كتاب علمي تعليمي

# الغشاء الخلوي
# التركيب والوظيفة

دراسة شاملة لتركيب الغشاء الخلوي وآليات نقل المواد عبره
مع تطبيقات حياتية وصناعية

Cell Membrane: Structure and Function

الصف الحادي عشر - الأحياء

الفصل الأول

# الغشاء الخلوي: التعريف والخصائص

Cell Membrane: Definition and Properties

يُعدّ الغشاء الخلوي (Cell Membrane) أو ما يُعرف بالغشاء البلازمي من أهم الأجزاء المكونة للخلية، إذ يمثّل الحد الفاصل بين ما بداخل الخلية من مكونات حيوية وما يحيط بها من بيئة خارجية. يمكن تشبيه الغشاء الخلوي بالباب الرئيسي لمدينة محصّنة، فهو يتحكّم في من يدخل ومن يخرج، ويحمي ما بداخلها من التهديدات الخارجية، ويحافظ على التوازن الداخلي الضروري لاستمرار الحياة. يتكوّن هذا الغشاء من طبقتين من الفسفوليبيدات (الدهون الفسفورية) تتداخل بينهما بروتينات متعددة الأنواع والأحجام، وهو ما يُعرف بالنموذج الفسيفسائي السائل (Fluid Mosaic Model) الذي اقترحه العالمان سنجر ونيتسون عام 1972.

يتميّز الغشاء الخلوي بعدّة خصائص جوهرية تجعله فريدًا في أدائه الوظيفي. أبرز هذه الخصائص هي **النفاذية الاختيارية (النصف نفوذية)**، والتي تعني أن الغشاء لا يسمح لجميع المواد بالعبور بنفس السهولة، بل يختار بعناية ما يدخل الخلية وما يخرج منها بناءً على حجم الجزيء وشحنته وذوبانيته. ومن خصائصه أيضًا **المرونة والديناميكية**، فالغشاء ليس صلبًا جامدًا بل يتمتّع بحركة مستمرة تتيح له التكيّف مع التغيّرات المحيطة، كما أن له القدرة على **الإصلاح الذاتي** في حال تعرّض للتلف الناتج عن الإجهاد الميكانيكي أو الكيميائي.

تنعكس أهمية هذه الخصائص في countless التطبيقات البيولوجية. فالنفاذية الاختيارية تضمن بقاء التراكيز المناسبة للأيونات والجزيئات داخل الخلية، والمرونة تتيح للخلايا مثل كريات الدم الحمراء بالمرور عبر الشعيرات الدموية الضيقة دون أن تنفجر. أما الإصلاح الذاتي فيسمح للغشاء باستعادة تكامله بعد أي تمزّق جزئي، مما يحمي الخلايا من الموت المبكر.

### الخصائص الرئيسية للغشاء الخلوي

- **النفاذية الاختيارية:** يسمح بمرور بعض المواد ويمنع مرور أخرى بناءً على خصائصها الفيزيائية والكيميائية كالحجم والشحنة والذوبانية في الدهون.
- **الطبيعة الديناميكية:** يتكوّن من جزيئات تتحرك باستمرار مما يمنحه المرونة والقدرة على التكيّف مع الظروف المتغيرة.
- **التركيب الفسيفسائي:** يحتوي على خليط متنوع من الدهون والبروتينات والكربوهيدرات موزّعة بشكل غير منتظم يشبه الفسيفساء.
- **القدرة على التواصل الخلوي:** يحتوي على مستقبلات بروتينية تتيح للخلية التفاعل مع الإشارات الكيميائية والهرمونية في البيئة المحيطة.
- **الإصلاح الذاتي:** يستطيع إصلاح التمزقات الصغيرة تلقائيًا بفضل خاصية الحركة الذاتية للفوسفوليبيدات في الطبقة الثنائية.

### تطبيق حياتي: أهمية النفاذية الاختيارية في الكلى

تتجلى أهمية النفاذية الاختيارية للغشاء الخلوي في عمل **الكلى** البشرية. فالنيفرونات (الوحدات الوظيفية في الكلية) تعتمد على أغشية خلوية شديدة النفاذية الاختيارية لتصفية الدم، حيث تسمح بمرور الفضلات والماء الزائد بينما تحتفظ بالبروتينات وخلايا الدم داخل الجسم. وفي حالة الإصابة بأمراض الكلى، تُستخدم أجهزة **الغسيل الكلوي (الديلزة)** التي تحاكي وظيفة الغشاء الخلوي باستخدام أغشية صناعية شبه نفوذة لفصل الفضلات عن الدم. كذلك تعمل أغشية الكبيبات الكلوية على تصفية حوالي 180 لترًا من الدم يوميًا، وهو ما لا يمكن أن يتم دون أغشية ذات نفاذية اختيارية فائقة الدقة.

الفصل الثاني

# مكونات الغشاء الخلوي

Components of the Cell Membrane

---

يتكوّن الغشاء الخلوي من أربعة مكونات رئيسية تعمل معًا بتناغم واضح لضمان أداء الوظائف الحيوية المختلفة. وهذه المكونات هي: **الفسفوليبيدات** التي تشكّل الأساس الهيكلي للغشاء وتؤمن العزل الأساسي، و**البروتينات** التي تؤدي وظائف متنوعة مثل النقل والإشارة والتعرف، و**الكوليسترول** الذي يضبط سيولة الغشاء واستقراره، و**الكربوهيدرات** التي تشارك في التعرف الخلوي والتواصل بين الخلايا. لكل مكوّن من هذه المكونات دور محدد لا غنى عنه في الحفاظ على سلامة الخلية ووظائفها الحيوية.

## أولًا: الفسفوليبيدات (Phospholipids)

تُمثّل الفسفوليبيدات المكوّن الأساسي للغشاء الخلوي، حيث تشكّل **طبقتين من الدهون** (Bilayer) تتجه الأذيال الكارهة للماء (Hydrophobic) نحو الداخل بعيدًا عن الماء، بينما تتجه الرؤوس المحبة للماء (Hydrophilic) نحو الخارج لتواجه البيئة المائية داخل الخلية وخارجها. هذا الترتيب الفريد هو ما يجعل الغشاء قادرًا على عزل محتويات الخلية عن البيئة الخارجية مع الحفاظ على انتقائية النفاذية في نفس الوقت. يبلغ سمك هذه الطبقة الدهنية حوالي 7 إلى 8 نانومتر تقريبًا، وهو ما يعادل تقريبًا سمك ورقة واحدة مقسومة على عشرة آلاف جزء. تحتوي كل فسفوليبيد على رأس فسفوري قطبي يحب الماء وذيلين دهنيين غير قطريين يكرهان الماء.

