كلية العلوم

القسم : علم الحياة

السنة : الرابعة

المادة : تغذية ونمو

المحاضرة : السادسة/نظري/د.ريم

{{ مكتبة A to Z }}

Facebook Group : مكتبة A to Z

2026

يمكنكم طلب المحاضرات برسالة نصية (SMS) أو عبر(What's app-Telegram)على الرقم 0931497960

Syrian Arab Republic Ministry of Higher Education and Scientific Research		الجمهورية العربية السورية وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

مقرر التغذية والنمو

(العناصر المعدنية)

آليات تفسير الامتصاص وانتقال الشوارد عبر الغشاء الخلوي

إعداد: د. ريم ابراهيم

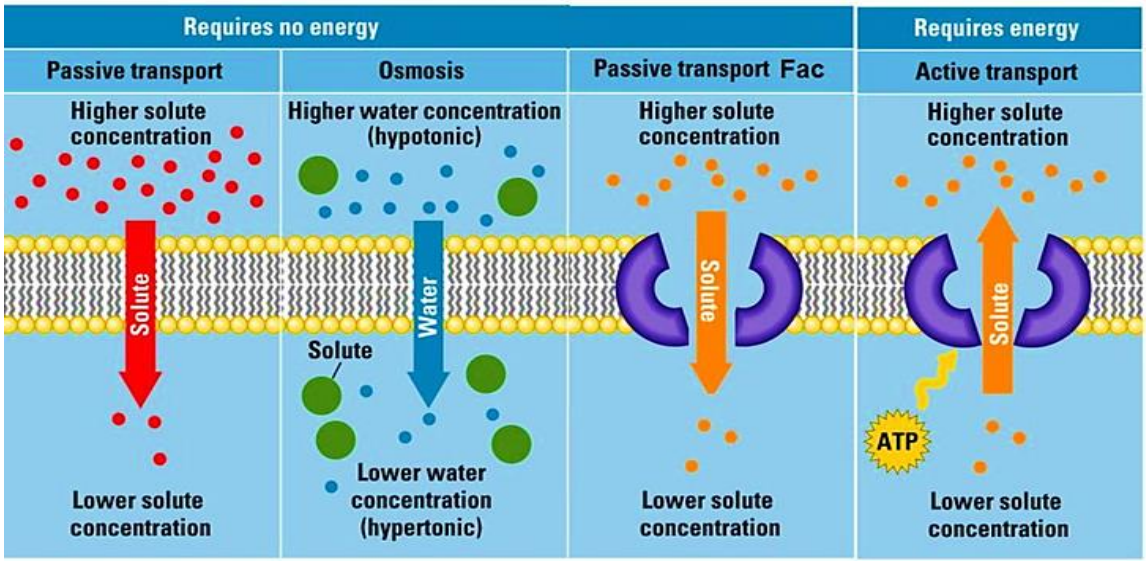
قسم علم الحياة

كلية العلوم

العام الدراسي 2025-2026

الآليات المقترحة لتفسير انتقال الشوارد عبر الأغشية وتجمعها في الخلايا:

امتصاص العناصر المعدنية عن طريق الجذور: يتم ذلك وفقا لممال التركيز من التراكيز المرتفعة إلى التراكيز المنخفضة بما يسمى الامتصاص السلبي Passive Transport أو عكس ممال التركيز بما يسمى بالانتقال الفعال أو النشط Active transport.



الشكل 1: أنماط النقل عبر الغشاء الخلوي.

النظريات المفسِّرة لامتصاص العناصر المعدنية في النبات

آليات الامتصاص ونظرياته

تجري عمليات الامتصاص في النبات بآليات مختلفة تتعلق بعدد من العمليات الحيوية مثل الحلول والانتشار والنقل الفعال، وسنذكر في هذا الجانب بعض الحالات الخاصة التي تؤثر على عملية امتصاص الماء في مختلف أجزاء النبات أيضاً، كما سنتطرق إلى امتصاص الأملاح الذي لا ينفصل عن امتصاص الماء ولكن تحكمه آليات مختلفة كنا قد ذكرنا منها الانتشار، الحلول وتدرج التركيز والتبادل الأيوني الحركي بالإضافة إلى عدد من النظريات التي تفسر هذه الآليات مثل نظرية دونان ونظرية النواقل الفوسفوليبدية ونظرية بينك كلارك وغيرها.

إن عملية دخول الماء عبر الأوبار الماصة ومنه إلى البارانشيم القشري بسبب الفرق في التركيز والناتج عنه فرق الضغط الحلولي بين خلية الجذر والتربة المحيطة بها، يساعد في تفسير عملية الامتصاص ولكنه لا يساعد في شرح بعض الحالات، لذلك لا بد من تفسير عمليات الامتصاص التي تتم في النبات بناءاً على عدد من العوامل المجتمعة ذكرنا منها سابقا الانتشار والنقل الفعال وكذلك حركة الماء الشعري في الأنابيب الدقيقة او ضمن فراغات التربة الشعرية.

وسنذكر في بعض الامثلة اقتراحات العلماء وتفسيرهم لعدد من الظواهر التي تساعد على فهم انتقال الماء والأملاح وعمليات الامتصاص:

1- بقاء الخلايا في حالة انتباج: تبقى الخلايا في حالة انتباج خفيفة بصورة دائمة مما يكسب الخلايا نوعاً من المقاومة للبيئة الخارجية. ويفسر ذلك بأن الضغط الحلولي للعصارة الفجوية يكون أعلى قليلاً من الضغط الحلولي للوسط، وتستطيع الخلايا الحفاظ على هذه الزيادة الطفيفة في ضغطها الحلولي مقاومة بذلك عوامل الوسط.

