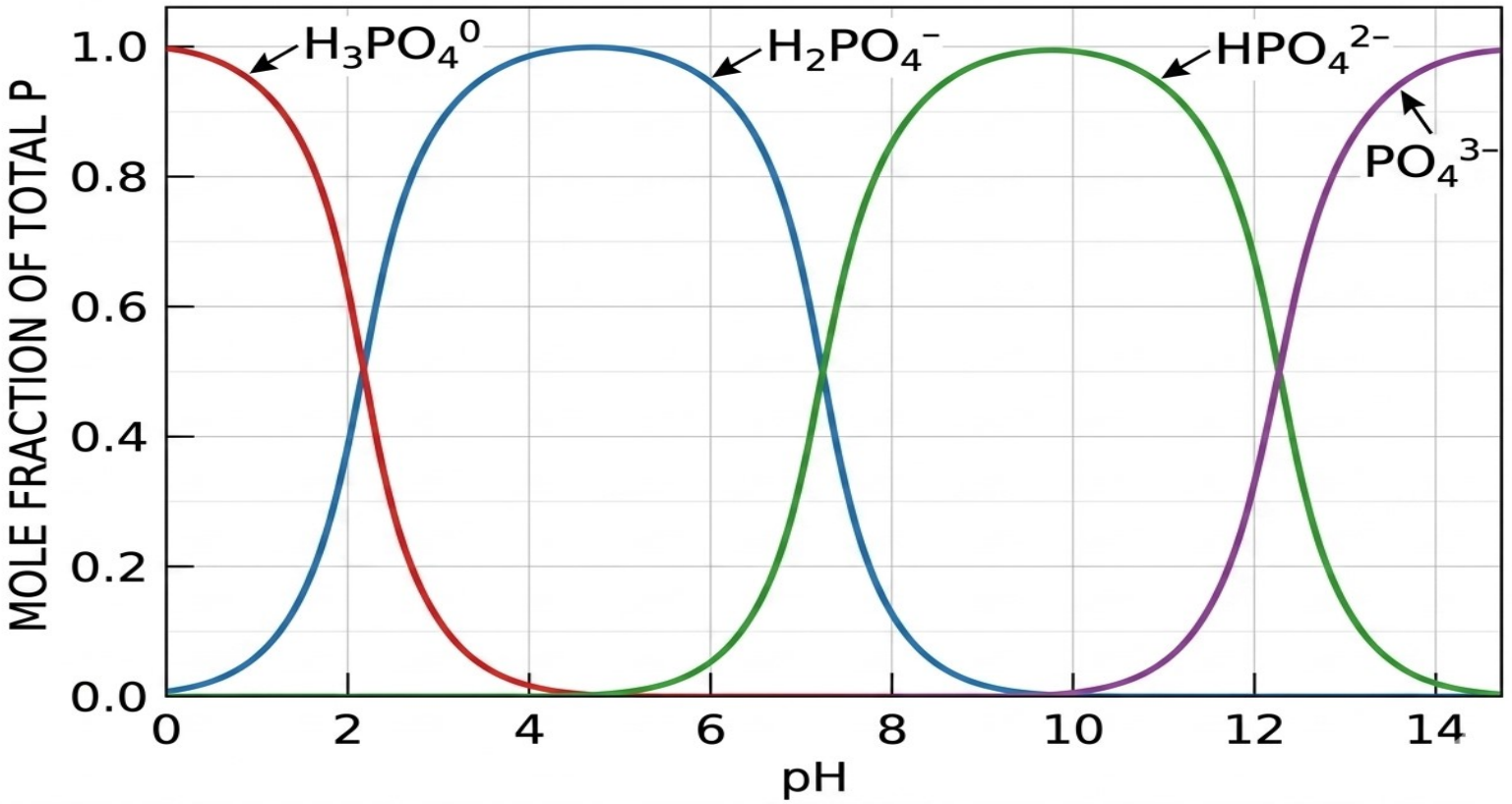
6-5-3 تفاعل التربة (الـ pH) : يمكن لتفاعل التربة أن يؤثر في امتصاص العناصر المغذية بطرائق شتى، إذ يؤثر بشكل **مباشر** في نمو النبات (الجدول 3-2)، كما يؤثّر بشكل **غير مباشر** عبر تأثيره في نشاط الكائنات الحية الدقيقة في التربة. حيث تنمو الفطور بصورة جيدة في الترب الحامضية (pH > 5.5) ويزداد نشاطها في المنطقة المحيطة بالجذور(منطقة الـ Rhizosphere) في مثل هذه الظروف، بينما يكون نمو البكتريا على أشده في الترب المتعادلة والمائلة نحو القلوية.

