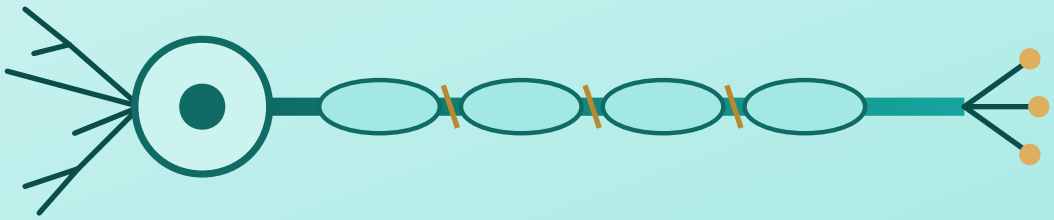
سلسلة الأحياء التفاعلية — الصف الحادي عشر

السيّال العصبي
من العصبون إلى التشابك العصبي

رحلة علمية داخل الخلية العصبية: التركيب، النشأة، والانتقال



الفصل الأول: الجهاز العصبي — من محتوى منهج الأحياء 11 (الجزء الأول)

مقدّمة الكتاب

يتميّز جسم الإنسان بشبكة اتصالات مذهلة الدقة تربط بين تريليونات الخلايا، تتحكّم في كل حركة نقوم بها، وكل إحساس نشعر به، بل وحتى في الأفكار التي تخطر ببالنا في هذه اللحظة. هذه الشبكة هي **الجهاز العصبي**، ولبنته الأساسية هي خلية مذهلة التصميم تُدعى **العصبون (Neuron)**.

يأخذك هذا الكتاب في رحلة مركّزة تبدأ من أصغر وحدة بنائية في الجهاز العصبي — العصبون — وتنتهي عند اللحظة التي تنتقل فيها الرسالة العصبية من خلية إلى أخرى عبر التشابك العصبي (Synapse). بين هاتين المحطتين، ستتعرّف على تركيب العصبون وأنواعه، وعلى الآلية الكهروكيميائية الدقيقة التي تُنشئ ما يُعرف بـ"السيال العصبي"، وكيف ينتقل هذا السيال بسرعة مذهلة قد تصل إلى 120 م/ث في بعض الألياف العصبية.

لم يقتصر هذا الكتاب على إعادة صياغة محتوى المنهج الدراسي فحسب، بل أضاف إليه أشكالًا توضيحية مُصمَّمة خصيصًا، وبطاقات مصطلحات ثنائية اللغة، وجداول مقارنة، وتطبيقات من الحياة اليومية والصناعة والطب، إضافة إلى نصائح صحية وأسئلة متدرّجة الصعوبة في نهاية كل فصل، وامتحانًا شاملًا في ختام الكتاب.

أهداف الكتاب

1. وصف تركيب الخلية العصبية (العصبون) وتصنيفها من حيث الشكل والوظيفة.
2. توضيح مفهوم السيال العصبي، واستنتاج آلية تكوّنه وانتقاله.
3. المقارنة بين النقل المتواصل والنقل القافز للسيال العصبي وتفسير الفرق بينهما.
4. شرح آلية انتقال السيال العصبي عبر التشابك العصبي (التشابك الكيميائي).
5. ربط المفاهيم النظرية بتطبيقات طبية وصناعية وحياتية واقعية.

جدول المحتويات

١	**العصبون: الوحدة البنائية والوظيفية للجهاز العصبي** التركيب، الزوائد الشجرية، جسم الخلية، المحور الأسطواني، الغمد الميليني	5
٢	**أنواع الخلايا العصبية وتركيب العصب** التصنيف الشكلي والوظيفي، الخلايا الدبقية، تركيب العصب	13
٣	**السيال العصبي: آلية النشأة** الاستقطاب، إزالة الاستقطاب، انعكاس الاستقطاب، إعادة الاستقطاب، فوق الاستقطاب	21
٤	**انتقال السيال العصبي على طول المحور** النقل المتواصل والنقل القافز، جهد العتبة، فترة الجموح	31
٥	**التشابك العصبي: نقل الرسالة بين العصبونات** التركيب، الناقلات العصبية، آلية النقل الكيميائي	39
*	**الاختبار الشامل** 30 سؤال اختيار من متعدد يغطي فصول الكتاب	47
*	**معجم المصطلحات** قائمة بجميع المصطلحات العلمية الواردة في الكتاب	53

الفصل الأول

العصبون: الوحدة البنائية والوظيفية للجهاز العصبي

تعرّف على الخلية التي تُشكّل حجر الأساس في كل فكرة، وكل حركة، وكل إحساس

يُعدّ **العصبون (Neuron)** الوحدة التركيبية والوظيفية للنسيج العصبي، إذ يُشكّل نحو 10% فقط من هذا النسيج بينما تُشكّل الخلايا الداعمة الباقي. يختصّ العصبون باستقبال المنبّهات المختلفة، ونقلها، والاستجابة لها على صورة سيالات عصبية تصل إلى أعضاء الاستجابة كالعضلات والغدد. والعصبونات، على عكس معظم خلايا الجسم، خلايا لا تُعوَّض بعد فقدها؛ إذ فقدت القدرة على الانقسام منذ مراحل مبكرة من نمو الجنين تقريبًا، وهذا ما يجعل الحفاظ عليها من الإصابة أمرًا بالغ الأهمية.

عصبون — Neuron

الوحدة التركيبية والوظيفية الأساسية للجهاز العصبي؛ خلية متخصصة في استقبال المنبّهات ونقلها والاستجابة لها بتوليد سيالات عصبية.

أولًا: الخلايا الدبقية — رفيقة العصبون الداعمة

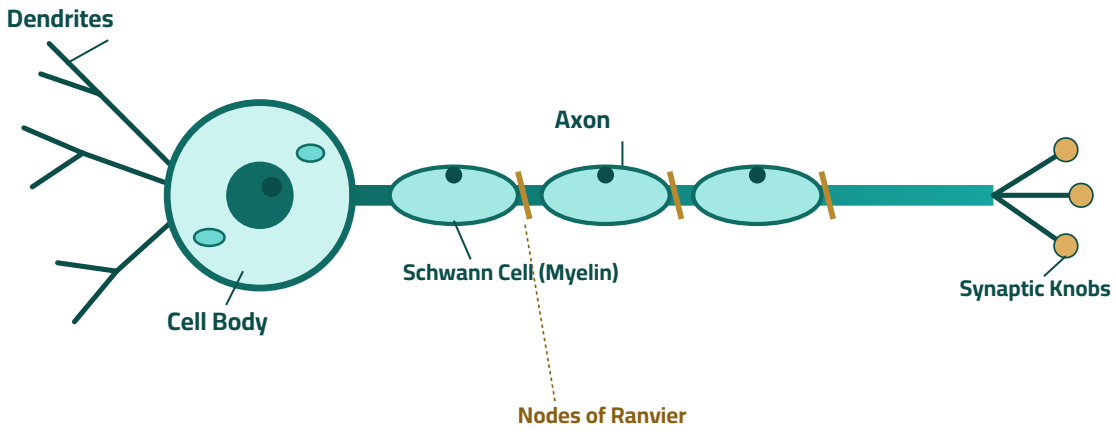
يحاط كل عصبون بحوالي عشر خلايا داعمة تُسمّى **الخلايا الدبقية (Glial cells)**، وهي خلايا مختلفة الأشكال والوظائف تعمل على ربط العصبونات ببعضها ودعم النسيج العصبي، كما تُسهم في إمداد العصبونات بالغذاء والأكسجين، ونقل الفضلات مثل ثاني أكسيد الكربون من العصبونات إلى الدم. وخلافًا للعصبونات، تحتفظ الخلايا الدبقية بالقدرة على الانقسام طوال الحياة.