## ثانيًا: البروتينات (Proteins)

تتواجد البروتينات داخل الغشاء الخلوي بنوعين رئيسيين: **بروتينات ناقلية** (Integral Proteins) تخترق طبقتي الدهون بالكامل وتظهر على كلا السطحين، و**بروتينات محيطية** (Peripheral Proteins) ترتبط بسطح الغشاء من الداخل أو الخارج دون اختراقه. تؤدي هذه البروتينات وظائف بالغة الأهمية تشمل: نقل المواد عبر الغشاء (بروتينات النقل والقنوات)، الاستجابة للإشارات الخارجية (مستقبلات الإشارة)، والتعرف على الخلايا الأخرى (بروتينات التعرف)، وتوفير الدعم الهيكلي (البروتينات المرتبطة بالهيكل الخلوي الداخلي). تُقدّر نسبة البروتينات في الغشاء الخلوي بحوالي 50 بالمائة من كتلته الكلية، مما يدلّ على محوريتها في أداء الوظائف الحيوية.

## ثالثًا: الكوليسترول (Cholesterol)

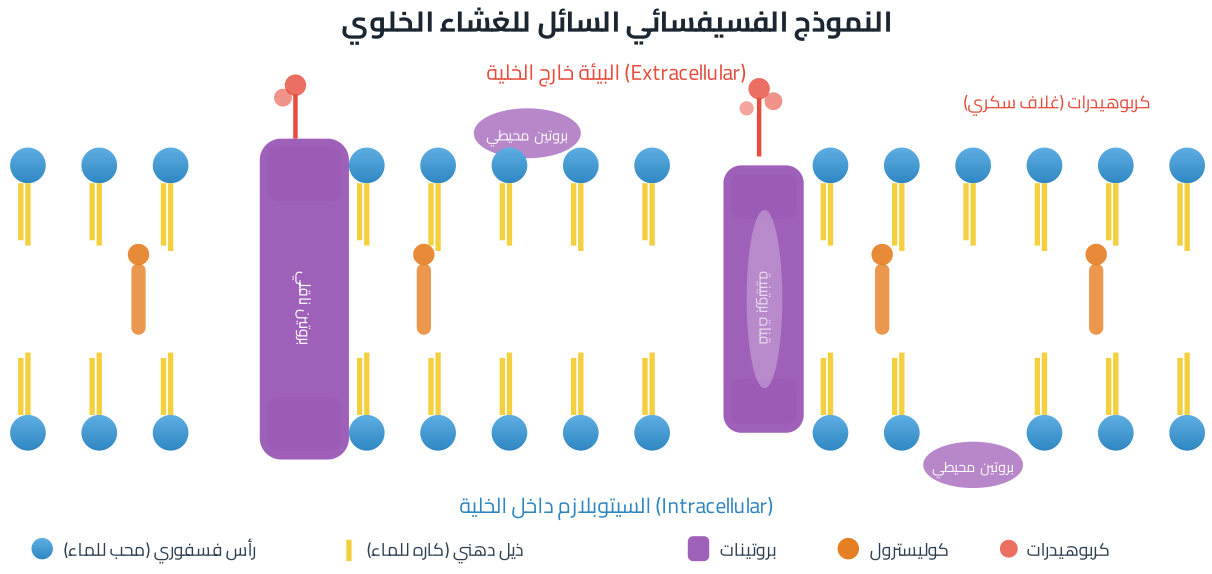
يحتوي الغشاء الخلوي على جزيئات الكوليسترول المتداخلة بين الأذيال الدهنية للفسفوليبيدات. يعمل الكوليسترول كمنظّم لسيولة الغشاء واستقراره: عند درجات الحرارة العالية يثبّت الغشاء ويمنعه من أن يصبح شديد السيولة، وعند درجات الحرارة

المنخفضة يمنع تراصّ الأذيال الدهنية ويحافظ على مرونة الغشاء وسائله. بدون الكوليسترول، سيفقد الغشاء الخلوي قدرته على الحفاظ على ثباته الهيكلي ووظائفه الحيوية، وسيصبح إمّا شديد الصلابة عند البرد أو شديد السيولة عند الحرارة. وتختلف نسبة الكوليسترول باختلاف نوع الخلية، فأغشية الخلايا العصبية تحتوي على نسبة عالية تصل إلى 25 بالمائة بينما أغشية الخلايا البكتيرية لا تحتوي عليه إطلاقًا.

## رابعًا: الكربوهيدرات (Carbohydrates)

توجد الكربوهيدرات على السطح الخارجي للغشاء الخلوي مرتبطة بالبروتينات (لتكوين بروتينات سكرية Glycoproteins) أو بالدهون (لتكوين دهون سكرية Glycolipids). تُشكّل هذه الكربوهيدرات ما يُعرف بـ**الغلاف السكري** (Glycocalyx)، وله دور حيوي في التعرف الخلوي والتواصل بين الخلايا. على سبيل المثال، تساعد هذه الكربوهيدرات في تحديد فصيلة الدم (A Bg AB وO) حيث تختلف نوعية السكريات على سطح كريات الدم الحمراء من شخص لآخر. كما تلعب دورًا في استجابة الجهاز المناعي حيث تميّز بين خلايا الجسم الطبيعية والخلايا الغريبة كالبكتيريا والفيروسات والخلايا السرطانية.

### شكل توضيحي: تركيب الغشاء الخلوي




*يوضح الشكل النموذج الفسيفسائي السائل مع المكونات الأربعة: الفسفوليبيدات والبروتينات والكوليسترول والكربوهيدرات*

### تطبيق صناعي: الأغشية الاصطناعية المستوحاة من الغشاء الخلوي

تمّ الاستفادة من فهم تركيب الغشاء الخلوي في تطوير **الأغشية الاصطناعية** المستخدمة في العديد من الصناعات الحديثة. في مجال **تحلية المياه**، تُستخدم أغشية التناضح العكسي (Reverse Osmosis Membranes) التي تحاكي النفاذية الاختيارية للغشاء الخلوي لفصل الأملاح عن الماء بنسبة تتجاوز 99 بالمائة. كما تُستخدم أغشية مشابهة في **صناعة البطاريات** كالأغشية الفاصلة في بطاريات الليثيوم أيون التي تسمح بمرور أيونات الليثيوم مع منع مرور الإلكترونات. وفي **الطب الحيوي**، تُصمّم أغشية التوصيل الدوائي الموضعي التي تتحكم في معدل إطلاق الدواء في الجسم، وتعتمد تقنية **الديلزة الدموية** على أغشية صناعية دقيقة المسام لتنقية دم المرضى من السموم والفضلات.