الجدول (3-2): تفاعل التربة(الـ pH) الأمثل لبعض المحاصيل

pH التربة	المحصول
6.5 <	فصة، شوندر سكري، برسيم الجذري
6.5 – 5.5	ذرة صفراء، قمح، شعير، بازلاء
5.5 – 5.0	بطاطا، تبغ
5.0 >	ترمس

يؤثّر تفاعل التربة في عملية التجوية Weathering التي تكون شديدة في الترب الحامضية مما يؤدي إلى تحرر الكاتيونات (Al^{3+}, Fe^{3+}, Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+}) من الوحدات البنيوية لفلزات الطين.

كما يؤثّر الـ (pH) في قابلية الأملاح المعدنية للذوبان، وبالتالي في جاهزية الأيونات الناتجة عن تفكك هذه الأملاح للنبات إذ تكون أملاح الكربونات والكبريتات والفوسفات على سبيل المثال أكثر قابلية للذوبان في الوسط الحامضي مقارنة بالوسط القلوي. ويؤثّر (pH) الوسط أيضاً في طبيعة الشوارد السائدة، وخير مثال على ذلك شاردة الفوسفات التي يمكن أن تكون متواجدة في الوسط في شكل أو أكثر من الأشكال الأيونية التالية: $H_2PO_4^-$, $H_2PO_4^{2-}$, PO_4^{3-} وذلك تبعاً لـ pH الوسط (الشكل 3-8).

