المحاضرة الثانية

الغشاء الخلوي – نقل الشوارد والجزيئات عبر غشاء الخلية

الخلية هي الوحدة الأساسية في الجسم، وكل عضو هو تجمّع لأنسجة مؤلفة من خلايا كثيرة مختلفة متصلة مع بعضها البعض ومثبتة مع بعضها بوساطة بنى داعمة، وكل نمط من الخلايا متخصص لإنجاز عمل أو وظيفة محددة. وعلى سبيل المثال يبلغ العدد الكلي لخلايا الدم الحمراء حوالي 25 تريليون خلية، وعلى الرغم من أن هذا النمط من الخلايا ربما كان الأكثر وفرة إلا أن هناك 75 تريليون خلية أخرى، وبالتالي فإن كامل الجسم يحوي تقريباً 100 تريليون خلية.

الغشاء الخلوي (الهيولي – البلاسمي: السيتوبلاسمي) Cell (Plasma) Membrane

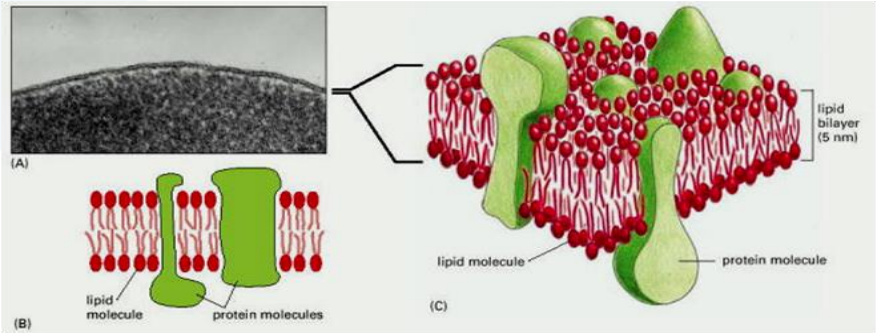
تحاط كل خلية في جسم الإنسان والكائنات الحية الأخرى بغشاء **يشكل حدود الخلية** ويفصلها عن جوارها، يدعى بالغشاء الخلوي أو السيتوبلازمي.

يؤدّي الغشاء الخلوي وظائف عدة، فهو يشكل **حاجزاً حيوياً** يفصل سيتوبلازما الخلية عن المحيط الخارجي، وينظّم عبور مختلف أنواع الأيونات (الشوارد) المعدنية والجزيئات الأخرى (سكريات، أحماض أمينية) من وإلى الخلية لتأمين المتطلبات الغذائية للخلية، ويحافظ على **الاستقطاب الخلوي**، كما يؤمّن **استجابة الخلية** للمؤثرات والإشارات الحيوية (هرمونات، نواقل عصبية)، **وخروج الفضلات** ونواتج الاستقلاب، بما يضمن سلامة الأنسجة والأعضاء.

البنية والتركيب الكيميائي Structure & Chemical Composition

يتألف الغشاء السيتوبلاسمي من الناحية الكيميائية ، من 40 % من وزنه مواد دسمة و 60 % بروتينات، بينما يلاحظ أيضاً في العديد من النسج الحيوانية (كالخلايا الظهارية للحويصل الصفراوي والأمعاء الدقيقة والكلية وبعض الغدد) وجود طبقة محيطة بالغشاء الخلوي تدعى **بالمعطف الخلوي Cell Coat** تتألف بشكل كامل من قليلات وعديدات السكاكر.

وتشير دراسات المجهر الإلكتروني أن الغشاء الخلوي يتألف من طبقات ثلاث؛ **طبقة محورية مضاعفة** بثخانة / 5 / نانومتر تتألف من مواد دسمة ومقسومة إلى وريقتين خارجية وداخلية، تشكلان معاً **الطبقة الليبيدية المضاعفة** Lipid Bilayer، إضافة إلى **طبقتين من مادة بروتينية** ثخانة كل منها نحو 2.5 نانومتر؛ الأولى **خارجية** تحيط بالطبقة الليبيدية من الخارج، والأخرى **داخلية** تحيط بالطبقة الليبيدية من الوجه السيتوبلازمي للغشاء ، وتتميز الطبقتان البروتينيتان بأنهما **غير مستمرتين** وتأخذان مظهراً **فسيفسائياً Mosaic**، الشكل (1).



الشكل (1): صورة بالمجهر الإلكتروني، وشكل تخطيطي، يوضّحان بنية الغشاء الخلوي.

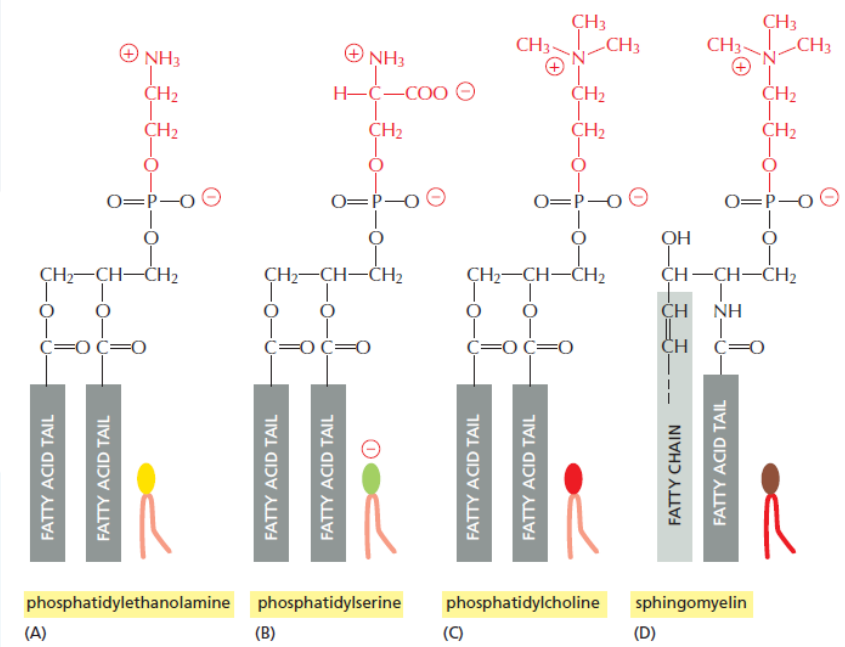
أولاً: الطبقة الشحمية

تنتمي المواد الدسمة أو الشحوم Lipids في الغشاء الخلوي إلى أنواع عدة، وهذه الأنواع هي:

1. الفسفوليبيدات Phospholipids.
2. الكوليسترول Cholesterol.
3. الشحوم المعتدلة Neutral lipids.
4. الشحوم السكرية Glycolipids.
5. السفنغوليبيدات Sphingolipids.