خلايا دبقية (خلايا عصبية داعمة) — Glial cells / Neuroglia

خلايا داعمة للنسيج العصبي، تربط العصبونات ببعضها، وتغذّيها، وتحميها، ولا تشارك مباشرة في توليد السيال العصبي، لكنها تحتفظ بالقدرة على الانقسام.

ثانيًا: تركيب العصبون

تختلف العصبونات في الحجم والطول والشكل، إذ قد يتراوح طولها من أجزاء من الميليمتر إلى نحو المتر الواحد (كما في عصبونات الحركة الممتدة من الحبل الشوكي إلى أصابع القدم). ومع هذا التنوّع الهائل، يتقاسم كل عصبون ثلاثة أقسام تركيبية رئيسة، هي: الزوائد الشجرية، وجسم الخلية، والمحور الأسطواني.



شكل (1-1): تركيب العصبون النموذجي — يوضح الزوائد الشجرية، وجسم الخلية، والمحور الأسطواني المغلّف بالغمد الميليني، وينتهي بأزرار تشابكية

1) الزوائد الشجرية (Dendrites)

زوائد عصبية متفرعة تُعدّ امتدادات للسيتوبلازم، تتناقص في القطر كلما ابتعدت عن جسم الخلية. تستقبل الزوائد الشجرية المعلومات (السيالات العصبية) وتنقلها باتجاه جسم الخلية. وكلما زاد عدد التفرعات والتشعبات في الزوائد الشجرية، زادت مساحة سطحها القادرة على تكوين اتصالات (تشابكات) مع عصبونات أخرى، مما يزيد من كمّ المعلومات التي يمكن للعصبون استقبالها في اللحظة الواحدة.

2) جسم الخلية (Cell body / Soma)

يُشكّل الجزء المركزي في العصبون، ويحوي معظم عضيات الخلية باستثناء السنتريولات (المريكزات)، وهو ما يُفسّر عجز العصبون عن الانقسام. يقوم جسم الخلية بالعمليات الأيضية، ويزوّد الخلية بالطاقة اللازمة لعملها، ولإنتاج البروتين والنواقل العصبية.

3) المحور الأسطواني (Axon)

امتداد طويل لجسم العصبون يحوي عددًا من الميتوكوندريا والأنيبيبات الدقيقة والإنزيمات، وينتهي بنهايات طرفية تحوي الأزرار الطرفية التشابكية. تحيط ببعض المحاور طبقة رقيقة من مادة دهنية بروتينية تُدعى **الغمد الميليني**، تنشأ من خلايا تُسمّى **خلايا شفان**، وتُسمّى الألياف التي تحوي هذا الغمد **ألياف ميلينية**. وتحوي الألياف الميلينية انغمادات غير مغلّفة تُدعى **عُقد رانفييه**، بينما تخلو بعض المحاور من الغمد الميليني وتُدعى **ألياف لا ميلينية**.

الزوائد الشجرية
Dendrites

امتدادات سيتوبلازمية متفرعة قصيرة تستقبل المعلومات وتنقلها نحو جسم الخلية.

المحور الأسطواني
Axon

امتداد طويل واحد لجسم العصبون ينقل السيال العصبي بعيدًا عن جسم الخلية باتجاه عصبون أو عضو آخر.

الغمد الميليني
Myelin sheath

طبقة عازلة دهنية بروتينية تحيط بمحاور بعض العصبونات، تسرّع من انتقال السيال العصبي.

خلية شفّان
Schwann cell

نوع من الخلايا الدبقية في الجهاز العصبي الطرفي، تلتفّ حول المحور الأسطواني مكوّنة الغمد الميليني.

عُقدة رانفييه
Node of Ranvier

فجوة غير مغلّفة بالميلين بين خليتَي شفان متجاورتين على طول المحور الأسطواني، تسمح بتوليد السيال العصبي فيها بسرعة.

الأزرار التشابكية الطرفية
Synaptic knobs

انتفاخات صغيرة في نهاية فروع المحور الأسطواني تحوي حويصلات النواقل العصبية.

⚖ أهم الفروقات: الزوائد الشجرية مقابل المحور الأسطواني

وجه المقارنة	الزوائد الشجرية	المحور الأسطواني
العدد في العصبون الواحد	عدة زوائد متفرعة	محور واحد فقط
الطول	قصيرة نسبيًا	قد يمتد لمسافات طويلة (حتى نحو المتر)
اتجاه نقل السيال	نحو جسم الخلية	بعيدًا عن جسم الخلية
وجود الغمد الميليني	لا يوجد	قد يوجد (ألياف ميلينية) أو لا (ألياف لا ميلينية)
الشكل	متشعبة كأغصان الشجرة	أسطواني ملس نسبيًا

تطبيق من الحياة: لماذا تُعدّ إصابات النخاع الشوكي خطيرة؟

لأن العصبونات فقدت القدرة على الانقسام، فإن تلف عصبونات الحبل الشوكي في حوادث السيارات أو الغوص في مياه ضحلة غالبًا ما يكون دائمًا؛ إذ لا يستطيع الجسم توليد عصبونات جديدة تعوّض التالفة، على عكس خلايا الجلد أو الدم التي تتجدد باستمرار. ولهذا تُعدّ الوقاية (حزام الأمان، خوذة الدرّاجة، قواعد السلامة في الرياضة) خط الدفاع الأول لحماية الجهاز العصبي.

تطبيق صناعي: هندسة الواجهات العصبية (Neural Interfaces)

يعتمد مهندسو الأجهزة الطبية الحيوية على معرفة دقيقة بأقطار المحاور العصبية وتوزيع عُقد رانفييه لتصميم أقطاب كهربائية دقيقة (Electrodes) تُزرع في الأعصاب الطرفية أو الدماغ، وتُستخدم في الأطراف الصناعية الذكية وأجهزة تنظيم ضربات القلب العصبية، وواجهات الدماغ والحاسوب (Brain-Computer Interfaces). كذلك، ألهم تركيب الغمد الميليني، بوصفه عازلًا حيويًا فائق الكفاءة، مهندسي الكابلات الدقيقة (Micro-cables) في صناعة الإلكترونيات الحيوية لتصميم عوازل تقلّل من تسرّب الإشارة الكهربائية.

تغذية داعمة لصحة الغمد الميليني والخلايا العصبية

يحتاج الجهاز العصبي إلى عناصر غذائية محدّدة للحفاظ على سلامة الأغشية والغمد الميليني، أبرزها الأحماض الدهنية أوميغا-3، وفيتامين B12، ومضادات الأكسدة. إليك ثلاث وجبات مقترحة:

وجبة الإفطار

بيض مسلوق + شريحة خبز أسمر + حفنة جوز — مصدر لفيتامين B12 ومضادات الأكسدة.

وجبة الغداء

سمك سلمون أو سردين مشوي مع خضار مطهوة على البخار وأرز بني — غني بأوميغا-3.

وجبة العشاء الخفيفة

زبادي قليل الدسم مع بذور شيا وموز — يدعم النواقل العصبية وامتصاص الكالسيوم.