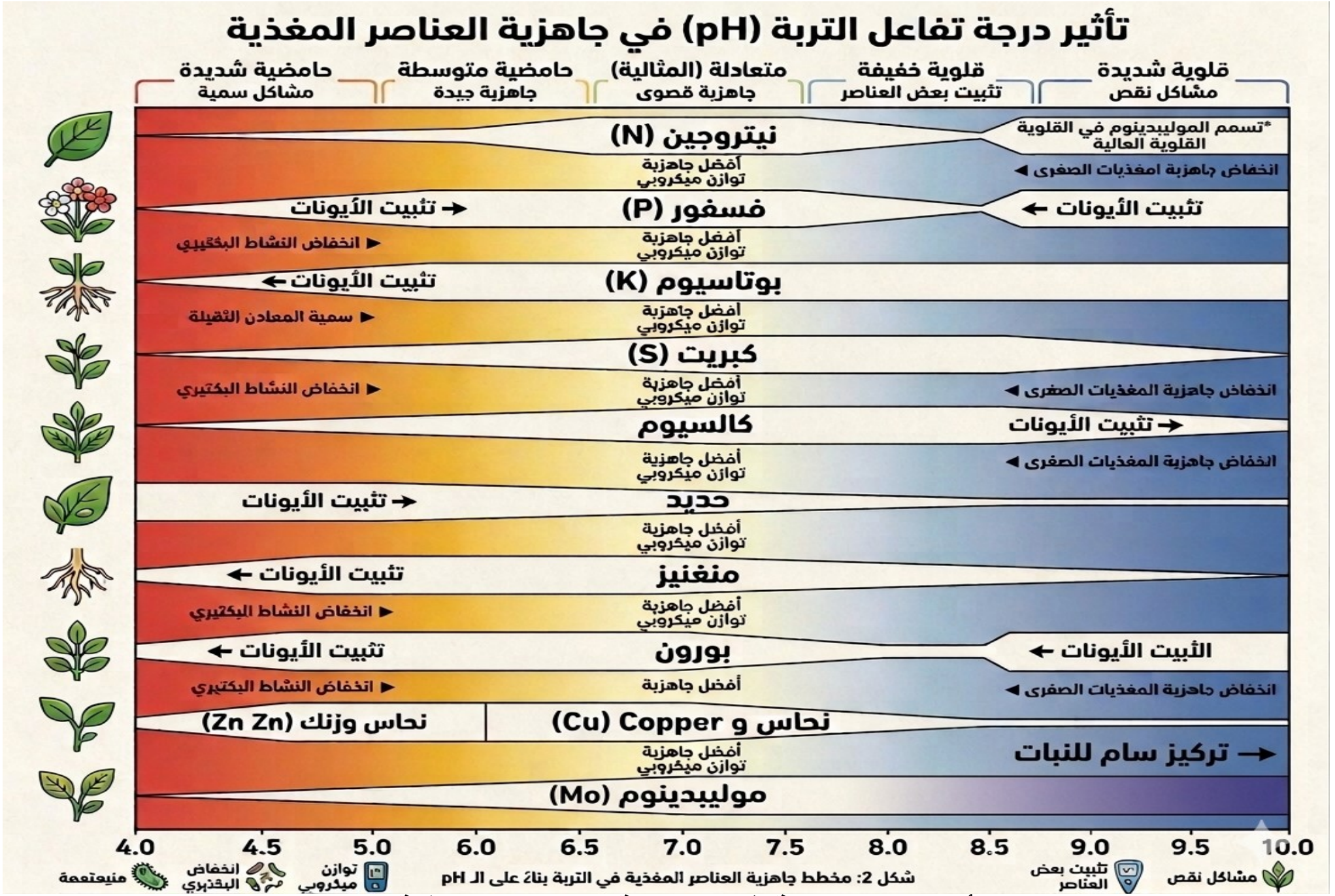


الشكل (3-8): توزع الأنواع الأيونية الفوسفاتية تبعاً للـ pH(عن Tisdale *et al.*, 1993)

ولتفاعل التربة تأثير بالغ الأهمية في امتصاص النبات للعناصر الصغرى من خلال تأثيره في ذوبان المركبات الحاوية على هذه العناصر (الشكل 3-9)، كما يؤثر في ادمصاص هذه العناصر على سطوح غرويات التربة. ويمكن القول إن أملاح جميع العناصر الصغرى باستثناء المولبيدنم يزداد ذوبانها مع انخفاض pH التربة وبالتالي تزداد جاهزيتها للنبات، وعلى العكس من ذلك تزداد انحلالية أملاح المولبيدنم في الوسط القلوي.

ومن جهة أخرى يمكن القول إنّ الأيونات السالبة (Anions) كالنترات والفوسفات تُمتص بكميات أكبر في الوسط المائل للحموضة، بينما يزداد امتصاص الأيونات الموجبة (Cations) في الوسط المتعادل والمائل للقلوية. ويمكن أن يعزى ذلك إلى تأثير المنافسة على مواقع الادمصاص على الجذور بين أيون الهيدروجين والكاتيونات الأخرى من جهة، والمنافسة على الامتصاص بين أنيون الهيدروكسيل والأنيونات الأخرى من جهة ثانية.

