

الغشاء (السييتوبلاسمي) الخلوي
CELL MEMBRANE

المحتويات

- **أولاً. مقدمة**
- **ثانياً. البنية الكيميائية للغشاء الخلوي**
 - الطبقة الليبيدية
 - بروتينات الغشاء الخلوي
 - النموذج الفسيفسائي للغشاء الخلوي
 - حركة المكوّنات الغشائية
- **ثالثاً. وظيفة الغشاء الخلوي وأنواع النقل عبر الغشاء**

مقدمة

- تحاط كل خلية في جسم الإنسان والكائنات الحية الأخرى بغشاء يشكل حدود الخلية ويفصلها عن جوارها، يدعى بالغشاء الخلوي أو السيتوبلازمي Plasma Membrane.
- يؤدي الغشاء الخلوي وظائف عدة، فهو يشكل **حاجزاً حيوياً** يفصل سيتوبلازم الخلية عن المحيط الخارجي، **وينظم عبور** مختلف **أنواع الأيونات** والجزيئات الأخرى (أيونات معدنية، سكريات، أحماض أمينية) من وإلى الخلية لتأمين المتطلبات الغذائية للخلية، **ويحافظ على الأستقطاب الخلوي**، كما يؤمن استجابة الخلية **للمؤثرات** والإشارات الحيوية (هرمونات، نواقل عصبية)، و**خروج الفضلات** ونواتج الاستقلاب، بما يضمن سلامة الأنسجة والأعضاء.

البنية والتركيب الكيميائي

STRUCTURE & CHEMICAL COMPOSITION

الطبقة الليبيدية

بروتينات الغشاء الخلوي

المعطف الخلوي

نموذج الفسيفساء السائل

البنية والتركيب الكيميائي Structure & Chemical Composition

يتألف الغشاء السيتوبلازمي من الناحية الكيميائية، من 40% من وزنه مواد دسمة و 60% بروتينات، بينما يلاحظ أيضاً في العديد من النسيج الحيوانية وجود طبقة محيطة بالغشاء الخلوي تدعى **بالمعطف الخلوي Cell Coat** تتألف بشكل كامل من **قليلات و عديدات السكار.**

تشير دراسات المجهر الإلكتروني أن الغشاء الخلوي يتألف من طبقات ثلاث؛ **طبقة متوسطة** مضاعفة بثخانة 5 نانومتر تتألف من **مواد دسمة** وموزعة 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.

تتميز الطبقتان البروتينيتان بأنهما غير مستمرتين وتأخذان مظهراً فسيفسائياً Mosaic. ونظراً لقلّة ثخانة الغشاء الخلوي (8-10 نانومتر) فلا يمكن مشاهدته إلا بالمجهر الإلكتروني. تتطلب دراسته **تثبيته برابع أوكسيد الأوسميوم** إذ يبدو ذا بنية ثلاثية الطبقات: اثنتان يروتينية تتلونان بالأوسميوم سماكة كل منهما 2,5-3 نانومتر تتوضعان على جانبي طبقة دهنية رائقة غير أليفة للأوسميوم سماكتها 2,5-3 نانومتر.

الطبقة الليبيدية

المكونات الليبيدية:

Phospholipids الليبيدات الفسفورية

Cholesterol الكولسترول

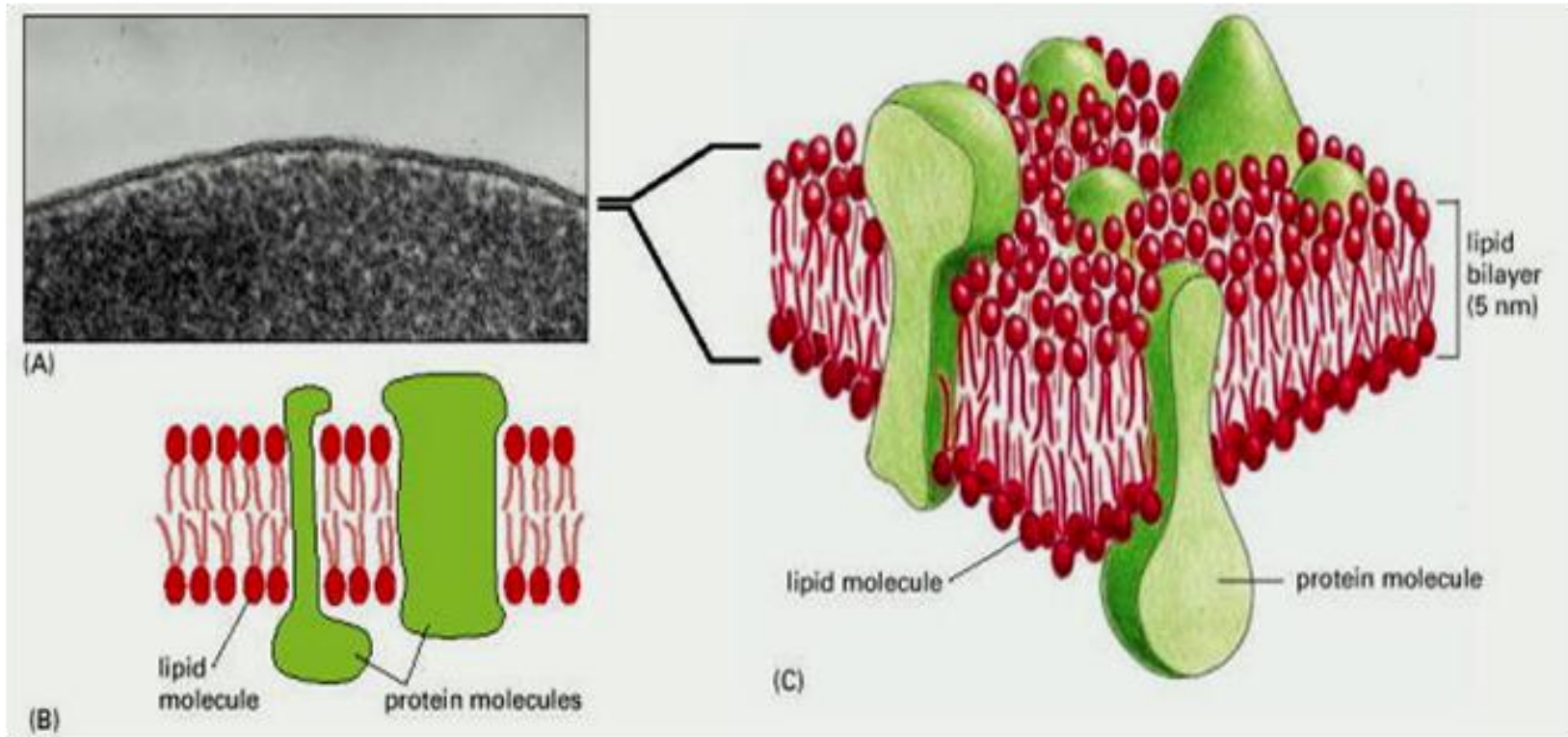
Neutral lipids الليبيدات الخاملة

Glycolipids الليبيدات السكرية

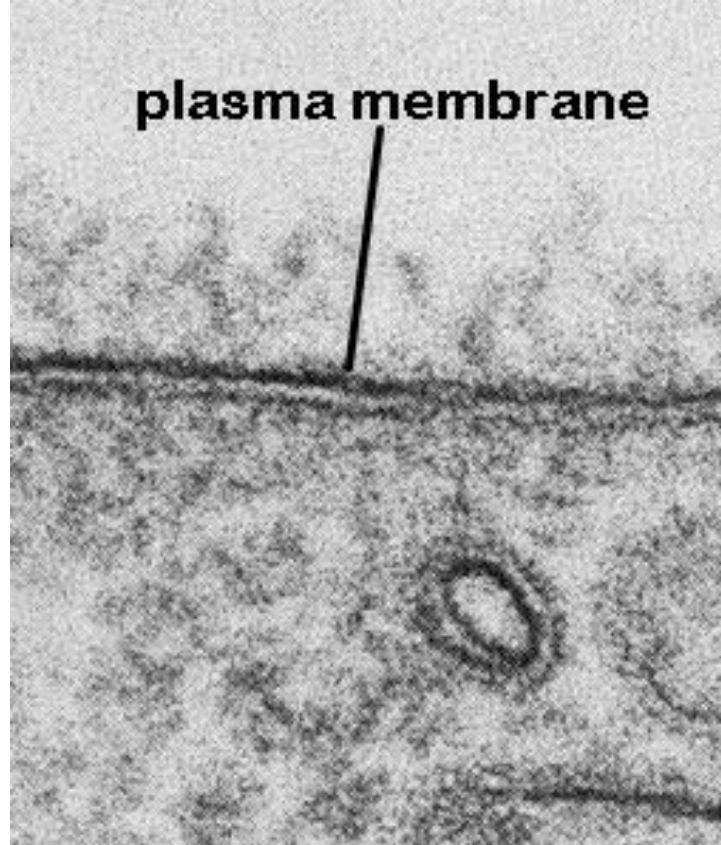
Sphingolipids السفنغوليبيدات

-خصائص المواد الدسمة الغشائية ودورها

صورة بالمجهر الإلكتروني، وشكل تخطيطي، يوضحان بنية الغشاء الخلوي



صورة للغشاء الخلوي بالمجهر الالكتروني تبين الوريقتين الملونتين بالأسميوم
بينهما الطبقة الرائقة



الطبقة الليبيدية:

تنتمي المواد الدسمة أو الشحوم Lipids في الغشاء الخلوي إلى أنواع عدّة هي:

١ - الفسفوليبيدات Phospholipids (الشحوم الفسفورية):

تنتمي معظم المواد الدسمة المتركرة بوفرة في أغشية الخلايا الحية إلى **الفسفوليبيدات**. تتألف الفسفوليبيدات من جزيئة غليسرول Glycerol ترتبط إليها في الموقعين ١ و ٢ الحموض الدسمة، أما الموقع الثالث فيرتبط بزمرة فوسفات.. وتعد الفسفوليبيدات في آن معاً مركبات **قطبية Polar**، أو **محبّة للماء** Hydrophilic، وذلك في الجزء من المركب الذي يحتوي مجموعة الفوسفات، ومركبات **غير قطبية Nonpolar**، أو **كارهة للماء** Hydrophobic، وذلك في الجزء الذي يضم سلاسل الحموض الدسمة كما شاهدنا في التركيب الكيميائي للخلية.

تشكل الفسفوليبيدات طبقة ثنائية بشكل تلقائي في الوسط المائي :

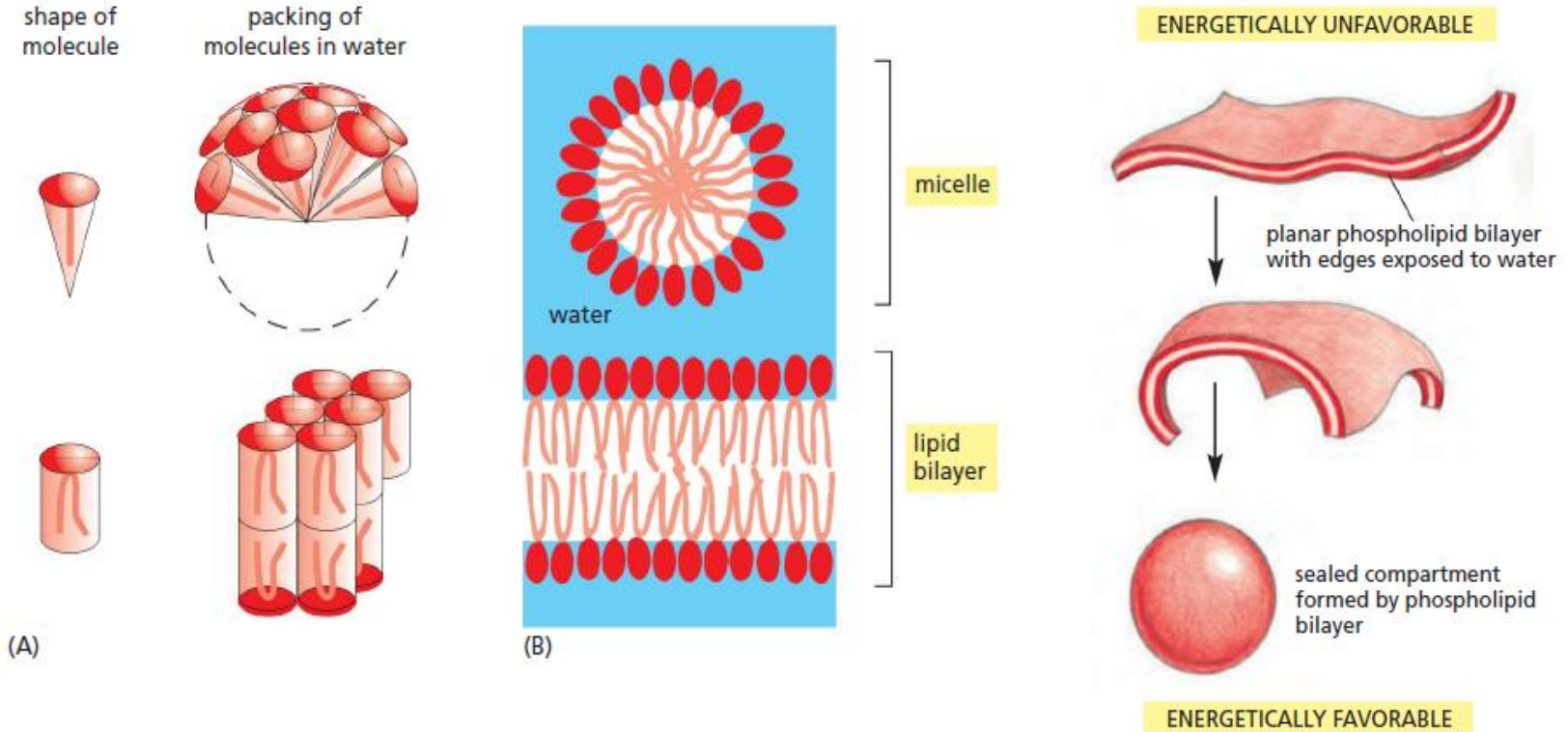
عند تعرّض مجموعات كارهة للماء للأوساط المائية، فإن هذه المجموعات **تتجمّع تلقائياً** بعضها مع بعض محاولةً **الابتعاد عن الماء**، وذلك لخفض الطاقة الحرّة في جزيئاتها. ويؤدّي ذلك إلى انفصال طورين اثنين، الأول هو الماء والثاني هو الجزيئات الكارهة له.

أما في حال كانت الجزيئات ثنائية الطور Amphipatic، أي لديها طرف/رأس كاره للماء والآخر محب له، عندها يمكن للرؤوس الكارهة للماء أن تتجمع بعيدةً عن الماء، بينما تتجمع **الأطراف القطبية باتجاه الماء لتتأثر** معه، وتعمل على تثبيت تلك الجزيئات في الوسط المائي.

ويكون تجمّع الرؤوس الكارهة للماء مختلفاً بحسب تكوين الجزيء. فإذا كان الجزيء يتألف من **رأس قطبي وذيل واحد غير قطبي** تتشكل عادةً **المذيلة Micelle**،

أما إذا تكوّن من **رأس قطبي وذيلين اثنين كارهين للماء**، عندها تتشكل تلقائياً طبقة ثنائية من الجزيئات ثنائية الطور، وخير مثال عنها هي الفسفوليبيدات في **الغشاء السيتوبلازمي**.

المذيلة والطبقة الثنائية من الدسم

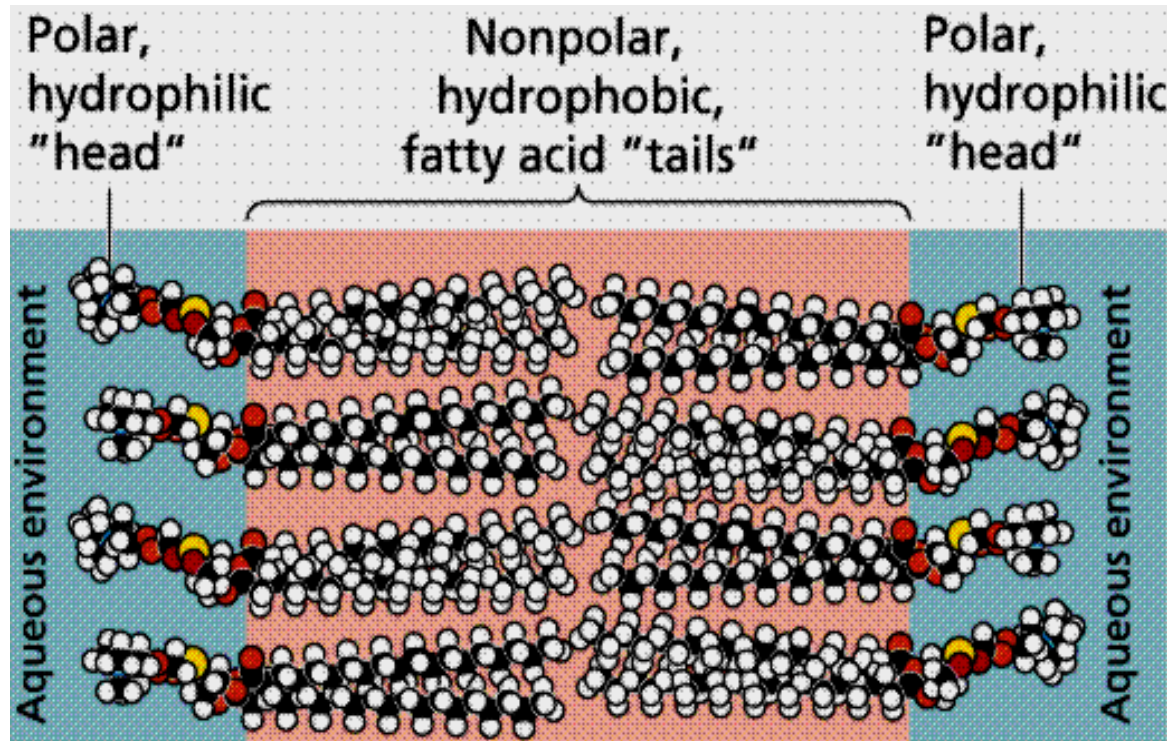


ويبين تشكّل المذيلة عند تجمّع الجزيئات ثنائية الطور مع ذيل وحيد كاره للماء، وتشكّل الطبقة الثنائية من الدسم مع وجود ذيلين كارهين للماء إضافة للرأس القطبي (يسار). أنّ الشكل المستوي من الطبقة ثنائية الدسم هو غير محبّب طاقياً. لذا، فإن الطبقة الثنائية للدسم تنطوي على نفسها لتشكّل كرة، الأمر الذي يشبه إحاطة الغشاء الخلوي بالعصارة الخلوية (يمين).

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 من الفسفوليبيدات في مركز الغشاء الخلوي .

ويمنع هذا الحاجز عملياً مرور المواد المحبة للماء التي تتركز داخل الخلية، مثل البروتينات، والإنزيمات، والمادة الوراثية، والنكليوتيدات نحو خارج الخلية.