# النقل السلبي عبر الغشاء الخلوي

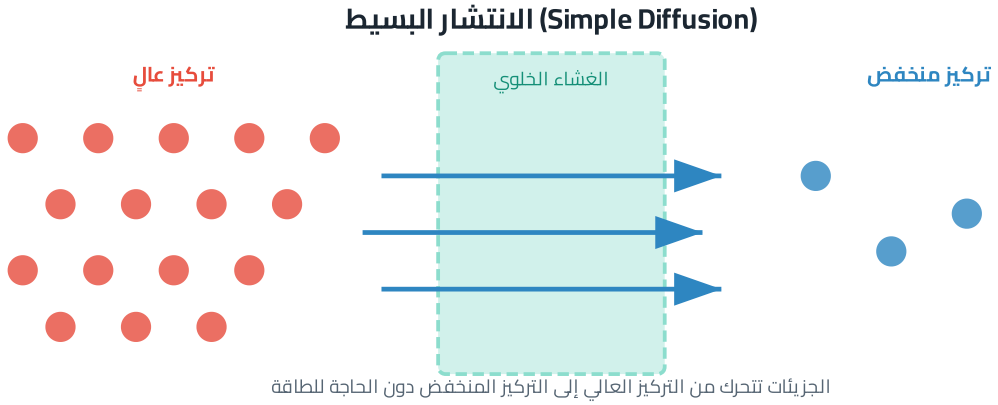
Passive Transport Across the Cell Membrane

*النقل السلبي* هو عملية انتقال المواد عبر الغشاء الخلوي **من منطقة تركيز عالٍ إلى منطقة تركيز منخفض** دون الحاجة إلى استهلاك الطاقة الخلوية (ATP). يحدث هذا النقل وفقًا لتدرّج التركيز (Concentration Gradient) مباشرةً، وتشمل آلياته ثلاث عمليات رئيسية: **الانتشار البسيط**، و**التنافذ** (الأسموز)، و**الانتشار التسهيلي**. تتميز جميعها بعدم الحاجة للطاقة واعتمادها على التدرّج الطبيعي للتركيز كقوة دافعة، ويستمر النقل حتى يتساوى التركيز على الجانبين (الاتزان) أو يزول التدرج.

## الانتشار البسيط (Simple Diffusion)

في الانتشار البسيط، تعبر الجزيئات الصغيرة والذرات والجزيئات غير القطبية (التي تذوب في الدهون) الغشاء الخلوي مباشرةً دون الحاجة إلى بروتينات ناقلة أو أي مساعدة خارجية. تخترق هذه المواد الطبقة الدهنية للغشاء بسبب ذوبانها فيها، مثل غاز الأكسجين وثاني أكسيد الكربون والكحول الإيثيلي والستيرويدات. يستمر الانتشار حتى يتساوى التركيز على جانبي الغشاء (الاتزان). وتُعدّ سرعة الانتشار البسيط بطيئة نسبيًا مقارنة بطرق النقل الأخرى، لكنها كافية لنقل الجزيئات الصغيرة غير القطبية. ويعتمد معدل الانتشار على عدة عوامل منها: حجم الجزيء (كلما صغر زادت سرعة انتشاره)، ودرجة الحرارة (كلما ارتفعت زادت سرعة الحركة)، وتدرج التركيز (كلما زاد التدرج زادت سرعة الانتشار).

**شكل توضيحي: الانتشار البسيط**




*تتحرك الجزيئات الصغيرة غير القطبية (مثل $O_2$ و$CO_2$) من منطقة التركيز العالي إلى منطقة التركيز المنخفض عبر الطبقة الدهنية*

### أمثلة على الانتشار البسيط في جسم الإنسان

- **تبادل الغازات في الرئتين:** يدخل الأكسجين من الحويصلات الهوائية إلى الدم عبر الانتشار البسيط، ويخرج ثاني أكسيد الكربون من الدم إلى الحويصلات في الاتجاه المعاكس.
- **امتصاص العناصر الغذائية:** تنتشر الأحماض الدهنية والفيتامينات الذائبة في الدهون (مثل فيتامينات A Dg Eg Kg) عبر جدران الأمعاء إلى الدم واللمف.
- **انتشار الكحول:** يمتص الكحول الإيثيلي عبر جدار المعدة والأمعاء بالانتشار البسيط نظرًا لصغر حجمه وذوبانيته في الدهون، مما يُفسّر سرعة تأثيره على الجهاز العصبي.
- **انتشار ثاني أكسيد الكربون:** يخرج من الأنسجة إلى الدم ثم إلى الرئتين حيث يُطرح خارج الجسم، ويعتمد entirely على الانتشار البسيط.

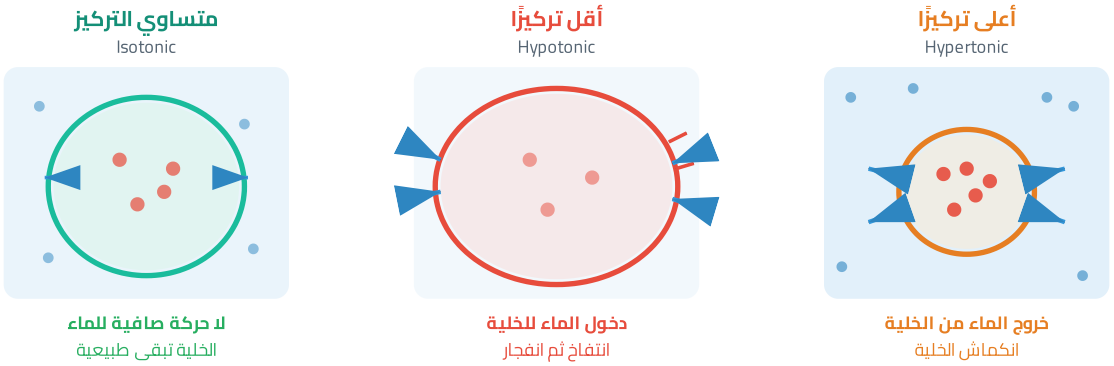
## التنافذ (Osmosis)

*التنافذ* هو حركة الماء عبر غشاء نصف نفوذ من منطقة تركيز منخفض للمذاب (أي تركيز عالٍ للماء) إلى منطقة تركيز عالٍ للمذاب (أي تركيز منخفض للماء). بعبارة أخرى، يتحرّك الماء دائمًا في الاتجاه الذي يُقلّل من تركيز المذاب. يلعب التنافذ دورًا محوريًا في حياة الخلايا، إذ يتحدّد مصير الخلية (انتفاخها أو انكماشها أو بقاءها على حالتها الطبيعية) بناءً على نوع المحلول الذي توجد فيه. وتوجد بروتينات خاصة تُسمى **أكوابورينات** (Aquaporins) تسهّل حركة الماء عبر الغشاء بسرعة فائقة تصل إلى مليارات الجزيئات في الثانية.