نصيحة صحية

احرص دائمًا على ارتداء الخوذة عند ركوب الدراجة الهوائية أو النارية، وحزام الأمان أثناء القيادة؛ فالضربات القوية على الرأس أو العمود الفقري قد تؤدي إلى تلف دائم في عصبونات الدماغ أو الحبل الشوكي لا يمكن تعويضه.

ماذا تعلّمت في هذا الفصل؟

- العصبون هو الوحدة التركيبية والوظيفية للنسيج العصبي، ولا يملك القدرة على الانقسام.
- تحيط بالعصبون خلايا دبقية داعمة تغذّيه وتحميه دون أن تشارك مباشرة في توليد السيال.
- يتكوّن العصبون من: زوائد شجرية (استقبال)، وجسم خلية (أيض وإنتاج طاقة)، ومحور أسطواني (نقل السيال بعيدًا عن جسم الخلية).
- قد يُغلّف المحور بغمد ميليني تكوّنه خلايا شفان، وتفصل بين قطعه عُقد رانفييه.

أسئلة الفصل الأول

اختيار من متعدد سهل

1. أيّ أجزاء العصبون هو المسؤول عن استقبال السيالات العصبية القادمة من عصبونات أخرى؟

أ) جسم الخلية

ب) الزوائد الشجرية

ج) المحور الأسطواني

د) الأزرار التشابكية

صواب / خطأ سهل

2. تحتفظ العصبونات بالقدرة الكاملة على الانقسام طوال حياة الإنسان. ( )

إكمال الفراغ سهل

3. تُدعى الخلايا التي تُكوّن الغمد الميليني حول المحاور في الجهاز العصبي الطرفي بـ .....

مطابقة متوسط

4. صِل كل مصطلح في العمود (أ) بما يناسبه من العمود (ب):

العمود (أ)	العمود (ب)
1) الزوائد الشجرية	أ) عازل دهني يسرّع انتقال السيال
2) الغمد الميليني	ب) استقبال السيالات ونقلها لجسم الخلية
3) عُقدة رانفييه	ج) موقع تجدد جهد الفعل على طول المحور الميليني

استنتاجي متوسط

5. لماذا يُعدّ غياب السنتريولات (المريكزات) في جسم العصبون سببًا مباشرًا لعجزه عن الانقسام؟ اربط إجابتك بوظيفة السنتريولات في عملية الانقسام الخلوي.

تفسير علمي صعب

6. تزداد كمية المعلومات التي يستقبلها العصبون كلما زاد عدد التفرعات في زوائده الشجرية. فسّر هذه العلاقة من الناحية التركيبية.

مقارنة صعب

7. قارن بين العصبون الميليني والعصبون اللاميليني من حيث التركيب، وتوقّع أثر ذلك على سرعة انتقال السيال العصبي فيهما (سيتم تناول هذا بالتفصيل في الفصل الرابع).

سؤال مفتوح للنقاش (بلا إجابة نموذجية): يفقد المريض المصاب بتلفٍ في النخاع الشوكي القدرة على الحركة الإرادية أسفل موضع الإصابة بشكل دائم غالبًا، بينما تتجدد الأعصاب الطرفية المقطوعة أحيانًا. ناقش مع زملائك الأسباب المحتملة لهذا الفرق، وابحث عن أحدث الأبحاث العلمية في مجال "إعادة تجديد الخلايا العصبية".

سؤال مفتوح للنقاش: في رأيك، كيف يمكن أن يُسهم فهمنا لتركيب العصبون في تطوير علاجات لأمراض تصيب الغمد الميليني مثل مرض التصلب اللويحي المتعدد (Multiple Sclerosis)؟

الفصل الثاني

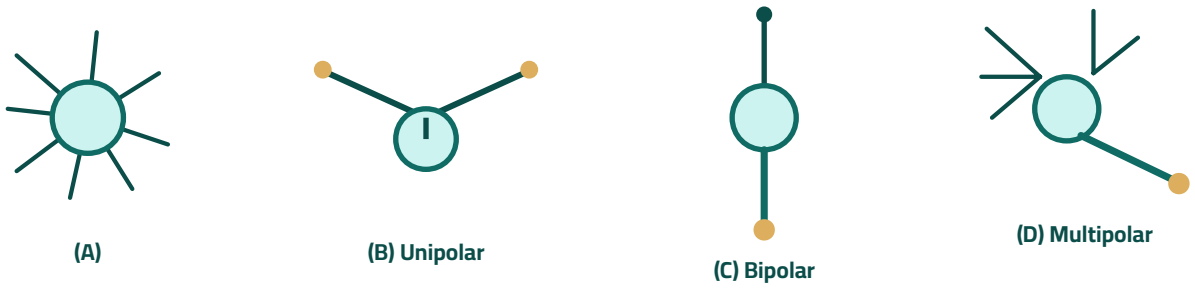
أنواع الخلايا العصبية وتركيب العصب

تصنيف العصبونات شكليًا ووظيفيًا، وكيف تتجمّع المحاور لتُكوّن عصبًا واحدًا

رأينا في الفصل الأول أن جميع العصبونات تشترك في الأجزاء الأساسية الثلاثة، لكنها تختلف فيما بينها اختلافًا كبيرًا من حيث الشكل الخارجي ومن حيث الوظيفة التي تؤديها. سنتعرّف في هذا الفصل على أساسَي التصنيف، ثم ننتقل لنرى كيف تتجمّع محاور العصبونات معًا مُكوّنةً ما نُسمّيه "العصب".

أولًا: تصنيف العصبونات من حيث الشكل

تُصنَّف العصبونات من الناحية الشكلية اعتمادًا على عدد الزوائد التي تخرج من جسم الخلية، وطريقة تفرّعها، إلى أربعة أشكال رئيسة:



شكل (2-1): الأشكال الأربعة للعصبونات حسب عدد زوائدها — لاحظ اختلاف عدد الزوائد الشجرية وطريقة خروجها من جسم الخلية في كل نوع

ثانيًا: تصنيف العصبونات من حيث الوظيفة

تُصنَّف العصبونات وظيفيًا إلى ثلاثة أنواع رئيسة، بحسب اتجاه السيال العصبي الذي تنقله:

عصبونات حسّية
Sensory Neurons

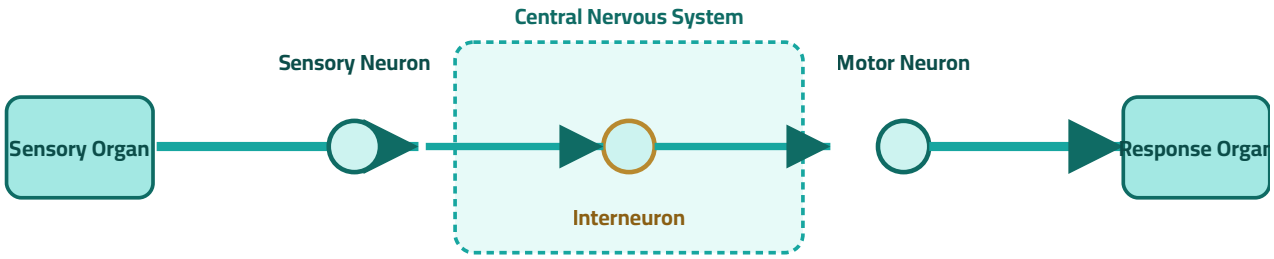
أحادية القطب، متصلة بأعضاء الاستقبال الحسي، تستقبل المؤثرات الخارجية والداخلية وتنقلها على شكل سيالات عصبية إلى الجهاز العصبي المركزي. توجد أجسام خلاياها في عقدة الجذر الظهري للحبل الشوكي.