شكل تخطيطي يبين توزيع الأجزاء المحبة للماء والكارهة له في الغشاء
السيتوبلازمي



الكولسترول Cholesterol:

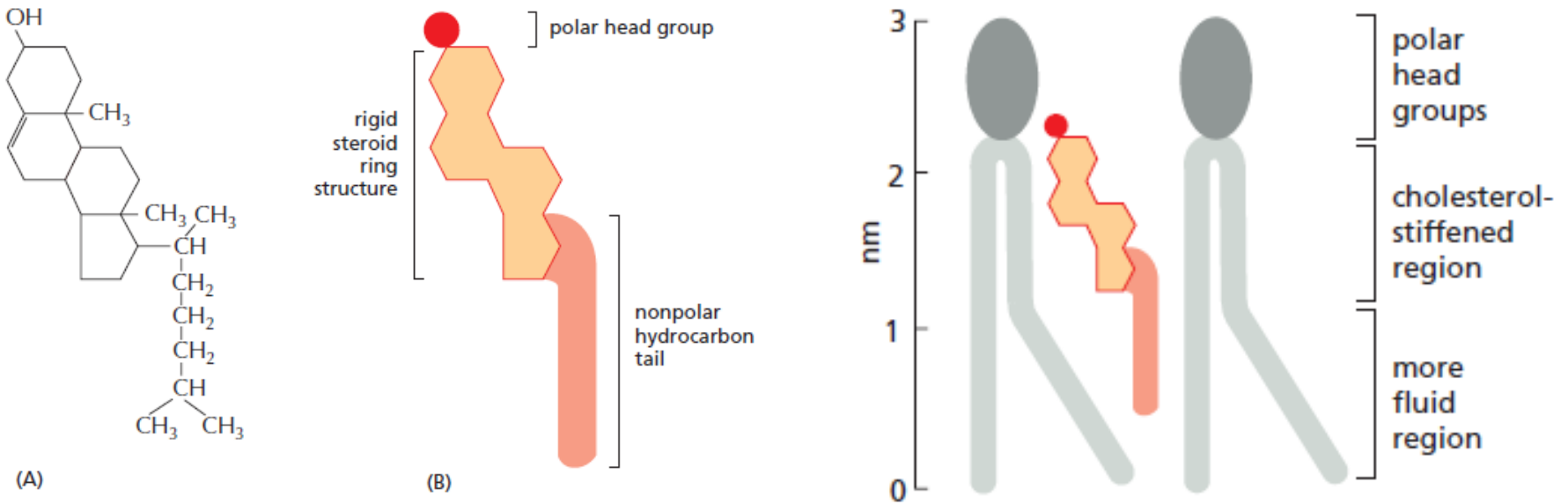
تتركز جزيئات الكولسترول بشكل **موازٍ للفسفوليبيد** في الطبقة الليبيدية المضاعفة، وتشكل ما نسبته ٩% من مجموع المواد الدسمة للغشاء الخلوي، وتعطيه نوعاً من **المقاومة والصلابة**.

وكلما **انخفضت** نسبة الكولسترول اكتسبت الأغشية الخلوية نسبة **أعلى من المرونة**، وهذا ما نجده في أغشية الشبكة السيتوبلازمية الداخلية، وجميع أغشية **العُضَيَّات التي يتطلب أداؤها لوظائفها المرنة والليونة**.

من جهةٍ أخرى، تحتوي **خلايا شوان Schwann Cells** **أعلى** نسبة من الكولسترول مقارنة مع جميع خلايا جسم الإنسان، وهي بذلك تشكل طبقة **عازلة حول محاور الخلايا العصبية** (العصبونات Neurons).

ويعتقد أن لوجود الكولسترول في أغشية خلايا شوان بهذه النسبة المرتفعة علاقة مع **وظيفتها العازلة**.

بنية وتوضع جزيئات الكولسترول



- يبين بنية الكولسترول (a) والأقسام الثلاث؛ القطبي والصلب والكاره للماء (B)، إضافةً إلى كيفية توضع جزيء الكولسترول بين الشحوم الفسفورية بحيث يكون جذر الهيدروكسيل في الكولسترول مجاوراً للرأس القطبي (مجموعة الفوسفات) في الشحوم الفسفورية (يمين). ويحدّد كل من الكولسترول والشحوم الفسفورية ثلاث أجزاء في كل من طبقتي الشحوم الفسفورية، الأولى قطبية، والثانية قاسية نسبياً لوجود حلقات الكولسترول، والثالثة أكثر انسيابية وسيولة

- الشحوم المعتدلة **NEUTRAL LIPIDS**:

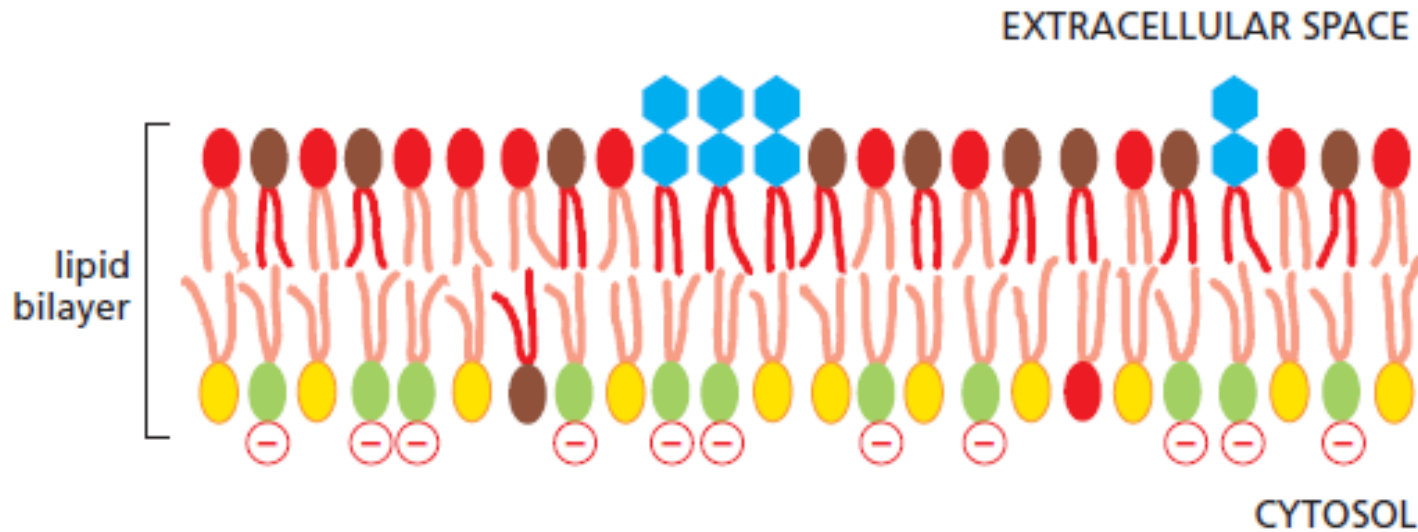
أو الغليسيريدات الثلاثية، إذ ترتبط ثلاث جزيئات من حموض دسمة بجزيئة الغليسول لتعطي جزيئاً **خاملاً كيميائياً**، وتوجد هذه المركبات بكميات **قليلة** جداً في الأغشية الخلوية.

- الشحوم السكرية **GLYCOLIPIDS**:

وهي عبارة عن جزيئات من **الدهم** ترتبط إليها جزيئات **سكرية** كالغلوكوز أو الغالاكتوز **بروابط كيميائية قوية**، وتكثر هذه المركبات في **أغشية العصبونات NEURONS**. وتتركز الشحوم السكرية بكثرة في **الوريقة الخارجية** من الطبقة الليبيدية المضاعفة للغشاء الخلوي، بينما **تتوضع** أجزاء **الفسفوليبيدات غير المستقطبة** (سلاسل الحموض الدسمة) نحو **عمق** أو مركز الطبقة الشحمية.

ويعتقد أن لتوضع هذه المركبات مع **البروتينات السكرية** في الوريقة الخارجية دوراً في تعرف خلايا الجملة **المناعية** على خلايا الجسم نفسه.

ويبين توضع الشحوم السكرية (بالأزرق) في الوريقة الخارجية من الغشاء الخلوي



خصائص المواد الدسمة الغشائية ودورها:

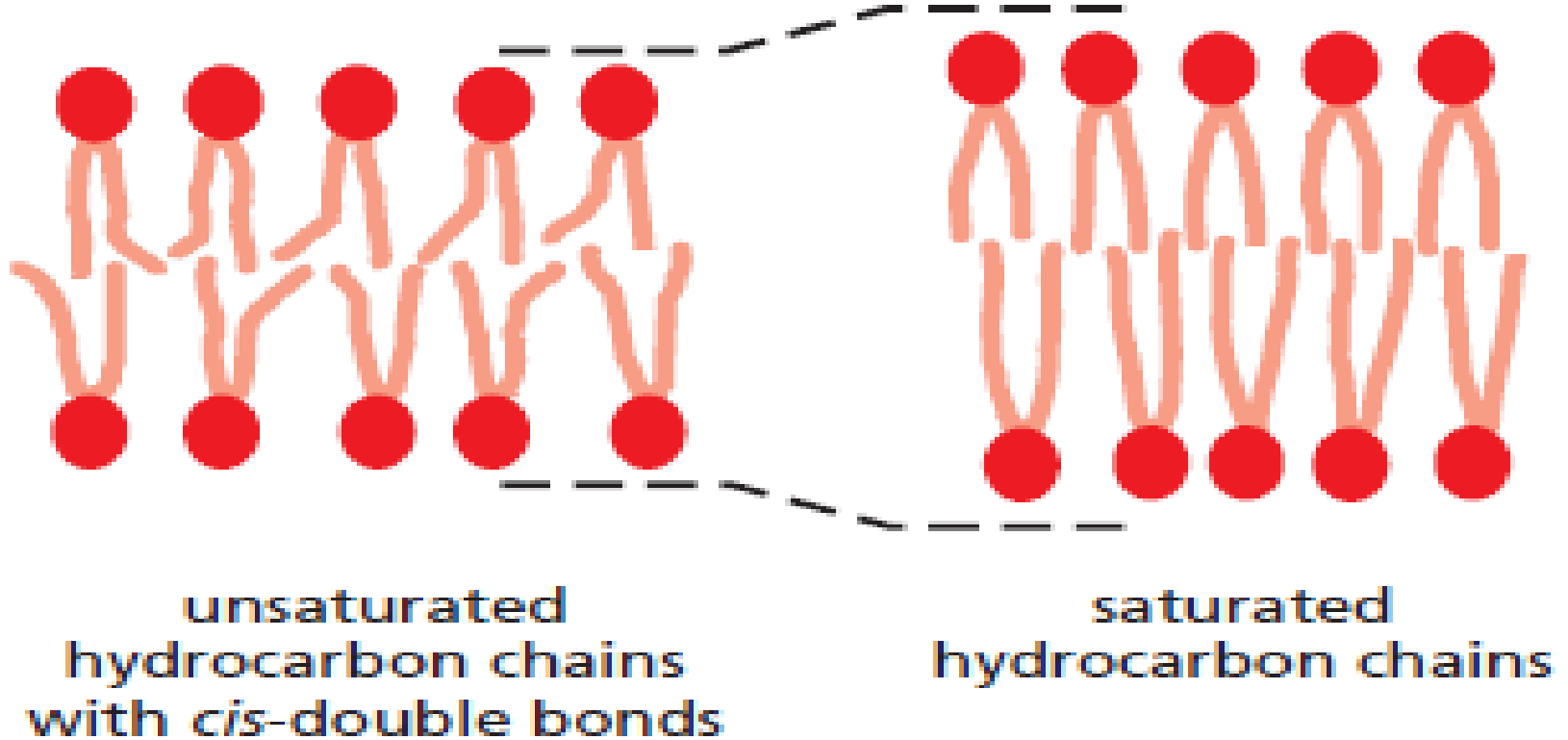
تؤدي المواد الدسمة دوراً في تحديد درجة **لدونة** (سيولة) Fluidity الغشاء الخلوي إذ إنّ هذه السيولة تتعلق بالعوامل التالية:

١- وجود أو غياب الروابط المضاعفة في السلسلة الكربونية، إذ إنّ **وجود** الروابط **غير المشبعة** يؤدي إلى **زيادة سيولة الغشاء**، أما الإشباع فيعطيه **القوام الدبقي اللزج**.

٢- وجود **الكولسترول** الذي يعطي الغشاء **صلابة** تزداد بزيادة عدد جزيئاته في الغشاء.

٣- درجة الحرارة: إذ يؤدي **انخفاض الحرارة** إلى **تشكيل دُسم غير مشبعة** مما يؤدي إلى **زيادة سيولة الغشاء**.

شكل يوضح سيولة الطبقة الدسمة: الحالة السائلة مع روابط غير مشبعة (يسار)، والحالة اللزجة مع روابط مشبعة (يمين).



بروتينات الغشاء الخلوي

CELL MEMBRANE PROTEINS

البروتينات المتداخلة Integral Proteins

البروتينات العابرة مرة واحدة Single Transmembrane Proteins

البروتينات العابرة عدة مرات Multipass Transmembrane Proteins

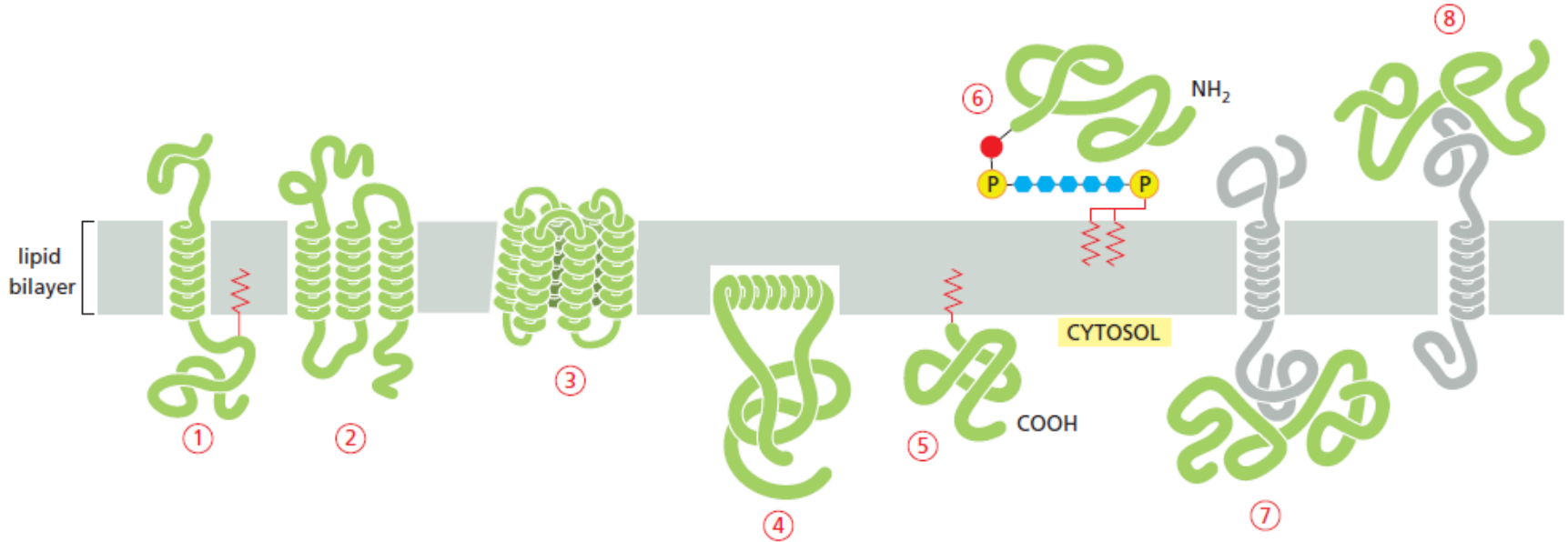
البروتينات السطحية Peripheral Proteins

بروتينات الغشاء الخلوي CELL MEMBRANE PROTEINS:

ترتبط طبيعة وكمية البروتينات التي تدخل في تركيب الغشاء الخلوي **بوظيفة الخلية**، وتتراوح نسبة هذه البروتينات بين **٢٥ و ٧٥%** من كتلة الغشاء، وهي بصورة عامة **أقل عدداً وأكبر حجماً من المواد الليبيدية**، إذ توجد **٥٠ جزيئة دسم مقابل كل بروتين**، إلا أن **حجم البروتين أكبر بنحو ٣٠-٥٠ ضعفاً من حجم جزيئة الدسم**. ويرتبط نحو **٧٠%** من بروتينات الغشاء الخلوي **بالدسم الفوسفورية غير المحبة للماء**.

وهناك عدة أشكال لارتباط البروتينات الغشائية مع الطبقة الثنائية للشحوم الفسفورية يوضحها الشكل التالي.

الشكل يبيّن الطرق المختلفة التي تترافق فيها البروتينات مع الغشاء الخلوي



تعتبر معظم البروتينات الغشائية طبقة الشحوم الفسفورية المضاعفة كحلزون α وحيد α Single helix (١)، أو عدة حلزونات α (٢)، أو كبنية صفائحة β sheet ملتفة. وهناك بروتينات أخرى تتواجد على جانب واحد من الغشاء. وبعض هذه البروتينات يثبتت على الوجه السيتوبلازمي للغشاء عن طريق تشكيل روابط كارهة للماء للـ α helix مع إحدى طبقتي الغشاء (٤) أو عن طريق روابط تساهمية مع الحموض الدسمة (٥)، أو عن طريق ارتباط الجزء السكري من البروتين السكري Glycoprotein مع الفسفاتيديل إينوزيتول في الوريقة الخارجية للغشاء (٦)، وأخيراً، يمكن لبعض البروتينات أن تثبتت في الغشاء عبر تأثيرها غير التساهمي مع بروتينات غشائية أخرى (٧ و ٨).