2- التجميع والارتكام: تستطيع بعض أنواع الخلايا أن تجمع العناصر في عصارتها الفجوية بالرغم من أن تركيز هذه العناصر قد يكون منخفضا في وسطها المحيط ولا يمكن تفسير التجميع هذا بناءاً على خاصية انتشار الأملاح من الوسط المرتفع إلى المنخفض لأنها معاكسة تماما لمفهوم الانتشار السابق الذكر. نذكر مثلا ان بعض الطحالب البحرية تستطيع تجميع عنصر اليود في عصارتها الفجوية بتركيز قد يصل إلى 10^{-3} بالرغم من وجوده في ماء البحر بتركيز 2×10^{-6} ، ومثل هذا المثال قد يفسر لنا تجمع بع العناصر المشعة أو الثقيلة في خلايا النباتات التي تنمو في مناطق ملوثة إما بالعناصر الثقيلة أو المشعة والذي يعزى إلى حالة التجميع والتراكم السابقة الذكر، وتفسر بان النبات يمتص تلك العناصر بصرف طاقة تأتي من العمليات الاستقلابية.

3- الاصطفاء: وتفسر هذه الخاصية امتصاص النباتات لنوع من الشوارد دون غيره مثلا تستطيع بعض النباتات امتصاص شوارد البوتاسيوم بنسبة تفوق امتصاصها شوار الصوديوم بالرغم من توافر النوعين من الشوارد في وسطها المحيط وبتركيز متقارب.

4- سلم سرعات النفوذ: لا تنفذ العناصر إلى الخلايا النباتية بنفس السرعة وإنما تختلف بحسب طبيعة ونوع النبات والخلايا ولذلك وضع العلماء عموما سلما لسرعات نفوذ الشوارد إلى داخل الخلايا النباتية وهو قابل للتغيير، ويكون بالنسبة للشوارد الموجبة كالآتي:

$$Ca^{++} < Mg^{++} < K^{+} < NH4^{+}$$

وأما بالنسبة للشوارد السالبة فهو يرتب كالآتي:

$$PO_4H_2^{-} < SO4^{-2} < CL^{-} < NO3^{-}$$

كما تتأثر عملية امتصاص هذه الشوارد بالنفوذية الاصطفائية للغشاء السيتوبلاسمي بالإضافة إلى حجم الجزيئات وطريقة توضع الجزيئات المحبة للدسم وتلك المحبة للماء أي بالبنية الفسيفسائية للغشاء السيتوبلاسمي.

وكذلك تتأثر بالشحنة الكهربائية لتلك الشوارد.

امتصاص إحدى الشوارد وتأثرها بعوامل الوسط لمحيط:

ندرس على سبيل المثال عملية الامتصاص التي يقوم بها جذر نباتي عندما يوضع في محلول كلور الأمونيوم؛ نجد أن الجذر يمتص شوارد $NH4^{+}$ بسرعة أكبر من شوارد الكلور وتتناقص PH الوسط وذلك لأن امتصاص تلك الشاردة من قبل الجذر سيؤدي إلى خلل في التوازن الشاردي في الوسط الخارجي وبالتالي سيعمل الجذر على طرح شاردة H^{+}

الناتجة عن تحلل حمض الكربون H_2CO3 التنفسي للتعويض عن شوارد $NH4^{+}$ الممتصة. أما إذا كان الملح نترات الـ صوديوم فإن الجذر يمتص $NO3^{-}$ بسرعة اكبر من امتصاص Na^{+} وبالتالي فإن شوارد HCO_3^{-} هي التي ستنطلق في

الوسط وتتحد مع شوارد +H وتزيد من PH الوسط وقد تكون هذه الزيادة نتيجة إطلاق OH^- الناتجة عن إرجاع النترات داخل الجذر النباتي:

$$NO3^- + 8H \longrightarrow NH3 + 2H2O + OH^-$$

بينما درجة الحموضة داخل الفجوات لا تتبدل بسبب وجود جمل صيانة فعالة تحول دون ذلك، وتفيد هذه الدراسات في ا ختيار قيمة PH لدى تحضير المحاليل المغذية المستخدمة في الزراعات المائية أ و النسيجية أو في عمليات التسميد المعدني ة، حيث يتم العمل انطلاقا من قيمة PH مرتفعة عند استخدام أملاح الأمونيو م مصدرا للآزوت أو ننطلق من قيمة PH منخفضة عند استخدام النترات مصدرا للآزوت.

آليات الامتصاص

يتأثر الامتصاص الجذري بانتقال بعض المحاليل الملحية بفعل التيار المائي، وقد تدرج العلماء في شرح ظاهرة الامتصاص الجذري وفقا لعدة مراحل معتمدين على التفسيرات وفقا لظاهر فيزيائية والربط بين الامتصاص وعمليات الاستقلاب الخلوي، و فيمايلي توضيح لهذه الآليات:

اولاً: الآليات الفيزيائية: وتدعى أيضا الآليات السلبية لأنها لا تتطلب تدخل الاستقلاب النباتي، هوي الانتشار وسحب العناصر مع تيار المحلول والحلول الكهربائي وتوازن دونان ومن ثم تبادل الشوارد.

الانتشار : Diffusion

عند وضع جزيئات مادة منحلة داخل محل ما مثل النشاء داخل الماء والتحريك الحراري سيصبح الوسط متجانسا.

في حالة الانتشار البسيط يؤخذ قانون االعالم Fick والذي ينص على ان سرعة الانتشار يجب أن تتناسب مع سلم التركيز

$$dM/dt = -Da.(dc/dx)$$

حيث dM هي كمية المادة الممتصة عبر السطح a خلال الوقت dt أما dc فهي الفرق بين التراكيز الفاصلة بين نقطتين، المسافة بينهما dx(سلم الانتشار). D معامل الانتشار ويقدر سم ^{2}/ثا.

وتدل إشارة الناقص على اتجاه معاكس لتزايد التركيز ، وتتبدل D حسب المادة المنحلة والمادة المحلة ودرجة الحرارة، وفي الدرجة صفر يتوقف الانتشار كلياً.