عصبونات حركية
Motor Neurons

عديدة الأقطاب، تنقل الأوامر من الجهاز العصبي المركزي إلى أعضاء الاستجابة (العضلات والغدد). توجد أجسامها داخل المادة الرمادية في الجهاز العصبي المركزي.

عصبونات موصلة
Interneurons

ذات أشكال مختلفة، تُشكّل حلقة وصل تعمل على ربط العصبونات المتجاورة ببعضها، وتوجد بأكملها داخل المادة الرمادية في الجهاز العصبي المركزي.

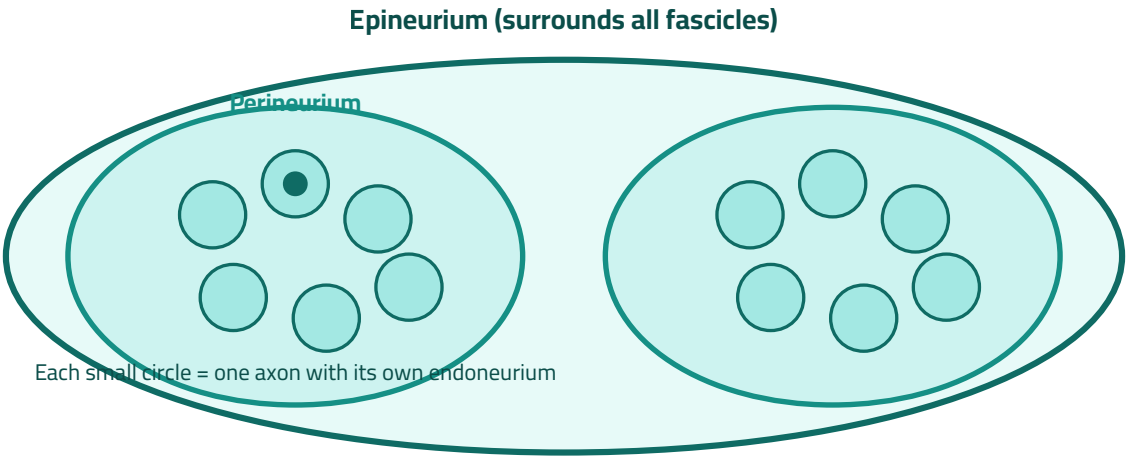


شكل (2-2): مسار السيال العصبي عبر الأنواع الوظيفية الثلاثة للعصبونات — من عضو الإحساس، عبر الجهاز العصبي المركزي، وصولًا إلى عضو الاستجابة

وجه المقارنة	عصبون حسي	عصبون حركي	عصبون موصل
الشكل الغالب	أحادي القطب	متعدد الأقطاب	أشكال مختلفة
اتجاه السيال	من المؤثر إلى المركز	من المركز إلى المستجيب	بين عصبونات متجاورة
موقع جسم الخلية	عقدة الجذر الظهري	المادة الرمادية بالمركز	المادة الرمادية بالمركز بالكامل

ثالثًا: تركيب العصب (Nerve)

يتكوّن **العصب** من مجموعة من الحُزَم العصبية التي تضمّ مجموعة من الزوائد والمحاور الأسطوانية الإسطوانية للعصبونات الحسية والحركية معًا. وتحاط كل حزمة بنسيج ضام يُدعى **غلاف الحزمة**، بينما تحاط جميع الحزم مجتمعة بنسيج ضام آخر يُدعى **غلاف العصب** ، أما المحور الأسطواني المفرد فيحيط به نسيج ضام رقيق يُدعى **غلاف المحور الأسطواني**.



شكل (2-3): تركيب العصب — حزم من المحاور العصبية، كل محور له غلافه الخاص، وكل حزمة محاطة بغلاف الحزمة، وجميع الحزم محاطة بغلاف العصب

⚖ ملاحظة مهمة

العصب الواحد قد يحمل في داخله عصبونات حسية وأخرى حركية معًا (عصب مختلط)، أو نوعًا واحدًا فقط؛ وهذا ما يُفسّر إمكانية فقدان الإحساس والحركة معًا عند إصابة عصب مختلط بالقطع أو الضغط.

تطبيق من الحياة: اعتلال الأعصاب السكري

يؤدي ارتفاع سكر الدم المزمن لدى مرضى السكري إلى تلف تدريجي في الأعصاب الطرفية الحسية، خصوصًا في القدمين، فيفقد المريض الإحساس بالألم أو الحرارة تدريجيًا. لهذا يُنصح مرضى السكري بفحص أقدامهم يوميًا بالعين لتفادي حدوث جروح أو حروق لا يشعرون بها.

تطبيق صناعي: فحوصات التوصيل العصبي في طب العمل

يستخدم أطباء الصحة المهنية فحص "سرعة التوصيل العصبي" (Nerve Conduction Study) لتشخيص اعتلال الأعصاب الطرفية الناتج عن التعرّض المهني للاهتزاز المستمر (كما في مشغّلي الآلات الثقيلة) أو للمواد الكيميائية السامة للأعصاب. كما ألهم تركيب العصب — حزم من الموصلات الفردية المعزولة، مُجمّعة داخل غلاف واحد — صناعة الكابلات الكهربائية متعددة الأنوية (Multi-core cables)، حيث يُعزل كل سلك على حدة، ثم تُجمّع مجموعة أسلاك داخل غلاف واقٍ مشترك، تمامًا كما تُجمّع المحاور داخل غلاف الحزمة ثم غلاف العصب.

نصيحة صحية

عند الشعور بخدر أو تنميل مستمر في اليدين أو القدمين، لا تتجاهل العَرَض؛ فقد يكون إشارة مبكرة لاعتلال عصبي طرفي ناتج عن مرض السكري، أو نقص فيتامين B12، أو ضغط مزمن على عصب معيّن (كما في متلازمة النفق الرسغي).

ماذا تعلّمت في هذا الفصل؟

- تُصنَّف العصبونات شكليًا إلى أربعة أنماط حسب عدد الزوائد الخارجة من جسم الخلية.
- تُصنَّف وظيفيًا إلى: حسية (نحو المركز)، وحركية (من المركز)، وموصلة (بين عصبونات متجاورة داخل المركز).
- يتكوّن العصب من حزم من المحاور، كل محور له غلافه، وكل حزمة لها غلافها، وجميع الحزم يحيط بها غلاف العصب.

أسئلة الفصل الثاني

اختيار من متعدد سهل

1. أيّ العصبونات التالية توجد أجسام خلاياها داخل المادة الرمادية في الجهاز العصبي المركزي بالكامل؟

أ) العصبون الحسي

ب) العصبون الحركي

ج) العصبون الموصل

د) ب و ج معًا

صواب / خطأ سهل

2. تنقل العصبونات الحركية السيال العصبي من أعضاء الاستقبال الحسي إلى الجهاز العصبي المركزي. ( )

إكمال الفراغ متوسط

3. يُدعى النسيج الضام الذي يحيط بجميع حزم العصب مجتمعةً بـ .....