- **الفسفوليبيدات أو الشحوم الفسفورية:** تنتمي معظم المواد الدسمة المتركزة بوفرة في أغشية الخلايا الحية إلى الفسفوليبيدات. تتألف الفسفوليبيدات من **جزيئة غليسرول Glycerol** ترتبط إليها في الموقعين / **1** و **2** / سلسلتان من **الأحماض الدسمة** ، أما الموقع الثالث فيرتبط بزمرة **فوسفات** وغالباً ما يرتبط إلى زمرة الفوسفات أساس عضوي مثل الكولين، أو السيرين، أو الإيتانولأمين.

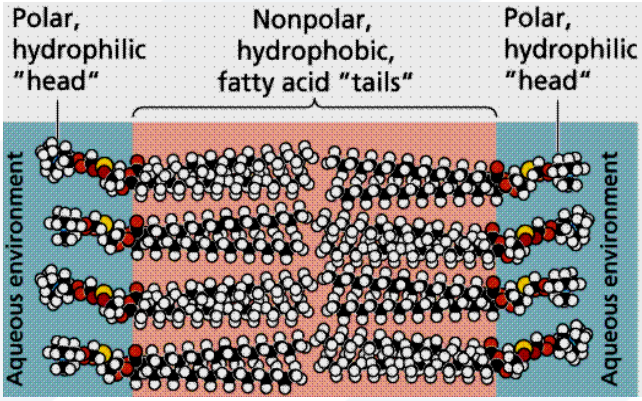
وتسمى هذه الفسفوليبيدات بحسب الأساس الأزوني، مثل : فوسفابتديل كولين Phosphatidylcholine، أو فوسفاتيديل سيرين Phosphatidylserine، أو فوسفاتيديل إيتانول أمين Phosphatidylethanolamine، الشكل (2).



الشكل (2): يوضّح البنية الكيميائية لأنواع الشحوم الفسفورية المختلفة المكوّنة لغشاء الخلية. A) فوسفاتيديل إيتانول أمين، B) فسفاتيديل سيرين، C) فسفاتيديل كولين، D) سفنغوميلين.

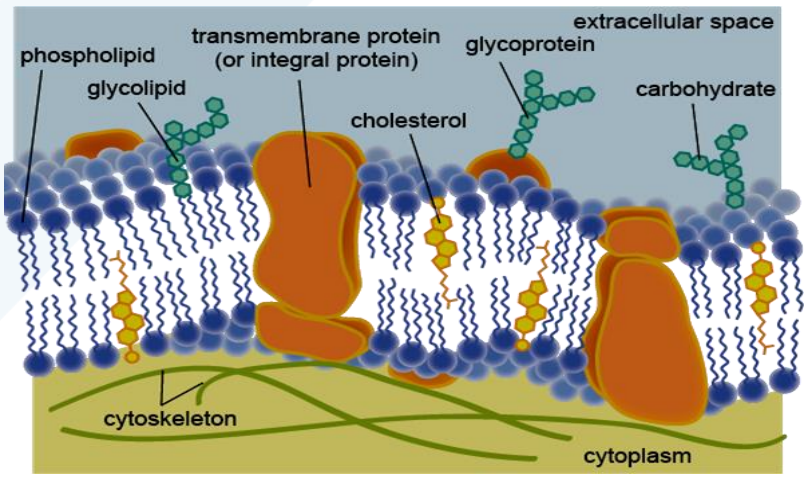
وتعد الفسفوليبيدات في آن معاً مركبات **قطبية** Polar أو **محبة للماء** Hydrophilic، وذلك في الجزء من المركب الذي يحتوي مجموعة **الفوسفات**، ومركبات غير قطبية Nonpolar أو كارهة للماء Hydrophobic، وذلك في الجزء الذي يضم الأحماض الدسمة، الشكل (3).

وعلى اعتبار أن الأوساط المحيطة بالغشاء الخلوي، سواء الوسط داخل الخلوي Intracellular Medium (العصارة الخلوية Cytosol) أم الوسط خارج الخلوي Extracellular Medium هي **أوساط مائية**، فإن الأجزاء **الكارهة للماء** في جزيئات الفسفوليبيد تقترب بعضها من بعض لتتوضع في **مركز الغشاء** تاركة الأجزاء **المحبة للماء** على **تماس** مع الوسطين المائيين المجاورين الداخلي والخارجي. وتتشكل نتيجة لذلك طبقة **ليبيدية مضاعفة** Lipid Bilayers من الفسفوليبيدات الشكل (3). ويمنع هذا الحاجز عملياً مرور المواد المحبة للماء التي تتركز **داخل الخلية** مثل البروتينات، والإنزيمات، والمادة الوراثية، والنكليوتيدات نحو خارج الخلية.



الشكل (3): يبيّن توضع الأجزاء المحبة للماء والكارهة له في الغشاء السيتوبلازمي.

- **الكوليسترول:** تتركز جزيئات الكولسترول بشكلٍ **موازٍ للفسفوليبيد** في الطبقة الليبيدية المضاعفة، وتشكل ما نسبته 9 % من مجموع المواد الدسمة للغشاء الخلوي، وتعطيه نوعاً من **المقاومة والصلابة** الشكل (4). وكلما **انخفضت** نسبة الكولسترول اكتسبت الأغشية الخلوية نسبة **أعلى من المرونة**، وهذا ما نجده في أغشية الشبكة السيتوبلازمية الداخلية، وجميع أغشية العضيات التي يتطلب أداؤها لوظائفها المرونة والليونة. من جهة أخرى، تحتوي **خلايا شوان** Schwann Cells **أعلى** نسبة من الكولسترول مقارنة مع جميع خلايا جسم الإنسان، وهي بذلك تشكل طبقة **عازلة** Insulating Layer حول محاور الخلايا العصبية العصبونات Neurons.