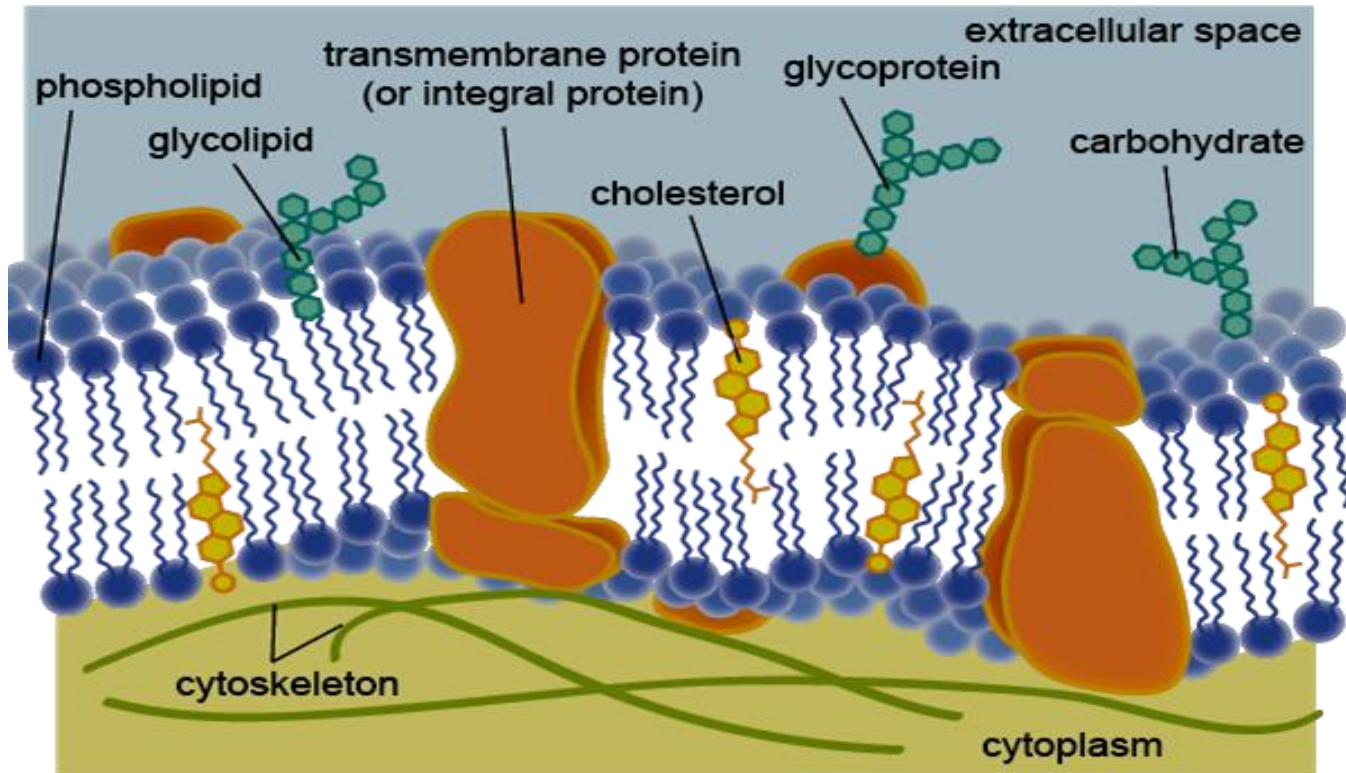
ويمكن عموماً تقسيم البروتينات الغشائية إلى قسمين رئيسيين:

البروتينات المتداخلة (المتكاملة) INTEGRAL PROTEINS:

وهي في معظمها بروتينات **عابرة** للغشاء TRANS-MEMBRANE PROTEINS، إذ تتألف من **جزء كاره** للماء يتركز في مركز الغشاء، ويتأثر مع الذبول الكاره للماء للفسفوليبيدات، وآخر **محب للماء** يوجد على تماس مع الوسط المحيط بالخلية أو مع السيتوبلازما. كما يمكن لهذه البروتينات أن تمتلك فقط جزءاً (أو مجالاً DOMAIN) **داخلاً غشائياً**، وجزءاً آخر يمتد إلى خارج أو داخل الخلية وليس كلاهما معاً، وتدعى عندها فقط بالبروتينات المتداخلة INTEGRAL PROTEINS. ومثال هذه البروتينات: **المستقبلات الخلوية** CELLULAR RECEPTORS، **والقنوات الأيونية** IONIC CHANNELS، **والمضخات الأيونية** IONIC PUMPS، وكذلك البروتينات **الناقلة** CARRIERS PROTEINS أو ما يدعى بمعدّات TRANSLOCASES. وتعدُّ هذه البروتينات أساسية جداً لبناء الغشاء الخلوي ووظيفته، كما أن قسماً من البروتينات الذاتية تتوضع داخل الطبقة الشحمية المضاعفة.

ترتبط البروتينات داخل الغشائية أو العابرة له TRANSMEMBRANE PROTEINS بشدة مع المواد الدسمة الموجودة في طبقتي الغشاء الخلوي، مما يستدعي **استخدام طرق خاصة لفصلها** ودراسة تركيبها، وتختلف البروتينات الغشائية **بعدد مرات عبورها**، فبعضها يعبر الغشاء الخلوي مرة واحدة فقط، وبعضها يعبره مرات عدة.

شكل تخطيطي يوضح بنية البروتينات المتداخلة والعابرة للغشاء الخلوي



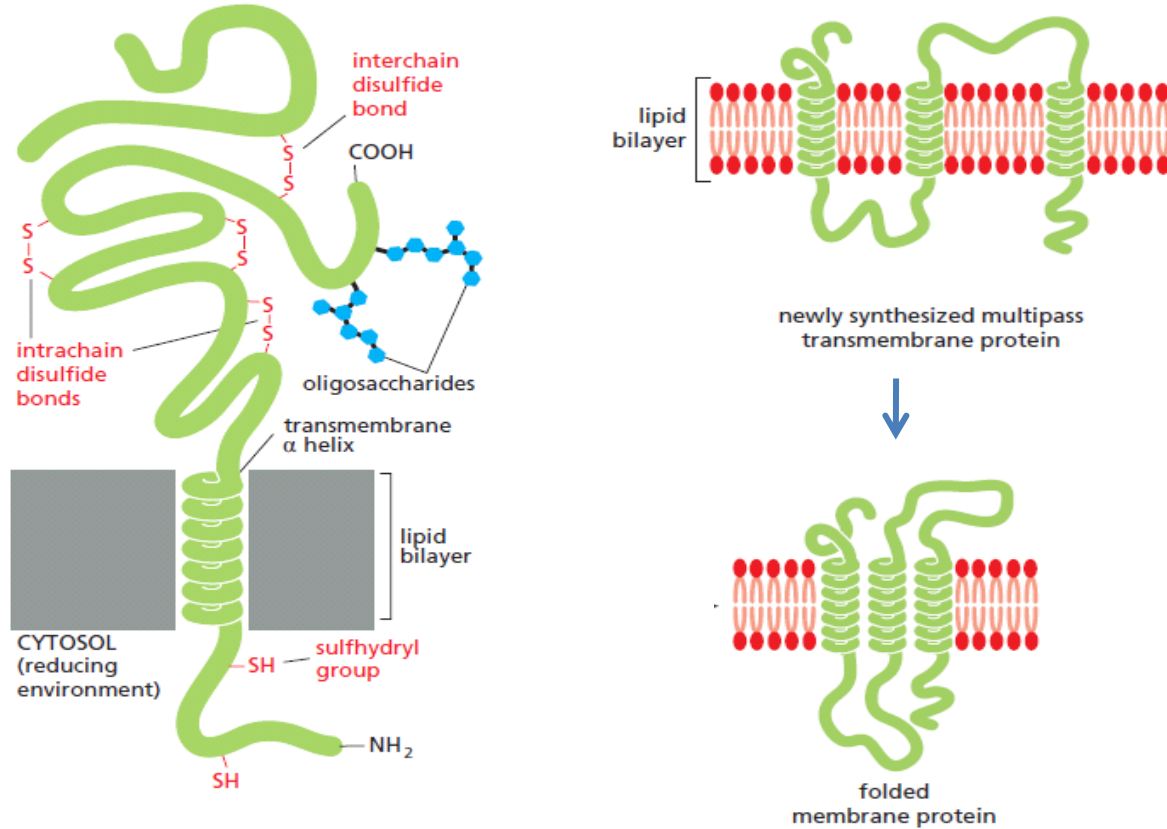
- البروتينات العابرة مرة واحدة **SINGLE-PASS TRANSMEMBRANE PROTEINS**: تقوم هذه البروتينات بدور **مستقبلات منشّطة أو مثبّطة** مثل مستقبلات الإنسولين ومستقبلات عوامل النمو. البروتينات العابرة عدة مرات **MULTI-PASS TRANSMEMBRANE PROTEINS**: تم الكشف عن هذه البروتينات بطريقة الكسر الجليدي **FREEZE FRACTURE**، وتبيّن أنها تعبر **الطبقة الدسمة المضاعفة عدة مرات**.

- البروتينات المحيطة **PERIPHERAL PROTEINS**:

توجد هذه البروتينات **ملتصقة إما بالوجه الخارجي وإما بالوجه الداخلي** للغشاء الخلوي، وترتبط بمكوناته إما بروابط ضعيفة (روابط هيدروجينية)، أو بروابط كيميائية تساهمية قوية. فمثلاً توجد **بروتينات G (G-PROTEINS)** التي تؤدي دوراً مهماً في **جملة تنبيغ الإشارة SIGNAL TRANSDUCTION** عبر الغشاء مرتبطة بالوجه الداخلي **بروابط ضعيفة**، بينما تكون بعض الإنزيمات ذات الفعالية المفسفرة أو ما يدعى **بالكينازات KINASES** مثبتة على الطرف السيتوبلازمي للغشاء **بروابط تساهمية**. ومن أنواع البروتينات المرتبطة إلى الوجه خارج الخلوي من الغشاء نذكر **إنزيم إستيراز الأسيتيل كولين ACETYLCHOLINE ESTERASE** الذي يوجد بوفرة في أغشية الكريات الحمر، وفي أغشية عناصر المشبك العصبي **SYNAPSE**، ونشير إلى أن هذه البروتينات غير ضرورية لثبات بنية الغشاء، وإنما هي عبارة عن بروتينات مُلحقة تساعد المستقبلات الغشائية في **نقل الإشارة**.

والجدير بالإشارة أن كثيراً من البروتينات الغشائية **مرتبطة بشكل غير مباشر مع ألياف الهيكل الخلوي CYTOSKELETON**، ولا سيّما ألياف **الأكتين** والألياف المتوسطة، عبر بروتينات محيطية وسيطة تؤمّن **نقل الإشارة**.

يبين بنية بروتين عابر للغشاء لمرة واحدة وبروتينات عابرة للغشاء عدة مرات



تظهر في الشكل البنية الثانوية للبروتين α helix الممتدة على طول الطبقة الثنائية للشحوم الفسفورية حيث ينتبت البروتين عبر روابط كاره للماء مع الحموض الدسمة للشحوم الفسفورية، كما تظهر مجموعات السلفهيدريل SH والتي تكون مُرجعة في الجزء السيتوبلازمي للغشاء نظراً للبيئة المُرجعة Reducing داخل الخلية، بينما تكون مُؤكسدة خارج الخلية وتشكل رباط ثنائية الكبريت تثبت البنية الثلاثية للبروتين في الجزء خارج الخلية نظراً للبيئة المُؤكسدة خارج الخلايا. ويمكن أن يرتبط البروتين أيضاً بقليلات سكاريدات في حال كونه بروتيناً سكرياً (يسار). أما بالنسبة للبروتينات التي تعبر الغشاء عدة مرات على شكل α helix فتكون الحزونات المشكّلة للأجزاء المتداخلة مع الغشاء أول نشأتها متباعدة عن بعضها البعض لتعود وتجتمع الحزونات مع بعضها وتشكل روابط كارهة للماء تثبت البنية الثالثية للبروتين العابر للغشاء الخلوي (يمين).

المعطف الخلوي

CELL COAT

البروتينات المتداخلة **Integral Proteins**

البروتينات العابرة مرة واحدة **Single Transmembrane Proteins**

البروتينات العابرة عدة مرات **Multipass Transmembrane Proteins**

البروتينات المحيطة **Peripheral Proteins**

المعطف الخلوي CELL COAT

تمت مشاهدة المعطف الخلوي أول مرة عام ١٩٥٥ عند دراسة الزغابات الدقيقة MICROVILLI في الخلايا الظهارية للحويصل الصفراوي، ومن ثمّ في الخلايا الظهارية للأمعاء الدقيقة والكلية وفي بعض الغدد. ويظهر المعطف الخلوي بشكل **خيوط دقيقة متشابكة تتوضع عمودياً** على الغشاء الخلوي وترتبط بالوريقة الخارجية. أما عند استخدام الطرق الكيميائية الخلوية فيظهر **بشكل تكثف** متركز على السطح الخارجي للغشاء الخلوي،. بينما يبدو ذا **بنية ليفية** في حالة استخدام **الطرق المناعية**.

يتكوّن المعطف الخلوي من عديدات سكاريدات سطحية ترتبط مع:

١) **المكوّنات الليبيدية الغشائية** لتشكّل جزيئات ليبيدية سكرية؛ ٢) **البروتينات الغشائية** المتداخلة والعابرة للغشاء، لتشكّل بروتينات سكرية ٣) البروتينات الغشائية المحيطية. وهو يقوم بعدة أدوار، من أهمها:

- ١- **وقاية الغشاء الخلوي**: يتمتع المعطف الخلوي بمقاومة كبيرة لمعظم الإنزيمات الحالة للمواد الدسمة والبروتينات، كما يقوم بدور **فلتر** فيمنع تسرّب الجزيئات الكبيرة إلى الغشاء الخلوي.
- ٢- **تحديد الشحنة الكهربائية للسطح الخلوي**: يتميز السطح الخلوي بشحنة كهربائية سلبية حيث تساعد هذه الشحنة في **حركة الخلايا**، إذ تتحرّك الخلايا عادةً باتجاه القطب **الموجب** في الأوساط الزرعية.
- ٣- **امتصاص بعض المواد**: مثلاً يمتص الغشاء الخلوي للكريات الحمر بعض المواد ويثبتها.
- ٤- المشاركة في تحديد **المستضدات** السطحية للخلايا وتقديمها لخلايا الجملة المناعية. وقد تم التأكد من دور سكاكر المعطف الخلوي في التعرف الخلوي، وثبت أن السكاكر الموجودة في أغشية الكريات الحمر تحدّد الزمر الدموية الأساسية ABO.
- ٥- **تتدخل في بعض النشاطات الإنزيمية**.
- ٦- تساهم في **نقل** بعض المواد.
- ٧- تساهم في **الالتصاق الخلوي** CELL ADHESION.

النموذج الفسيفسائي السائل للغشاء الخلوي

FLUID MOSAIC MODEL OF CELL MEMBRANE

حركة المواد الشحمية Lipid Movement

حركة البروتينات Protein Movement

الطافيات الشحمية Lipid Rafts

الغشاء الخلوي في الخلايا السرطانية Membranes in Cancer Cells

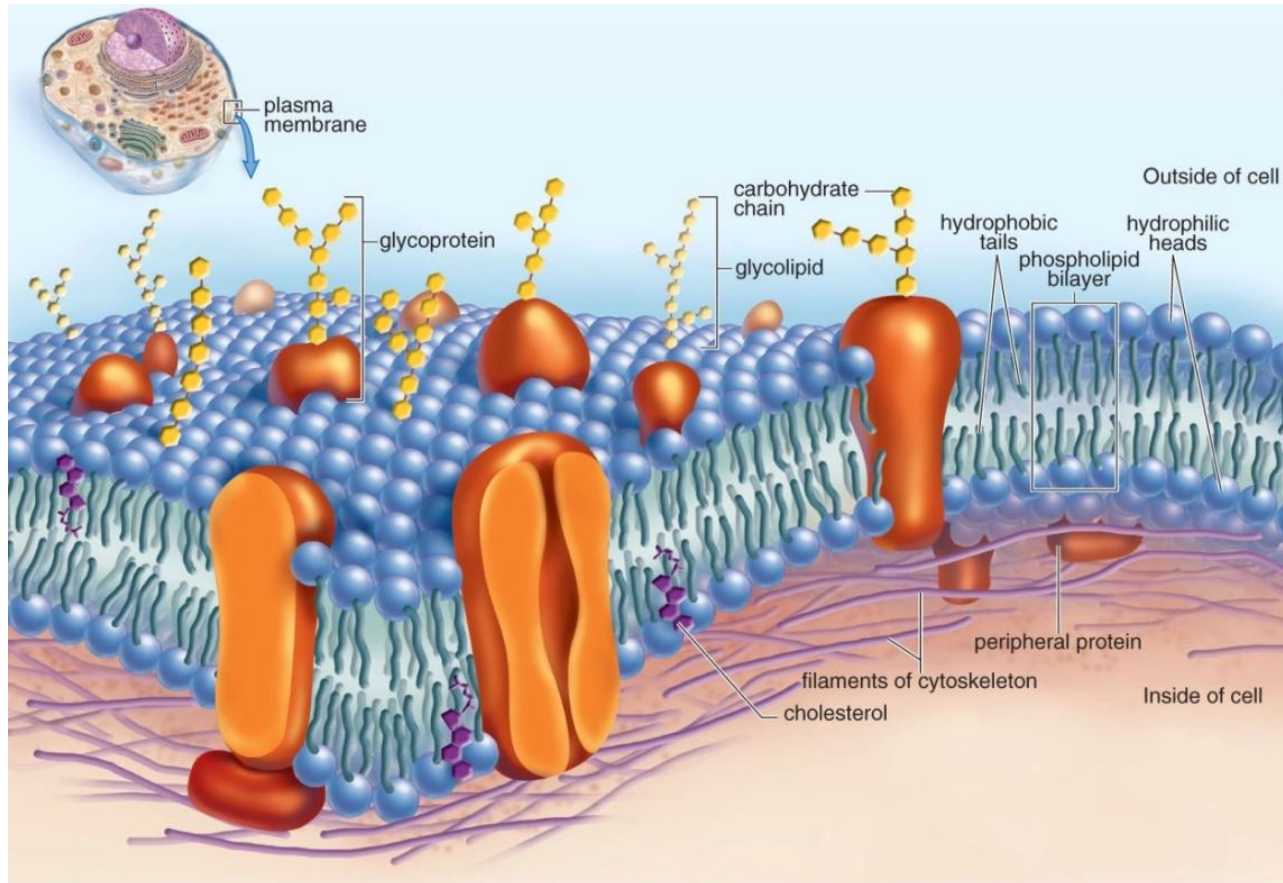
النموذج الفسيفسائي السائل للغشاء الخلوي:

FLUID MOSAIC MODEL OF CELL MEMBRANE

اعتماداً على المعطيات السابقة التي أسست لها دراسات المجهر الإلكتروني والدراسات النسيجية والكيميائية الحيوية تم وضع نموذج الشطيرة SANDWICH للغشاء الخلوي، وفيه تتركز المواد **الدهنية بشكل طبقة مضاعفة** محورية تحيط بها البروتينات من الأعلى والأسفل بشكل طبقتين **غير مستمرتين**. لكن تبين وجود آليات تبادل وعبور للمواد عبر الغشاء الخلوي لا يفسرها النموذج السابق. إذ تتمكن الجزيئات والأيونات المعدنية من العبور بحرية بالانتشار البسيط دون الحاجة إلى الطاقة. ولتفسير ذلك، تم اقتراح وجود **قنوات** أو ثغوب 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 حُدّت مجمل هذه الملاحظات بالباحثين J. SINGER و G. NICOLSON عام ١٩٧٢ لاقتراح البنية **الفسيفسائية السائلة للغشاء** الخلوي، وتعدّ النموذج الأكثر قبولاً في الوقت الحاضر. وفي الواقع، يعتمد النموذج الفسيفسائي السائل بشكل رئيسي على حركة المكونات الغشائية، التي أثبتتها العديد جداً من التجارب المخبرية، وتضمّ حركة المكونات الشحمية إضافة إلى حركة البروتينات الغشائية.

نموذج البنية الفسيفسائية Mosaic Model للغشاء السيتوبلازمي



• يتوضّح في الشكل الشطيرة الممثلة للطبقة الثنائية من الشحوم الفسفورية يتبعثر خلالها عدد كبير من البروتينات الغشائية العابرة للغشاء أو المتداخلة فيه أو المحيطة. كما تظهر جزيئات الكوليسترول وقليلات السكاكر المرتبطة إما بالبروتينات أو بالشحوم. كل ذلك، يعطي ذلك الشكل الفسيفسائي المتنوع للغشاء الخلوي.

حركة المواد الشحمية LIPID MOVEMENT

يمكن للمكونات الشحمية الموجودة في الغشاء الخلوي أن تقوم بنوعين من الحركات:
حركات انتقالية وحركات انتنائية مرنة.