ويمكن ان توضع قوانين في حال وجود حجرتين حيث التركيز في الحجرة الاولى C1 وفي الحجرة الثانية C2على الشكل الآتي:

$$dM/dt = -ka.(C1 - C2)$$

تتشبه عملية انتقال الغازات والجزيئا ت العضوية غير القابلة للانحلال عبر الغشاء السيتوبلاسمي بعملية الانتشار ولكن الـ جزيئات العضوية تتحرك عبر الطبقة المحبة للماء وكذلك الجزيئات الأليفة للدسم تتحرك عبر طبقة الدسم المضاعفة في الـ غشاء.

توضيح نظرية الانتشار DIFFUSION THEORY:

بالرغم من أن الانتشار ليس عاملاً مهماً في امتصاص الشوارد بين الخلايا، لكنه يحدث بين بعض مناطق الخلايا والوسط المحيط، وتسمى هذه المناطق بالفراغ الحر وه يتمثل الجدار الخلوي والسيتوبلاسما غير المتمايزة، ونميز هذا النوع من الامتصاص عن الامتصاص النشط الذي يحدث في الغشاء الفجوي (غشاء الفجوة النباتية).

عندما يكون التركيز في الوسط خارج الخلية مرتفعا تنتقل الشوارد بالانتشار من الخارج إلى داخل الخلية، وإن أحد أهم الطرق التي تساهم في انتقال الشوارد في هذه الحالة هو الفراغات بين الخلايا .

لفهم آلية انتشار الشوارد في الفراغ الحر للخلايا وكيفية تحديد هذا الفراغ الحر نضع نسيج نباتي في الماء ينتشر قسم من شوارده إلى الماء حتى تصل إلى حالة التوازن لكل نوع من الشوارد ما عدا الشوارد التي تتجمع في الفجوات والعضيات تبقى كما هي، ومن ثم ننقله إلى محلول أملاح ونلاحظ انتقال الشوارد من المحلول ودخولها بسرعة كبيره إلى الفراغ الحر ولا تتجمع في العصارة الفجوية وذلك بفرض ثبطنا عملية التنفس وبالتالي أوقفنا النقل النشط بإيقاف مصدر الطاقة.

و تتغلب الشوارد على صعوبة الانتقال عبر الأغشية الخلوية من خلال القنوات البروتينية الموجودة في الغشاء السيتوبلاسمي .

الفكرة الأساسية نظرية الانتشار Diffusion Theory: تنتقل الأيونات من تركيز عالٍ إلى منخفض عبر الأغشية والشرط الأساسي لحدوث ذلك وجود فرق تركيز واضح و غشاء شبه نفوذ

عيوب هذه النظرية: لا تفسر الامتصاص ضد تدرج التركيزو تأثير الحرارة والمثبطات التنفسية.

سحب العناصر مع تيار الماء:

يمكن أن تسحب الشوارد مع الماء اثناء انتقاله عبر الأوعية الخشبية وحيث أن حركة الماء تعود إلى ظاهرة الحلول لذلك فهي تتأثر بتراكيز الأملاح، وكذلك يزداد امتصاص الأملاح بزيادة التعرق وتركيز الأملاح داخل النبات تزداد نتيجة لذلك، ويمكن للجزيئات الصغيرة فقط أن تتحرك مع هذا التيار بينما الجزيئات الكبيرة لا تجتاز الغشاء.

الحلول الكهربائي:

يقصد بهذه الظاهرة عملية دفع ناتجة عن حركة الجزيئات المشحونة كهربائياً عبر ثقوب الأغشية تحت تأثير حقل كهربائي، إن تحقق هذه الظاهرة ممكن في الأغشية البيولوجية لأنها قادرة على أن تشحن كهربائياً عندما تغطى بطبقة من الشوارد المثبتة بعملية الامتزاز، وتكون مثبتة بشكل جيد، ونتيجة لذلك تتوضع في الوسط شوارد معاكسة في الشحنة ويتحقق ذك على جميع ثقوب الغشاء وعندما يتعرض الغشاء لتيار كهربائي ينزلق الماء والشوارد معه من جهة لأخرى ليتحقق انتقال الشوارد بتأثير تدرج كهربائي. وتشرح هذه ظواهر الفروق الشاريدة على جانبي الغشاء الخلوي للعديد من النباتات او الطحالب المائية.

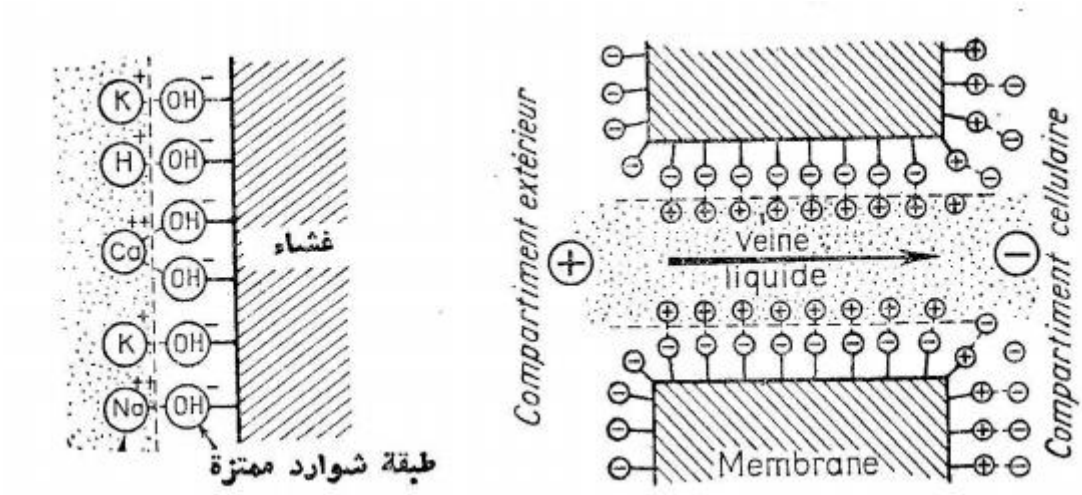
خلاصة: نظرية التبادل الحركي للايونات Contact Exchange theaory: الايونات ليست ثابتة على السطوح بل تتحرك في مجال صغير في مكان تلاصقها على التربة أو الغشاء الخلوي وهذا يسهل تبادلها.