إنّ التأثيرات السابقة لتفاعل الوسط يمكن أن تلاحظ ضمن المجال الفيزيولوجي للنبات (pH 4 – 9)، وأن انخفاض pH الوسط عن (4) أو ارتفاعه عن (9) سوف يؤدي إلى **تخريب** الأنسجة النباتية وكذلك الحوامل الأيونية، مما يؤدي في النهاية إلى تثبيط عملية الامتصاص. ومن المؤكد أن الدرجة المثلى لتفاعل التربة **تعتمد** على طبيعة نسيج التربة Texture Soil ومحتواها من المادة العضوية. فالتفاعل المفضّل للترب العضوية هو التفاعل الحامضي، أما الترب المعدنية فتتطلب pH أكثر ارتفاعاً كلما ازداد محتواها من الطين، وذلك إلى حد معين نظراً لتأثر جاهزية العديد من العناصر كالفوسفور والبورون والنحاس والزنك سلباً في الـ pH القلوي.



الشكل (3-9): تأثير pH التربة في جاهزية العناصر المغذية للنبات

7-5-3 الفعل المتبادل Interaction Effect

يتأثّر امتصاص أيون معين بوجود أيونات أخرى في الوسط المغذي، حيث يمكن أن يزداد امتصاص هذا الأيون أو ينقص بتأثير وجود أيون ما أو غيابه. ويُعتقد أن هذه العملية تحصل تحت تأثير مجموعة من العوامل المتداخلة مثل ارتباط الأيون بالعمليات الاستقلابية والشحنة الكهربائية للأيون المرافق ونصف قطره الأيوني وتركيزه...الخ.

يقال إن هناك تضاداً Antagonism بين عنصرين مختلفين عندما **يخفّض** أحدهما امتصاص النبات للعنصر الآخر، وأن هناك تآزراً Synergism بين عنصرين مختلفين عندما **يشجّع** وجود أحدهما امتصاص العنصر الآخر. ويُعتقد أن **التضاد** يحصل بين العناصر المتقاربة كيميائياً، أو التي تُمتص من قبل النبات بآليات متشابهة. فمثلاً يتأثر امتصاص أيون الكلور (Cl^-) سلباً بوجود أيون البروم (Br^-) أو أيون اليود (I^-)، في حين لا يتأثر امتصاص النبات لهذا الأيون عند وجود أيون النترات (NO_3^-) أو الفوسفات ($H_2PO_4^-$). كما يتأثّر امتصاص أيون الفوسفات سلباً بوجود كل من أيونات السلفات (SO_4^{2-}) والسيلينات (SeO_4^{2-}) والزرنيخات (AsO_4^{3-}) نظراً لوجود تنافس بين هذه الأيونات.

ومن ناحية أخرى هناك تضاد بين الكاتيونات القاعدية (Na^+, K^+, Rb^+, Cs^+)، حيث لوحظ انخفاض معدل امتصاص أحدها عند زيادة تركيز كاتيون آخر من هذه المجموعة، الأمر الذي يعزى إلى التنافس على مواقع الربط في الحوامل.

ومن المؤكّد أنَّ امتصاص **الصوديوم** ينخفض كثيراً تحت تأثير **منافسة البوتاسيوم** له، بينما لم يلاحظ تأثير يذكر للصوديوم في امتصاص **البوتاسيوم**. كما أنَّ هناك تضاداً بين الكاتيونات القاعدية الأرضية يشمل كلاً من الكالسيوم (Ca^{2+}) والباريوم (Ba^{2+}) والسترونسيوم (Sr^{2+}) (Epstein and Laggett,1954).

أمَّا عند وجود **الكاتيونات القاعدية الأرضية والكاتيونات القاعدية** معاً في الوسط المغذي فإن هناك ميلاً لزيادة امتصاص **الكاتيونات القاعدية (البوتاسيوم)** بوجود بعض الكالسيوم أو المغنزيوم، **بينما يقلّ امتصاص الكاتيونات القاعدية الأرضية (الكالسيوم والمغنزيوم)** بوجود تراكيز عالية من الكاتيونات القاعدية. فقد وجد Viets أن امتصاص **البوتاسيوم** يتأثّر **بوجود الكالسيوم والمغنزيوم** وبالعديد من الكاتيونات الأخرى متعددة التكافؤ Polyvalent. حيث تبيّن أنَّ **امتصاص البوتاسيوم** -كما البروم- **يزداد** بوجود تراكيز منخفضة من **الكالسيوم، وينخفض** بوجود تراكيز **عالية** من الكالسيوم. ويُعرف هذا التأثير المزدوج للكالسيوم في امتصاص كل من البوتاسيوم والبروم بتأثير فيت Viet's Effect. كما يُعتقد أن امتصاص النبات **للمغنزيوم** يتأثر عكسياً بوجود الكالسيوم.