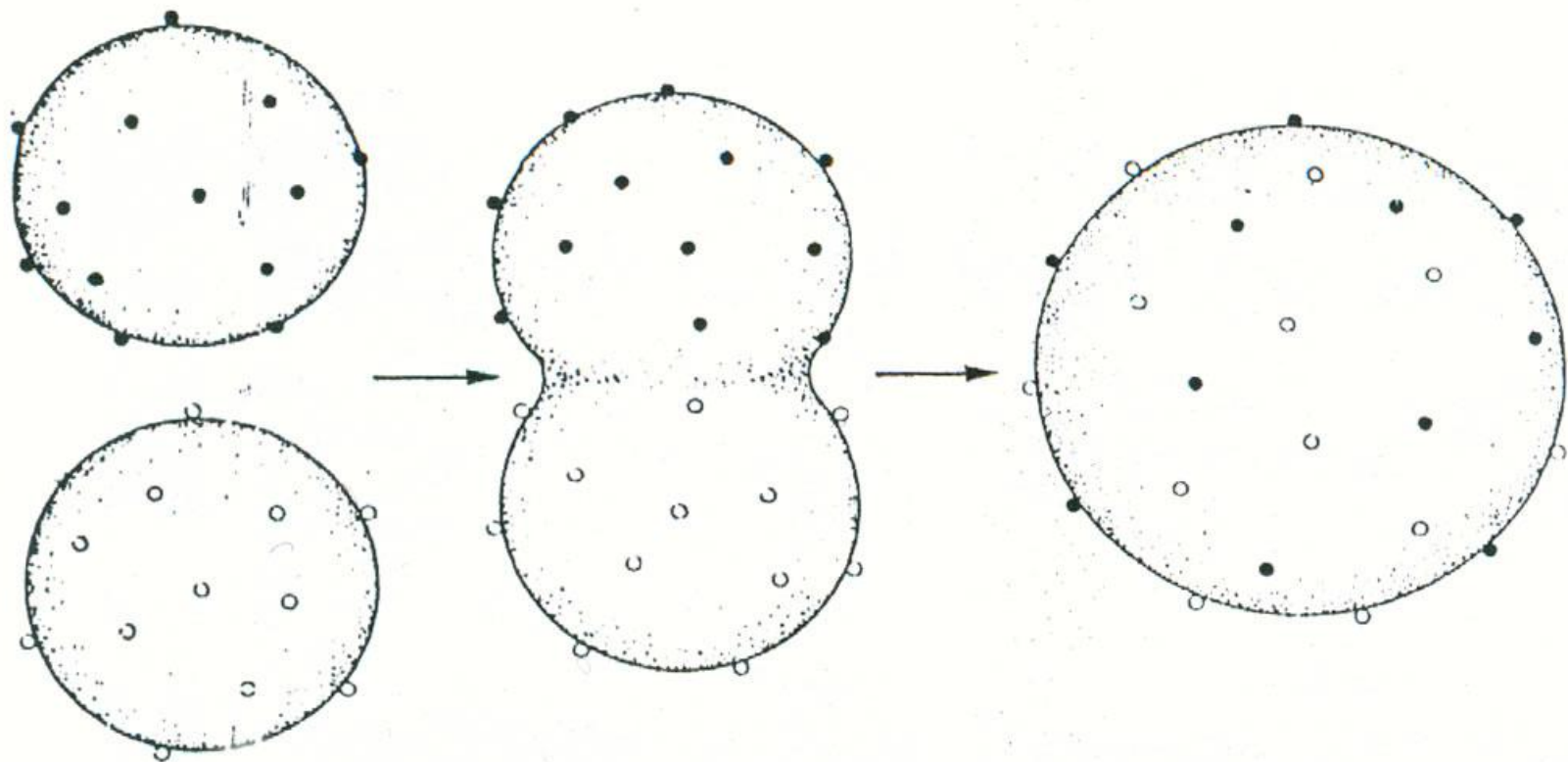
تكون حركة الفسفوليبيدات **بالانتشار الجانبي LATERAL DIFFUSION** **سريعة جداً** (نحو 10^7 حركة بالثانية)، وتظهر بوضوح في **الدهم صغيرة السلسلة وغير المشبعة** إذ تتبادل فيها الفسفوليبيدات مواقعها مع مجاوراتها من الفسفوليبيدات الأخرى ضمن الطبقة الواحدة للغشاء، بينما يكون التبادل بين الطبقتين بطيئاً **ونادر الحدوث بالنسبة للفسفوليبيدات وسريعاً وكثير الحدوث بالنسبة لجزيئات الكوليسترول.** إضافة لذلك، يمكن للفسفوليبيدات أن **تدور حول محورها** أو أن تميل إلى اليمين أو اليسار.

وتتعلق الحركات الانتنائية للجزيئات غير المشبعة بمرونة الارتباطات المضاعفة، إذ تزداد سيولة الغشاء بزيادة درجة عدم الإشباع، كما ترتبط أيضاً بكمية الكوليسترول، فزيادته تؤدي إلى زيادة صلابة الغشاء الخلوي.

حركة البروتينات PROTEIN MOVEMENT

أثبتت الدراسات الحديثة أن البروتينات التي تدخل في تركيب الغشاء الخلوي قابلة للحركة، ويمكن تشبيه حركة البروتينات ضمن الغشاء الخلوي بحركة جبل جليدي في المحيط. ويمكن شرح وتفسير هذه الحركة بالاعتماد على طبيعة وبنية الغشاء الخلوي، إذ افترض أن المسافة بين البروتينات الغشائية تتعلق بمجموعتها الكربوكسيلية، وتحافظ الشحنة السالبة لهذه المجموعات على مسافة معينة بين البروتينات، ويؤدي ذلك إلى توزيعها بشكل متجانس. يغير انخفاض درجة PH توزع البروتينات وتجمعها في مناطق محددة من الغشاء، وذلك نتيجة تغير مقدار الأيونات السالبة التي تمتلكها البروتينات. وعندما يحصل تلامس بين خليتين حاملتين لشحنة سالبة في منطقة التماس، فإن الشحنة السالبة تختفي من هذه النقطة بسبب هجرة وحركة الجزيئات البروتينية.

ويظهر التجارب الرائدة في توضيح حركة البروتينات الغشائية إذ تم دمج خليتين، الأولى فأرية والثانية بشرية، تعبر كل منهما عن بروتينات مختلفة. فإذا ما تمّ وسم الخلية الناتجة بأضداد ANTIBODIES مفلورة نوعية لبروتينات الفأر وبروتينات الإنسان، فإن الخلية الناتجة حديثاً تبدي تلوّناً يعكس توزع البروتينات الفأرية والبشرية بشكل مستقلّ بعضهما عن بعض. أما بعد مضيّ وقت محدّد، نلاحظ أن كلاً من البروتينات الفأرية والبشرية قد انتشرت على كامل الغشاء الخلوي للخلية المنصهرة وبشكل عشوائي، مما يدعم وجود حركة للبروتينات ضمن الغشاء.



إندماج خلية جسدية لغار و خلية جسدية لإنسان في مزرعة باستخدام فيروس سنداى

كامل مساعد .

من أهم الخواص التي يتميز بها الغشاء البلاسمي :

- اللدانة *Plasticity*: تسمح طبقة الدهن الثنائية السائلة بحدوث تبادل مستمر بين البروتينات المتجاورة الموجودة في الغشاء البلاسمي .
- تم تأكيد ذلك من خلال تجربة الدمج خلوي *Cell fusion* التي تم استعراضها
- وفي حال الخلايا المتحركة كالماكروفاج فعند وضعها على سطح مستوي فإنه يمتد منها من جهة المقدمة أقدام كاذبة تلتصق من أسفل السطح ويلى ذلك انسحاب الجسم الرئيسي للخلية إلى الأمام في اتجاه الحافة المتقدمة. وهذا ما يوحي أن المركبات للغشاء تتحرك بشكل مستقل عن البيئة المحيطة بها .
- توحى سيولة الغشاء وكأن الدهون هي عبارة عن بحر والبروتينات المنتشرة فيه هي عبارة عن قطع الجليد الطافية والموزعة فيه والقدرة على الحركة .

• علاقة الغشاء البلاسمي بالأورام الخبيثة :

- تتميز الخلايا الخبيثة بقدرتها على النمو والانقسام المستمر بدون حافز ولا تخضع للمنظمات الطبيعية للنمو والانقسام في الخلية .
- يمكن أن تكون الأورام تلقائية أو أن تكون نتيجة لعوامل ومؤثرات خارجية فيزيائية أو كيميائية أو حيوية .
- تقوم الخلايا الخبيثة بغزو الأنسجة المحيطة بها فيما يعرف بالأجتياح أو الغزو وتزداد الخطورة بوصولها إلى الجهاز الدوري أو تجايف الجسم وفي أماكن أخرى .
- تعزى قدرة الخلايا السرطانية على الانبثاث والانتشار إلى صفات تتعلق بالغشاء البلاسمي لها .
- أظهرت المقارنة بين بين خلايا سرطانية وأخرى طبيعية مزروعتان مخبريا أن الخلايا الطبيعية المتناثرة تنقسم لتشكل طبقة واحدة من الخلايا المترابطة المتجاورة مشكلة سطح يشبه الرصيف لعدم قدرتها على الزحف فوق بعضها وكلما تزاومت وازداد التلامس والتلاصق بين أسطح الخلايا يؤدي ذلك إلى تناقص قدرة الخلايا المتلاصقة على الحركة . وهكذا تصل الخلايا إلى حد الاقتران وعندها تتوقف عن الحركة والانقسام ويطلق على نظام الخلايا هذه بحالة الكبح بالتلامس Contact inhibition .

- تفقد الخلايا السرطانية القدرة على الكبح بالتلامس وعند وصول هذه الخلايا الى مرحلة الأقران لتزاحمها وزيادة العدد فإنها لا تتوقف عن الانقسام والحركة مما يؤدي إلى زحف الخلايا فوق بعضها والتداخل بين حدودها بحيث يتكون عدة طبقات متداخلة فق بعضها ويرجع السبب إلى **فقدان الخلايا السرطانية لخاصة الكبح بالتلامس** والذي ينتج عن فشلها في استقبال إشارات الكبح بالتلامس أو في إرسالها .

- من الفروق بين الخلايا السرطانية والطبيعية على سبيل المثال فقد تم عزل من الغشاء البلاسمي للخلايا الطبيعية بروتين عال الوزن الجزيئي وهو الغليكوبروتين العالي الوزن الجزيئي (٢٥٠٠٠٠ دالتون) ويدعى بالبروتين الكبير ويطلق عليه **lets p** وقد لوحظ زيادته بكثرة على سطح الغشاء البلاسمي للخلايا المكبوحة بالتلامس بينما ينعدم وجوده على سطح الخلايا السرطانية .

- كما أمكن تمييز بروتين على سطح الغشاء البلاسمي للخلايا السرطانية يدعى بالبروتيز **protease** وهو أنزيم معتدل في حين أنه لم يلاحظ على سطح الخلايا الطبيعية .

صفات أغشية الخلايا السرطانية MEMBRANES OF CANCER CELLS

يخضع الغشاء الخلوي في الخلايا الورمية لعدة **تغيرات بنيوية**، سواءً من مكوناته الليبيدية أم البروتينية، والتي قد تنعكس في **تبدل بعض خصائصه**. ونذكر من بين هذه التبدلات:

١- **زيادة سيولة الغشاء MEMBRANE FLUIDITY**: وتنتج عن زيادة عدم الإشباع في الحموض الدسمة للشحوم الفوسفورية، وقلة كمية الكولسترول الغشائي.

٢- **زيادة شحنة السطح الخلوي MEMBRANE CHARGE**: وتعود إلى زيادة كمية الحموض المسؤولة عن **الشحنة السالبة** الإجمالية على سطح الخلية.

٣- **تغير مستضدات الغشاء MEMBRANE ANTIGENICITY**: إذ يلاحظ **ظهور** مستضدات ANTIGENS جديدة و**اختفاء** مستضدات كانت موجودة، وكذلك **ظهور مستضدات جنينية**.

٤- **اختلال آليات الالتصاق الخلوي CELL ADHESION**: إذ يحصل تغير في التصاق الخلايا بعضها مع بعض أو مع ألياف المترسب خارج الخلوي، مما **يسهل هجرة** الخلايا من النسيج وانتقالها إلى نسيج أخرى تصبح الخلايا الورمية التي فقدت إمكانية الالتصاق قادرة على الانتشار في مناطق مختلفة من الجسم، إلا أن هذا الانتشار يتم وفق نظام محدد وبتجاه أنسجة وأعضاء معينة تختلف باختلاف الخلايا الورمية، ونوع ودرجة الورم. وعلى سبيل المثال، نذكر أن **خلايا سرطان الثدي تميل إلى الانتقال إلى العظام** بشكل خاص. ويعتمد انتشار الخلايا السرطانية على نموذج اللكتينات (بروتينات مرتبطة بالسكريات) الموجودة على السطح، إذ تحمل الخلايا السرطانية لكتينات تختلف عن لكتينات الخلايا الطبيعية.

• علاقة الغشاء البلاسمي بالتخدير الموضعي والمسكنات :

- يعتقد أن معظم عقاقير التخدير الموضعي وكذلك مسكنات الألم تحدث مفعولها نتيجة للتفاعل مع دهون الغشاء البلاسمي للوحدات العصبية الحسية، حيث تندمج معه بحيث تمنع انتقال الدافع العصبي فيقل الإحساس بالألم .

وقد وجد أن فعالية هذه المسكنات تزداد كلما زادت قدرتها على الذوبان في الدهون ويفترض أن التأثير التخديري يتم عن طريق تشويبه مؤقت في تنظيم الغشاء البلاسمي بطريقة غير محددة .

وظيفة الغشاء الخلوي والنقل على طرفي الغشاء

TRANSPORT ACROSS MEMBRANES

النقل عبر الغشاء Transmembrane Transport

النقل المنفعل Passive Transport

الانتشار البسيط Simple Diffusion

التحال Osmosis

الانتشار الميسر Facilitated Diffusion

النقل الفعّال Active Transport

النقل عبر الغشاء:

TRANSPORT ACROSS MEMBRANES

من الوظائف الرئيسية للغشاء الخلوي هي **تنظيم عبور** الأيونات والجزيئات المنحلة وغير المنحلة من وإلى داخل الخلية، بحيث يؤمن للخلية **حمايتها** من التبدلات الحاصلة في محيطها، وفي نفس الوقت يؤمن كل **مستلزمات العمليات الاستقلابية** داخل الخلية كما **يطرح الفضلات** الناتجة عن تلك العمليات التي قد تكون سامة إذا ما تراكمت داخل الخلية. ومن المهم أن نشير بدايةً إلى **التباين في توزع** أهم الأيونات والجزيئات الأخرى بين داخل الخلية وخارجها .

ويكون دور المكونات الشحمية أساسياً في تكوين الطبقة الثنائية الكارهة للماء التي تشكل حاجزاً انتقائياً لمرور العديد جداً من المواد المنحلة والأيونات، ولا سيما أن **بعض الأيونات تختلف بتركيزها بأكثر من ٢٠ ألف ضعف**، كما هي الحال بالنسبة لأيونات الكالسيوم، ومن ثمّ كان لا بدّ من وجود آلية دقيقة تمنع العبور العشوائي للأيونات إلى داخل العصارة الخلوية. إضافةً لذلك، تؤمن المكونات الشحمية قاعدة ارتكاز أساسية للبروتينات الغشائية، إضافةً لدور العديد من المكونات الشحمية في تنبغ الإشارة الخلوية **SIGNAL TRANSDUCTION**.

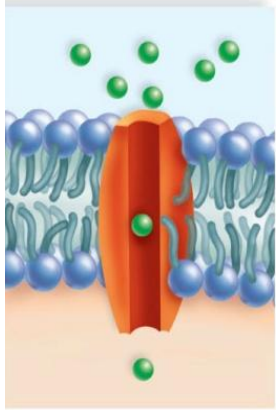
العناصر الكيميائية المشكّلة لكتلة الكائن الحي

التركيز داخل الخلية	التركيز خارج الخلية	الشاردة أو المركب
10 mEq/L	142 mEq/L	Na⁺
140 mEq/L	4 mEq/L	K⁺
0.0001 mEq/L	2.4 mEq/L	Ca⁺⁺
58 mEq/L	1.2 mEq/L	Mg⁺⁺
4 mEq/L	103 mEq/L	Cl⁻
10 mEq/L	28 mEq/L	HCO₃⁻
75 mEq/L	4 mEq/L	الفوسفات
0.20 mg/dl	90 mg/dl	الغلوكوز
200 mg/dl	30 mg/dl	الحموض الأمينية
16 g/dl	2 g/dl	البروتينات
7.0	7.4	pH

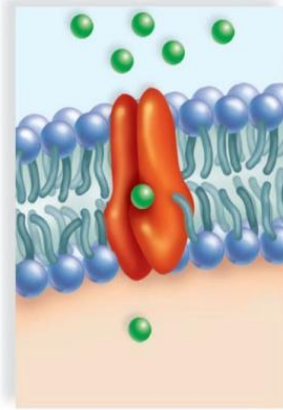
أما البروتينات الغشائية فيمكن تصنيفها بحسب وظائفها الى :

- ١- بروتينات القنوات الأيونية CHANNEL PROTEINS: التي تسمح للجزيئات بالعبور بين طرفي الغشاء. ومثالها قنوات البروتون H^+ في الغشاء الداخلي للمتوكوندرى.
- ٢- البروتينات الحاملة CARRIER PROTEINS: ترتبط أولاً بالمادة المنقولة وتساعد على عبور الغشاء. ومثالها البروتين الحامل لأيونات الصوديوم والبوتاسيوم في الخلايا العصبية.
- ٣- بروتينات التعرف الخلوي CELL RECOGNITION PROTEINS: وتؤدي دوراً مهماً في تمييز خلايا الجسم عن خلايا الكائنات الدقيقة التي تغزو الجسم، وتشكل المستضدات التي تفعّل جملة المناعة في الجسم.
- ٤- المستقبلات البروتينية RECEPTOR PROTEINS: تمتلك مواقع ارتباط BINDING SITES لجزيئات نوعية أو ما يدعى بالليجندات LIGANDS. وعند ارتباط المستقبل بالليجين يتغير شكل المستقبل ويؤدي إلى استجابة خلوية.
- ٥- بروتينات تعمل كإنزيمات ENZYME PROTEINS: لديها القدرة على تحفيز بعض التفاعلات الكيميائية.
- ٦- بروتينات الالتصاق: تساعد في التواصل فيما بين الخلايا أو بين الخلايا وبيئتها المحيطة. ويبين الشكل التالي التباين الجوهري بين القنوات الأيونية وبين البروتينات الحاملة إذ لا يطرأ أي تغيير على شكل القنوات الأيونية، باستثناء فتحها وإغلاقها، بينما يكون التغيير واضحاً بالنسبة للبروتينات الحاملة.