استنتاجي متوسط

4. إذا تعرّض عصب مختلط (يحوي عصبونات حسية وحركية) لإصابة سحقية، فما التأثيرات المتوقعة على المريض من الناحيتين الحسية والحركية معًا؟

تحليل شكل صعب

5. بالنظر إلى تركيب العصب الموضّح في شكل (2-3)، فسّر لماذا يوفّر هذا التنظيم الهرمي (محور ← حزمة ← عصب) حماية ميكانيكية أفضل من وجود جميع المحاور عارية دون أغلفة؟

مقارنة شاملة صعب

6. قارن بين التصنيف الشكلي والتصنيف الوظيفي للعصبونات: أساس كل تصنيف، والغاية العلمية من كل منهما.

سؤال مفتوح للنقاش (بلا إجابة نموذجية): ابحث عن أمراض تصيب الأعصاب الطرفية نتيجة إصابة أغلفتها (كمتلازمة غيلان-باريه)، وناقش كيف يُفسّر تلف الأغلفة الأعراض التي تظهر على المريض.

الفصل الثالث

السيال العصبي: آلية النشأة

كيف تتحول شحنة كهربائية عابرة إلى رسالة عصبية دقيقة؟

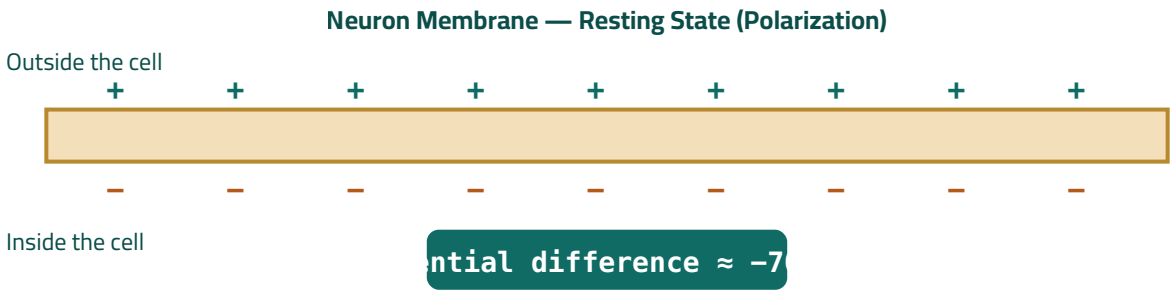
عند تعرّض العصبون لمؤثر مناسب، تتولّد فيه إشارات كهروكيميائية تنتقل عبر أجزاء العصبون المختلفة إلى عصبون آخر، أو عضلة، أو غدة. وهذا ما يُعرف بـ**السيال العصبي (Nerve Impulse)**. ولفهم كيفية نشوء هذا السيال، يجب أولًا أن نفهم حالة الغشاء الخلوي للعصبون في وضعه الطبيعي (حالة الراحة)، ثم كيف تتغيّر هذه الحالة عند وصول منبّه.

السيال العصبي — Nerve Impulse

إشارة كهروكيميائية تتولّد في العصبون عند تعرّضه لمؤثر مناسب، وتنتقل عبر أجزائه المختلفة لتصل إلى عصبون آخر أو عضلة أو غدة.

أولًا: الحالة الأولى — حالة الاستقطاب (الراحة)

في حالة الاستقطاب **(Polarization)**، وهي حالة العصبون قبل وصول أي منبّه مناسب، يكون غشاء الخلية العصبية "مُتأهبًا كهربائيًا"، إذ يكون السطح الداخلي للغشاء سالب الشحنة بالمقارنة مع سطحه الخارجي، ويصل فرق الجهد الكهربائي إلى نحو **-70 ملي فولت**.



شكل (3-1): حالة الاستقطاب (الراحة) — السطح الخارجي موجب والسطح الداخلي سالب

العوامل التي تُسهم في حالة الاستقطاب

1. النفاذية الاختيارية العالية لغشاء المحور لأيونات البوتاسيوم (K^+)، وقلة نفاذيته لأيونات الصوديوم (Na^+).
2. **مضخة الصوديوم والبوتاسيوم**: تضخّ ثلاثة أيونات صوديوم ($3Na^+$) نحو الخارج مقابل ضخّ أيونَي بوتاسيوم ($2K^+$) نحو الداخل، في عملية نقل نشط تستهلك طاقة (ATP).
3. وجود بروتينات كبيرة الحجم مشحونة بشحنة سالبة داخل العصبون، لا تستطيع النفاذ عبر الغشاء، وكذلك أيونات الكلور السالبة خارج الخلية.

الاستقطاب — Polarization

حالة الراحة الطبيعية للعصبون، حيث يكون الجانب الداخلي للغشاء سالبًا مقارنة بالخارج بفرق جهد يبلغ نحو −70 ملي فولت.

مضخة الصوديوم والبوتاسيوم — Na^+/K^+ Pump

بروتين ناقل يستهلك طاقة (ATP) لضخّ 3 أيونات صوديوم للخارج مقابل إدخال أيونَي بوتاسيوم، حفاظًا على حالة الاستقطاب.

ثانيًا: الحالة الثانية — حالة العصبون بعد وصول منبّه مناسب (جهد الفعل)

عند تنبيه العصبون تنبيهًا كافي الشدة (يبلغ أو يتجاوز **جهد العتبة**)، تحدث تغيّرات متسلسلة وسريعة في نفاذية الغشاء الخلوي في منطقة المؤثر على الزوائد الشجرية، تُحدث ما يُعرف بـ**جهد الفعل (Action Potential)**، ضمن أربع مراحل متتابعة:

جهد العتبة — Threshold Potential

أقل جهد فعل يلزم لاستمرار فتح قنوات الصوديوم، ليحدث تغيير في حالة الاستقطاب (يتراوح بين −60 و−55 ملي فولت).

1) إزالة الاستقطاب (Depolarization)

تزداد نفاذية الغشاء لأيونات الصوديوم (Na^+) وتفتح قنواته، فتدخل كميات كبيرة من Na^+ إلى داخل الخلية، بينما تبقى قنوات البوتاسيوم مغلقة؛ ما يزيد من الشحنات الموجبة داخل الخلية، ويُقلّل فرق الجهد على جانبَي الغشاء تدريجيًا حتى يصل إلى صفر.

2) انعكاس الاستقطاب (Reverse Polarization)

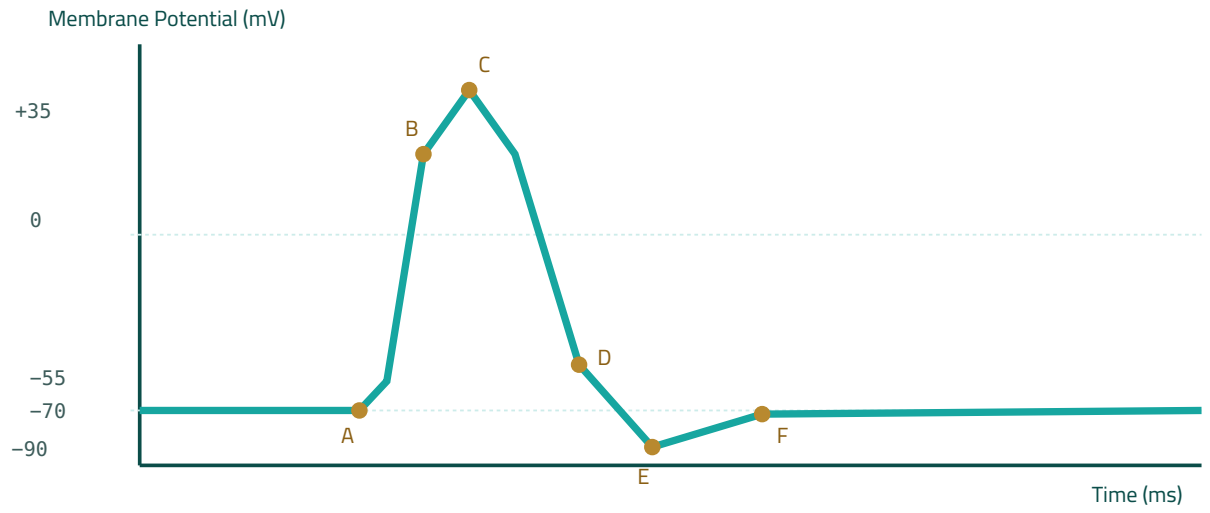
يزداد دخول أيونات الصوديوم إلى داخل الخلية مع بقاء قنوات البوتاسيوم مغلقة، فينعكس فرق الجهد ليصل إلى ما بين (+30 إلى +35) مللي فولت، أي يُصبح داخل الغشاء موجبًا مقارنة بخارجه.