### أنواع المحاليل وتأثيرها على الخلية

1. **المحلول المتساوي التركيز (Isotonic Solution):** يكون تركيز المذاب فيه مساويًا لتركيزه داخل الخلية، فلا يحدث انتقال صافٍ للماء وتبقى الخلية بحالتها الطبيعية. ومثال ذلك **المحلول الملحي الفسيولوجي** (0.9 بالمائة كلوريد الصوديوم) المستخدم في الطب لحقن المرضى والمحافظة على خلايا الدم سليمة.
2. **المحلول الأقل تركيزًا (Hypotonic Solution):** يكون تركيز المذاب فيه أقل من تركيزه داخل الخلية، فيدخل الماء إلى الخلية مسببًا انتفاخها. وفي حالة كريات الدم الحمراء قد يُسبب انفجارها (الانحلال Hemolysis). ومثال على ذلك وضع خلية في ماء مقطر نقي.
3. **المحلول الأعلى تركيزًا (Hypertonic Solution):** يكون تركيز المذاب فيه أعلى من تركيزه داخل الخلية، فيخرج الماء من الخلية مسببًا انكماشها (الانقباض Crenation). ومثال ذلك وضع خلية نباتية في محلول ملحي مُركّز.

### شكل توضيحي: التنافذ (الأسموز) وتأثير المحاليل على الخلية




*يوضح الشكل تأثير ثلاثة أنواع من المحاليل على الخلية: متساوي التركيز (طبيعية)، أقل تركيزًا (انتفاخ وانفجار)، أعلى تركيزًا (انكماش)*

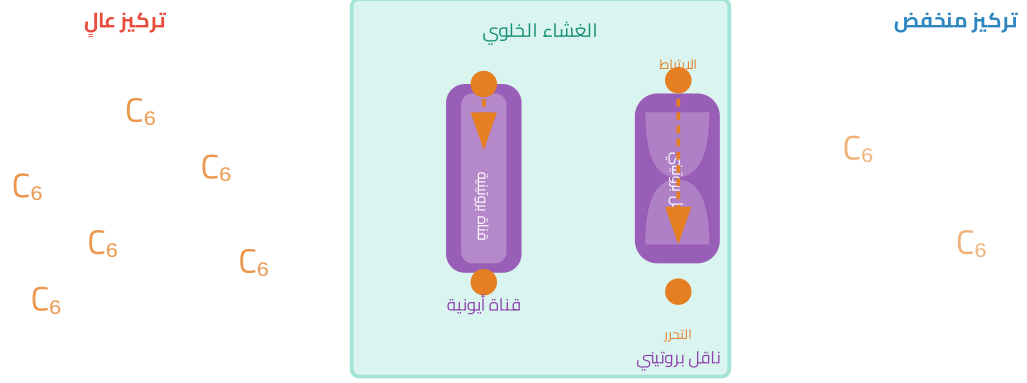
### تطبيق حياتي: التنافذ في الطب والزراعة وحفظ الأغذية

يتجلى مبدأ التنافذ في العديد من التطبيقات الحياتية المهمة. في مجال **الطب**، يُستخدم المحلول الملحي المتساوي التركيز (0.9 بالمائة NaCl) في الوريد لمنع انكماش أو انتفاخ خلايا الدم أثناء العمليات الجراحية وعلاج الجفاف. وفي **حفظ الأغذية**، يُضاف الملح بتركيز عالٍ إلى اللحوم والمخللات فينتقل الماء من البكتيريا المسببة للتلف إلى المحيط الملحي فتموت البكتيريا ويُحفظ الطعام لفترات طويلة. كذلك في **الزراعة**، إذا سُقيت النباتات بماء مالح شديد التركيز تذبل أوراقها لأن الماء يخرج من خلاياها بالتنافذ العكسي، لذلك يُنصح باستخدام مياه عذبة في الري. وفي **التجميل**، تُستخدم مستحضرات تحتوي على محاليل أقل تركيزًا لترطيب البشرة عن طريق تنافذ الماء إلى خلايا الجلد.

## الانتشار التسهيلي (Facilitated Diffusion)

*الانتشار التسهيلي* يشبه الانتشار البسيط في أنه يحدث مع تدرّج التركيز ودون استهلاك الطاقة، لكنه يختلف في أنه يتطلب وجود **بروتينات ناقلة** أو **قنوات بروتينية** متخصصة موجودة في الغشاء الخلوي. تُستخدم هذه البروتينات لنقل الجزيئات الكبيرة أو القطبية أو المشحونة التي لا تستطيع العبور عبر الطبقة الدهنية بمفردها، مثل الجلوكوز والأحماض الأمينية وأيونات الصوديوم والبوتاسيوم. تعمل القنوات كأنفاق تسمح بمرور أيونات محددة بناءً على حجمها وشحنتها، بينما تعمل الناقلات على الارتباط بالجزيء وتغيير شكلها لنقله إلى الجانب الآخر من الغشاء ثم تعود لشكلها الأصلي.

### شكل توضيحي: الانتشار التسهيلي




يحدث مع تدرج التركيز ودون طاقة لكن يتطلب بروتينات متخصصة (قنوات أو ناقلات)

*يستخدم بروتينات متخصصة: القنوات الأيونية (يمين) تسمح بمرور الأيونات، والناقلات البروتينية (يسار) تغيّر شكلها لنقل الجزيئات*

**ملاحظة مهمة: الفرق بين الانتشار البسيط والانتشار التسهيلي**

الفرق الجوهري بين الانتشار البسيط والانتشار التسهيلي هو أن الأخير يتطلب بروتينات متخصصة (قنوات أو ناقلات) رغم أنه لا يستهلك طاقة. كلاهما يحدث مع تدرّج التركيز وحتى الوصول إلى الاتزان، وكلاهما لا يحتاج إلى طاقة (ATP). لكن الانتشار التسهيلي يكون أسرع ويتسمى بخصوصية أكبر حيث تنقل كل قناة أو ناقلة نوعًا محددًا من الجزيئات فقط.

**تطبيق صناعي: الأغشية المتخصصة في الصناعات الدوائية والغذائية**

يُستفاد من مبدأ الانتشار التسهيلي في تصميم **أجهزة توصيل الأدوية** (Drug Delivery Systems) المتخصصة. فبعض الأدوية لا تستطيع اختراق الأغشية الحيوية بمفردها، لذلك يتم تصميم **أنظمة توصيل ذكية** تستخدم جزيئات ناقلة تحاكي عمل بروتينات النقل في الغشاء الخلوي. كما تُستخدم أغشية التناضح في صناعة **الأدوية الوريدية** لضمان نقاء المحاليل الطبية من الجسيمات الضارة. وفي **الصناعات الغذائية**، تُستخدم أغشية الانتشار التسهيلي في تقنية **التنقية بالأغشية** (Membrane Filtration) لفصل البروتينات من المحاليل الغذائية وتنقية العصائر ومنتجات الألبان. وتُطبّق أيضًا في **صناعة المستحضرات الصيدلانية** للتحكم في معدل إطلاق الدواء في الجسم عبر أغشية تحاكي عمل الناقلات البروتينية.