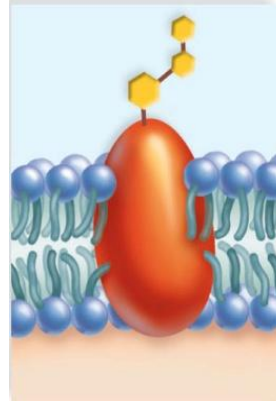
بعض الوظائف المختلفة للبروتينات الغشائية



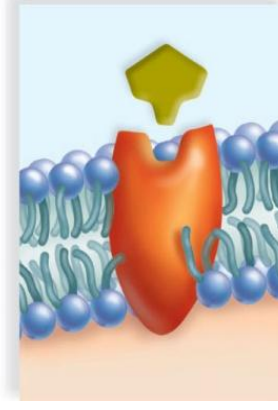
Channel Protein



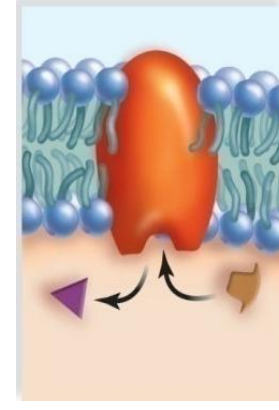
Carrier Protein



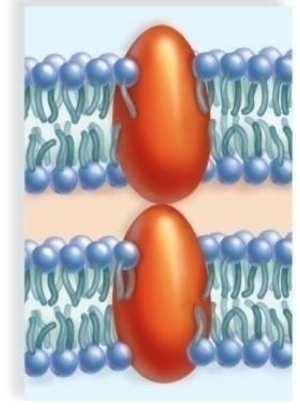
Cell Recognition Protein



Receptor Protein



Enzymatic Protein

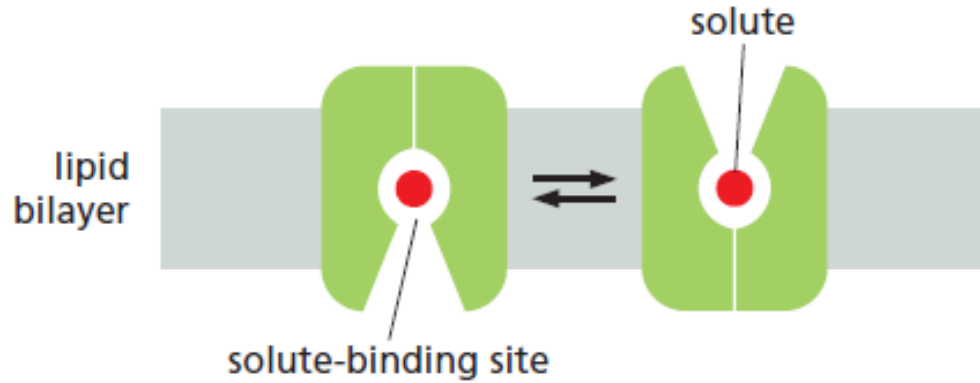


Junction Protein

- من اليسار إلى اليمين: بروتين قنوي، بروتين ناقل، بروتين يُعرّف الخلية، مستقبل بروتيني، بروتين ذو فعالية إنزيمية، وبروتين يستخدم في الالتصاق والتواصل الخلوي

يمكن أن نميّز شكلين رئيسيين لنقل المواد من وإلى الخلية هما النقل عبر الغشاء **TRANSMEMBRANE TRANSPORT** والنقل الخلوي **CELLULAR TRANSPORT**، ويمكن التفريق بينهما على أساس قيام المكونات الغشائية الشحمية والبروتينية بالنقل في النوع الأول إضافةً إلى اعتماد هذا النوع من النقل على تدرج تراكيز المادة المنقولة. بينما يترافق النوع الثاني بتغيرات مهمة كبيرة ومرئية في شكل الغشاء الخلوي دون أن يرتبط النقل بتدرج التراكيز.

يوضح الفرق بين النقل عبر البروتينات الحاملة Carrier (أو الناقل) (Transporter)



(A) TRANSPORTER



(B) CHANNEL PROTEIN

النقل عبر الغشاء TRANSMEMBRANE TRANSPORT

يمكن لأي من الجزيئات الانتقال عبر الغشاء الخلوي بإحدى طريقتين :
النقل السلبي PASSIVE TRANSPORT: يتميز بانتقال الجزيئات تبعاً لتدرج تراكيزها، أي من التركيز الأعلى إلى التركيز الأدنى، ولا يتطلب هذا النوع من النقل استهلاكاً للطاقة.
النقل الفعال ACTIVE TRANSPORT: يتميز بانتقال الجزيئات بعكس تدرج تراكيزها، أي من التركيز الأدنى إلى الأعلى، وهو بذلك يتطلب طاقة على شكل جزيئات الـ ATP.

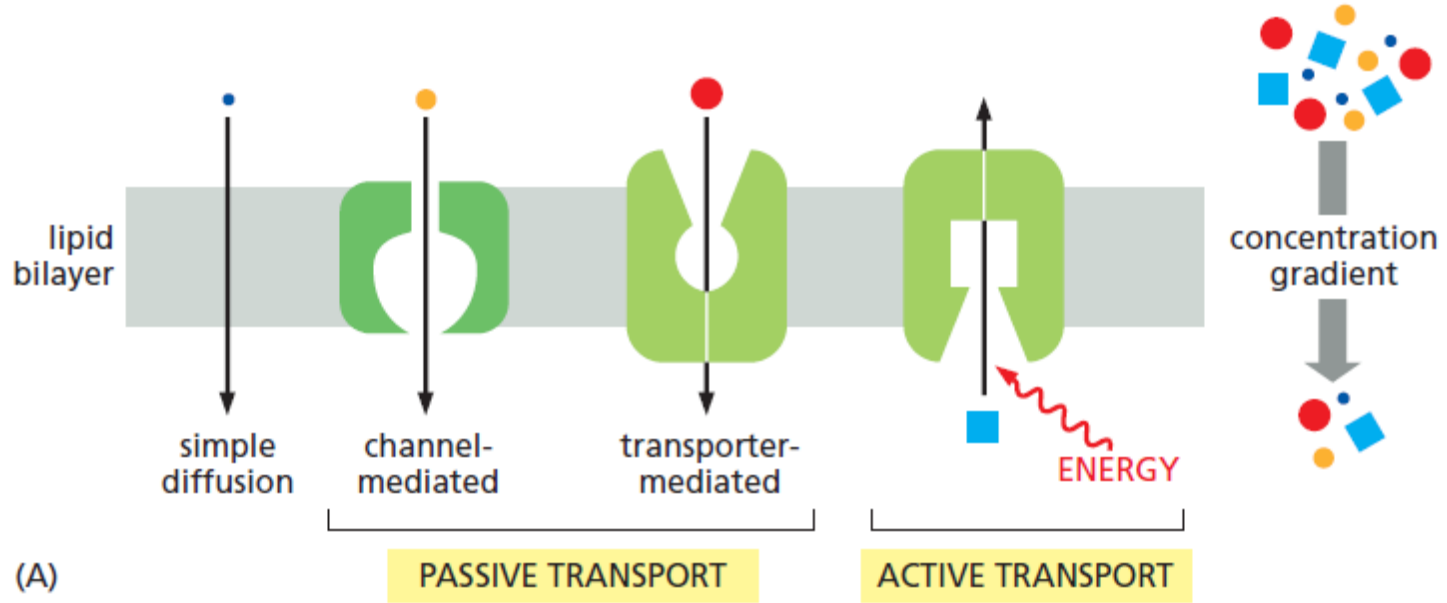
- النقل السلبي PASSIVE TRANSPORT:

نمىز منها عدة انماط هي: (١) الانتشار البسيط، (٢) التحال، (٣) النقل الميسر.

- لانتشار البسيط SIMPLE DIFFUSION:

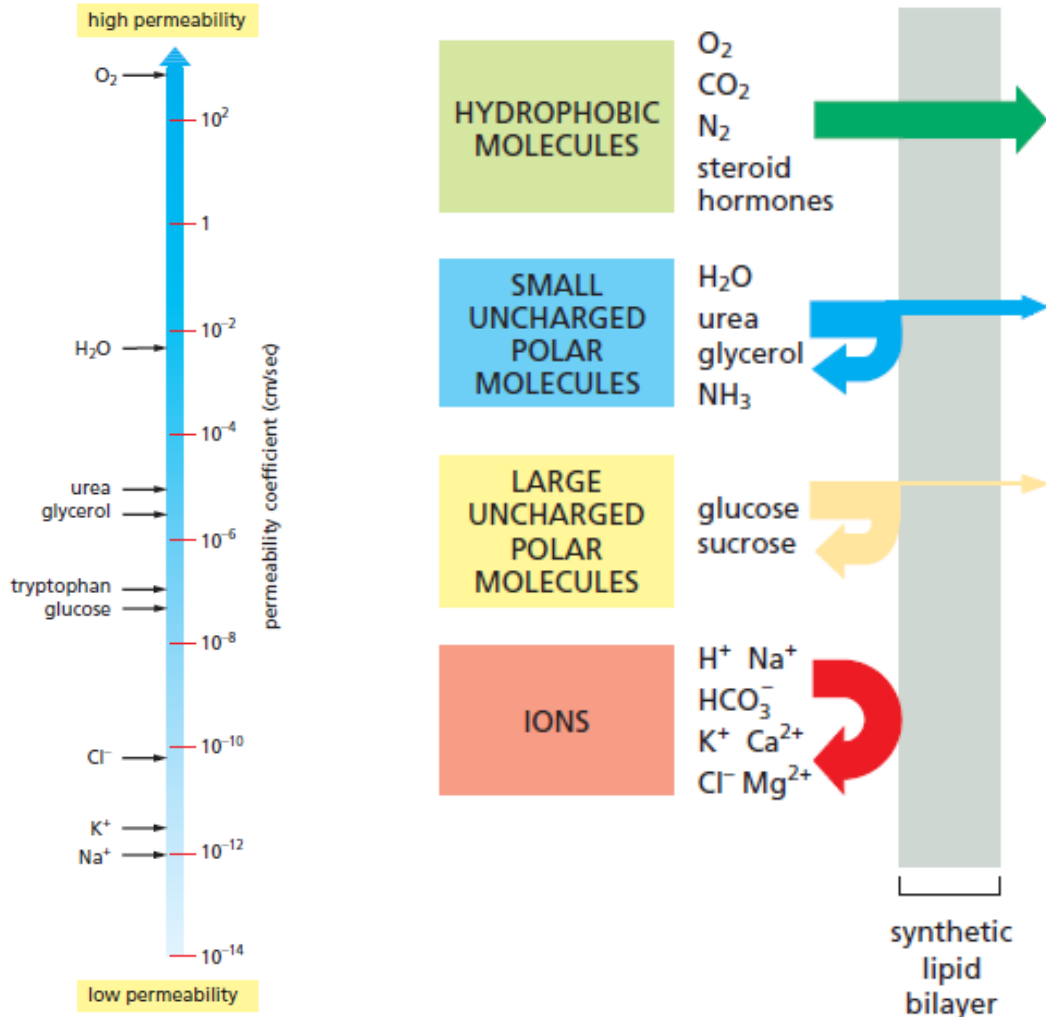
يتحدّد مرور الجزيئات مباشرة عبر الطبقة الثنائية للغشاء الخلوي، **ودون الاستعانة بنواقل بروتينية**، بكونها إما كارهة للماء (غير قطبية) وإما قطبية مع مراعاة شرطين أساسيين: (١) أن تكون الجزيئات القطبية المنقولة **صغيرة الحجم**، و (٢) أن تكون **غير متشردة** وألا تحمل شحنة .

الفرق بين الانتشار البسيط والنقل السلبي والفعال



• ويوضح الفرق بين الانتشار البسيط، والذي يكون مباشرة عبر الطبقة الثنائية للغشاء، والنقل السلبي، والذي يكون تبعاً لتدرج التراكيز من الأعلى إلى الأدنى إما عبر القنوات الشاردية او عبر البروتينات الحاملة، والنقل الفعال الذي يكون بعكس لتدرج التراكيز ويتطلب طاقة.

النقل بالانتشار البسيط للجزيئات مختلفة القطبية



ويوضح الإمكانية الكبيرة للنقل بالانتشار البسيط للجزيئات الكارهة للماء، والمتوسطة للجزيئات القطبية صغيرة الحجم وغير المتشردة، والصغيرة للجزيئات القطبية كبيرة الحجم، بينما لا تتمكن الشوارد من اختراق طبقتي الغشاء (يمين). كما يظهر الشكل طيف لثابتة نفوذية الجزيئات عبر الغشاء والتي تكون أعلى ما يمكن للغازات كالأكسجين (أكبر من 10²) وأخفض ما يمكن بالنسبة لشوارد الصوديوم (حوالي 10⁻¹⁰) (يسار).

التحال OSMOSIS :

يعدّ التحال، وهو انتقال جزيئات الماء من التركيز **الملحي الأدنى إلى التركيز الملحي الأعلى** عبر الغشاء نصف النفوذ، أحد أشكال **الانتشار البسيط**. فالماء ينتقل من التركيز الأدنى للمادة المنحلّة، أي حيث يكون عدد جزيئات الماء أكبر، إلى التركيز الأعلى من المادة المنحلّة، أي حيث يكون عدد جزيئات الماء أقل، إلى أن يحصل توازن في تركيز المادة المنحلّة، ومن ثمّ عدد جزيئات الماء على طرفي الغشاء. وهكذا، لا يتطلّب انتقال الماء أي صرف للطاقة. وإذا ما وضعنا خلية ما في وسط مائي نكون أمام احتمالات ثلاثة :

١- أن يكون تركيز المواد المنحلّة في الوسط مساوياً لتركيزها داخل الخلية، ونسمّي هذا الوسط **بمتساوي الضغط الحلوي ISOTONIC SOLUTION**، ولا ينجم عن ذلك أي تغيير في شكل الخلية.

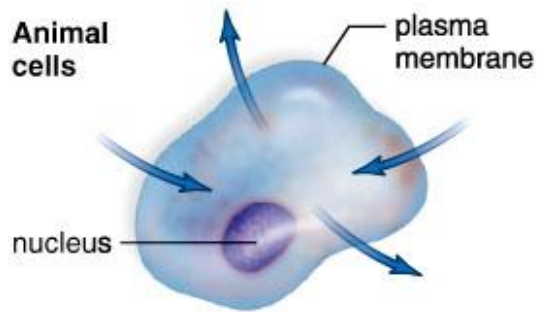
٢- أن يكون **تركيز المواد المنحلّة** في الوسط أكبر من تركيزها داخل الخلية، ونسمي الوسط هنا **بمرتفع الضغط الحلوي HYPERTONIC SOLUTION**، وينجم عن ذلك انتقال الماء من داخل الخلية إلى خارجها مما يؤدي إلى انكماش العصارة الخلوية، ويبدو ذلك جلياً في الخلايا الحيوانية بشكل **انكماش** كامل الخلية وتجعدّ غشائها، وأقل وضوحاً في الخلايا النباتية لوجود الجدار الخلوي .

٣- أن يكون تركيز المواد المنحلّة في الوسط أخفض من تركيزها داخل الخلية، ونسمّي هذا الوسط **بالمخفض الضغط الحلوي**، وينجم عن ذلك انتقال الماء من خارج الخلية إلى داخلها، مما قد يتسبب في انتباج ومن ثم انفجار الخلية الحيوانية نتيجة زيادة الضغط في داخلها أو انتباج الخلية النباتية.

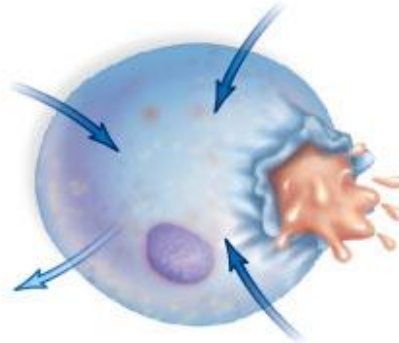
ولا بدّ من الإشارة، وبشكل مستقل عن التحال الذي يتم بانتقال الماء البطيء بالانتشار البسيط، إلى وجود **قنوات للماء WATER CHANNELS** تدعى الأكوابورينات AQUAPORINS التي تزيد بشكل كبير من إمكانية عبور الماء لغشاء الخلية. وتكون هذه القنوات المائية **نفوذة للماء وغير نفوذة للأيونات** وتوجد بكثرة في الخلايا الحيوانية التي يتضمّن عملها نقل كميات كبيرة من الماء كالخلايا الظهارية في النسيج الكلوي وخلايا الغدد العرقية.

وأخيراً، نذكر أن للتحال **تطبيقات غذائية منزلية!** فيمكن حفظ اللحوم المملّحة بتمرير كميات من الملح على سطح قطعة اللحم، بحيث يؤدي ذلك إلى خروج الماء من خلايا اللحم وتأخير نمو الجراثيم والفطريات التي تحتاج إلى الماء لتنمو في النسيج الحيوانية. كما نستطيع **الحفاظ على المخلّلات والمربّيات** باستخدام تراكيز

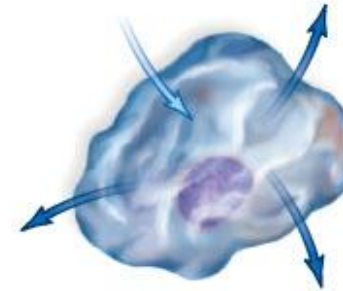
يبين تأثير ثلاثة محاليل الأول متساوي الضغط الحلوي Isotonic والثاني منخفض الضغط الحلوي Hypotonic والثالث مرتفع الضغط الحلوي Hypertonic على كل من الخليتين الحيوانية والنباتية.



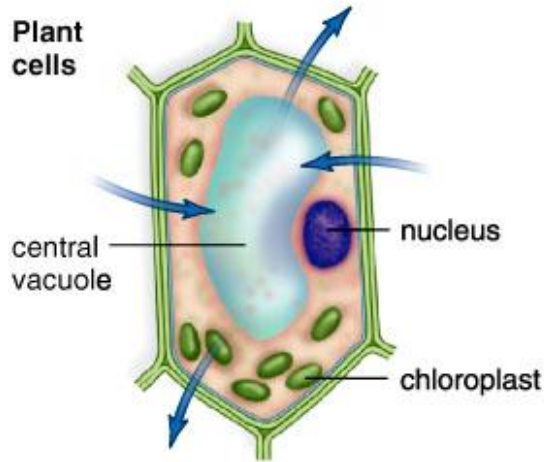
In an isotonic solution, there is no net movement of water.



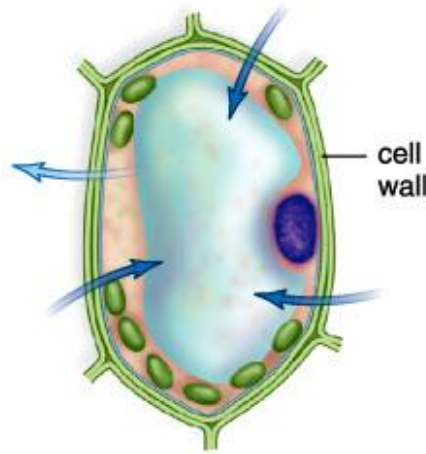
In a hypotonic solution, water enters the cell, which may burst (lysis).



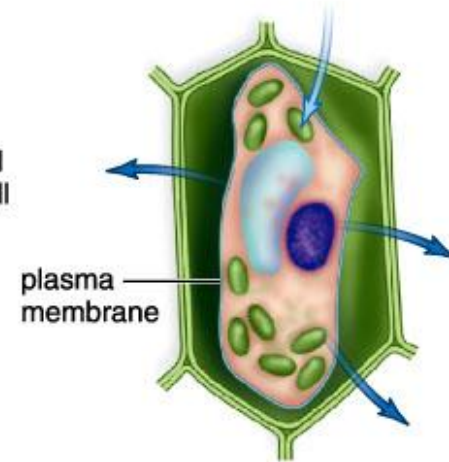
In a hypertonic solution, water leaves the cell, which shrivels (crenation).



In an isotonic solution, there is no net movement of water.