ويمكن أيضاً أن تحفّز بعض الأيونات كالنترات والفوسفات والسلفات امتصاص أيونات أخرى من خلال تأثيرها في عمليات **الاستقلاب Metabolism**. فلقد تبين أن امتصاص النبات **للنترات** مثلاً ينخفض بشدة عند غياب أيونات **الفوسفات** نظراً لتأثير الأيونات الأخيرة في اصطناع المركبات العضوية التي يدخل النتروجين في تركيبها، كما تبين أن النبات يتوقف عن امتصاص **أيون البوتاسيوم** عند غياب أيون **النترات** أو بعض الأيونات الأخرى الأساسية في العمليات الاستقلابية.

يُعتقد أنّ الفعل المتبادل بين الأيونات يرتبط أساساً بالتخصّص في مواقع الربط على الحوامل. فإذا كان هناك عدد كافٍ من هذه المواقع فمن المحتمل ألا يكون هناك تداخل أو تنافس بين الأيونات، حيث يمكن للأيونات التي تتبادل على المواقع الرابطة في الحوامل أن تُمتص بالسرعة والكفاءة القصوى. كما يكون امتصاص أيون ما سريعاً وبمعزل عن التأثّر بالأيونات الأخرى عندما تكون مواقع الربط لهذا الأيون **عالية التخصّص به**.

وعلى صعيد آخر يمكن أن يكون التضاد بين الأيونات **تضاداً تنافسياً** ينتج في غالب الأحيان عن التنافس بين الأيونات التي لها **آلية الامتصاص نفسها** من قبل النبات، كما يمكن أن يكون التضاد بين **الأيونات وظيفياً** أو **استقلابياً** كما هو الحال بين أيوني الهدروجين (H^+) والكالسيوم (Ca^{2+}). فلقد تبيّن أنّ نفاذية الأغشية الخلوية للمركبات ذات الألفة المائية Hydrophilic تعتمد ولدرجة كبيرة على تركيز كل من (H^+) و(Ca^{2+}) في المحلول المحيط بالخلية (محلول التربة).

فزيادة تركيز أيون الهدرجين في هذا المحلول **يزيد** من نفاذية الغشاء الخلوي، مما ينتج عنه تسرب لمحتويات الخلية إلى خارجها ومن ثم اضطراب الفعاليات الحيوية داخل الخلية الأمر الذي قد يؤدي إلى هلاكها.

لوحظ أنَّ هذا التأثير **لـ (H+)** يمكن إيقافه بإضافة كمية مناسبة من (Ca^{2+})للمحلول المغذي . ويفسّر ذلك بأنّ أيون **الهيدروجين** يعمل على زيادة نفاذية الغشاء الخلوي من خلال توسيع منافذ دخول الأيونات الموجودة على الغشاء، أو أنه يؤثر سلباً في الحوامل التي تقوم بنقل هذه الأيونات نحو الداخل. أما تأثير **الكالسيوم** فيفسّر بأنّ هذا الأيون يقوم **بمعادلة الشحنات السالبة لغشاء الخلية** مما ينعكس إيجابياً على نفاذية الغشاء بحيث تصبح في حدودها المفضلة.