نظرية تغير التراكيز IRON EXCHANGE THEORY: أو ما يسمى **نظرية التبادل الأيوني Ion Exchange Theory:** يحدث الامتصاص نتيجة تبادل الأيونات بين أيونات مثبتة على سطح الجذر و أيونات موجودة في محلول التربة وتتم عملية الامتصاص وفق آلية محددة حيث يقوم الجذر بإفراز H^+ أو OH^- و يتم تبادلها مع الشوارد الموجبة (K^+، Ca^{2+}، Mg^{2+}) أو الشوارد السالبة (NO_3^-، Cl^-)

مثال: إفراز H^+ يؤدي لامتصاص K^+، ويدل على عملية الامتصاص تغير pH محلول التربة قرب الجذور.

عيوب هذه النظرية: تفسر الامتصاص عند السطح ولا تفسر الامتصاص النشط أو النوعية العالية

الايونات الموجودة على الجدار الخلوي لخلايا الوبرة الماصه لها شحنة سالبة، تتبادل مع الشحنات الموجبة المدمصة على سطح دقائق الغضار في التربة، حيث تتواجد شوارد الهدروجين على الغشاء الخلوي لخلية الوبرة الماصه وتتبادل مع شوارد الصوديوم والبوتاسيوم الموجودة على جزيئات الغضار في التربة وبنفس الطريقة يتم تبادل شوارد الهيدروكسيل مع الشوارد السالبة في التربة.



تبادل الشوارد بالحلول الكهربائي

نظرية التبادل الكربوني Carbon Exchange Theaory: يتم تبادل الأوكسجين وثنائي أوكسيد الكربون بين الوبرة والوسط الخارجي بعملية الانتشار، وترتبط CO2 الخارجة مع الماء في التربة وتشكل H2CO3 الذي يتشرد بسرعة ويتحول إلى شاردة البيكربونات $HCO3^-$ وشاردة الهيدروجين H^+، وتتبادل شوارد الهدروجين مع الشوارد الموجبة المدمصة على سطح الغضار ومن ثم ترتبط $HCO3^-$ مع تلك الشوارد الموجبة في التربة وتشكل أملاح البيكربونات التي تدخل إلى داخل خلية الوبرة الماصة عبر قنوات بروتينية.

نظرية دونان Donnan Equilibrium: بعض الشوارد الكبيرة الحجم لا تستطيع عبور الغشاء الخلوي بسبب النفوذية الاصطفائية التي يتمتع بها هذا الغشاء وبالتالي تتجمع في الداخل.

لاحظ العالم دونان أن الشوارد تتجمع على أسس فيزيائي ولذلك سميت النظرية باسمه؛ حيث وجدت شوارد سالبة لا تقبل الانتشار عبر الغشاء وتبقى في الداخل وبالتالي ستخلق تدرجا في الجهد عبر الغشاء وعند التوازن الكهروكيميائي ليس من الضروري أن يتساوى تركيز مثل هذه الشوارد على جانبي الغشاء. اعتمادا على ما سبق نجد أنه عندما توجد شاردة قابلة للانتشار على جانب واحد من الغشاء فإنها تسبب توزع الشوارد الأخرى القابلة للانتشار توزعا غير متساو على جانبي الغشاء وتكون الشوارد الموجبة القابلة للانتشار أكثر تركيزاً على الجانب الذي يحوي الشاردة السالبة غير القابلة للانتشار وبالعكس فإن تركيز الشوارد السالبة القابلة للانتشار أكثر على الجانب الآخر. يفسر توازن دونان تجمع الشوارد في وقت ما إذا كانت من إشارة واحدة .

نظرية الامتصاص النشط Active Absorption Theory

الفكرة الأساسية لهذه النظرية تدور حول أن الامتصاص عملية حيوية تعتمد على الطاقة (ATP) الناتجة عن التنفس الخلوي و الدليل على ذلك تأثر الامتصاص بنقص الأكسجين وانخفاض الحرارة ومثبطات التنفس (مثل KCN) مما يؤدي إلى تراكم الأيونات داخل الخلايا بتركيز أعلى من التربة، وتعد أكثر النظريات قبولًا لتفسير الامتصاص النوعي؛ حيث أن الفجوات ومختلف العضيات المحاطة بغشاء تحتوي على تركيز شوارد أعلى بكثير من الوسط المحيط وبالرغم من ذلك تتحرك بعض أنواع الشوارد إلى داخل الفجوات والعضيات أي عكس منحدر التركيز وتنتقل من التركيز المنخفض إلى التركيز المرتفع، وتحتاج لطاقة أثناء حدوث تأتي هذه الطاقة من عملية التنفس وأحياناً من عملية التركيب الضوئي، وتمر هذه الشوارد عبر قنوات بروتينية تعمل باستهلاك طاقة.

نظرية الجريان أو نظرية التدفق الكتلي Mass Flow Theory :

افترضها العالم MUNCH وتسمى فرضية تدفق الكتل، يسمح تدفق الكتل بانتقال المواد مع نسغ النبات الجاري بسرعة أكبر من سرعة انتشار الماء أو المواد الذائبة، وهناك أيضا تدفق الماء والمواد المنحلة عبر الفراغ الحر ولكن شريط كاسبار في الجذر يمنع جريانها في الفراغ الحر ويجبرها على المرور عبر هيولى هذه الطبقة.