In a hypotonic solution, vacuoles fill with water, turgor pressure develops, and chloroplasts are seen next to the cell wall.



In a hypertonic solution, vacuoles lose water, the cytoplasm shrinks (plasmolysis), and chloroplasts are seen in the center of the cell.

- الانتشار الميسر FACILITATED DIFFUSION:

يتطلب الانتشار الميسر بروتينات حاملة تنقل الجزيئات بعد ارتباطها بها من التركيز الأعلى إلى التركيز الأدنى لتلك الجزيئات، وهي بذلك لا تتطلب طاقة لعملها. يتم هذا النمط من النقل عن طريق بروتينات ناقلة محبة للماء ذات شكل فراغي محدد يتكامل مع مادة معينة تمثل المادة المنقولة.

يُنقل بهذه الطريقة الغلوكوز إلى داخل الكريات الحمر بسرعة تتجاوز مئات المرات سرعة نقل السكاكر الأحادية الأخرى بسبب الانتشار الميسر.

ويمكن تصنيف البروتينات الناقلة والمشاركة في النقل الميسر إلى:

١- بروتينات وحيدة المسام: تمرر مادة واحدة من جانب إلى آخر، ومثالها نقل الغلوكوز.

٢- بروتينات مسامية متبادلة، تشرف على النقل إمّا:

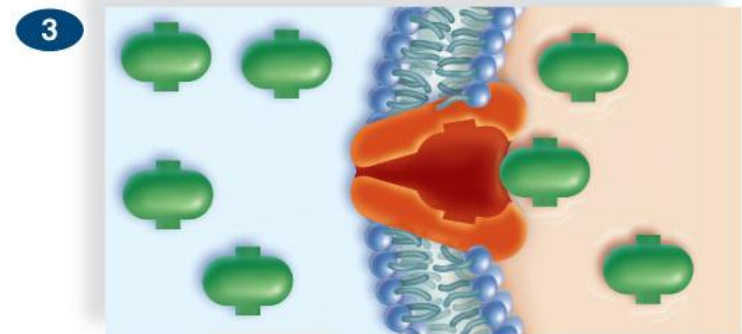
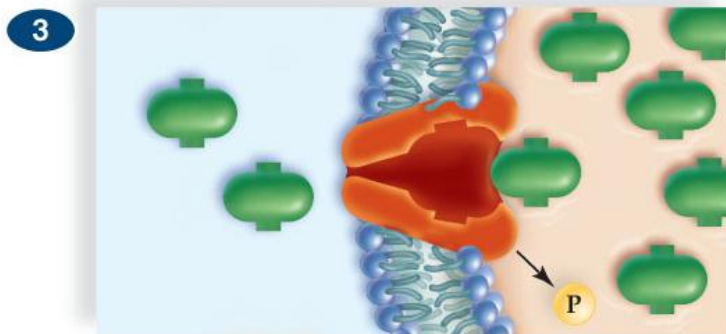
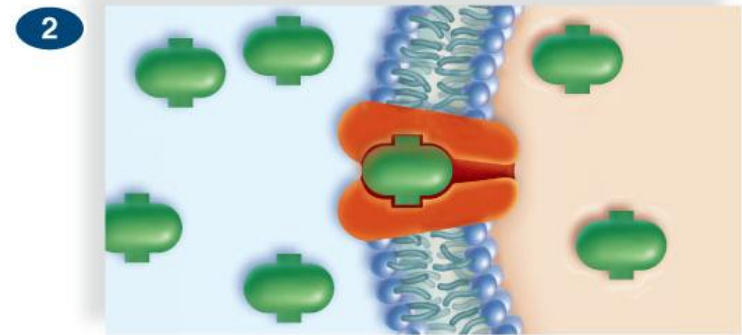
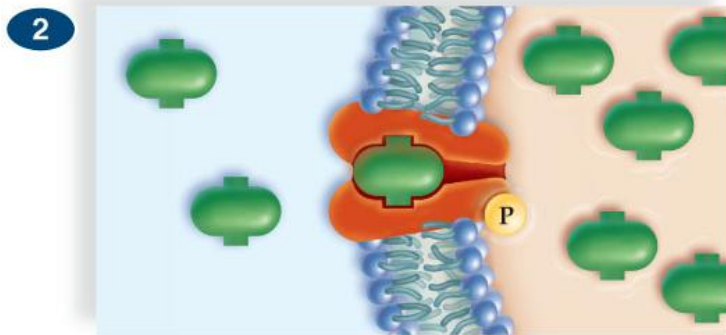
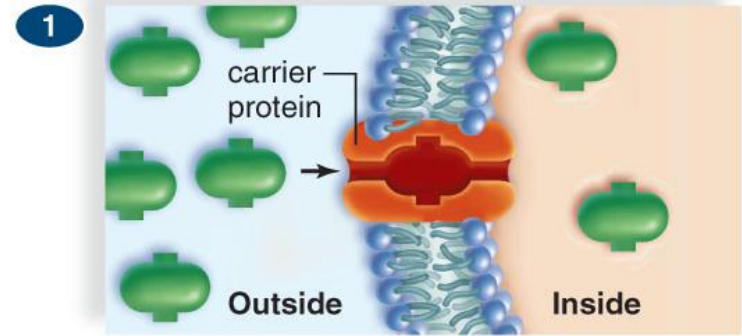
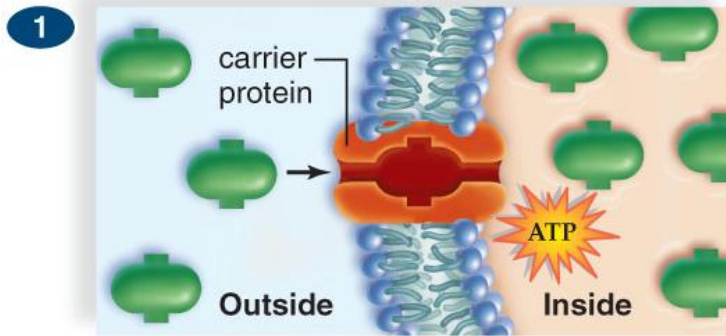
- باتجاه واحد SYMPORT، إذ يرتبط نقل مادة ما بنقل مادة أخرى بالاتجاه نفسه. يظهر هذا الفعل واضحاً في الخلايا الظهارية المعوية، وخلايا الأنبوب الملتف في الكلية التي تمتص الغلوكوز من لمعة الأنبوب بعكس تدرج تركيز السكر فيتمّ النقل مع الصوديوم ذي التركيز العالي خارج الخلية.

-باتجاهين متعاكسين ANTIPOINT، وفيها يتم نقل مادتين مختلفتين بأن واحد ولكن باتجاهين متعاكسين.

وكمثال يوجد في الغشاء الخلوي للكريات الحمر، بروتين ناقل ميسر تضادي يعمل لتبادل أيونة الكلور مع جزيئة غاز ثاني أوكسيد الكربون .

٣- قنوات أيونية ION CHANNELS: وهي قنوات بروتينية داخل غشائية خاصة بالنقل الأيوني، تتكوّن من بروتين غشائي يشكل ما يشبه المسام. وتكون القناة من الجهة الداخلية مفتوحة أو مغلقة بوساطة التجمعات البروتينية، كما يتغير قطر القناة في نقطة معينة منها. ومن القنوات الأيونية المعروفة جداً قناة البوتاسيوم المفتوحة دائماً والموجودة في أغشية جميع الخلايا، الأمر الذي يفسر الناقلية الكبيرة لأيونات البوتاسيوم عبر الأغشية الخلوية.

مقارنة النقل الميسر (المنفعل) (يمين) غير المتطلب للطاقة وعبر مدرّج التراكيز، بالنقل الفعّال (يسار) المتطلب للطاقة والمعكس لمدرّج التراكيز

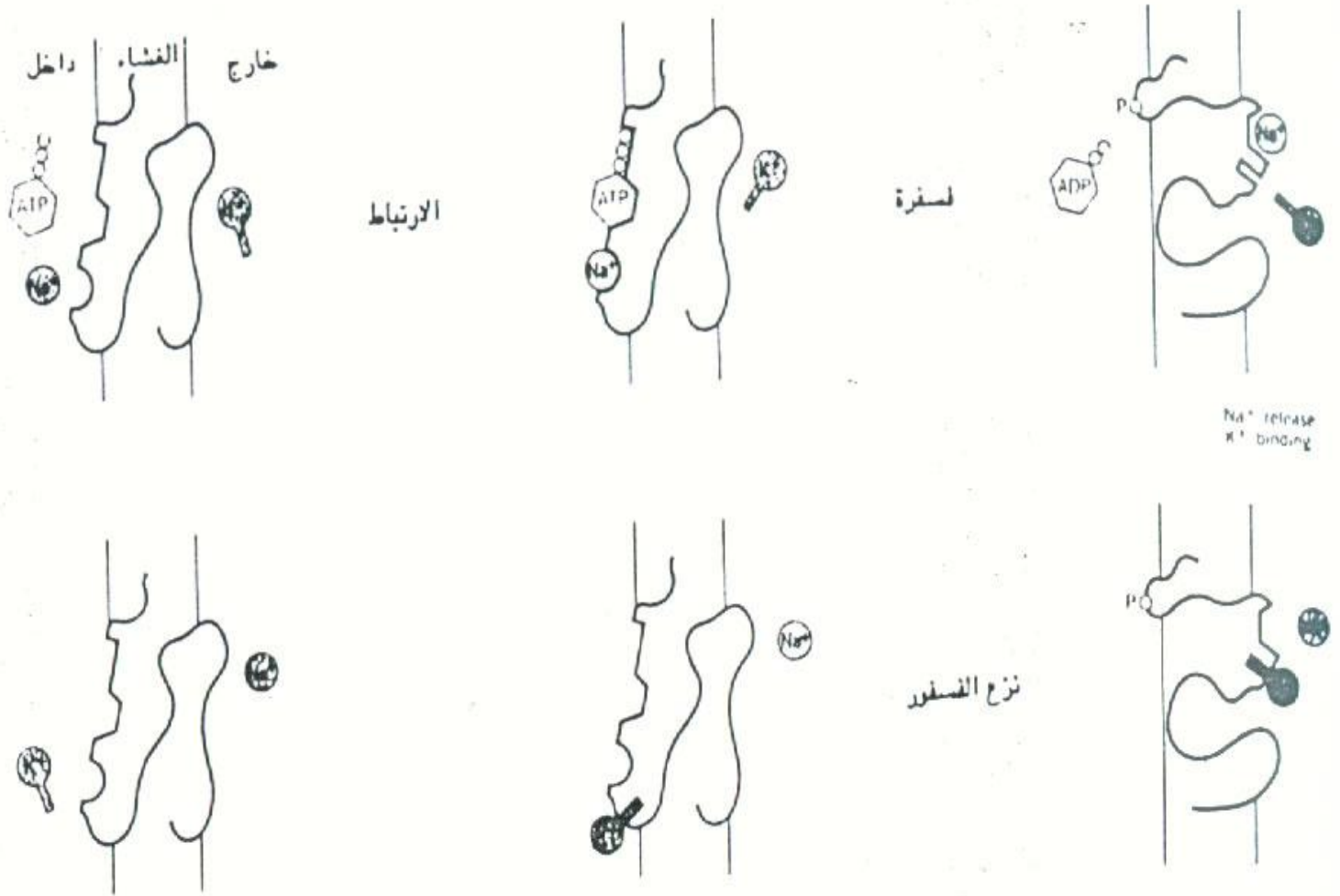


النقل الفعّال (النشط) :ACTIVE TRANSPORT

يتم النقل الفعّال بعكس منحدر التركيز وباستهلاك الطاقة الناتجة عن حلمهة الـ ATP. ويعتمد هذا النقل على وجود بروتينات ناقلة تم اكتشافها عند نقل السكاكر الثنائية في الجراثيم.

النقل الفعّال للأيونات: لتوضيح هذا النموذج من النقل ندرس حركة أيونات الصوديوم والبوتاسيوم، إذ تتوزع هذه الأيونات داخل وخارج الخلايا، إلا أن توزعها متعاكس إذ يوجد البوتاسيوم بتركيز مرتفع داخل الخلية بينما يوجد الصوديوم بتركيز منخفض داخلها وبتركيز عالٍ خارجها. يتم في جميع الخلايا نقل فعّال لأيونات الصوديوم والبوتاسيوم وبصورة مستمرة عبر ما يسمى مضخة الصوديوم/بوتاسيوم SODIUM POTASSIUM PUMP.

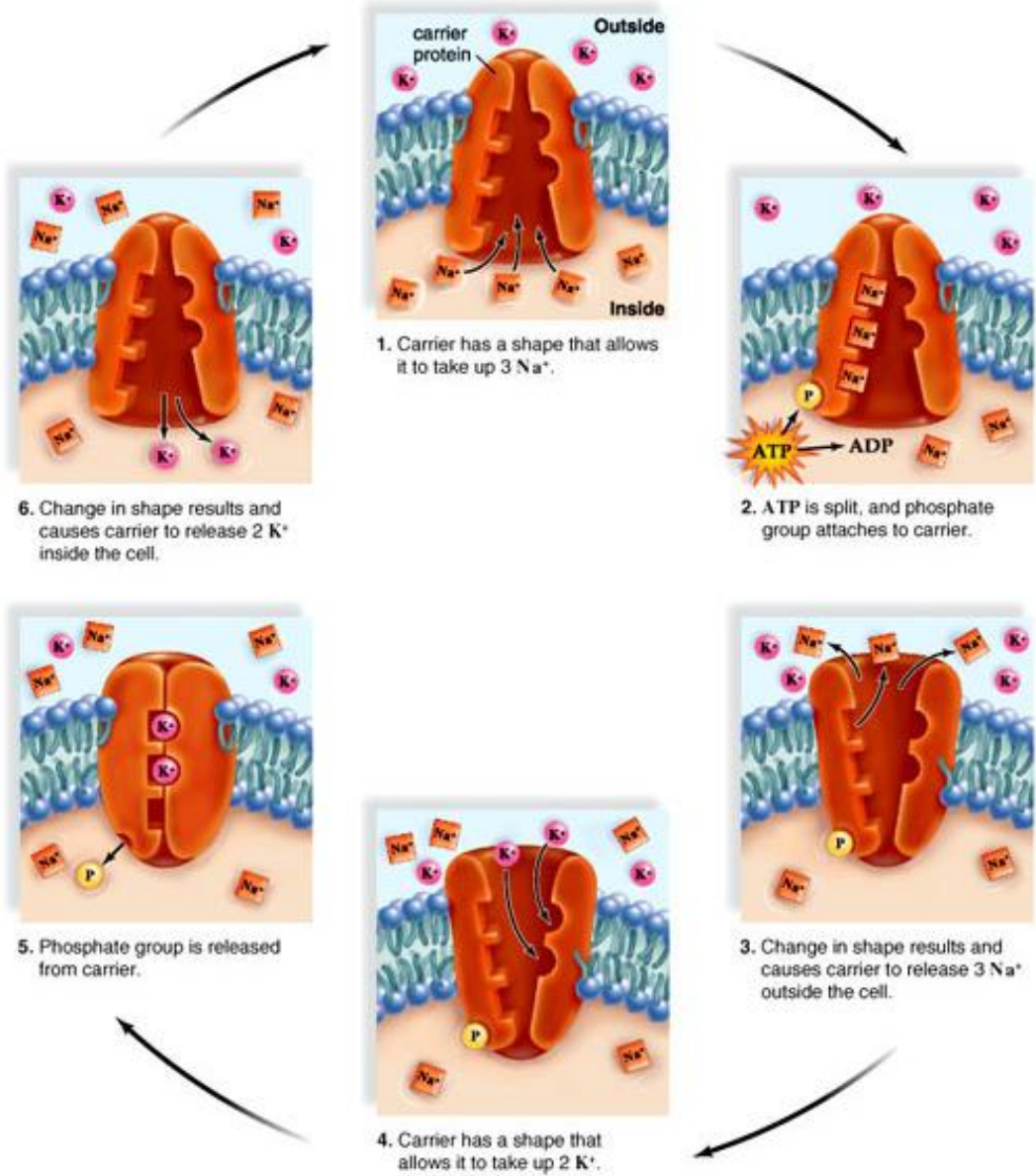
وتحمل هذه المضخة عند عملها ثلاث أيونات من الصوديوم إلى خارج الخلية وأيونتي بوتاسيوم إلى داخلها، ويعتبر التحكم بحجم الخلايا من أهم وظائف هذه المضخة، فبدونها تنتج الخلايا وتتفجر، كما تثبت هذه المضخة كمون الاسترخاء RELAXING POTENTIAL في الخلايا العصبية وتُجنبها التنبية.



شكل تخطيطي للخطوات التي تحدث أثناء عمل مضخة الصوديوم / البوتاسيوم

ATP ase

مضخة الصوديوم البوتاسيوم في النسيج العصبي



ويبين عمل مضخة الصوديوم البوتاسيوم في النسيج العصبي بعد إزالة تنبيه الغشاء وانتهاء كمن العمل. يترافق مرور السيالة العصبية بدخول الصوديوم إلى الخلية وخروج البوتاسيوم منها. وتعمل مضخة الصوديوم/بوتاسيوم على إعادة 3 شوارد صوديوم إلى خارج الخلية (بعكس مدرج التراكيز لشوارد الصوديوم) وإدخال شاردتي بوتاسيوم إلى داخل الخلية (أيضاً بعكس مدرج تراكيز شوارد البوتاسيوم). تصرف المضخة لعملها كمية من الطاقة على شكل ATP والضرورية للمساهمة في تغير شكل المضخة، والذي يتراوح بين الشكل الرابط للصوديوم والمفتوح إلى الوجه السيتوبلازمي للغشاء، وبين الشكل الرابط للبوتاسيوم والمفتوح إلى خارج الخلية.