الشكل (4): يظهر جزيئات الكوليسترول المتوضعة بشكل موازٍ للفوسفولبيد في الطبقة اللبيدية المضاعفة.

- **الشحوم المعتدلة (الخاملة) أو الغليسيريدات الثلاثية:** حيث ترتبط **ثلاثة** أحماض دسمة بجزيئة الغليسرول لتعطي جزيئاً **خاملاً** كيميائياً، وتوجد هذه المركبات بكميات قليلة في الغشاء الخلوي.
- **الشحوم السكرية:** هي عبارة عن جزيئات من **الدسم** ترتبط إليها جزيئات سكرية **كالغلوكوز والغالاكتوز** بروابط كيميائية قوية، وتكثر في أغشية العصبونات. وتتركز الشحوم السكرية بكثرة في **الوريقة الخارجية** من الطبقة الليبيدية المضاعفة للغشاء الخلوي، ويعتقد أن لهذه المركبات مع البروتينات السكرية Glycoproteins في الوريقة الخارجية دوراً في **تعرف خلايا الجملة المناعية** على خلايا الجسم نفسه، الشكل (4).
- **السفنغوليبيدات:** تضم في تركيبها مادة السفينغوزين Spingosine ومن أبسط أنواعها مادة **السيراميد** Ceramides التي توجد في كل من الأنسجة النباتية والحيوانية، و**السفينغوميلين** Sphingomyelin الذي يتركز بكثرة في **الأنسجة العصبية** (يتركب منه غمد النخاعين).

ابحث:

ما الفرق بين كل من الغشاء الخلوي Cell membrane، والجدار الخلوي Cell wall، والهيكل الخلوي Cytoskeleton؟

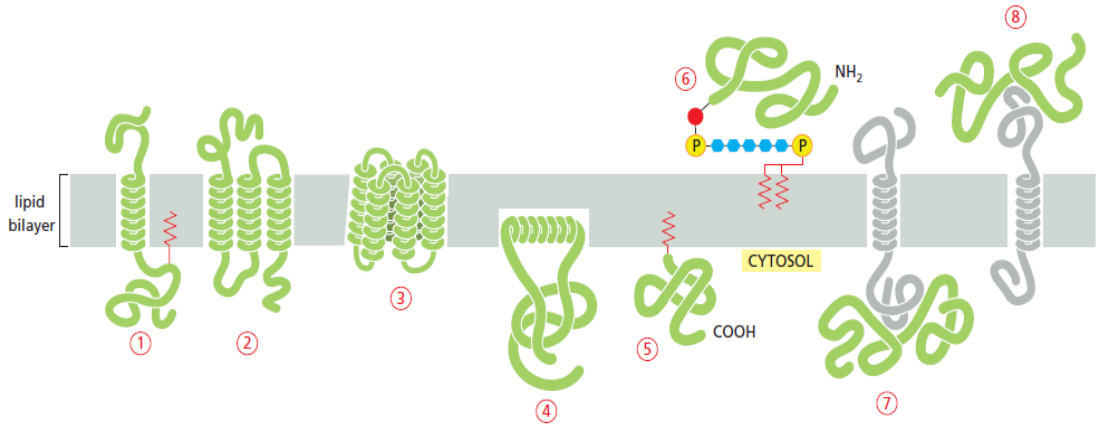
ثانياً: بروتينات الغشاء الخلوي

ترتبط طبيعة وكمية البروتينات التي تدخل في تركيب الغشاء الخلوي Cell Membrane Proteins بوظيفة الخلية، وتتراوح نسبة هذه البروتينات بين 25 % و 75 % من كتلة الغشاء، وهي بصورة عامة **أقل عدداً وأكبر حجماً** من المواد الشحمية، إذ توجد 50 جزيئة دسم مقابل كل بروتين ، إلا أن حجم البروتين أكبر بنحو 30-50 ضعفاً من حجم جزيئة الدسم ويرتبط نحو 70 % من بروتينات الغشاء الخلوي بالدسم الفوسفورية **غير المحبة للماء**. وهنالك عدة أشكال لارتباط البروتينات الغشائية مع الطبقة الثنائية للشحوم الفسفورية يوضّحها الشكل (5):

تعبر معظم البروتينات الغشائية طبقة الشحوم الفسفورية المضاعفة **كحلزون α وحيد** Single α helix **(1)**، أو عدة **حلزونات α (2 و 3)**، أو كبنية صفائحية β sheet ملتفّة. وهنالك بروتينات أخرى تتواجد على جانب واحد من الغشاء. وبعض هذه البروتينات يتثبّت على الوجه السيتوبلازمي للغشاء عن طريق تشكيل روابط **كارهة للماء للـ α helix** مع إحدى طبقتي الغشاء **(4)**، أو عن طريق روابط **تساهمية** مع الحموض الدسمة **(5)**، أو عن طريق الارتباط بجزء أو جسر سكّري مع **الفسفاتيديل إينوزيتول** في الوريقة الخارجية للغشاء **(6)**، وأخيراً، يمكن لبعض البروتينات أن تتثبّت في الغشاء عبر **تآثرها غير التساهمي** مع بروتينات غشائية أخرى **(7 و 8)**.

اضف إلى معلوماتك:

يتوضع الفسفاتيديل إينوزيتول Phosphatidylinositol، وهو أحد الفسفوليبيدات النادرة في الغشاء الخلوي.



الشكل (5): يبيّن الطرق المختلفة التي تتر افق فيها البروتينات مع الغشاء الخلوي.

ويمكن عموماً تقسيم البروتينات الغشائية إلى قسمين رئيسيين:

- **البروتينات المتداخلة (الأساسية) Integral Proteins**

وهي في معظمها بروتينات عابرة للغشاء Trans-membrane proteins وتتألف من جزء **كاره للماء** يتركز في مركز الغشاء الخلوي ويتأثر مع **الذيول** الكاره للماء، وآخر **محب للماء** إما يوجد على تماس مع **الوسط المحيط** بالخلية (السائل خارج الخلوي)، أو على تماس مع **السيتوبلاسما**، الشكل (4، 6).

ومثال هذه البروتينات: المستقبلات الخلوية Cellular Receptors، البروتينات الناقلة (القنوات البروتينية) Channel Proteins، البروتينات الحاملة Carrier Proteins، المضخات الأيونية Ionic Pumps،

تعد هذه البروتينات **أساسية** جداً **لبناء** الغشاء الخلوي ووظيفته.