الفكرة الأساسية لهذه النظرية أنّ العناصر تنتقل مع حركة الماء نحو الجذرو ترتبط بالنتح وفرق الجهد المائي وأما العناصر المرتبطة بها Ca^{+2} Mg^{2+} و $NO3^-$ جزئياً. عيوب النظرية: لا تفسر الامتصاص الانتقائي.

نظرية المضخة البروتونية (الكهروكيميائية) Proton Pump / Electrochemical Gradient Theory

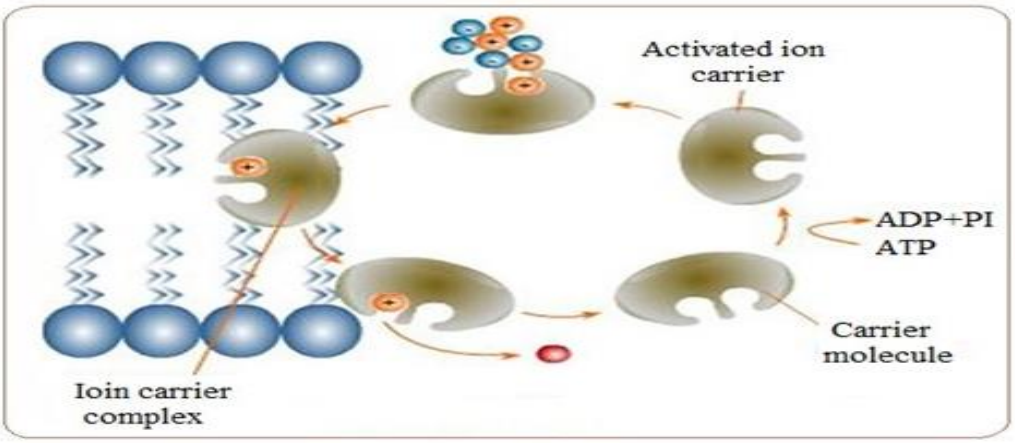
وتمثل هذه النظرية الفكرة الحديثة لمضخة +H-ATPase والتي تولّد فرق جهد كهربائي ناتج عن فرق تركيز بروتونات وتؤدي إلى دخول الشوارد الموجبة كهربائيًا و دخول الشوارد السالبة عبر النقل المشترك (Symport) وتأتي أهمية هذه النظرية من أنها توحِّد بين الامتصاص النشط والانتقائية وتنظيم pH.

يساهم في هذا النمط من النقل انشطار الماء في الداخل إلى شوارد OH^- وشوارد H^+ وكذلك مضخة الـ ATP التي تحول الأدينوزين ثلاثي الفوسفات (ATP) إلى ثنائي فوسفات (ADP) وتضخ بروتوناً H^+ إلى الخارج وهكذا تتجمع شوارد OH^- في الداخل وشوارد H^+ في الخارج. نتيجة لذلك تتبادل شوارد الهيدروكسيل مع الشوارد السالبة بحيث تخرج الهيدروكسيل خارج الخلية ويدخل بدلا منها أنماط من الشوارد السالبة، بينما تدخل الشوارد الموجبة بدلاً من البروتونات عبر مضخة ال ATP وفي كل مرة يتم استهلاك طاقة. ويستمر ذلك حتى تعود حالة التوازن من جديد على جانبي الغشاء وهكذا.

نظرية النواقل Carrier Concept (Carrier Theory) :

تدور الفكرة الأساسية لهذه النظرية حول تواجد بروتينات ناقلة نوعية في الغشاء البلازمي ولفهم آلية العمل نوضح أن ارتباط الأيون بالناقل وانتقال المركب عبر الغشاء يؤدي إلى تحرير الأيون داخل الخلية ومن أهم الخصائص التي توضحها هذه النظرية هو نوعية عالية وتشبع (Saturation) وتنافس بين الأيونات المتشابهة والأهمية أنها تفسر الامتصاص الانتقائي والحركية الإنزيمية (Michaelis-Menten)

تفسير نظرية الحوامل Carrier Concept: تعتمد فكرة الحامل على التقاط بعض جزيئات الغشاء لشوارد على السطح الخارجي وإطلاقها في الداخل.



الشكل 7: آلية عمل جزيئة الحامل في الغشاء الخلوي.

لكل شاردة حامل معين خاص بها أو مركز ارتباط يلائمها (الشكل7)، وهذا يفسر تعارض انتقال بعض الشوارد معاً حيث تتنافس على مكان واحد على الحامل. بينما لا تتنافس بعض الشوارد على هذا النوع من الانتقال لأن لكل منها مركز ارتباط خاص بها مثل الشوارد $SO4^{-2}$ و $NO3^{-1}$ و $PO4^{-3}$، وكذلك إن للشوارد السالبة حامل موجب بينما للشوارد الموجبة حامل سالب. وتتطلب عملية الارتباط بالمركز والانفصال عنه صرف طاقة تأتي من ATP.

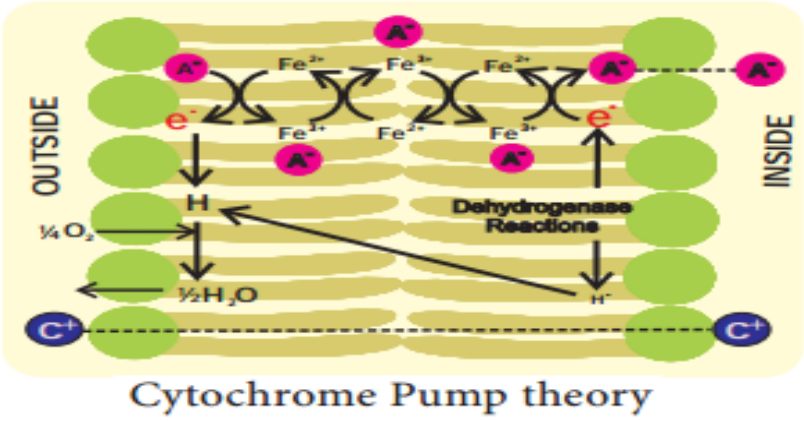
وتوجد ثلاثة أنماط للحوامل تساهم في تفسير النقل الفعال وهي النواقل بروتينية و سيتوكرومات و نوقل فوسفوليبيدية تسمى LECITHIN التي تشكل معقد نقل الأيونات.