وظيفة الغشاء الخلوي والنقل على طرفي الغشاء

TRANSPORT ACROSS MEMBRANES

النقل الخلوي Cellular Transport

الادخال Endocytosis

البلعمة Phagocytosis

الايخراج Exocytosis

-النقل الخلوي

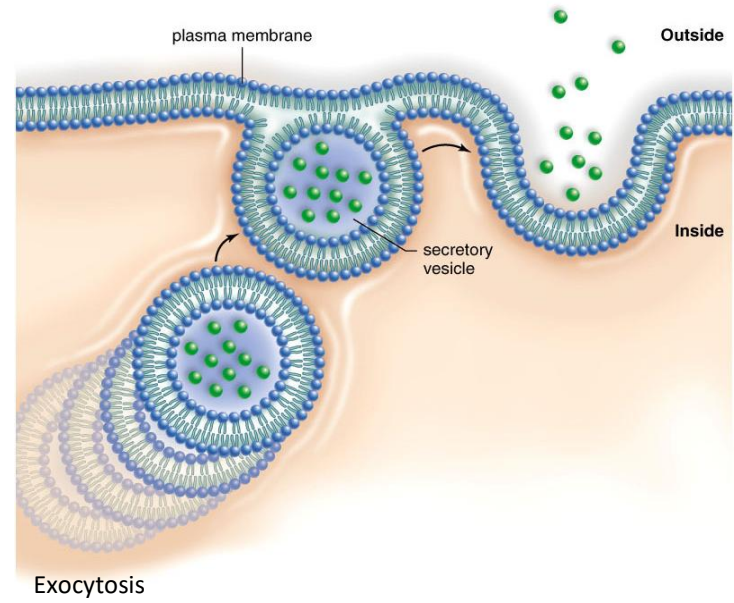
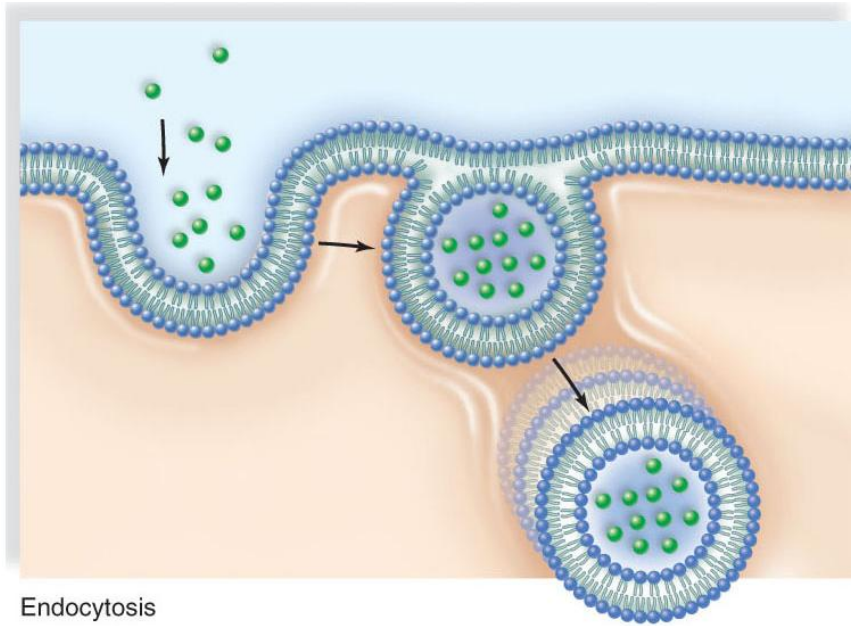
يتمثل النقل الخلوي **بدخول مواد** أو عضيات مجهرية إلى داخل الخلية بفضل **حركات محددة تتم في الغشاء الخلوي** مؤدية إلى تشكيل فجوات أو حويصلات

تحتوي المواد المطلوب نقلها.

ويمكن هنا تمييز نموذجين من النقل حسب اتجاه حركة المواد المنقولة:

الإدخال **ENDOCYTOSIS** والاعراج **EXOCYTOSIS**.

مقارنة بين الإدخال والإخراج الخلوي



• البلعمة Phagocytosis :

• - أمكن التحقق من حدوث ظاهرة البلعمة في أنواع كثيرة من الخلايا والأنسجة .ففي الكائنات وحيدة الخلية Protozoa مثل الأميبات تحدث البلعمة كجزء من النشاط العادي للخلية .

• وفي الثدييات تسير **الخلايا البلعمية Phagocytes** مع دوران الدم والجهاز اللمفاوي في جسم الإنسان ،كما تتوزع في أماكن ثابتة في كثير من الأعضاء وأنسجة الجسم - ومن أهم أنواع الخلايا البلعمية وأكثرها انتشارا الخلية البلعمية الوحيدة النواة والتي تعرف عادة بالخلية البلعمية الكبيرة Macrophage .

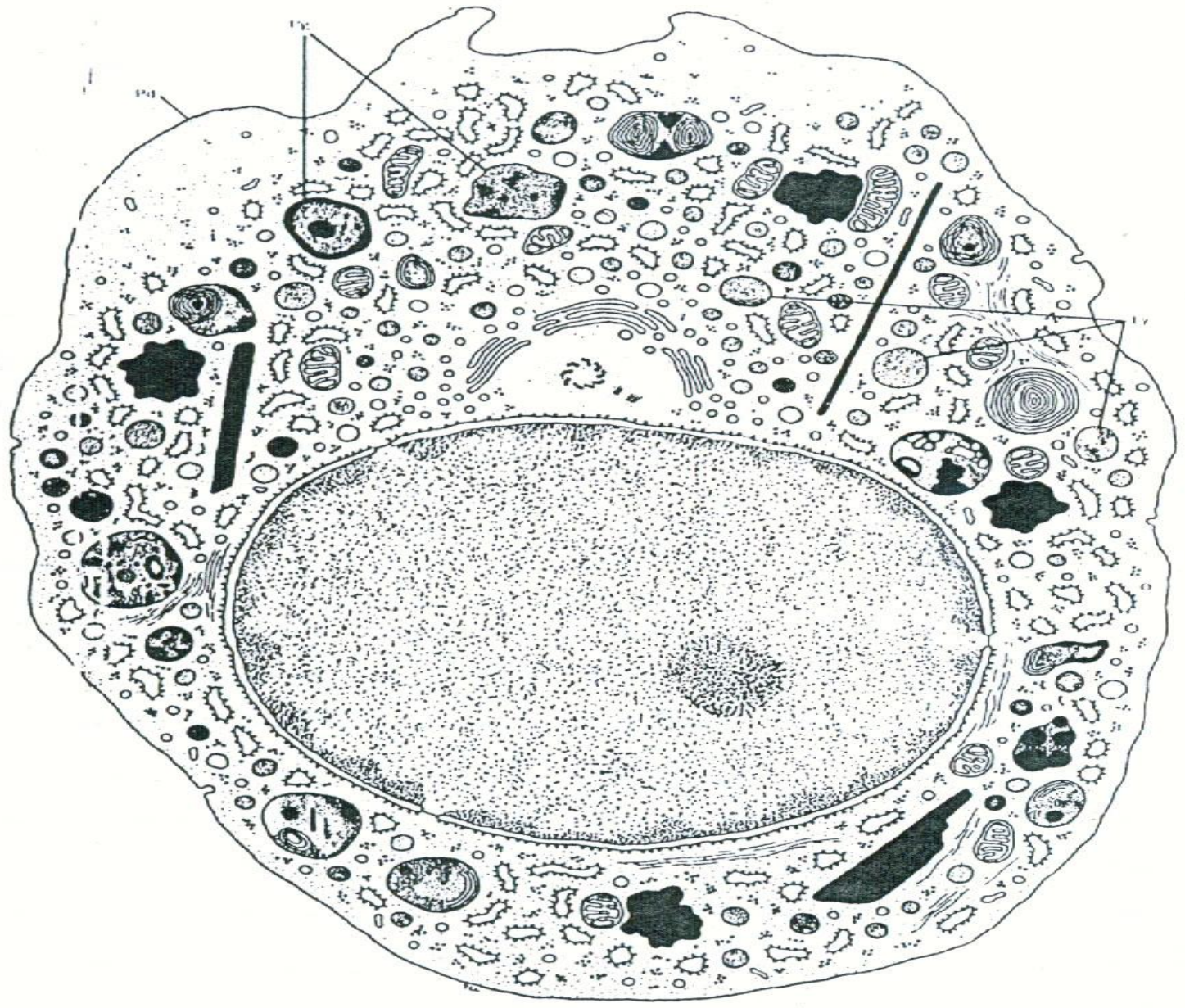
• تنتشر الماكروفاج في جميع أنسجة وأعضاء الجسم خاصة في الكبد حيث يوجد أعلى تركيز من هذه الخلايا .والتي تعمل على تخلص وتنقية الدم من المواد الغريبة التي قد تصل إلى الجهاز الدوري في أي نقطة سابقة للكبد .كما توجد هذه الخلايا في الطحال والعقد اللمفاوية ونخاع العظم وغيرها من الأنسجة حيث تقوم بعملية البلعمة لأي جسم غريب ضار بالجسم مثل :الجراثيم والفطريات والبروتوزوا وكذلك الكريات الحمراء وغيرها من الأجسام الغريبة .

- تتميز الماكروفاج باحتوائها على عدد كبير من **الليسوسومات** (الجسيمات الحالة) و**الفجوات الغذائية** في مراحل مختلفة من الهضم كما يتميز الغشاء البلاسمي لها **بالمرونة التامة** - وهناك نوع آخر من خلايا الدم البيضاء ذات النواة المتعددة الأشكال. ويطلق على نوعي الخلايا هذه خلايا **البلعمة المحترفة Professional phagocytes** نظرا لنشاطها المستمر في عمليات **البلعمة**.

- اما عن مراحل البلعمة فهي :

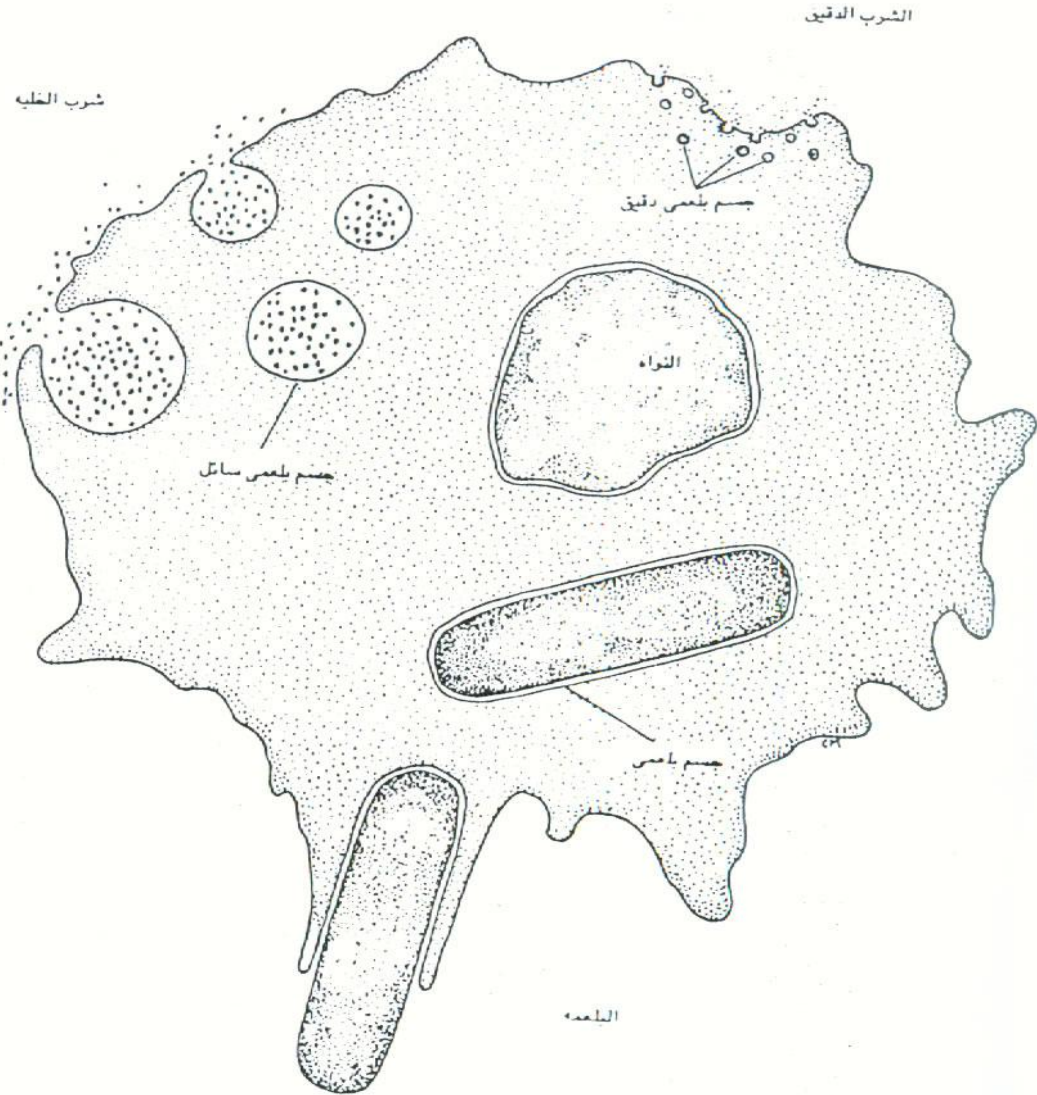
تعتبر البلعمة عملية مستمرة ولكن لسهولة العرض سنحاول تقسيمها إلى المراحل التالية بالترتيب :

الإشارة - المطاردة - تعارف الأسطح - الاحتواء .



رسم تخطيطي للخلية البلعمية الكبيرة (الماكروفاج) ، الخلية غنية بالليسوسومات (L) ، والمواد المحتواه

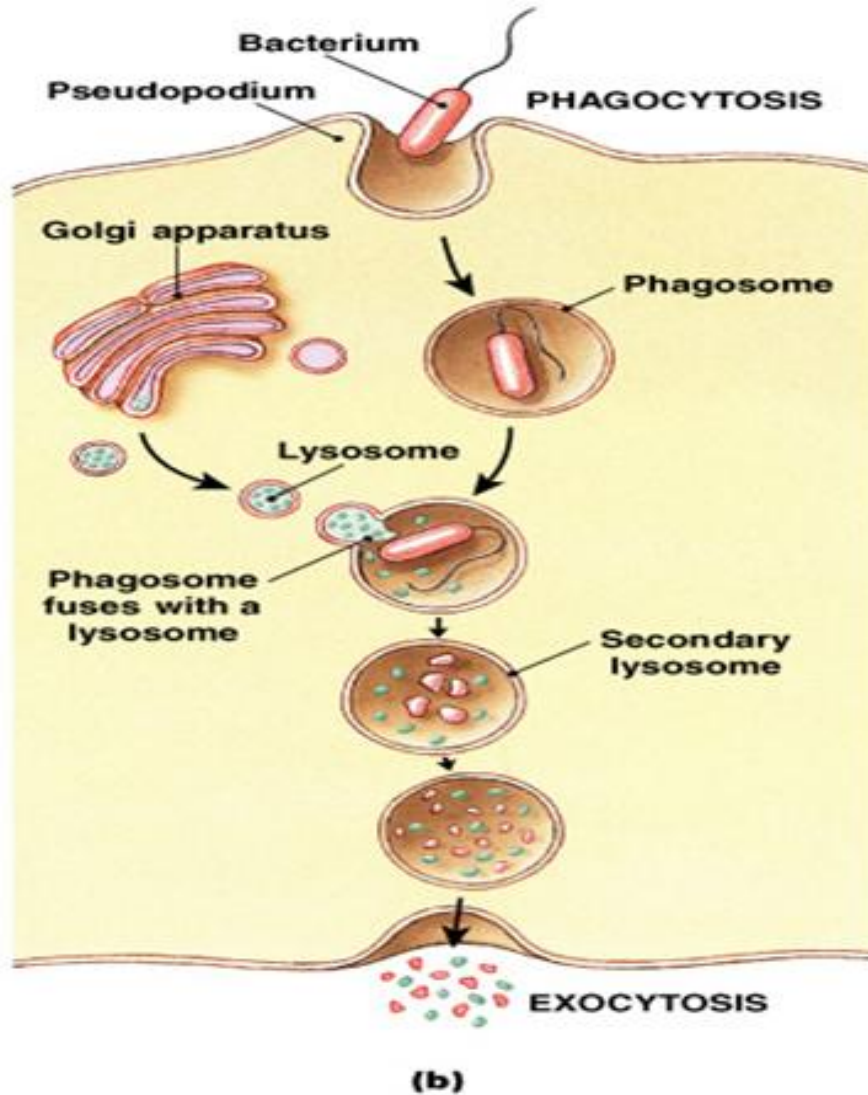
داخل الاجسام البلعمية (Pg) ، وتكون الاقدام الكاذبة (Pd) عادة خالية من العضيات .



• شكل للماء

أنواع التخلاء الداخلي.

Phagocytosis



- Phagocytosis (*cell eating*)
 - pseudopodia (*psuedo* = false, *podia* = feet)
 - engulf large objects in phagosomes

١- الإشارة Signal:

- تبدأ أولى خطوات البلعمة بأن **تتنبه** الخلية البلعمية إلى وجود مادة **غريبة قابلة للبلعمة** في الوسط المحيط بها، أي إن إشارة ما أو مرسلا أول يبدأ العملية كلها فيصل إلى سطح الخلية البلعمية شيء ما يؤدي إلى تحفيز سلسلة من الأحداث المتتالية .

- إن تمركز الخلايا البلعمية الكبيرة في أماكن ثابتة مهمة في الجسم يجعل من الممكن افتراض أن **الإشارة الأولية تأتي نتيجة للتفاعل بين المادة الغريبة والماكروفاج** نفسها، وقد يؤدي ذلك إلى إطلاق عنصر الإشارة الذي ينقل المعلومات الخاصة بوجود جسم غريب إلى خلايا بلعمية أخرى في المنطقة، و ينشأ هذا العنصر من الماكروفاج نفسها أو من النسيج الموجودة به .

• ٢-المطاردة Pursuit :

- تبدأ الماكروفاج عند إعطاء الإشارة بالحركة في اتجاه الجسم الغريب وتسمى هذه المرحلة من البلعمة **بالإنجذاب الكيميائي Chemotaxis**، في اتجاه منحدر التركيز الكيميائي للمادة .
وفي حالة عدم وجود منحدر التركيز ، أو في المناطق التي يرتفع فيها نشاط الإنجذاب الكيميائي فإن الخلايا البلعمية تميل إلى **الحركة العشوائية** . ويفترض أن الخلية لا بد أن تمتلك ميكانيكيات للاكتشاف والاستجابة لمنحدر تركيز الجزيئات .

وقد وجد أن عدد كبير من **المستقبلات** تنتشر على سطح الخلايا المتحركة ، وعند تقابلها أو إقترابها من منحدر التركيز فإن مواقع المستقبلات الأمامية والموجودة بالقرب من مركز المادة الجذابة سترتبط بتركيزات أعلى من هذه الجزيئات ، عن ما في مواقع المستقبلات الموجودة في الجهة البعيدة من الماكروفاج مما يؤدي إلى إحداث حركة في الخلية البلعمية بحيث **تهاجر في اتجاه التركيز الأعلى** .

- - تبين أن معظم المواد الجاذبة تنتمي إلى مجموعة البروتينات التي يسهل تحليلها مائياً وانتشارها بسهولة .
كما يوجد تعاون وثيق بين بعض أنواع الأجسام المضادة والتميمات الموجودة في مصل الدم وبين الماكروفاج .
- يتم أثناء المطاردة خروج الماكروفاج من خلال جدر الأوعية الدموية وغيرها من الأنسجة إلى موقع الجسم الغريب وتستمر في نشاطها البلعمي الأكل وحين تتركز الجراثيم في نسيج معين ويحدث إتهاب تتجه أعداد هائلة من الخلايا البلعمية لإلتهاام الأجسام الغريبة والجراثيم .

• تعرف الأسطح Surface recognition :

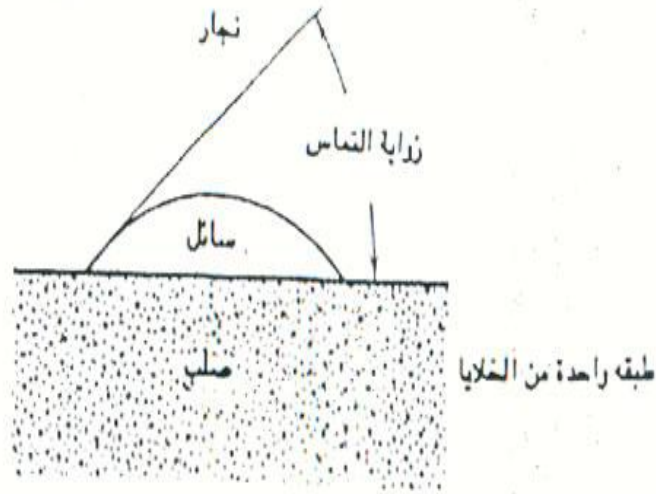
- يحصل اتصال مع الماكروفاج في موقع دخول المادة الغريبة . حيث تستمر عملية الاحتواء ويتحكم في هذه المرحلة التفاعل بين المادة الغريبة ومواقع المستقبلات الموجودة على سطح الخلية البلعمية .
ويعد تعرف الأسطح مرحلة مهمة جدا في عملية البلعمة حيث لا بد أن تميز الخلية هنا بين المادة الغريبة والمواد الذاتية الخاصة بالجسم نفسه .