لا بدَّ من الإشارة أخيراً إلى أنَّ سرعة امتصاص أيون ما تتوقف إلى حد بعيد على **شحنة هذا الأيون**، فالشوارد الأحادية أكثر قابلية للامتصاص من الشوارد الثنائية، وهذه أكثر من الثلاثية. كما أن سرعة امتصاص الكاتيونات عموماً **أكبر** من سرعة امتصاص الأنيونات شريطة تحقيق الاتزان الأيوني بين الشحنات الموجبة والسالبة. ومن أجل **الكاتيونات** الأكثر تواجداً في محلول التربة يمكن أن يعبَّر عن سرعة الامتصاص وفق التالي:

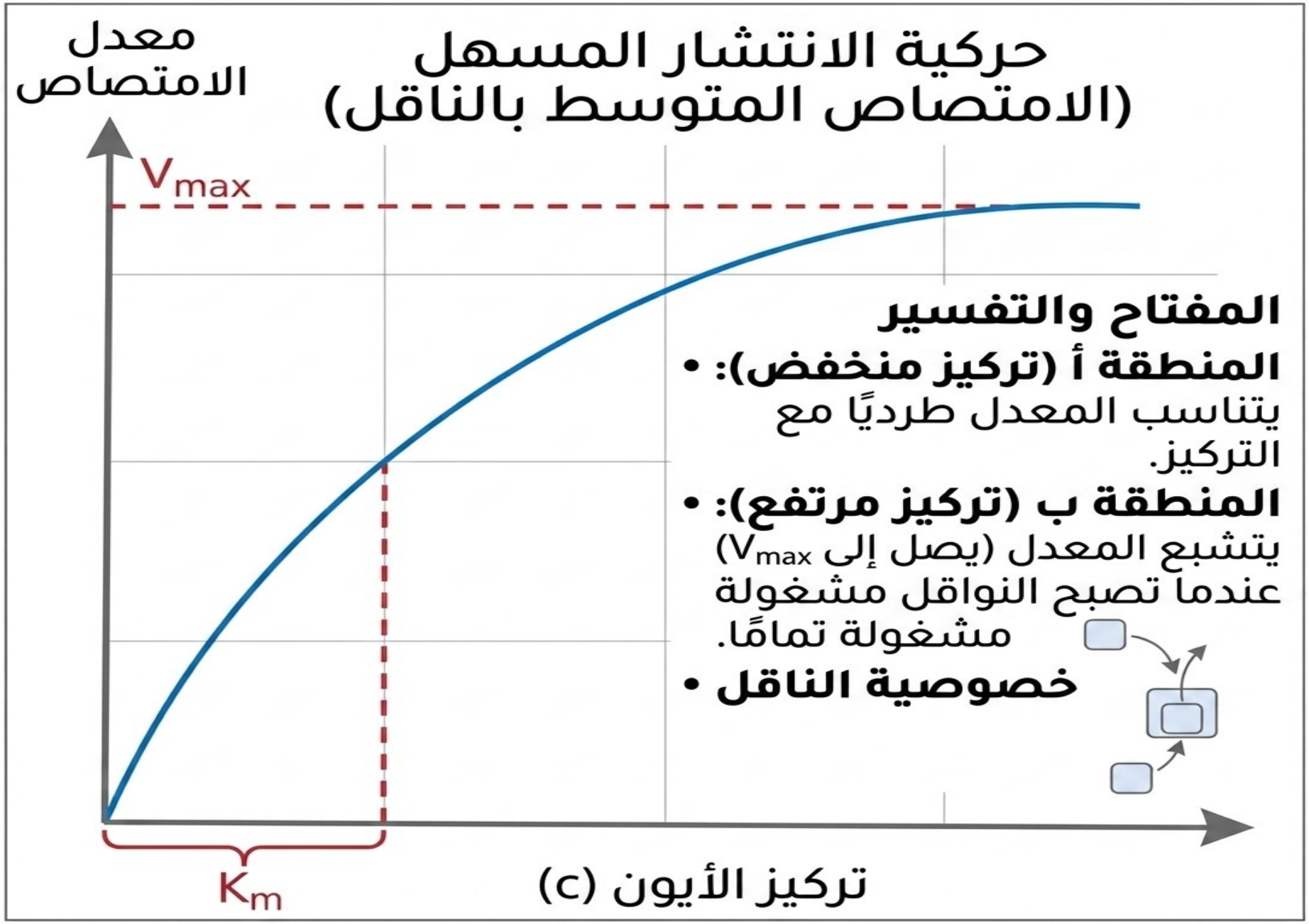
$$NH_4^+ > K^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+} > Na^+$$