3) إعادة الاستقطاب (Repolarization)

عند وصول فرق الجهد إلى (+30 إلى +35) مللي فولت، تبدأ قنوات أيونات البوتاسيوم (K^+) بالفتح فيما تُغلق قنوات الصوديوم؛ فيخرج البوتاسيوم من الخلية، ما يزيد الشحنات السالبة داخلها حتى يعود فرق الجهد تدريجيًا نحو الحالة الطبيعية (−70 مللي فولت).

4) فوق الاستقطاب (Hyper Polarization)

يستمر خروج أيونات البوتاسيوم مدة أطول قليلًا من اللازم، فيصل فرق الجهد إلى نحو (−90) مللي فولت، مع بقاء قنوات الصوديوم مغلقة. ثم تُغلق معظم قنوات البوتاسيوم، وتنشط مضخة الصوديوم والبوتاسيوم لإعادة فرق الجهد إلى حالة الراحة (−70 مللي فولت). ولا تستجيب هذه المنطقة لأي مؤثر جديد حتى يعود الغشاء العصبي إلى حالة الاستقطاب الأصلية، وتُسمّى هذه الفترة **فترة الجموح (Refractory Period)**، وتستمر بين (1-3) مللي ثانية.



شكل (3-2): منحنى جهد الفعل — (أ) وصول المنبه وبداية إزالة الاستقطاب، (ب-ج) انعكاس الاستقطاب، (د) إعادة الاستقطاب، (هـ) فوق الاستقطاب، (و) العودة لحالة الراحة

المرحلة	قنوات Na^+	قنوات K^+	فرق الجهد التقريبي
الاستقطاب (الراحة)	مغلقة	مغلقة (تسريب طفيف)	−70 mV
إزالة الاستقطاب	مفتوحة	مغلقة	−60 إلى 0 mV
انعكاس الاستقطاب	مفتوحة	مغلقة	0 إلى +35 mV
إعادة الاستقطاب	مغلقة	مفتوحة	+35 إلى −70 mV
فوق الاستقطاب	مغلقة	مفتوحة (زيادة)	حتى −90 mV

إزالة الاستقطاب
Depolarization

دخول أيونات الصوديوم بكثافة إلى داخل الخلية مسببًا تراجع فرق الجهد نحو الصفر.

انعكاس الاستقطاب
Reverse Polarization

استمرار دخول الصوديوم حتى يصبح داخل الغشاء موجبًا مقارنة بخارجه.

إعادة الاستقطاب
Repolarization

خروج أيونات البوتاسيوم من الخلية، ما يعيد الشحنة السالبة تدريجيًا داخل الغشاء.

فوق الاستقطاب
Hyperpolarization

تجاوز فرق الجهد للقيمة الطبيعية نحو −90 ملي فولت قبل عودته لحالة الراحة.

فترة الجموح
Refractory Period

فترة زمنية قصيرة (1-3 ميلي ثانية) لا يستجيب فيها الغشاء لأي مؤثر جديد، تضمن انتقال السيال باتجاه واحد.

تطبيق طبي: كيف يعمل التخدير الموضعي؟

تعمل أدوية التخدير الموضعي، مثل الليدوكايين (Lidocaine) التي يستخدمها طبيب الأسنان قبل حشو السن، على إغلاق قنوات الصوديوم البوابية على الغشاء العصبي، فتمنع حدوث إزالة الاستقطاب، وبالتالي تمنع تولّد جهد الفعل ومنعَ وصول إشارة الألم إلى الدماغ مؤقتًا، دون التأثير في وعي المريض.

تطبيق صناعي: تصميم الأدوية المؤثرة على القنوات الأيونية

تعتمد شركات الأدوية على فهم دقيق لآلية عمل قنوات الصوديوم والبوتاسيوم البوابية في تطوير أدوية علاج الصرع (كحاصرات قنوات الصوديوم مثل الكاربامازيبين)، وأدوية اضطراب نظم القلب. كما تُستخدم سموم طبيعية تُغلق قنوات الصوديوم، مثل سمّ التتراودوتوكسين المستخرج من سمك المنفوخ (Pufferfish)، كأدوات بحثية أساسية في مختبرات علم الأعصاب لدراسة القنوات الأيونية بدقة.

تغذية داعمة لتوازن الأيونات (الصوديوم والبوتاسيوم)

يعتمد عمل مضخة الصوديوم والبوتاسيوم على توازن غذائي للأملاح والطاقة (ATP الناتجة من الغلوكوز). إليك ثلاث وجبات تدعم هذا التوازن:

وجبة الإفطار

موز + شوفان بالحليب — مصدر جيد للبوتاسيوم والطاقة السريعة.

وجبة الغداء

صدر دجاج مشوي + بطاطا حلوة + سبانخ — بوتاسيوم ومغنيسيوم وطاقة متوازنة.

وجبة العشاء

شوربة عدس + خبز أسمر — كربوهيدرات معقدة تُغذّي الخلايا العصبية تدريجيًا.

نصيحة صحية

الصدمة الكهربائية القوية (كالتعرّض لتيار كهربائي عالي أو الصعق بالبرق) قد تُخلّ بتوازن الجهد الكهربائي على أغشية الخلايا العصبية والقلبية في آنٍ واحد، لذا يجب الابتعاد فورًا عن مصدر الكهرباء واستدعاء الإسعاف دون لمس المصاب مباشرة إن كان لا يزال ملامسًا لمصدر التيار.

ماذا تعلّمت في هذا الفصل؟

- في حالة الراحة (الاستقطاب) يكون داخل الغشاء سالبًا بفرق جهد −70 mV، بفضل النفاذية الاختيارية ومضخة Na^+/K^+ والبروتينات السالبة الكبيرة.
- عند بلوغ جهد العتبة، يمر الغشاء بأربع مراحل: إزالة استقطاب، انعكاس استقطاب، إعادة استقطاب، فوق استقطاب.
- فترة الجموح تمنع استجابة المنطقة لمؤثر جديد لفترة قصيرة، وتضمن اتجاهية السيال العصبي.

أسئلة الفصل الثالث

اختيار من متعدد سهل

1. ما فرق الجهد الكهربائي التقريبي لغشاء العصبون في حالة الراحة؟

أ) +35 مللي فولت

ب) صفر

ج) −70 مللي فولت

د) −90 مللي فولت

صواب / خطأ سهل

2. في مرحلة إعادة الاستقطاب، تفتح قنوات الصوديوم بينما تُغلق قنوات البوتاسيوم. ( )

إكمال الفراغ متوسط

3. تُدعى الفترة التي لا يستجيب فيها الغشاء العصبي لأي مؤثر جديد بعد جهد الفعل بـ .....