- توجد قوى مختلفة تنظم عملية التعرف بين الأسطح أهمها : **القوى الكهروستاتيكية** التي تلعب دورا في بداية عملية التفاعل حيث أنه يمكنها العمل من مسافات بعيدة نسبيا بالمقارنة بالقوى الأخرى ومن ناحية أخرى فإن عوامل مثل **قوى فاندرفالس والتفاعل بين المواد المحبة للماء والكارهة للماء** تسهم في عملية تعرف الأسطح ولكن على مدى مسافات أقصر نسبيا .

- وجد أن **كثافة الشحنات** على اسطح الخلايا البلعمية تؤثر بشدة على عملية الالتهام. فعندما تزداد **الشحنات السالبة** على سطح الخلية يحدث **انخفاض في نشاطها البلعمي**. وكذلك ما إذا كانت المادة الغريبة مثل الجراثيم **كارهة للماء أو محبة للماء**. حيث يؤثر ذلك تأثيرا كبيرا على مدى تعرض الجراثيم للالتهام.

- من المعروف أن الجراثيم المحاطة **بكبسولة محبة للماء** (بروتينات) وهي التي تميز معظم الجراثيم الممرضة الشرسة فإنها تكون عادة مقاومة للبلعمة. وقد أمكن تفسير ذلك على أساس قياس **زاوية التماس** بين سطحي الخلية والمادة الغريبة. وقد أشارت النتائج التجريبية إلى وجود تلازم مباشر وعلاقة مؤكدة بين مقدار زاوية التماس والحساسية للبلعمة.

- فعندما تكون **زاوية التماس كبيرة** فإن ذلك يعني أن الجراثيم **كارهة للماء** والعكس صحيح أي أن زاوية التماس الصغيرة تدل على أن الجراثيم **محبة للماء** حيث أنها تعكس قدرة عالية على البلل والانتشار على سطح الخلايا الأكثر حبا للماء.



زاوية التماس بين نقطة السائل والسطح الصلب . يمثل السطح الصلب طبقة وحيدة من الخلايا البكتيرية .

أو الخلايا البلعمية ، وكلما زادت كراهية هذا السطح للماء زادت زاوية التماس .

متوسط عدد البكتيريا
المبلعمة لكل ماكروفاج

زاوية التعاس

السلالة

٠,٢

١٦

Staphylococcus aureus
strain Smith

(ذات كبسولة)

٢,١

٢٦

Staphylococcus aureus
Strain Smith

(بدون كبسولة)

متوسط عدد البكتيريا المبلعة لكل ماكروفاج	مقدار زاوية التماس	السلالة البكتيرية
		أولاً : البكارهة للماء :
٦	٧٠	<u>Mycobacterium butyricum</u>
٢,٥	٢٥	<u>Staphylococcus epidermidis</u>
١,٦	١٩	<u>Haemophilus influenzae</u>
		ثانياً : المحبة للماء :
٠,٦	١٧	<u>Escherichia coli</u>
٠,٢	١٧	<u>Salmonella typhimurium</u>

- إن الجراثيم التي تقل فيها زاوية التماس عن ١٨ أى محبة للماء تكون مقاومة بشدة للبلعمة . وكلما زادت زاوية التماس (أى كانت الخلايا كارهة للماء) زاد تعرض الجراثيم للإلتهايم . تعطي **الكبسولة** المحيطة بالجراثيم الممرضة مقاومة للبلعمة مما **يكسبها شراسة** أشد في النسيج المصاب . وحيث أن الكبسولة مكونة من بروتين . فإن سطحها عادة يكون كما سبق القول محبا للماء وبالتالي تكون زاوية التماس صغيرة جدا وتقل بالتالي فرصة بلعمة مثل هذه الجراثيم كما أوضحنا في الشكل السابق .

- إن وجود الكبسولة قد أدى إلى حماية الجراثيم من البلعمة حين كانت محبة للماء بزاوية تماس منخفضة مما أدى إلى انخفاض حاد في معدل البلعمة وعلى العكس من ذلك وعند إزالة كبسولة نفس السلالة الجرثومية تعرى سطح الخلية الكاره للماء فارتفعت زاوية التماس وتضاعف معدل البلعمة إلى عشرة أمثال لما حدث في الجراثيم ذات الكبسولة .

• دور الاضداد في البلعمة :

تبين أن تحويل أسطح الخلية البلعمية (الماكروفاج) أو الجسم الغريب المستهدف، يؤثر تأثيرا كبيرا على عملية البلعمة .

فقد وجد أن المعاملة بالمواد التي تساعد على رفع كراهية الجسم الغريب للماء، بالمقارنة بتلك الخاصة بخلايا البلعمة أو زيادة السطح المحب للماء في خلية البلعمة بالمقارنة بالجسم الغريب تؤدي إلى زيادة معدل البلعمة .

-وجد أن الاجسام المضادة والمتممة (وهي بروتينات موجودة في مصل الدم) تقوم بدور في هذا الشأن .

وهناك نوع معين من الأجسام المضادة { IgG1 , IgG3 } وأحد بروتينات المتممة { C3b بشكل خاص } والتي يطلق عليها اسم Opsinins أي المجهزة للطعام او الطهارة، تتفاعل بصفة خاصة مع الجراثيم ذات الكبسولة والمقاومة للبلعمة وتحيط بها لترفع معدل التهامها بواسطة الخلايا البلعمية . ويتم ذلك بأن تبطن الأوبسينينات سطح الجراثيم المحب للماء مما يؤدي إلى تغير سطح التفاعل بين الجراثيم وخلية البلعمة ويحفز على زيادة عملية الالتهام .

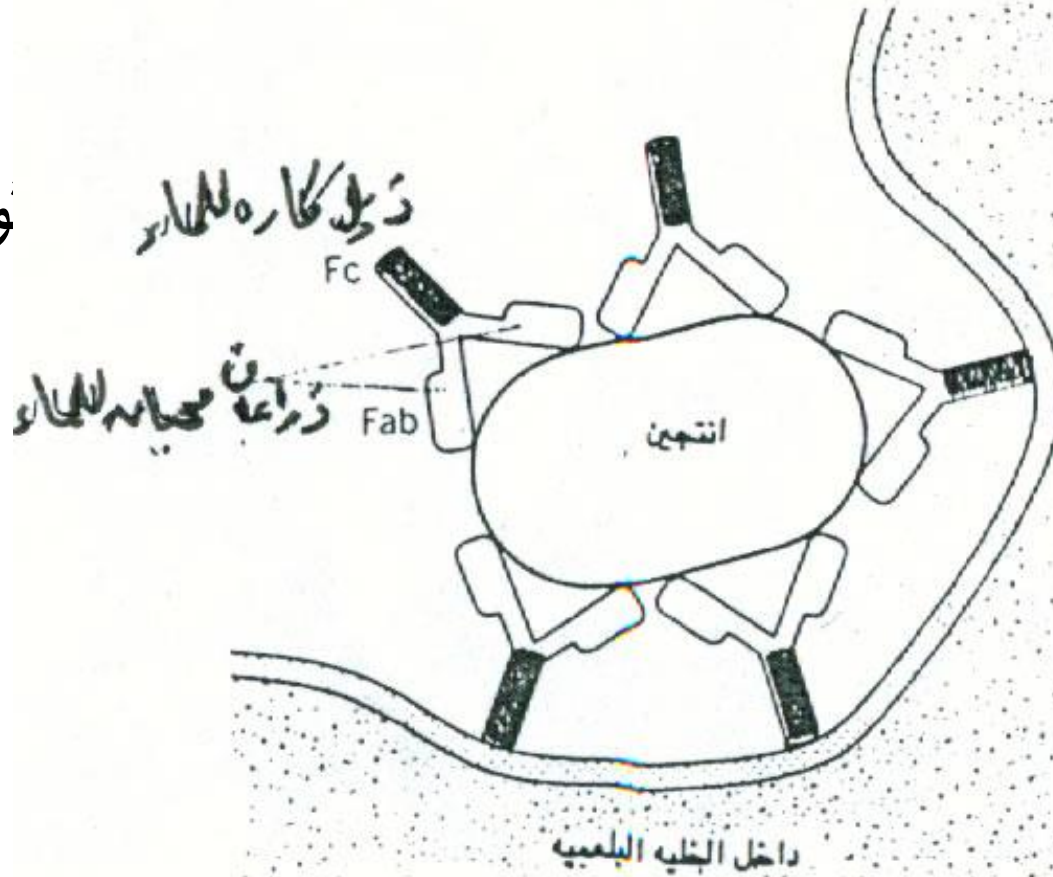
- تم إجراء تجربة لمعرفة تأثير الكبسولة على مقاومة البلعمة حيث حقنت فئران التجارب بسلاطات معلمة باليود المشع وتم قياس نسبة الإشعاع في الدم بعد فترات متقاربة (دقائق) بحيث أخذ معدل انخفاض نسبة الإشعاع في الدم كمقياس لحدوث البلعمة كنتيجة لإلتهام الماكروفاج للجراثيم وتنقية الدم .

- استخدمت ثلاث سلالات من الجرثوم *Salmonella typhi* تختلف في خواص سطوحها ووجد أن السلالة T415 قد أستمر ظهورها في الدم بمستوى مرتفع لفترة أطول نسبيا بالمقارنة بالسلالة الخشنة R2 (بدون كبسولة) مما يؤكد مساهمة الكبسولة في مقاومة الجراثيم للبلعمة .

- يمكن تفسير ذلك أن تركيب الجسم المضاد البروتيني يحتوي على ثلاث نهايات : ذراعان يرتبطان بشكل نوعي بالجسم الغريب، والنهاية الثالثة {وتدعى القطعة FC } ترتبط بمستقبلها الخاص الموجود على أغشية البالعات الكبيرة، ويؤدي هذا الارتباط الى تفعيل الخلية البالعة مما يؤدي للبلعمة.

- وكذلك في حالة بعض بروتينات المتممة، كما ذكرنا، فإنها ترتبط بالميكروبات من جهة وبمستقبلاتها النوعية الموجودة على اغشية البالعات من جهة اخرى. وتدعى عملية تهيئة الميكروبات للبلعمة بهذه الطريقة بالطهاية Opsinization .

• نوم



رسم تخطيطي لإرتباط الانتجين بالأجسام المضادة في عملية 'تجهيز الطعام'

• ٤- الاحتواء :

- بمجرد أن يحدث الاتصال بين الخلية البلعمية والجسم الغريب وتتعرف عليه تبدأ سلسلة من **الأنغمادات** غير العكسية في الغشاء البلاسمي تؤدي في النهاية إلى نقل الجسم الغريب إلى الجهة الداخلية من الغشاء البلاسمي مغلقا بحويصلة من الغشاء المقلوب .

وتعتمد هذه الحركة التي تتم داخل السيتوبلازما في المراحل الأولى للبلعمة . كما يعتبر تكوين **الأقدام الكاذبة** ميكانيكية عامة لحركة سطح الخلية والتي تتم أثناء الحركة العادية .
وتصاحب هذا التغير الظاهري تغيرات في تماسك السيتوبلازما تحت الغشاء مباشرة في المنطقة البارزة فيما يعرف بعملية **التحويل من سول إلى جيل** ، وتحدث لمنطقة القدم الكاذبة تغيرات تمثل **تفاعل البلمرة وإنحلال البلمرة** للبروتينات الانقباضية في الخلية .

• شرب الخلية Pinocytosis:

- وهي عبارة عن إدخال كمية كبيرة من المواد المذابة إلى الخلية وتقسّم هذه العملية إلى الشرب الكبير (الحوصلة من 100-500 nm) والشرب الدقيق عندما يكون نصف قطر الحوصلة أقل من 70 nm.
- تتم عملية الشرب في الحالتين على مرحلتين : تبدأ بإدمصاص وتركيز الجزيئات المتناثرة على سطح الخلية وهي عملية عكسية ويتبعها تدفق غير عكسي وتخليق أغشية مما يؤدي إلى إحتواء هذه الجزيئات في حوصلة في الجانب الداخلي للغشاء السيوبلاسمي .
- تتم عملية الإدمصاص بواسطة بعض مواقع المستقبلات التي تقوم بتركيز المواد على السطح الخارجي للخلية كما تقوم بتنشيط عملية إنغماد الغشاء ويطلق على هذا النوع من الشرب اسم الشرب الأدمصاصي Absorptive pinocytosis وذلك للتمييز بينه وبين دخول مواد غير نوعية ذائبة تدفع إلى داخل الخلية ضمن المحتوى السائل لفجوة التخلية الداخلية وتسمى الطور العصاري لشرب الخلية ومن الواضح أن هذا النوع لا يتضمن أى تركيز للجزيئات الآتية من خارج الخلية أى أن تركيزها قبل الشرب وبعده يكون متساويا .



ادمصاصي .



عصاري



المسوخ المخاري

مراد شرب الخلية العصاري (اخلك) بالادمصاصي (اسفل)

EXOCYTOSIS (الإخراج الخلوي):

وهي عملية معاكسة للإدخال الخلوي يتم فيها التحام أغشية الحويصلات داخل الخلية مع الغشاء الخلوي وتحرير محتوياتها في الوسط خارج الخلوي. يمكن للمواد الموجودة في حويصلات الإخراج أن **تلتحم مع الغشاء** الخلوي وتشكل جزءاً منه أو أن تطرح خارج الخلايا.

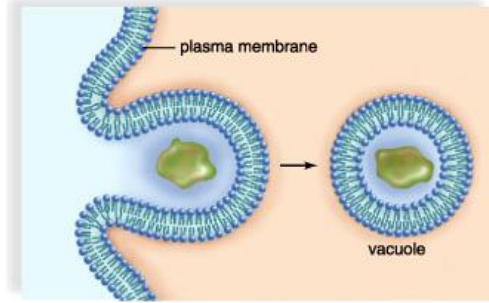
ويحدث الإخراج الخلوي بصورة مستمرة أو متقطعة .

- **الإخراج المستمر**: يتم عبر حركة مستمرة للمواد التي تتركب في الخلية من مكان تركيبها إلى الغشاء الخلوي حيث يتم طرحها.

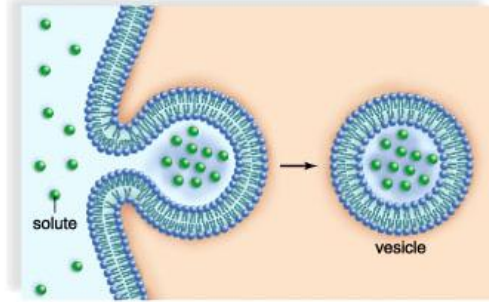
- **الإخراج المتقطع**: مثل إفراز **الإنسولين** من خلايا بيتا في جزر لانغرهانس في البنكرياس إذ يتحرر الإنسولين عند زيادة سكر الغلوكوز في الدم.

يتم في عملية الإخراج الخلوي **التحام الوريقة الخارجية للحويصل** الإفرازي مع الوريقة الداخلية للغشاء الخلوي، فيتشكل في منطقة الالتحام غشاء ثلاثي الوريقات. بعد ذلك تهاجر البروتينات الغشائية إلى حواف منطقة الالتحام **وتتباعد المواد الدسمة**، مؤدية إلى انفتاح الحويصل وتحرير محتوياته. تتدخل في هذه العملية بروتينات متخصصة هي **بروتينات الالتحام** لأن أغشية العضيات الخلوية لا يلتحم بعضها مع بعض في الأحوال الطبيعية.

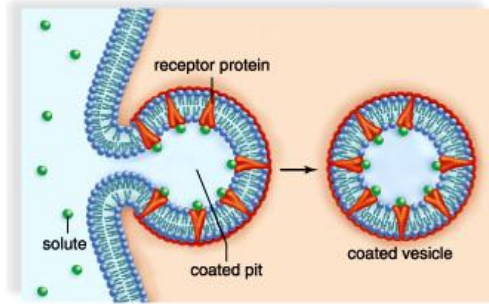
أشكال تخطيطية وصور مجهرية تبين الأنواع المختلفة للإدخال الخلوي Endocytosis.



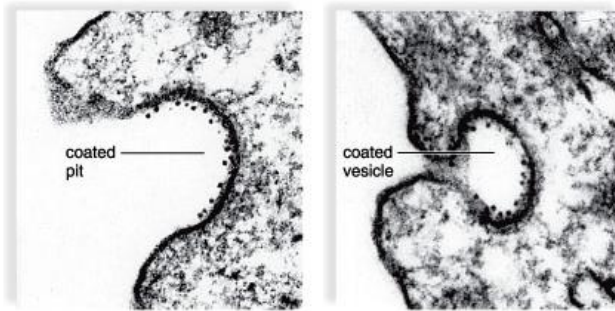
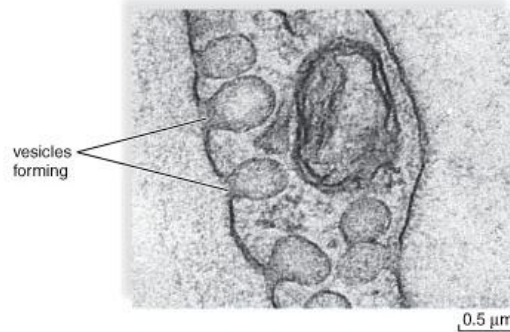
a. Phagocytosis



b. Pinocytosis



c. Receptor-mediated endocytosis



• (أعلى) تختص البلعمة بإدخال الجزيئات الصلبة وكبيرة الحجم، وتبدو بالمجهر الضوئي (يمين) عملية بلعمة خلية بارامسيوم تقوم بها خلية المتحول الأميبي. (وسط) يختصّ الشرب بإدخال الجزيئات السائلة وصغيرة الحجم وتبدو بالمجهر الإلكتروني (يمين) بشكل جلي الحويصلات المتشكلة في جدار الخلية. (أسفل) تتميز عملية الشرب الادمصاصي المتواسط بالمستقبلات بوجود مستقبلات نوعية للمادة المراد نقلها مما يسرّع عملية نقل المواد ذات التركيز المنخفض ويزيد من كفاءة النقل.

خاتمة

- تعرّفنا في الفصل الخامس على أهم التحديات التي تواجهها الخلية الحية، وهو التفاعل مع بيئتها. فوجدنا أن تراكيز كثير جداً من الشوارد والمواد يختلف بشكل جذري بين خارج وداخل الخلية الحية، مع ما يشكّله ذلك من خطورة على العمليات الحيوية داخل الخلية لولا وجود هذا السور المتقن الإحكام والذي نسميه الغشاء السيتوبلاسمي.
- وقد عرفنا في هذا الفصل جميع مكوّناته والاليات التي تسهم في حفظ الخلية وحمايتها في مواجهة التبدلات البيئية المحيطة، وفي نفس الوقت، تُيسّر للخلية استيراد المواد اللازمة لها وتصدير منتجاتها وطرح فضلاتها بالشكل الأمثل.