- **البروتينات المحيطية Peripheral Proteins**

توجد هذه البروتينات **ملتصقة** إما بالوجه **الخارجي**، أو بالوجه **الداخلي** للغشاء الخلوي، وترتبط بمكونات هذا الغشاء بروابط ضعيفة (روابط هيدروجينية)، أو بروابط كيميائية تساهمية قوية، الشكل (6).

معظم هذه البروتينات تلعب دوراً **كأنزيمات**، وهي **غير ضرورية** لثبات **بنية** الغشاء، وإنما هي عبارة عن بروتينات **ملحقة** تساعد الغشاء والخلية على أداء وظائفهما الحيوية.

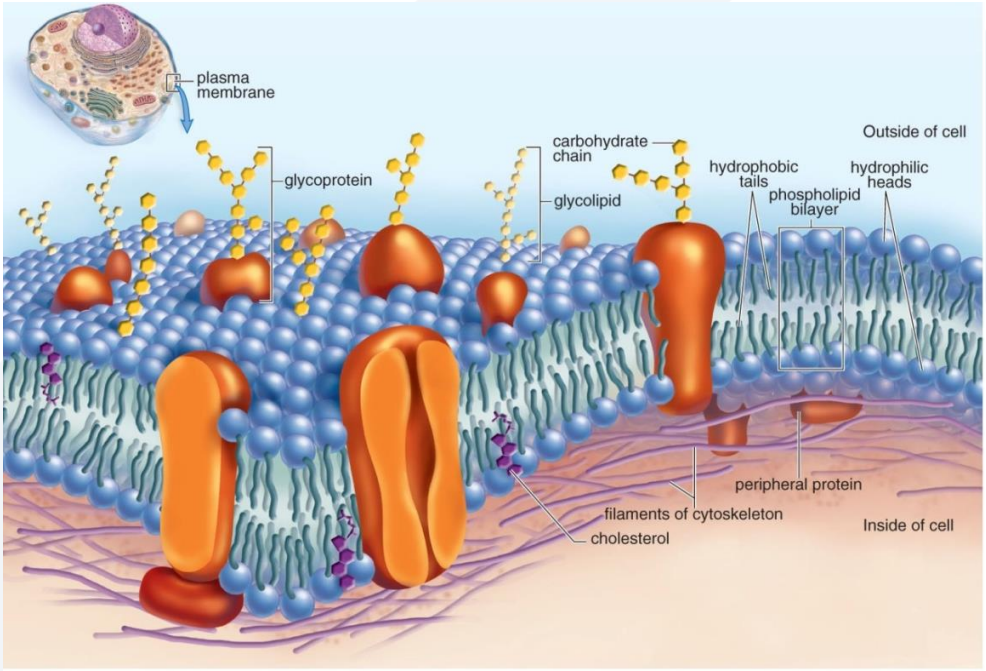
النموذج الفسيفسائي السائل (أو المائع) للغشاء الخلوي Fluid Mosaic Model

اعتماداً على المعطيات السابقة التي أسست لها دراسات المجهر الإلكتروني والدراسات النسيجية والكيميائية الحيوية تم وضع نموذج **الشطيرة Sandwich للغشاء الخلوي**، وفيه تتركز المواد **الدسمة** بشكل طبقة **مضاعفة محورية** تحيط بها **البروتينات** من الأعلى والأسفل بشكل **طبقتين غير مستمرتين**، بالإضافة إلى جزيئات **الكوليسترول** و**قليلات السكاكر** المرتبطة إما بالبروتينات أو بالشحوم.

لكن تبين لاحقاً وجود آليات تبادل وعبور للمواد عبر الغشاء الخلوي لا يفسّرها النموذج السابق. إذ تتمكن الجزيئات والأيونات المعدنية من العبور بحريّة بالانتشار البسيط دون الحاجة إلى الطاقة. ولتفسير ذلك، تم اقتراح وجود **قنوات** أو **ثقوب** في الغشاء، بالإضافة إلى اكتشاف أن **ليبيدات** الغشاء **سائلة** وليست صلبة. كما أكدت دراسات الفلورة المناعية والنظائر المشعة أن **البروتينات تتحرك** بسهولة من منطقة إلى أخرى ضمن الغشاء الخلوي. وقد حدّت مجمل هذه

الملاحظات **بالباحثين J. Singer و G. Nicolson عام 1972** لاقتراح البنية الفسيفسائية السائلة للغشاء الخلوي، الشكل (6).

وفي الواقع، يعتمد النموذج الفسيفسائي السائل بشكل رئيس على توضع جزيئات البروتينات بشكل فسيفسائي ضمن الطبقة الثنائية (المضاعفة) من الفسفوليبيدات وعلى حركة المكونات الغشائية، التي أثبتتها العديد جداً من التجارب المخبرية، وتضم حركة المكونات الشحمية إضافة إلى حركة البروتينات الغشائية.



الشكل (6): نموذج البنية الفسيفسائية Mosaic Model للغشاء السيتوبلاسمي.

إن الوظيفة الرئيسية للغشاء الخلوي هي تنظيم عبور الأيونات والجزيئات المنحلة وغير المنحلة من وإلى داخل الخلية، بحيث يؤمن للخلية حمايتها من التبدلات القائمة في محيطها، وفي نفس الوقت يؤمن كل مستلزمات العمليات الاستقلابية داخل الخلوية كما يطرح الفضلات الناتجة عن تلك العمليات التي قد تكون سامة إذا ما تراكمت داخل الخلية.

نقل الشوارد والجزيئات عبر غشاء الخلية

الانتشار – النقل الفعّال

تكون كافة الشوارد والجزيئات في سوائل الجسم بما فيها جزيئات الماء والمواد المنحلة أو المذابة Dissolved substances في **حركة مستمرة**، وتتعلق هذه الحركة بدرجة الحرارة، فكلما ازدادت درجة الحرارة ازدادت الحركة، ولا تتوقف هذه الحركة في أي ظرف كان باستثناء **درجة الصفر المطلق**.