الفصل الرابع

# النقل النشط عبر الغشاء الخلوي

Active Transport Across the Cell Membrane

---

*النقل النشط* هو عملية انتقال المواد عبر الغشاء الخلوي **عكس تدرّج التركيز** (من منطقة تركيز منخفض إلى منطقة تركيز عالٍ)، مما يتطلب استهلاك الطاقة الخلوية على شكل **ATP** (الأدينوزين ثلاثي الفوسفات). يتيح النقل النشط للخلية تجميع المواد الضرورية داخلها حتى عندما يكون تركيزها في الخارج أقل من تركيزها في الداخل، وهو أمر ضروري لاستمرار العديد من العمليات الحيوية كالنقل العصبي والامتصاص المعوي والحفاظ على جهد الراحة الكهربائي للخلية. ويُقسّم النقل النشط إلى

نوعين: **النقل النشط الأولي** الذي يستهلك ATP مباشرة، و**النقل النشط الثانوي** الذي يستفيد من تدرّج التركيز المُنشأ سابقًا بوساطة النقل النشط الأولي.

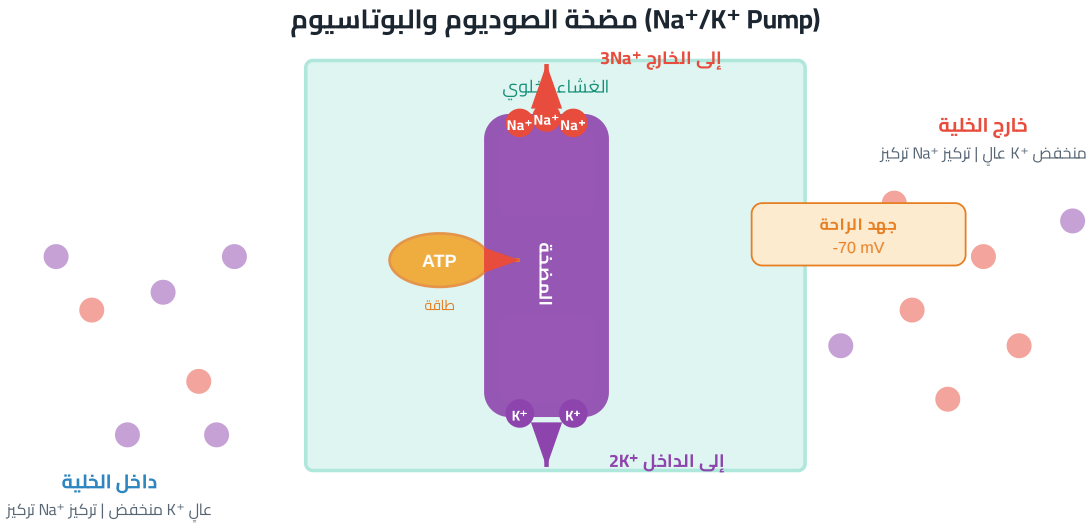
## مضخة الصوديوم والبوتاسيوم (Sodium-Potassium Pump)

تُعدّ مضخة الصوديوم والبوتاسيوم من أهم الأمثلة على النقل النشط الأولي في الخلايا الحية، وهي بروتين ناقل موجود في أغشية جميع خلايا الحيوانات تقريبًا. تقوم هذه المضخة بنقل أيونات الصوديوم (+Na) من داخل الخلية إلى خارجها (عكس تدرّج التركيز)، وفي المقابل نقل أيونات البوتاسيوم (+K) من خارج الخلية إلى داخلها. تعمل المضخة وفق آلية محددة تتضمن تغيّر شكل البروتين الناقل عند ارتباط كل أيون به واستهلاك جزيء ATP لكل دورة كاملة. لكل دورة كاملة تُنقَل ثلاث أيونات صوديوم إلى الخارج ويونان بوتاسيوم إلى الداخل، مما يُنشئ فرقًا في التركيز والشحنة عبر الغشاء الخلوي.

### أهمية مضخة الصوديوم والبوتاسيوم

- **الحفاظ على جهد الراحة:** تحافظ على فرق الجهد الكهربائي (حوالي -70 ملي فولت) عبر الغشاء الخلوي وهو ضروري لعمل الأعصاب والعضلات وإيصال الإشارات العصبية.
- **التحكم في حجم الخلية:** تمنع دخول الماء الزائد عبر التنافذ من خلال الحفاظ على التركيز الأسموزي المناسب داخل الخلية.
- **دعم النقل الثانوي:** يُستفاد من تدرّج الصوديوم المُنشأ في النقل النشط الثانوي لجزيئات مثل الجلوكوز والأحماض الأمينية عبر الأمعاء والكلى.
- **النقل العصبي:** ضرورية لتوليد وإيصال السيال العصبي (Impulse) على طول المحور العصبي وال مشابك العصبية.
- **استهلاك الطاقة:** تستهلك هذه المضخة وحدها حوالي 30 إلى 40 بالمائة من إجمالي طاقة الخلية (ATP) مما يدلّ على أهميتها المحورية.

### شكل توضيحي: مضخة الصوديوم والبوتاسيوم




*تُنقل 3 أيونات صوديوم إلى الخارج و2 أيونات بوتاسيوم إلى الداخل لكل دورة، مع استهلاك جزيء ATP واحد*

### الفرق الجوهري بين النقل النشط والنقل السلبي

يتلخّص الفرق في نقطتين أساسيتين: الأول هي **اتجاه النقل**، فالنقل السلبي يحدث مع تدرّج التركيز (من الأعلى إلى الأقل) بينما النقل النشط يحدث عكس التدرّج (من الأقل إلى الأعلى). والثانية هي **الحاجة للطاقة**، فالنقل السلبي لا يحتاج إلى طاقة بينما النقل النشط يستهلك ATP. كلاهما قد يستخدم بروتينات ناقلة أو قنوات، لكن النقل النشط يحتاج طاقة إضافية لتحريك المواد عكس تدرج التركيز.

### تطبيقات حياتية وصناعية: النقل النشط في الطب والصناعة

يُستفاد من فهم آلية النقل النشط في تطوير العديد من **الأدوية الحيوية**. على سبيل المثال، تُستخدم أدوية مثل **الديجوكسين** (المستخدمة في علاج فشل القلب) التي تعمل على تثبيط مضخة الصوديوم والبوتاسيوم مما يزيد من قوة انقباض عضلة القلب. كما تُستخدم مبادئ النقل النشط في **أنظمة التنقية الصناعية** لإزالة المعادن الثقيلة من المياه الملوثة باستخدام مضخات أيونية صناعية تحاكي عمل المضخات البيولوجية. وفي **صناعة المستحضرات الصيدلانية**، تُصمّم أدوية تستهدف بروتينات النقل النشط مثل **مثبطات مضخة البروتون** (PPIs) المستخدمة في علاج قرحة المعدة والارتداد المريئي. كما يُستفاد من فهم النقل النشط الثانوي في تطوير **محاليل معالجة الجفاف الفموية** التي تعتمد على نقل الصوديوم والماء المتزامل في خلايا الأمعاء.