برزت عدة نظريات لتفسير طبيعة جزيئة الحامل:

1- النظرية الأولى افترضت أن الحوامل هي أنزيمات وقد اقترح العالم لوندغاند آلية لتفسير انتقال الشوارد بجملة من السيتوكرومات وهي مبنية على أربع فرضيات:

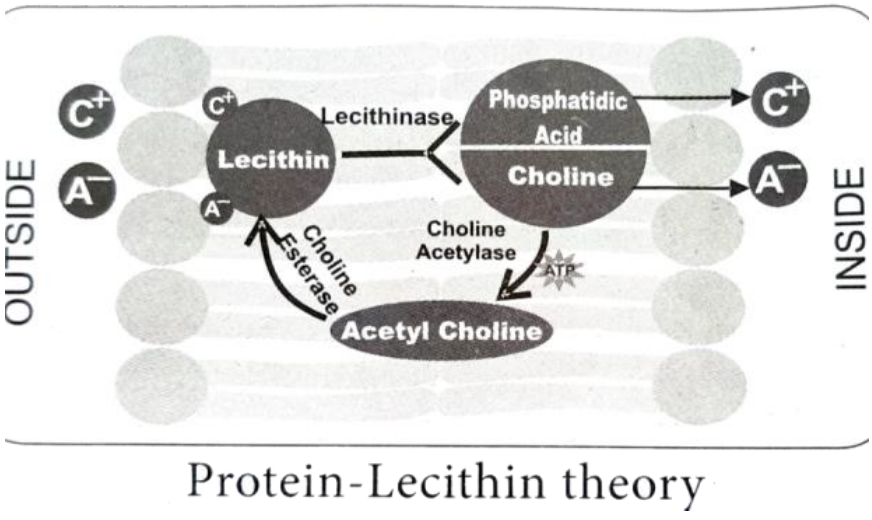
- امتصاص الشوارد السالبة مستقل عن امتصاص الشوارد الموجبة.
- امتصاص الشوارد الموجبة يتم على خطوتين: (امتصاص الشاردة من المحلول الخارجي- إفراز الشاردة من الهيولي إلى الفجوات).
- يتم امتصاص الشوارد السالبة بعكس تدرج التركيز وعكس شحنة الخلية وعكس جهد الامتصاص ويعتمد على جزء من التنفس يسمى تنفس الشوارد السالبة.
- تنفس الشوارد السالبة يختلف عن باقي التنفس الذي يسمى التنفس العام.

السيتوكرومات تمتص الشوارد السالبة لأن مركزها الفعال هو شاردة Fe التي تغير رقم تشاردها من 2 على 3 وبالعكس وتطلق الكترونات. افترض لوغلاند وجود جسور من السيتوكرومات مرتبطة بشكل عرضي عبر السيتوبلاسم من حده الخارجي وهو الغشاء البلاسمي إلى حده الداخلي وهو الغشاء الفجوي. حيث تعمل الشاردة Fe^{+++} الموجودة على السيتوكروم على الحد الخارجي على جذب شاردة سالبة وتخسرها في الداخل وتلتقط الكترون متحولة إلى شاردة Fe^{++}، وهكذا تنتقل موجات الالكترونات من الداخل إلى الخارج وتنتقل الشوارد السالبة عكسها. (الشكل8).



الشكل 8: دور السيتوكرومات في انتقال الشوارد من محيط الخلية إلى الفجوة.

2- النظرية الثانية- نظرية بينك- كلارك : تفترض هذه النظرية وجود تحولات دائرية للكولين واستيل كولين والليستين lecithin وحمض الفوسفاتيديك والتي تشكل جملة حاملة للشوارد الموجبة والسالبة وفيه تمتص الليستين الشوارد وتنقلها كمعقد من خلال الغشاء ومن ثم تتميه. وتتحرر الليستين عندما تتميه ويحتاج تركيب الليستين من جديد استهلاك ATP. تفسر هذه النظرية معظم عملية النقل الفعال للشوارد حيث أن الحامل من الليبيدات الفوسفورية أي من مكونات الغشاء (الشكل9).



الشكل 9: نظرية بينك ـ كلارك وانتقال الشوارد عبر المعقدات المختلفة.

أما شوارد الصوديوم فقد تم تفسير انتقالها وفقا لجملة حاملة تعرف بمضخة الصوديوم التي تعمل على ضخ شوارد الصوديوم للخارج مقابل شوارد البوتاسيوم للداخل، وهذا يفسر التركيز المنخفض لـ +Na في الداخل. إن المحافظة على مستويات منخفضة نسبياً من شوارد الصوديوم في البروتوبلاست هام جداً من ناحية تضاد الشوارد واتزانها وخاصة في النباتات البحرية حيث يمكن الوصول إلى مستوى ملائم من +Na في بروتوبلاسم الخلية بضخ الصوديوم إلى داخل الفجوات.

يمكن للشوارد العضوية السالبة مثل الحموض الأمينية وكذلك السكريات أن تنتقل بواسطة النقل النشط بحوامل خاصة، والسكريات قد تنتقل على شكل معقدات سكريات –بور أو سكريات- فوسفورية. ويفسر كذلك تجمع الأصبغة الانتوسيانية في الفجوات بالنقل النشط للجزيئات العضوية.

تقييم تطور نظرية بينك – كلارك ونظرية السيتوكرومات.

نظرية بينك–كلارك (Bink–Clark Theory) هي من النظريات الكلاسيكية المبكرة التي حاولت تفسير امتصاص الأيونات في النبات قبل تطور مفهوم النواقل البروتينية، وتُذكر غالبًا في سياق التاريخ العلمي لتفسير الامتصاص في فسيولوجيا النبات.