يتم النقل عبر غشاء الخلية سواء المباشر عبر الطبقة الدسمة المزدوجة أو الذي يحدث عبر البروتينات بواحدة من الآليتين الأساسيتين الآتيتين: **الانتشار** Diffusion (ويدعى أيضاً النقل المنفعل Passive transport) أو **النقل الفعّال** Active transport.

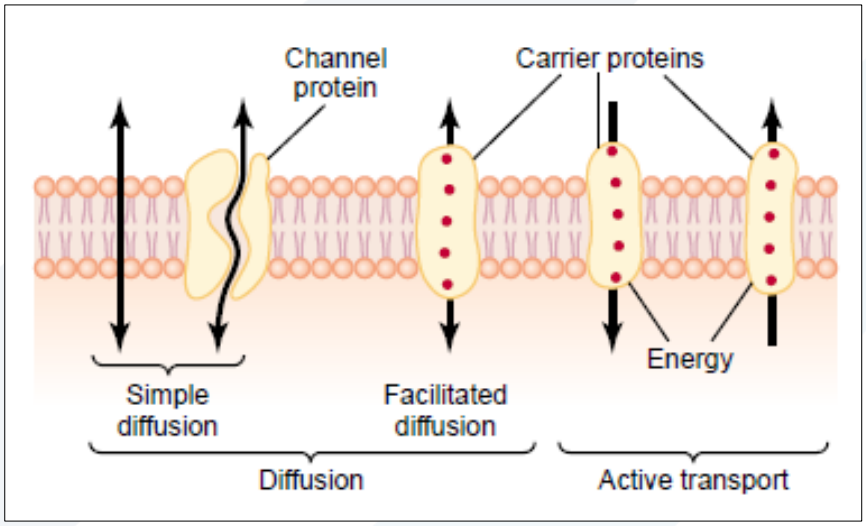
يقسم **الانتشار** عبر غشاء الخلية إلى نمطين:

الانتشار البسيط Simple diffusion، و**الانتشار الميسّر** Facilitated diffusion.

أولاً: الانتشار البسيط

يقصد به الحركة النشطة للجزيئات والشوارد عبر فتحات الغشاء أو الأفضية (الفراغات) بين الجزيئية Intermolecular spaces دون الحاجة للارتباط بالبروتينات الحاملة في الغشاء، وتتعلق **سرعة الانتشار** بكمية أو تركيز المادة، وسرعة الحركة Kinetic motion، وعدد الفتحات في الغشاء والتي يمكن للجزيئات أو الشوارد أن تمر عبرها.

يمكن للانتشار البسيط أن يحدث بطريقتين: إما عبر **الأفضية** الموجودة في الطبقة الدسمة المزدوجة، أو عبر **القنوات المائية** في بعض البروتينات الناقلة، الشكل (7).



الشكل (7): مسالك النقل عبر غشاء الخلية.

أجريت **دراسة تجريبية** تم خلالها فصل دسم الخلية عن البروتينات ثم إعادة تركيبها من جديد وتشكيل **أغلفة صنعية** تتألف من طبقة دسمة مضاعفة فقط بدون أي بروتينات ناقلة، وتم باستخدام مثل هذا الغشاء الصنعي تحديد **خصائص هذه الطبقة**:

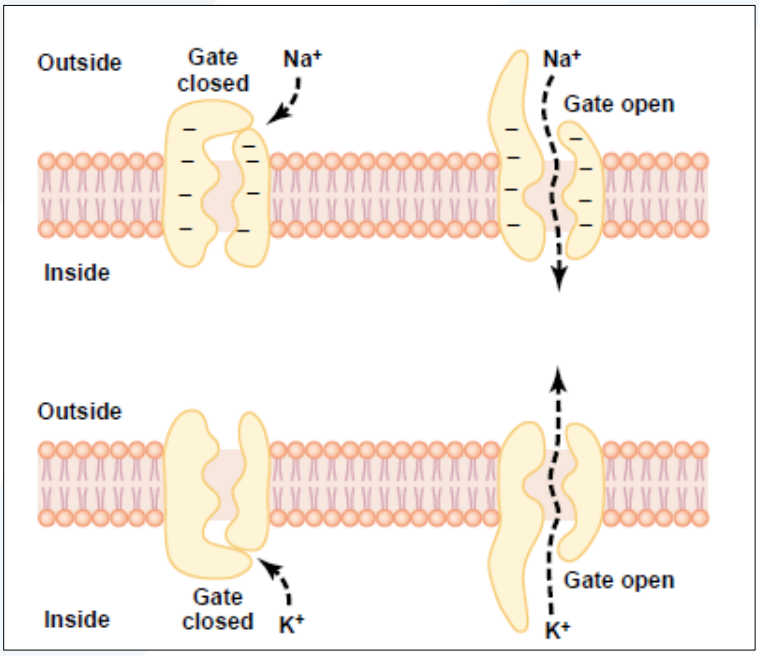
1. يعد **انحلال أو ذوبان المادة في الدسم** Lipid solubility أحد أهم العوامل التي تحدد سرعة انتشار المادة.
2. يستطيع كل من **الأكسجين، والآزوت، وثاني أكسيد الكربون، والكحول**، أن تذوب في هذه الطبقة وتنتشر عبر الغشاء بطريقة مشابهة للانتشار الذي يحدث في محلول مائي.
3. بالرغم من أن **الماء** لا ينحل بالدسم، ولكنه يخترق الغشاء بسرعة كبيرة، والكثير منه يمر عبر هذه الطبقة (ولكن ما يمر عبر قنوات البروتين أكثر)، ويعتقد أن السبب في ذلك يعود إلى **صغر حجم جزيئات الماء** بالإضافة إلى امتلاكها **طاقة حركية كبيرة** وكافية، بحيث تستطيع أن تعبر بسهولة وسرعة كالرصاصة الجزء الدسم من الغشاء قبل أن تتمكن الأطراف الكاره للماء من إيقافها.

4. **لا تستطيع الشوارد** أن تنتشر عبر هذه الطبقة بسبب **شحنتها الكهربائية** التي تسبب **ارتباط** لعدد من جزيئات الماء بها مشكلة ما يسمى **بالشوارد المموهة** Hydrated ions وبالتالي زيادة حجمها، كذلك تتأثر الشوارد **بشحنات الطبقة الدسمة** المزدوجة، لذلك عندما تحاول اختراق هذا الحاجز الكهربائي السلبي أو الإيجابي فإنها **تُبعد فوراً**.