الفصل الخامس

# النقل الجماعي عبر الغشاء الخلوي

Bulk Transport Across the Cell Membrane

---

*النقل الجماعي* هو عملية نقل كميات كبيرة من المواد (جزيئات كبيرة أو كتل من المواد) عبر الغشاء الخلوي، ويحدث ذلك عن طريق تغيّر شكل الغشاء نفسه وتكوين حويصلات. يتضمّن نوعين رئيسيين: **الإدخال الخلوي (Endocytosis)** وهو عملية إدخال المواد إلى الخلية، و**الإخراج الخلوي (Exocytosis)** وهو عملية إخراج المواد من الخلية إلى البيئة المحيطة. يختلف هذا النوع من النقل عن النقل السلبي والنشط التقليدي في أنه ينقل كميات كبيرة دفعة واحدة وليس جزيئات فردية، كما يتطلّب استهلاك طاقة على شكل ATP.

## الإدخال الخلوي (Endocytosis)

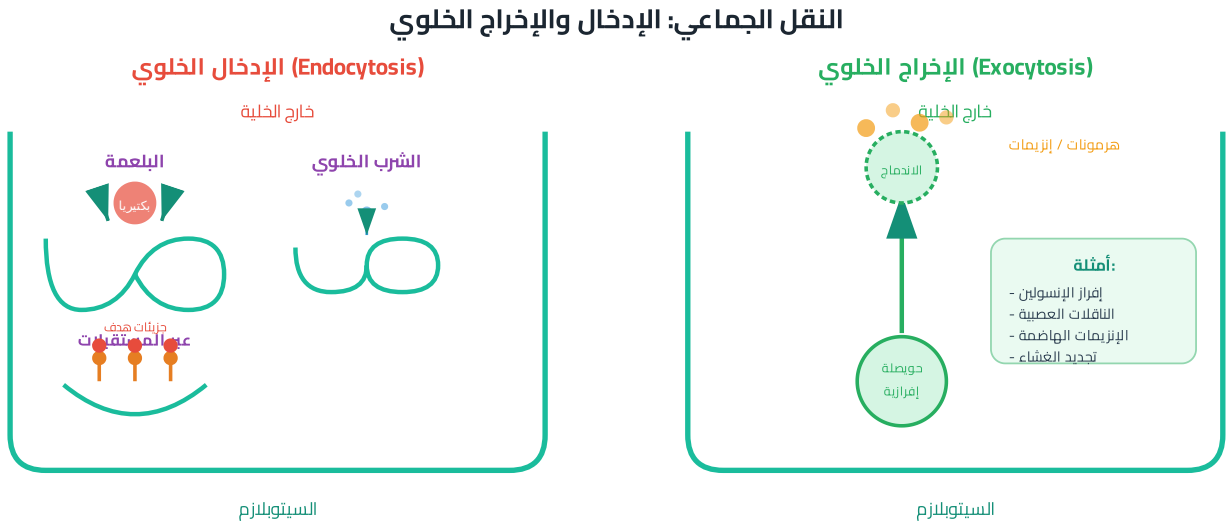
في عملية الإدخال الخلوي، ينثني جزء من الغشاء الخلوي حول المادة المراد إدخالها مُكوّنًا حويصلة تندمج مع أغشية الخلية من الداخل. يتنوّع الإدخال الخلوي إلى ثلاثة أنواع بناءً على حجم وطبيعة المادة المُدخلة: **البلعمة (Phagocytosis)** وهي ابتلاع الجزيئات الكبيرة أو الخلايا الكاملة (مثل البكتيريا) عن طريق امتداد أقدام كاذبة (Pseudopodia) تحيط بالفريسة وتُكوّن حويصلة بلعمة تندمج مع الجسيمات الحالة لهضمها. **الشرب الخلوي (Pinocytosis)** وهو ابتلاع قطرات سائلة صغيرة تحوي جزيئات ذائبة في السائل المحيط بالخلية. و**الإدخال الخلوي عبر المستقبلات** (Receptor-Mediated Endocytosis) وهي آلية أكثر تحديدًا تعتمد على ارتباط المادة بمستقبلات محددة على سطح الخلية قبل أن يُحيط بها الغشاء.

## الإخراج الخلوي (Exocytosis)

*الإخراج الخلوي* هو العملية العكسية للإدخال الخلوي، حيث تندمج الحويصلات المحتوية على المواد المراد إخراجها مع الغشاء الخلوي من الداخل، فتُفرغ محتوياتها إلى خارج الخلية. تُستخدم هذه العملية لإخراج الهرمونات مثل الإنسولين إلى مجرى الدم،

وإفراز الإنزيمات الهاضمة من خلايا المعدة والبنكرياس، وإطلاق الناقلات العصبية (Neurotransmitters) في المشابك العصبية لنقل الإشارة بين الخلايا العصبية. كما تلعب هذه العملية دورًا في إدماج البروتينات الغشائية والكربوهيدرات في الغشاء الخلوي نفسه، مما يُساهم في تجديد الغشاء وإصلاحه.

### شكل توضيحي: النقل الجماعي (الإدخال والإخراج الخلوي)




*الإدخال الخلوي يتضمن البلعمة والشرب الخلوي والإدخال عبر المستقبلات. الإخراج الخلوي يُفرز الهرمونات والإنزيمات عبر اندماج الحويصلات بالغشاء*

### تطبيقات حياتية وصناعية للنقل الجماعي

تلعب عمليات النقل الجماعي دورًا حيويًا في العديد من المجالات. في **الجهاز المناعي**، تقوم خلايا البلعمة الكبيرة (Macrophages) بالبلعمة لابتلاع البكتيريا والفيروسات والمواد الغريبة وتدميرها، كما تقوم الخلايا اللمفاوية بـالبلعمة لتقديم مستضدات البكتيريا للخلايا التائية. وفي **الصناعة الدوائية**، تُستخدم تقنيات تحاكي الإدخال الخلوي عبر المستقبلات لتصميم **أدوية موجهة** (Targeted Drug Delivery) تصل إلى خلايا سرطانية محددة دون التأثير على الخلايا السليمة. وفي **الصناعات الحيوية**، تُستخدم تقنية الإخراج الخلوي في الخمائر والبكتيريا المُعدّلة وراثيًا لإنتاج الإنزيمات والبروتينات المُستخدمة في المنظفات الحيوية وصناعة الأجبان. كما تُستخدم في **صناعة اللقاحات** حيث يتم إدخال المستضدات إلى خلايا الجهاز المناعي عن طريق الإدخال الخلوي لتحفيز الاستجابة المناعية المناسبة.