ترتيب متوسط

4. رتّب المراحل التالية بالترتيب الصحيح لحدوثها: (إعادة الاستقطاب — إزالة الاستقطاب — فوق الاستقطاب — انعكاس الاستقطاب — حالة الراحة)

استنتاجي صعب

5. ماذا يحدث لو بقيت قنوات أيونات البوتاسيوم مفتوحة مع استمرار بقاء قنوات الصوديوم مغلقة لفترة أطول من الطبيعي؟ اربط إجابتك بمفهوم فوق الاستقطاب.

تحليل رسم بياني صعب

6. بالنظر إلى منحنى جهد الفعل في شكل (3-2)، ما تفسيرك العلمي للفرق الزمني بين صعود المنحنى الحاد (النقطة ب-ج) وهبوطه الأكثر تدرجًا (النقطة د-هـ)؟

سؤال مفتوح للنقاش (بلا إجابة نموذجية): يعتمد تشخيص بعض الحالات العصبية على قياس سرعة توليد جهد الفعل وانتقاله. ابحث عن جهاز "تخطيط التوصيل العصبي" (NCS) وكيف يُستخدم سريريًا، وناقش أهميته في التشخيص المبكر.

الفصل الرابع

انتقال السيال العصبي على طول المحور

من نقطة التحفيز إلى نهاية المحور: رحلتان مختلفتان للسرعة

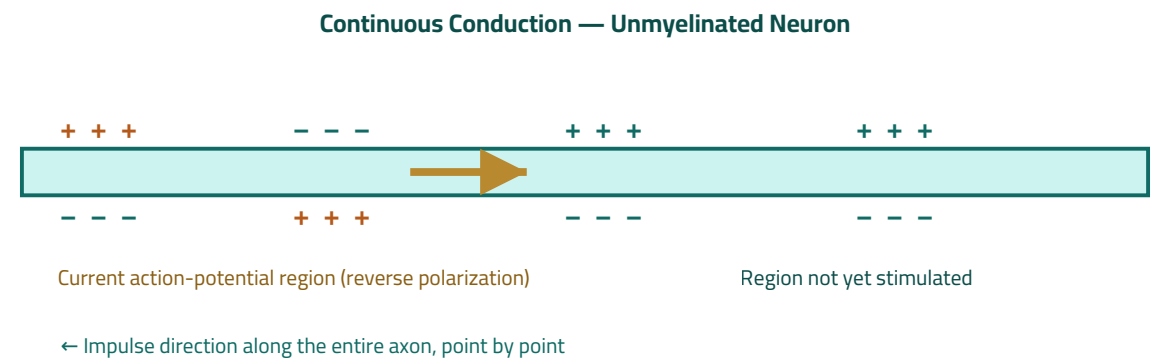
بعد أن تعرّفنا في الفصل السابق على آلية توليد جهد الفعل في نقطة واحدة من غشاء العصبون، يبقى السؤال: كيف ينتقل هذا الجهد عبر طول المحور الأسطواني بأكمله ليصل إلى نهايته؟ الإجابة تختلف باختلاف نوع المحور: مُغلّف بغمد ميليني أم لا.

أولًا: الانتقال في العصبون اللاميليني — النقل المتواصل

يؤدي حدوث جهد الفعل في منطقة معيّنة من الغشاء إلى تأثير كهربائي ينتقل إلى المناطق المجاورة، فيُصبح هذا الجزء من الغشاء منبّهًا جديدًا للمنطقة المجاورة له، ويعمل على:

1. زيادة نفاذية الغشاء الخلوي لأيونات الصوديوم عبر القنوات المعتمدة على تغير الجهد، ويتبعه خروج أيونات البوتاسيوم عبر قنواتها للخارج، فيُصبح داخل العصبون موجبًا مقارنة بخارجه.
2. ينتشر جهد الفعل في المنطقة المجاورة، وتنتشر أيونات الصوديوم عبر الغشاء خلال السيتوسول، بما يشبه تيارًا كهربائيًا داخليًا، مؤديًا إلى تغيّر فرق الجهد في المنطقة المجاورة وحدوث جهد فعل جديد فيها، بينما تعود المنطقة الأولى إلى حالة الاستقطاب.
3. تتكرّر هذه الخطوات على طول المحور من موقع إلى آخر، مُسبّبة سلسلة متعاقبة من انتقال السيال العصبي حتى نهاية المحور والأزرار التشابكية.

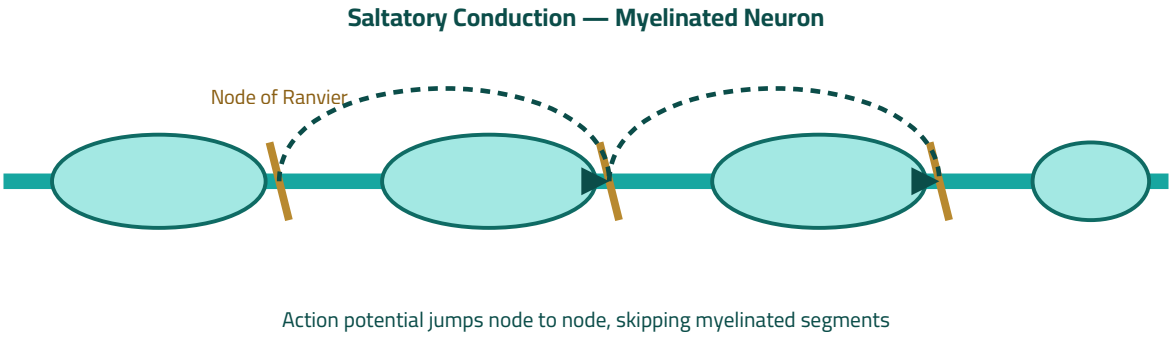
تُعرَف هذه الآلية بآلية **النقل المتواصل (Continuous conduction)**.



شكل (4-1): آلية النقل المتواصل — ينتقل جهد الفعل تدريجيًا من نقطة إلى المجاورة لها على طول الغشاء العاري (اللاميليني)

ثانيًا: الانتقال في العصبون الميليني — النقل القافز

في الألياف الميلينية، لا يمكن أن يتولّد جهد الفعل إلا في مناطق **عُقد رانفييه** فقط؛ لأن الغمد الميليني يعزل الغشاء عن السائل خارج الخلية في بقية أجزاء المحور، فتنتقل الأيونات الموجبة من عقدة إلى العقدة الأخرى المجاورة وكأنها "تقفز" فوق أجزاء الغمد الميليني. وتُسمّى هذه الآلية **النقل القافز (Saltatory conduction)**، وهي أسرع من النقل المتواصل بنحو **خمسين مرة**؛ إذ تصل السرعة فيها إلى نحو **120 م/ث**.



شكل (4-2): آلية النقل القافز — السيال العصبي "يقفز" بين عُقد رانفييه المتتالية، ما يزيد سرعة الانتقال بشكل كبير

وجه المقارنة	النقل المتواصل (لاميليني)	النقل القافز (ميليني)
مواقع توليد جهد الفعل	على طول الغشاء بأكمله، نقطة بنقطة	عند عُقد رانفييه فقط
السرعة	أبطأ	أسرع بحوالي 50 مرة (حتى 120 م/ث)
استهلاك الطاقة (ATP لمضخة Na^+/K^+)	أعلى (تُستعاد الأيونات على طول المحور بأكمله)	أقل (تُستعاد الأيونات عند العُقد فقط)
وجود الغمد الميليني	غير موجود	موجود

النقل المتواصل
Continuous Conduction

انتقال جهد الفعل تدريجيًا من نقطة إلى المجاورة لها على طول غشاء المحور العاري (اللاميليني).