أما الانتشار البسيط عبر **القنوات البروتينية ذات المسالك الناقلة المائية** فيتصف بـ:

1. **انتقائية واصطفائية** هذه القنوات لمواد معينة.
2. يمكن فتح وإغلاق الكثير من هذه القنوات بوساطة **البوابات** Gates.

تعود **الانتقائية** إلى صفات القناة بحد ذاتها **كقطرها**، **وشكلها**، وطبيعة **الشحنات الكهربائية** الموجودة على السطوح الداخلية لهذه القناة، وكمثال على ما سبق نذكر قناة الصوديوم؛ إذ تقيس 0.3 * 0.5 نانومتر فقط، كما أن السطح الداخلي لهذه القنوات مشحون سلبياً وبشدة (سطح شديد السلبية) الشكل (8)، لذلك فهي تجذب شوارد الصوديوم دون غيرها نتيجة لصغر قطرها الشاردي (هي شوارد منزوعة الماء Dehydrated ions.



الشكل (8): نقل شاردتي الصوديوم والبوتاسيوم عبرقنوات البروتين ذات البوابة (المبوبة).

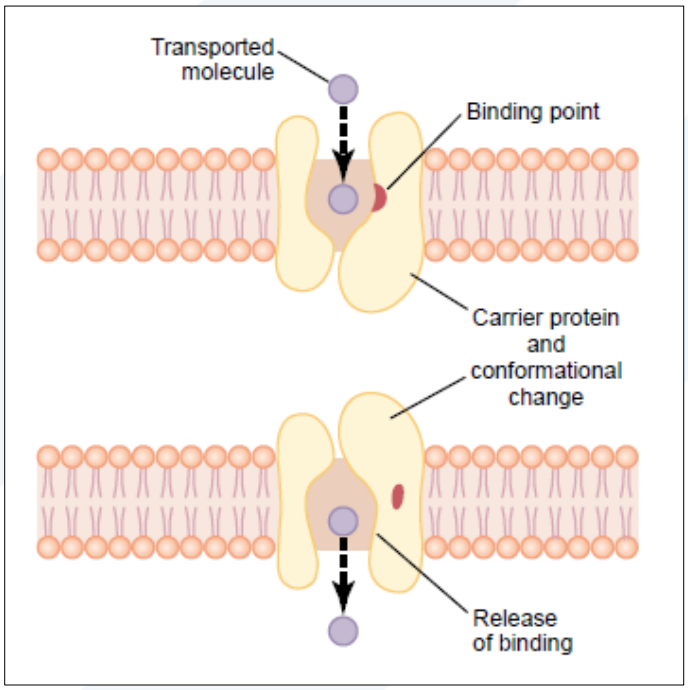
تقدم بوابة قناة البروتين وسيلة للتحكم بنفوذية القنوات، ويعتقد أن هذه البوابات عبارة عن **امتدادات لجزيء البروتين الناقل**، ويمكن أن تغطي وتغلق فتحة القناة أو تبتعد عنها نتيجة التبدل الشكلي لجزيء البروتين، كما يمكن أن توجد على السطح الخارجي للغشاء (قناة الصوديوم) أو على السطح الداخلي (قناة البوتاسيوم).

ثانياً: الانتشار الميسّر

يدعى الانتشار ميسّراً عندما يتوسطه **بروتين حامل**، وذلك لأن المادة لا يمكنها المرور عبر غشاء الخلية بدون مساعدة البروتين حامل معيّن، أي أن هذا البروتين ييسّر انتشار المادة إلى الطرف أو الجانب الآخر.

الفرق بين الانتشار البسيط والميسّر يتمثّل بالسرعة، فسرعة الانتشار البسيط تزداد مع ازدياد تركيز المادة المنتشرة، أما سرعة الانتشار الميسّر فتتوقف عند سرعة معينة هي **سرعة البروتين الحامل.**

ما الذي يحد إذاً من سرعة الانتشار الميسّر؟ الإجابة على هذا السؤال يوضّحها الشكل (9)؛ إذ يتوجب على الجزيء المنتقل أن يدخل القناة ويرتبط بالمستقبل، ومن ثم تحدث تبدلات شكلية خلال جزء من الثانية للبروتين الحامل تقود إلى انفتاح القناة للجانب الآخر للغشاء. إن الحركة الحرارية للجزيء سرعان ما تسبب انفصاله عن المستقبل وتحرره إلى الجانب الأخر.



الشكل (9): آلية الانتشار الميسّر.

ويبدو واضحاً بأنه لا يمكن نقل أي جزيء بهذه الطريقة بسرعة أكبر من السرعة اللازمة للبروتين الحامل كي يخضع للتبدل الشكلي. ويلاحظ بأن هذه الآلية تسمح بانتقال وانتشار الجزيئات بالاتجاهين.

إن الغلوكوز والعديد من السكريات الأحادية البسيطة كالغالكتوز (أو سكر الحليب)، من أكثر المواد التي تعبر غشاء الخلية بوساطة الانتشار الميسّر، بالإضافة إلى معظم الحموض الأمينية.

النقل الفعّال (الفاعل)

عندما ينقل الغشاء الجزئيات أو الشوارد **عكس مدروج أو ممال التركيز**، أي من المنطقة ذات التركيز المنخفض إلى المنطقة ذات التركيز المرتفع، بوجود **بروتين حامل، وبصرف طاقة**، فإن هذه العملية تدعى **بالنقل الفعّال.**

من **المواد التي تنتقل بهذه الطريقة نذكر**: شوارد الصوديوم، وشوارد البوتاسيوم، شوارد الكالسيوم، وشوارد الحديد، وشوارد الهيدروجين، وشوارد الكلور، وشوارد اليود.