الفكرة الأساسية للنظرية تفترض أن الامتصاص يتم عبر تكوين مركبات غير متأينة بين الأيونات المعدنية ومركبات عضوية داخل الخلية (أحماض أو مواد بروتوبلازمية) هذه المركبات غير المتأينة تستطيع عبور الغشاء البلازمي بسهولة ثم تتفكك داخل الخلية مطلقة الأيون

آلية الامتصاص حسب النظرية

- وجود الأيون في محلول التربة
- دخوله إلى سطح الجذر
- اتحاده مع مادة عضوية داخل البروتوبلازم
- تكوين مركب غير متأين
- عبور المركب للغشاء
- تفكك المركب داخل الخلية
- تحرر الأيون واحتجازه داخل الخلية

الفكرة المحورية: الغشاء لا ينقل الأيون الحر، بل ينقل المركب غير المتأين.

ما الذي حاولت النظرية تفسيره؟ النفاذية العالية لبعض الأيونات وتراكم الأيونات داخل الخلية وتجاوز الغشاء شبه المنفذ.

الأدلة التي استندت إليها: وجود مركبات عضوية داخل الخلية و سهولة نفاذ المركبات غير المشحونة مقارنة بالأيونات وبعض حالات التراكم الأيوني.

التقييم العلمي الحديث: نقاط القوة لهذه النظرية أكدت أن الامتصاص ليس عملية فيزيائية بحتة وإنما الغشاء البلازمي يلعب دورًا فعالًا ولكنها بقيت لا تفسر الانتقائية العالية و التشبع التنافس الأيوني وتأثير المثبطات التنفسية.

النواقل الفوسفوليبيدية Phospholipid Carrier Concept

الفكرة الأساسية للنظرية تؤكد على أن الغشاء البلازمي يتكون أساسًا من طبقتين من الفوسفوليبيدات وقد اقترحت هذه النظرية أن بعض الأيونات المعدنية ترتبط مؤقتًا بالرؤوس القطبية للفوسفوليبيدات ويتحرك مركب (أيون–فوسفوليبيد) عبر الغشاء. ومن ثم يتحرر الأيون داخل السيتوبلازم.

آلية الامتصاص المقترحة ارتباط الكاتيون (مثل K^+ أو Ca^{2+}) بالشحنة السالبة لمجموعة الفوسفات. انتقال المركب عبر الغشاء مع حركة الفوسفوليبيد. تحرر الأيون داخل الخلية نتيجة اختلاف الوسط.

فسّرت هذه النظرية نفاذية الغشاء لبعض الأيونات و الامتصاص الانتقائي النسبي خاصة للأيونات: الذائبة صغيرة الحجم

وقد ساعدت في التأكيد على دور الغشاء البلازمي والانتقال من التفسير الفيزيائي إلى الجزيئي لكنها لا تفسر التشبع و لا تفسر التنافس الأيوني لا تفسر الحساسية للمثبطات التنفسية، و تُعد حالياً نظرية تاريخية تمهيدية أكثر من كونها آلية معتمدة.

جميع النواقل السابقة تعمل باستهلاك الطاقة من جزيئة ATP، ويتم عمل النوع الأخير LECITHIN (الشكل 16) وفقا لمايلي:

1- ترتبط النواقل الفوسفوليبيدية LECITHIN مع الشاردة وتشكل معها معقد خلوي (ناقل – شاردة).
2- يتحرك المعقد عبر الغشاء من الخارج على الداخل.
3- يغير المعقد شكله وتنفصل الشاردة عن الناقل وتتحرر داخل الخلية وتحتاج العملية إلى طاقة تأتي من جزيئة ATP.
4- يعود الناقل من جديد إلى سطح الغشاء الهيولي للوبرة الماصة ليرتبط بشاردة جديد وتتكرر العملية.

نواقل السيتوكرومات Cytochrome Carrier Theory

الفكرة الأساسية افترضت أن: السيتوكرومات (مركبات حاوية للحديد) و الموجودة في أغشية الخلايا الجذرية تلعب دورًا في نقل الأيونات، تعتمد الآلية المقترحة على انتقال الإلكترونات تغير حالة الأكسدة والاختزال ($Fe^{2+} \rightleftharpoons Fe^{3+}$) الأيونات ترتبط مؤقتًا بالسيتوكروم ثم تُنقل عبر الغشاء أثناء دورة الأكسدة والاختزال

دورها في الامتصاص: ساعدت على تفسير ارتباط الامتصاص بالتنفس وتأثر الامتصاص بالأكسجين و امتصاص بعض العناصر الصغرى خاصة الحديد والأدلة التي استندت إليها هذه النظرية هي انخفاض الامتصاص عند تثبيط التنفس ووجود السيتوكرومات في الأغشية

دعمت النظرية فكرة أن الامتصاص عملية حيوية نشطة و لكنها لا تفسر الانتقائية العالية ولا تفسر نقل الأيونات غير المرتبطة بالأكسدة والاختزال

حاليًا: يُنظر إليها كـ تفسير غير مباشر يربط الطاقة بعملية الامتصاص.

الخلاصة العلمية: كانت فكرتا النواقل الفوسفوليبيدية والسيتوكرومات محاولات مبكرة لتفسير الامتصاص على المستوى الغشائي، ومهّدتا لظهور مفهوم النو ع ربطه بالمستوى الخلوي–الجزيئي وبدون الاعتماد على النظريات التاريخية إلا كخلفية.

الإطار التفسيري الحديث لآليات الامتصاص في تغذية النبات

يعتمد المبدأ الأساسي للتفسير الحديث لامتصاص العناصر المعدنية في النبات على وصفه عملية منظمة، انتقائية، نشطة في معظمها، تعتمد على نواقل بروتينية متخصصة، وتُدار بواسطة تدرج كهروكيميائي للبروتونات عبر الغشاء البلازمي لخلايا الجذر.