أما الأنيونات الأكثر تواجداً في محلول التربة، فيمكن التعبير عن سرعة امتصاصها وفق الآتي:

$$NO_3^- > Cl^- > H_2PO_4^- > SO_4^{2-}$$

8-5-3 التركيز الأيوني Ionic Concentrating

تزداد الكمية الممتصة من أيون ما بزيادة تركيزه في المحلول الخارجي (محلول التربة)، فالعلاقة بين التركيز الأيوني والامتصاص علاقة طردية ولكن إلى حد معين من التركيز. ويمكن القول إن العلاقة بين التركيز الأيوني والامتصاص أشبه بخط منحنٍ منها بخط مستقيم، فالزيادات في التركيز لا تقابلها زيادة متساوية في الامتصاص (الشكل3- 10). ويُعتقد أن زيادة تركيز أيون ما في المحلول الخارجي يؤثر في آلية نقله بواسطة الحامل بصورة مشابهة لتأثير زيادة تركيز المادة المتفاعلة في الوسط، حيث تزداد فرص نقل الأيون على الحامل بصورة كبيرة بزيادة تركيزه. وقد تختلف العلاقة بين التركيز الأيوني والامتصاص باختلاف نوع الأيونات، فامتصاص السلفات والفوسفات مثلاً يكون في المحاليل الممددة لهذه الأيونات متناسباً مع لوغارتيم تركيزها في المحلول، بينما يصبح مستقلاً تماماً عن تركيزها في الوسط في المحاليل المركزة لهذه الأيونات.