ويقسم إلى نمطين: **الأولي والثانوي.**

أولاً: النقل الفعّال الأولي أو البدئي Primary Active Transport: ويضم:

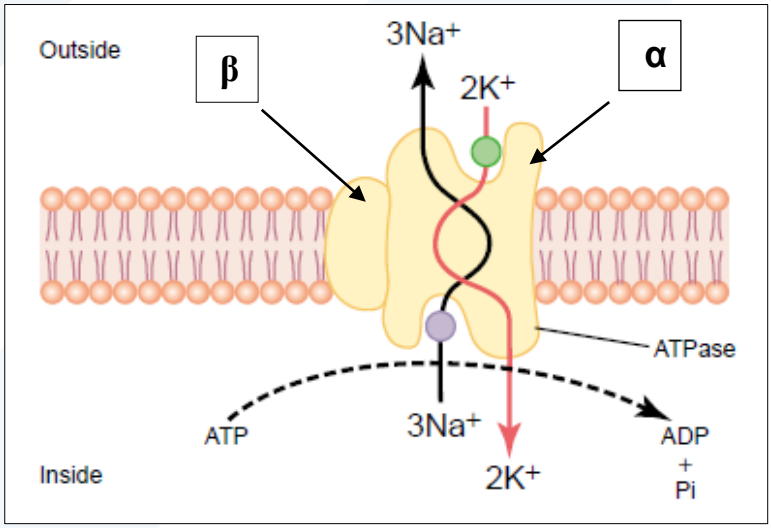
- **مضخة الصوديوم – البوتاسيوم ATPase -** (Na^+-K^+)

تعد من آليات النقل الفعّال الأولي؛ إذ تضخ شوارد الصوديوم نحو الخارج عبر غشاء الخلية، وفي الوقت نفسه تضخ شوارد البوتاسيوم من الخارج إلى الداخل، وهذه المضخة موجودة في **كل خلايا الجسم**، ووظيفتها المحافظة على **فرق التركيز** على جانبي غشاء الخلية بالإضافة إلى **تعزيز** الكمون الكهربائي السلبي داخل الخلايا (تشكل هذه المضخة عنصراً أساسياً في وظيفة الألياف العصبية وبالتالي الأعصاب لنقل السيالات العصبية عبر الجهاز العصبي).

يوضّح الشكل (10)، المكونات الأساسية لمضخة الصوديوم - البوتاسيوم pump (Na^+-K^+) حيث يتألف البروتين الحامل من بروتينين **كرويين منفصلين**، الجزيء الأكبر **α** ذو وزن جزيئي يعادل 100.000، والجزيء الأصغر **β** ذو وزن جزيئي يعادل 55.000 ، وعلى الرغم من وظيفة البروتين الأصغر غير معروفة، فإن للبروتين الأكبر **ثلاث صفات** مميزة تعد ضرورية لعمل المضخة وهي:

1. له **ثلاثة** مواقع مستقبلة لربط شوارد الصوديوم على الجزء الذي يبرز لداخل الخلية.
2. له **موقعين مستقبلين** لشوارد البوتاسيوم على الجزء الذي يبرز لخارج الخلية.
3. يمتلك الجزء الداخلي من هذا البروتين القريب من مواقع ارتباط شوارد الصوديوم فاعلية **ATPase**.

عندما ترتبط ثلاث شوارد من الصوديوم على القسم الداخلي من البروتين الحامل وشاردتي بوتاسيوم على القسم الخارجي منه، تتنشط وظيفة الأتباز ATPase الموجودة في البروتين وتؤثر في جزيء واحد من الـ ATP شاطرة إياه إلى أدينوزين ثنائي الفوسفات **ADP** وجزيئة **فوسفات** عالية الطاقة، ويعتقد أن هذه الطاقة تسبب **تبدلاً شكلياً** في جزيء البروتين الحامل فيلقي بشوارد الصوديوم إلى الخارج وشوارد البوتاسيوم نحو الداخل، ولكن الآلية الدقيقة لهذا التبدل الشكلي في جزيء البروتين لا تزال **غير معروفة**.



الشكل (10): آلية عمل مضخة الصوديوم – البوتاسيوم.

- **مضخة الكالسيوم ATPase - (Ca^{+2})**

يتم المحافظة على التركيز **المنخفض** للكالسيوم (في الحالة السوية) في السائل **داخل الخلية** بالمقارنة مع السائل خارج الخلية عن طريق مضخة الكالسيوم، ويتحقق ذلك بآليتين: إحداهما في غشاء الخلية وهي **تضخّ شوارد الكالسيوم للخارج**، والأخرى تضخ هذه الشوارد إلى إحدى العضيات الخلوية **كالشبكة الهيولية الداخلية** للألياف العضلية، أو إلى **الجسيمات الكوندرية** في الخلايا كافة، وتمتلك مضخة الكالسيوم كما مضخة الصوديوم - البوتاسيوم **فاعلية ATPase**.

- **مضخة البروتون ATPase - (H^{+})**

تنقل شوارد **الهيدروجين** من الخلايا الجدارية المعدية إلى **لمعة المعدة** أي **عكس** مدروج تركيزها، وتمتلك كذلك **فاعلية ATPase**.

ثانياً: النقل الفعّال الثانوي Secondary Active Transport: ويضم:

- **النقل المترافق في نفس الاتجاه Symport**

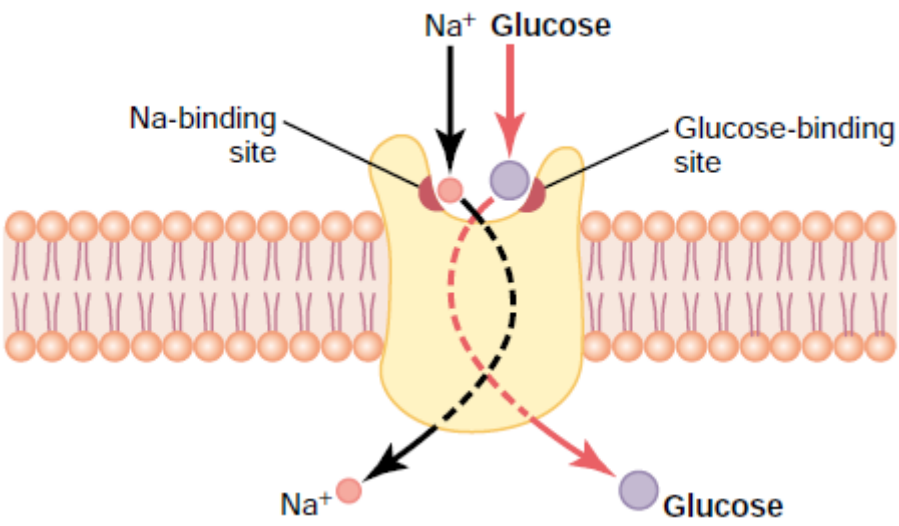
عندما تنقل شوارد الصوديوم إلى خارج الخلية بالنقل الفعّال الأولي ينشأ تركيز **عالٍ جداً** لهذه الشوارد خارج الخلية بالمقارنة مع داخلها، وينتج عن ذلك **طاقة انتشار كبيرة** للصوديوم نحو داخل الخلية، وتتمكن طاقة انتشار الصوديوم هذه من سحب مواد أخرى مع الصوديوم عبر الغشاء الهيولي، وتسمى هذه الظاهرة **بالنقل المترافق** co-transport وهي إحدى أنواع النقل الفعّال الثانوي.