الفصل السادس

# وظائف الغشاء الخلوي واضطراباتها

Cell Membrane Functions and Disorders

---

يؤدي الغشاء الخلوي مجموعة متكاملة من الوظائف الحيوية الضرورية لبقاء الخلية وأداء دورها في الكائن الحي ككل. ويمكن تلخيص هذه الوظائف في عدة محاور رئيسية تشمل: حماية الخلية من العوامل الخارجية، تنظيم مرور المواد إليها ومنها، التواصل الخلوي مع البيئة المحيطة، والتعرف الخلوي على الخلايا المختلفة. وعند حدوث خلل في أي من هذه الوظائف تنشأ أمراض واضطرابات خطيرة تؤثر على صحة الكائن الحي وقد تُهدد حياته. لذلك يُعدّ فهم وظائف الغشاء الخلوي أساسًا لفهم الكثير من الأمراض وتطوير طرق علاجها.

| الوظيفة | الوصف | المكوّن المسؤول |
|---|---|---|
| **الحماية** | يعمل كحاجز ميكانيكي يحمي محتويات الخلية من التلف الخارجي ويحافظ على شكلها | الطبقة الدهنية الثنائية |
| **النفاذية الاختيارية** | ينظّم دخول وخروج المواد بناءً على خصائصها الفيزيائية والكيميائية | البروتينات الناقلة والقنوات |
| **التواصل الخلوي** | يتلقى الإشارات الكيميائية والهرمونية ويُحوّلها إلى استجابات داخلية | مستقبلات البروتين السطحي |
| **التعرف الخلوي** | يُميّز بين خلايا الجسم والخلايا الغريبة كالبكتيريا والفيروسات | الكربوهيدرات (الغلاف السكري) |
| **الدعم الهيكلي** | يحافظ على شكل الخلية ويرتبط بالهيكل الخلوي الداخلي | البروتينات المحيطية |

## اضطرابات وظائف الغشاء الخلوي

عندما يفشل الغشاء الخلوي في أداء وظائفه الطبيعية نتيجة طفرات جينية أو عدوى بكتيرية أو عوامل بيئية، تظهر أمراض خطيرة تؤثر على أجهزة الجسم المختلفة. ومن أبرز هذه الاضطرابات ما يلي:

### أولًا: التليف الكيسي (Cystic Fibrosis)

يُعدّ التليف الكيسي من أكثر الأمراض الوراثية شيوعًا التي تصيب الغشاء الخلوي في البشر. ينتج عن طفرة في جين CFTR الذي يُشفّر لبروتين قناة الكلوريد الموجود في الغشاء الخلوي. عند تلف هذه القناة، يتعذّر خروج أيونات الكلوريد من الخلايا الظهارية في الرئتين والجهاز الهضمي، مما يؤدي إلى إنتاج مخاط سميك ولزج يُسدّ المجاري التنفسية والقنوات الصفراوية والبنكرياس. يُصيب هذا المرض حوالي واحد من كل 2500 مولود في الأعراق القوقازية، ويتميز بأعراض تنفسية مزمنة وصعوبات في الهضم ونمو بطيء.

### ثانيًا: مرض الكوليرا (Cholera)

يُسبّب بكتيريا الكوليرا (Vibrio cholerae) اضطرابًا خطيرًا في وظيفة الغشاء الخلوي لخلايا الأمعاء الدقيقة. تُفرز البكتيريا سُمًّا (Cholera Toxin) يؤثّر على بروتينات نقل أيونات الكلوريد في غشاء خلايا الأمعاء، مما يُسبب فتح قنوات الكلوريد بشكل مستمر. يؤدي ذلك إلى تدفّق غير طبيعي للماء والأملاح من الخلايا إلى تجويف الأمعاء بكميات كبيرة، مسببًا إسهالًا مائيًا شديدًا قد يُسبب جفافًا شديدًا وفقدان الحياة خلال ساعات إذا لم يُعالج بسرعة. وتُعدّ الكوليرا نموذجًا واضحًا على كيفية تأثير العوامل الخارجية الممرضة على وظائف الغشاء الخلوي.

### تطبيقات حياتية وصناعية: اضطرابات الغشاء الخلوي وتطوير العلاجات

أدّت دراسة اضطرابات الغشاء الخلوي إلى تطوير علاجات ثورية غيّرت مسار الطب الحديث. ففهم آلية التليف الكيسي أدى إلى ابتكار أدوية مثل **إيفاكافتور (Ivacaftor)** الذي يعمل على تصحيح وظيفة بروتين CFTR المُتضرر، مما حسّن جودة حياة المرضى بشكل كبير. كما أثمرت أبحاث الكوليرا عن تطوير **محاليل الإماهة الفموية (ORS)** التي تعتمد على مبدأ النقل النشط المتزامل لامتصاص الصوديوم والماء في الأمعاء، وقد أنقذت هذه المحاليل البسيطة ملايين الأرواح حول العالم واعتبرتها منظمة الصحة العالمية من أهم الإنجازات الطبية في القرن العشرين. وفي **الصناعة الدوائية**، تُطوَّر أدوية تُستهدف بروتينات الغشاء الخلوي مباشرة مثل حاصرات قنوات الكالسيوم المستخدمة في علاج ارتفاع ضغط الدم وأمراض القلب، ومثبطات مضخة البروتون المستخدمة في علاج قرحة المعدة.

### ملخص مقارن: آليات نقل المواد عبر الغشاء الخلوي

| الآلية | الاتجاه | الطاقة | البروتينات | أمثلة |
|---|---|---|---|---|
| الانتشار البسيط | مع تدرّج التركيز | لا يحتاج ATP | بدون بروتينات | الأكسجين وثاني أكسيد الكربون |
| التنافذ | مع تدرّج التركيز | لا يحتاج ATP | أكوابورينات (قنوات ماء) | حركة الماء عبر الأغشية |
| الانتشار التسهيلي | مع تدرّج التركيز | لا يحتاج ATP | ناقلات وقنوات بروتينية | الجلوكوز والأحماض الأمينية |
| النقل النشط | عكس تدرّج التركيز | يحتاج ATP | مضخات وناقلات | مضخة الصوديوم والبوتاسيوم |
| الإدخال الخلوي | إلى داخل الخلية | يحتاج ATP | انثناء الغشاء وتكوين حويصلات | البلعمة والشرب الخلوي |
| الإخراج الخلوي | إلى خارج الخلية | يحتاج ATP | اندماج الحويصلات مع الغشاء | إفراز الهرمونات والإنزيمات |

# أسئلة شاملة لمراجعة الكتاب

Comprehensive Review Questions

## الفصل الأول: الغشاء الخلوي - التعريف والخصائص

1. عَرِّف الغشاء الخلوي، واذكر النموذج الذي يصف تركيبه مع ذكر اسمي العالمين اللذين اقترحاه.
2. ما المقصود بالنفاذية الاختيارية للغشاء الخلوي؟ اذكر ثلاثة عوامل تحدّد قدرة المادة على العبور عبر الغشاء.
3. اشرح خاصية الديناميكية في الغشاء الخلوي، وكيف تُفيد كريات الدم الحمراء أثناء مرورها في الشعيرات الدموية الضيقة؟
4. وضّح كيف تتحقّق خاصية الإصلاح الذاتي في الغشاء الخلوي، وما أهمية هذه الخاصية للخلية؟
5. ما العلاقة بين الغشاء الخلوي وأجهزة الغسيل الكلوي (الديلزة) من حيث المبدأ العلمي؟