الدور المركزي للغشاء البلازمي الغشاء البلازمي حاجز انتقائي وليس مجرد غشاء شبه منفذ وهو يحتوي على قنوات أيونية (Ion channels) و نواقل بروتينية (Transporters) **و** مضخات (Pumps).

المضخة البروتونية (H^+-ATPase) – حجر الأساس: الوظيفة ضخ +H من السيتوبلازم إلى الجدار الخلوي باستخدام طاقة ATP **و** النتائج ستكون توليد فرق جهد كهربائي (Membrane potential) وفرق تركيز بروتونات (ΔpH) وكذلك تكوين قوة دافعة بروتونية (Proton motive force) هذه القوة هي المحرّك الرئيسي لكل عمليات الامتصاص.

آليات الامتصاص الحديثة (حسب نوع الأيون)

امتصاص الكاتيونات (K^+، Ca^{2+}، Mg^{2+}، NH_4^+) الآلية عبر: قنوات أيونية (دخول سلبي كهربي) ونواقل نشطة ثانوية.
مثال دخول K^+ مدفوعًا بالجهد السالب داخل الخلية

امتصاص الأنيونات (NO_3^-، SO_4^{2-}، $H_2PO_4^-$) المشكلة الأنيونات تعاكس الشحنة السالبة للغشاء الحل النقل المشترك مع +H (Symport)مثال: NO_3^- / H^+ symporter

أنظمة الامتصاص المزدوجة High- and Low-Affinity Transport Systems

لكل عنصر: نظام عالي الألفة (عند تركيزات منخفضة) نظام منخفض الألفة (عند تركيزات مرتفعة)

 يفسّر: التكيّف مع اختلاف خصوبة التربة الحركية الإنزيمية للامتصاص

التنظيم الجزيئي للامتصاص: تنظيم جيني تعبير جينات النواقل يتغير حسب: توفر العنصر مرحلة النمو تنظيم هرموني الأوكسينات، السيتوكينينات، الإيثيلين تؤثر على: كثافة الشعيرات الجذرية نشاط النواقل

دور الريزوسفير والكائنات الدقيقة تحمض الريزوسفير إفراز +H زيادة ذوبان الفوسفور والحديد المايكورايزا توسيع منطقة الامتصاص زيادة امتصاص P و Zn و Cu

المسارات الداخلية (بعد الدخول) انتقال أبلاستي حتى الإندودرمس عبور إلزامي عبر الغشاء (انتقائية) تحميل الخشب (Xylem loading) النقل مع تيار النتح

خصائص الإطار الحديث الخاصيةالتفسير الحديث الانتقائية نواقل نوعية الطاقة $ATP \rightarrow H^+$ gradient التشبع عدد النواقل التنافس تشارك النواقل التأقلم تنظيم جيني

عاشرًا: صياغة ختامية علمية

الإطار الحديث يفسر امتصاص العناصر المعدنية باعتباره عملية غشائية–جزيئية نشطة، تقودها المضخة البروتونية وتُنفَّذ عبر نواقل بروتينية متخصصة، وتخضع لتنظيم دقيق يربط التربة بالخلية وبحالة النبات الفسيولوجية.

نماط المضخّات الأيونية في خلايا النبات ودورها في الامتصاص

أولًا: تعريف عام المضخّات الأيونية هي بروتينات غشائية تقوم بنقل الأيونات ضد تدرج التركيز والجهد الكهربائي باستخدام الطاقة، وتمثل الأساس لكل عمليات النقل النشط.

ثانيًا: التصنيف الحديث للمضخّات الأيونية في النبات

مضخّة البروتون (H^+-ATPase) Primary Active Transport

الموقع الغشاء البلازمي غشاء الفجوة العصارية (Vacuole) آلية العمل تحلل ATP ضخ +H إلى خارج السيتوبلازم

الدور المركزي توليد: فرق جهد كهربائي (– داخل الخلية)فرق pHتوفير الطاقة للنقل الثانوي تُعد أهم مضخّة في تغذية النبات

2 **مضخّة البروتون الفجوية (V-ATPase)** الموقع غشاء الفجوة العصارية (Tonoplast)الدورخفض pH الفجوةتخزين الأيونات تنظيم الاتزان الأيوني

مهمة للتكيف مع: الملوحة التسمم الأيوني

3 **مضخّة البروتون البيروفوسفاتية (H^+-PPase)**

الموقغشاء الفجوة مصدر الطاقة تحلل PPi (بيروفوسفات) الدور دعم V-ATPaseالحفاظ على الطاقة في الظروفالمحدودة

أكثر نشاطًا في:الخلايا الناميةالإجهاد

مضخّة الكالسيوم (Ca^{2+}-ATPase)

الموقع الغشاء البلازمي غشاء الفجوة الشبكة الإندوبلازمية الدور تنظيم Ca^{2+} السيتوبلازمي الإشارات الخلوية منع السُميّة لا تهدف مباشرة لامتصاص Ca من التربة بل لتنظيمه داخليًا

مضخّة الصوديوم (Na^+/H^+ Antiporter) الموقع Tonoplast أحيانًا الغشاء البلازمي الدور إخراج Na^+ أو عزله في الفجوة مقاومة الملوحة مثال تطبيقي مهم في محاصيل الأراضي الملحية

الخلاصة:

المقارنة بين المضخّات الأيونية توضح أن الامتصاص ليس حدثًا منفردًا، بل جزء من شبكة طاقية وتنظيمية متكاملة تجعل الجذر قادرًا على التكيّف مع ظروف التربة المختلفة. شرح الانتقائية العالية، والتشبّع، والتنافس الأيوني، وتأثير المثبطات التنفسية ليس فقط مهمًا، بل هو الدليل التجريبي الحاسم الذي بُني عليه الإطار الحديث لامتصاص العناصر.