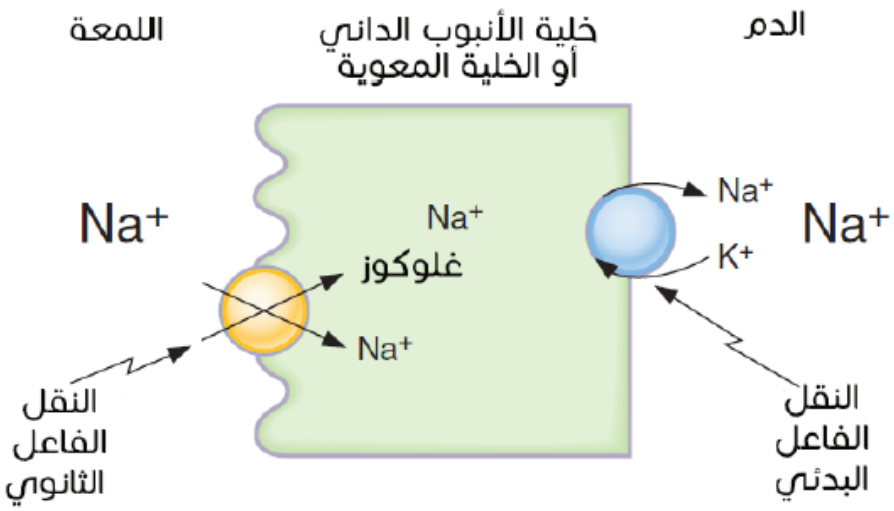
ويتحقق ذلك بوجود بروتين **حامل آخر** في غشاء الخلية؛ حيث يمتلك هذا البروتين **موقعي استقبال** أحدهم للصوديوم والآخر للمادة الثانية التي تنقل بالترافق معه، وعند ارتباط كل منهما بموقعه المستقبل وبالإضافة إلى **طاقة** انتشار الصوديوم الكبيرة، فإن شكل البروتين الحامل يتغيّر ناقلاً كليهما إلى داخل الخلية.

يعد كل من **الغلوكوز والحموض الأمينية** من المواد التي يتم نقلها أيضاً بآلية النقل المترافق أيضا؛ حيث يبيّن الشكل (11)، امتلاك البروتين الحامل موقعين مستقبلين على جهته الخارجية، أحدهما للصوديوم والثاني للغلوكوز، وبما أن تركيز الصوديوم خارج الخلية كبير جداً مقارنة بداخلها فإن ذلك سيوفر طاقة الانتشار اللازمة للنقل، ونضيف إلى ذلك الخاصية المهمة التي يتمتع بها البروتين الحامل المتمثلة بعدم تغير شكله إلا بعد ارتباط جزيء الغلوكوز أيضاً، عندئذٍ يتم نقل الصوديوم والغلوكوز إلى داخل الخلية في الوقت نفسه.

يتم النقل المترافق للحموض الأمينية بنفس الطريقة السابقة، ولكن باستخدام مجموعة أخرى من البروتينات الحاملة.

يتم النقل المترافق سواء للغلوكوز أو الحموض الأمينية مع الصوديوم بشكل خاص ضمن الخلايا الظهارية للسبيل المعوي (الأمعاء الدقيقة)، وللأنيبيبات الكلوية (القسم الأول من الأنيبب المتعرج القريب أو الداني).

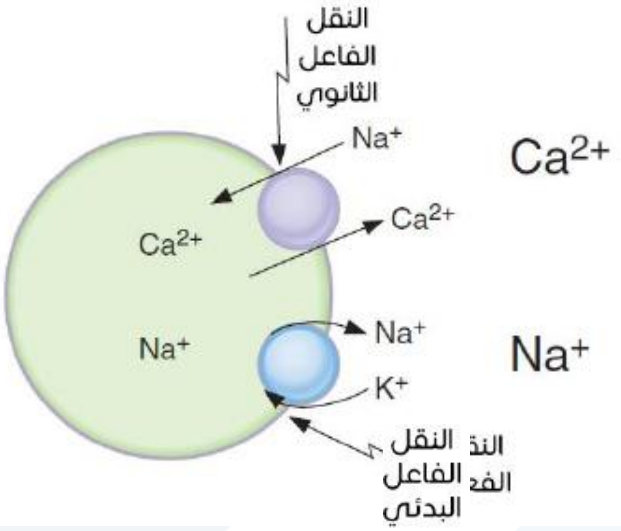




الشكل (11): النقل المترافق للصوديوم – الغلوكوز.

- **النقل المعاكس (المضاد) في اتجاهين مختلفين Antiport**

يضم آلية النقل المعاكس للصوديوم – الكالسيوم التي تتم (تقريباً) في أغشية جميع الخلايا الشكل (12)؛ حيث تتحرك شوارد الكالسيوم **للخارج** بينما تتحرك شوارد الصوديوم **للداخل**، وذلك بعد ارتباطهما بنفس البروتين الحامل وتحت تأثير طاقة الانتشار الكبيرة للصوديوم كما في النقل المترافق. يتم هذا النقل بالإضافة إلى النقل الفعّال الأولي للكالسيوم عن طريق المضخة الخاصة به والتي ذكرت سابقاً.



الشكل (12): النقل المعاكس للصوديوم – الكالسيوم.

ابحث:

يتمثل النقل الخلوي بدخول مواد إلى الخلية أو خروجها منها بفضل حركات محددة تتم في الغشاء الخلوي، ونميّز نمطين من هذا النقل: الالتقام (الادخال) Endocytosis والايماس (الاخراج) Exocytosis.

انتهت المحاضرة ... بالتوفيق للجميع.