## الفصل الثاني: مكونات الغشاء الخلوي

1. اذكر المكونات الأربعة الرئيسية للغشاء الخلوي مع توضيح دور كل مكوّن.
2. اشرح تركيب الفسفوليبيد من حيث أجزائه المحبة والكارهة للماء، وكيف يُسهم هذا التركيب في تكوين الطبقة الثنائية؟
3. قارن بين البروتينات الناقلية والبروتينات المحيطية من حيث موقعها ووظائفها.
4. ما دور الكوليسترول في الغشاء الخلوي عند درجات الحرارة العالية والمنخفضة؟ ولماذا تختلف نسبته بين الخلايا العصبية والبكتيرية؟
5. وضّح دور الكربوهيدرات في تحديد فصيلة الدم، وكيف يُسهم الغلاف السكري في التعرف الخلوي؟
6. اربط بين فهم تركيب الغشاء الخلوي وتطوير أغشية التناضح العكسي المستخدمة في تحلية المياه.

## الفصل الثالث: النقل السلبي عبر الغشاء الخلوي

1. عَرِّف النقل السلبي واذكر ثلاث خصائص مشتركة بين جميع آلياته.
2. ما الفرق بين الانتشار البسيط والانتشار التسهيلي؟ اذكر مثالًا على كل منهما في جسم الإنسان.
3. وضّح مبدأ التنافذ (الأسموز)، واذكر الدور الذي تلعبه بروتينات الأكوابورينات.
4. قارن بين المحلول المتساوي التركيز والمحلول الأقل تركيزًا والمحلول الأعلى تركيزًا من حيث تأثيرها على الخلية مع ذكر مثال لكل منها.
5. لماذا يُستخدم المحلول الملحي الفسيولوجي (0.9 بالمائة NaCl) في الحقن الوريدية بدلًا من الماء المقطر؟
6. اشرح كيف يُستفاد من مبدأ التنافذ في حفظ الأغذية بالملح، مع توضيح ما يحدث للبكتيريا في هذه الحالة.
7. اذكر العوامل التي تؤثر على معدل الانتشار البسيط، ووضّح تأثير كل عامل.

## الفصل الرابع: النقل النشط عبر الغشاء الخلوي

1. عَرِّف النقل النشط، ووضّح الفرق الجوهري بينه وبين النقل السلبي من حيث اتجاه النقل والحاجة للطاقة.
2. اشرح آلية عمل مضخة الصوديوم والبوتاسيوم بالتفصيل، واذكر عدد أيونات الصوديوم والبوتاسيوم التي تُنقل في كل دورة.
3. ما أهمية مضخة الصوديوم والبوتاسيوم في كل مما يأتي: جهد الراحة، حجم الخلية، النقل العصبي؟
4. قارن بين النقل النشط الأولي والنقل النشط الثانوي مع ذكر مثال لكل منهما.
5. لماذا تستهلك مضخة الصوديوم والبوتاسيوم حوالي 30 إلى 40 بالمائة من إجمالي طاقة الخلية؟ وماذا يدلّ ذلك على أهميتها؟
6. كيف يُستفاد من فهم آلية النقل النشط في تطوير الأدوية مثل الديجوكسين ومثبطات مضخة البروتون؟

## الفصل الخامس: النقل الجماعي عبر الغشاء الخلوي

1. عَرِّف النقل الجماعي، ووضّح ما يميّزه عن النقل السلبي والنقل النشط التقليدي.
2. قارن بين الإدخال الخلوي والإخراج الخلوي من حيث المبدأ والآلية والأمثلة.
3. اذكر الأنواع الثلاثة للإدخال الخلوي مع توضيح آلية كل نوع ومثال عليه.
4. ما الفرق بين البلعمة والشرب الخلوي والإدخال الخلوي عبر المستقبلات من حيث حجم المادة المُدخلة وآلية الارتباط؟
5. وضّح دور الإخراج الخلوي في إفراز الهرمونات والناقلات العصبية والإنزيمات الهاضمة.
6. اشرح كيف تُستفاد من تقنيات الإدخال الخلوي عبر المستقبلات في تصميم الأدوية الموجهة للخلايا السرطانية.

## الفصل السادس: وظائف الغشاء الخلوي واضطراباتها

1. اذكر الوظائف الرئيسية للغشاء الخلوي مع تحديد المكوّن المسؤول عن كل وظيفة.
2. اشرح كيف يُسبّب مرض التليف الكيسي اضطرابًا في وظيفة الغشاء الخلوي، وما الجين المتأثر في هذا المرض؟
3. وضّح آلية تأثير سُم الكوليرا على بروتينات نقل الكلوريد في غشاء خلايا الأمعاء، وما النتيجة المترتبة على ذلك.
4. اربط بين فهم اضطرابات الغشاء الخلوي وتطوير محاليل الإماهة الفموية (ORS)، ووضّح المبدأ العلمي الذي تعتمد عليه هذه المحاليل.
5. كيف تُستخدم بروتينات الغشاء الخلوي كأهداف دوائية في علاج أمراض مثل ارتفاع ضغط الدم وقرحة المعدة؟

## أسئلة مقارنة وتفكير نقدي

1. ضع جدولًا مقارنًا بين جميع آليات نقل المواد عبر الغشاء الخلوي من حيث: الاتجاه، الحاجة للطاقة، استخدام البروتينات، ومثال على كل آلية.
2. تخيّل أن غشاء خلية حيوانية فقد خاصية النفاذية الاختيارية وأصبح نفوذًا بالكامل لجميع المواد. ما النتائج المحتملة لذلك على حياة الخلية؟
3. إذا تمّت إزالة الكوليسترول من الغشاء الخلوي لخلايا عصبية، فما التأثير المتوقع عند درجات حرارة مرتفعة وعند درجات حرارة منخفضة؟
4. لماذا لا يمكن للجلوكوز العبور عبر الغشاء بالانتشار البسيط رغم أن الخلايا تحتاجه بكميات كبيرة؟ وكيف يتغلّب الجسم على هذه المشكلة؟
5. ناقش العبارة التالية: "الغشاء الخلوي ليس مجرد حاجز سلبي، بل هو عضو ديناميكي نشط يُشارك في تنظيم جميع العمليات الحيوية" هل توافق على هذه العبارة؟ وضّح إجابتك بأمثلة من الكتاب.
6. أيُهما أكثر خطورة على الخلية: وجود خلل في مضخة الصوديوم والبوتاسيوم أم وجود خلل في بروتينات الأكوابورينات؟ ناقش مع التبرير.

# الغشاء الخلوي: بوابة الخلية الحيوية

فهم تركيب الغشاء الخلوي ووظائفه أساسٌ متين لفهم الحياة على المستويين الخلوي والعضوي