الشكل (3-10): معدل امتصاص العنصر المغذي كتابع لتركيزه في المحلول المغذي

9-5-3 عوامل أخرى

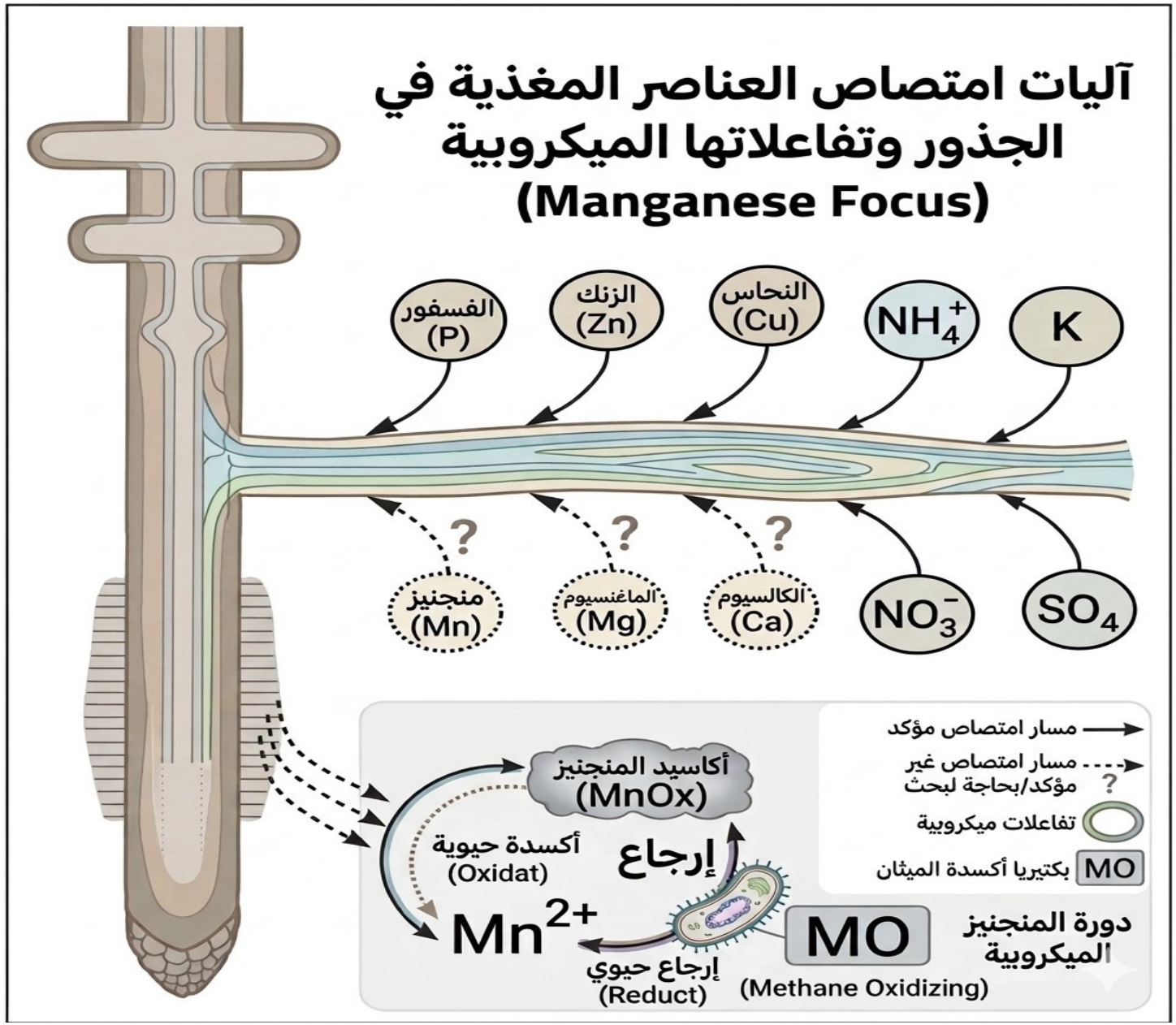
هناك العديد من العوامل الأخرى التي يمكن أن تؤثر في الامتصاص الأيوني. فانخفاض محتوى الخلايا النباتية من **الكربوهيدرات** مثلاً يقلّل من امتصاص الأيونات.

كما تؤثّر السموم Poisons عند وجودها في المحلول المغذي سلباً في امتصاص الأيونات، على الرغم من كون درجة هذا التأثير تختلف من أيون إلى أيون آخر فمركب Dintro phenol مثلاً يخفِّض امتصاص **البوتاسيوم** بمقدار (90%) **والبروم** بمقدار (63%).

ويتأثّر الامتصاص الأيوني **سلباً** أيضاً بزيادة الضغط الحلولي للمحلول المغذي (أو لمحلول التربة) نتيجة احتوائه عندئذ على تركيز عالٍ من الأملاح الذائبة.

مقابل ذلك، يتأثّر الامتصاص الأيوني **إيجابياً** عند احتواء المحلول المغذي على بعض المواد كالفيتامينات والأوكسنيات وغيرها،

وعند وجود علاقة تكافلية بين الجذور و**الميكوريز**Mycorrhizal fungi (الشكل 3-11).



الشكل (3-11): تأثير تعايش الجذور النباتية مع المايكوريزا (VAM fungi) في امتصاص النبات للعناصر المغذية [MO= microorganisms](عن Manthey *et al.*, 1994)

إلى اللقاء في المحاضرة القادمة

المرجع: - عودة وشمشم(2011) : كتاب خصوبة التربة وتغذية النبات- منشورات جامعة حمص.

ملاحظة: تمَّ تطوير بعض الرسوم البيانية بالاستعانة بالذكاء الصنعي .