النقل القافز
Saltatory Conduction

انتقال جهد الفعل قفزًا من عُقدة رانفييه إلى التي تليها في الألياف الميلينية، بسرعة أكبر وطاقة أقل.

⚖ لماذا يستهلك النقل المتواصل طاقة أكبر؟

لأن مضخة الصوديوم والبوتاسيوم يجب أن تعمل على طول المحور بأكمله لإعادة الأيونات إلى أماكنها الطبيعية بعد كل جهد فعل، بينما يقتصر هذا العمل في النقل القافز على عُقد رانفييه فقط، وهو ما يجعل النقل القافز أكثر كفاءة من حيث استهلاك الطاقة، إضافة إلى تفوّقه الكبير في السرعة.

تطبيق من الحياة: مرض التصلب اللويحي المتعدد (MS)

في هذا المرض المناعي الذاتي، يهاجم الجهاز المناعي الغمد الميليني في الجهاز العصبي المركزي ويُتلفه، ما يُحوّل النقل القافز السريع إلى نقل بطيء أو مضطرب، فيعاني المريض من ضعف عضلي، واضطراب في التوازن والرؤية، وتنميل في الأطراف، بحسب موقع الضرر في الجهاز العصبي.

تطبيق صناعي: كابلات الألياف الضوئية وتقنيات الاتصالات

يُشبّه مهندسو الاتصالات أحيانًا مبدأ "تكرار الإشارة عند نقاط متباعدة بدلًا من كل نقطة" (كما في النقل القافز) بمُقوّيات الإشارة (Repeaters) الموزّعة على طول كابلات الألياف الضوئية العابرة للقارات، والتي تُعيد تقوية الإشارة الضوئية الضعيفة على مسافات متباعدة بدلًا من تقويتها في كل نقطة، مما يوفّر الطاقة ويزيد سرعة نقل البيانات - بمبدأ مشابه لكفاءة النقل القافز الحيوي.

نصيحة صحية

الحفاظ على مستويات كافية من فيتامين B12 وأوميغا-3 في النظام الغذائي يدعم سلامة الغمد الميليني على المدى الطويل، وهو عامل وقائي مهم إلى جانب المتابعة الطبية المنتظمة، خصوصًا لمن لديهم تاريخ عائلي لأمراض عصبية مناعية.

ماذا تعلّمت في هذا الفصل؟

- في العصبون اللاميليني، ينتقل السيال بآلية "النقل المتواصل"، نقطة بنقطة على طول الغشاء.
- في العصبون الميليني، ينتقل السيال بآلية "النقل القافز" بين عُقد رانفييه فقط.
- النقل القافز أسرع بنحو 50 مرة من النقل المتواصل، وأكثر كفاءة في استهلاك الطاقة.

أسئلة الفصل الرابع

اختيار من متعدد — سهل

1. في أيّ منطقة من العصبون الميليني يتولّد جهد الفعل؟

أ) في كل نقطة من الغمد الميليني

ب) عند عُقد رانفييه فقط

ج) في جسم الخلية فقط

د) في الزوائد الشجرية فقط

صواب / خطأ سهل

2. النقل المتواصل أسرع من النقل القافز. ( )

إكمال الفراغ متوسط

3. تصل سرعة النقل القافز إلى حوالي ..... م/ث، وهي أسرع من النقل المتواصل بنحو ..... مرة.

استنتاجي صعب

4. أيّهما يستهلك طاقة أكبر في نقل السيال العصبي: النقل المتواصل أم النقل القافز؟ فسّر إجابتك بالاعتماد على عمل مضخة الصوديوم والبوتاسيوم.

تحليل ومقارنة صعب

5. لو أُصيب عصبون ميليني بمرض أدى إلى تآكل الغمد الميليني تدريجيًا مع بقاء المحور سليمًا، صف كيف ستتغيّر آلية انتقال السيال وسرعته في هذا العصبون تدريجيًا؟

سؤال مفتوح للنقاش (بلا إجابة نموذجية): ابحث عن العلاقة بين قطر المحور العصبي وسرعة انتقال السيال العصبي فيه (بصرف النظر عن وجود الميلين)، وناقش أمثلة من عالم الحيوان (مثل المحور العملاق لحبار البحر) التي استُخدمت تاريخيًا في أبحاث جهد الفعل.

الفصل الخامس

التشابك العصبي: نقل الرسالة بين العصبونات

حين تتوقف الإشارة الكهربائية، تبدأ رسالة كيميائية دقيقة عبر فجوة مجهرية

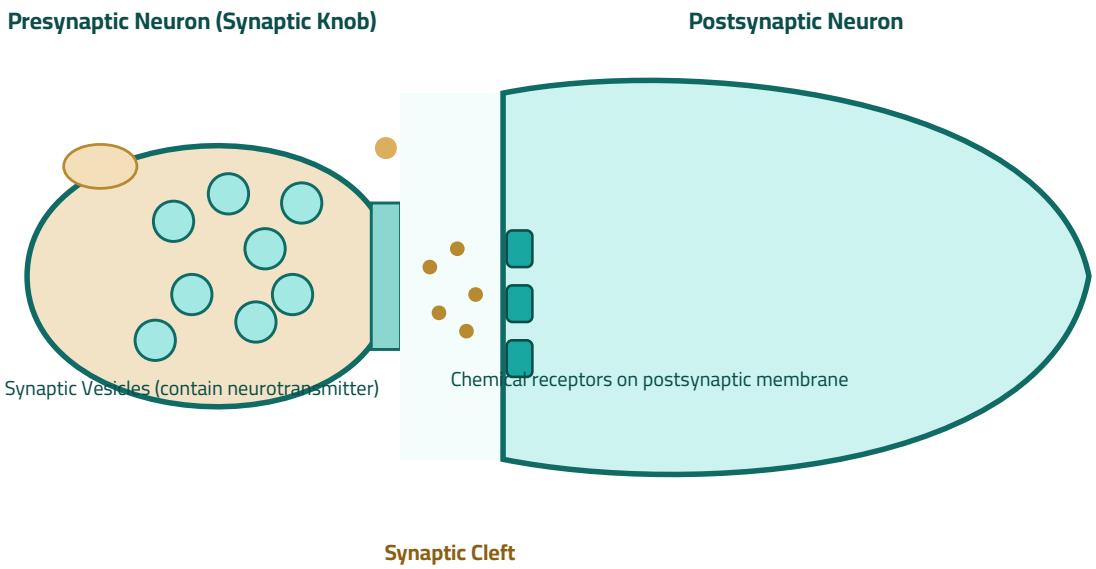
بعد أن ينتقل جهد الفعل بنجاح عبر طول المحور الأسطواني — سواء بالنقل المتواصل أو النقل القافز — يصل إلى النهايات الطرفية للعصبون، حيث يجب أن تُنقل الرسالة العصبية إلى عصبون آخر (أو إلى عضلة أو غدة). لكن العصبونين المتجاورين لا يتلامسان فعليًا؛ إذ يفصل بينهما فراغ مجهري ضيق. هذه المنطقة الفاصلة، بكل مكوّناتها، تُسمّى **التشابك العصبي (Synapse)**، وفيها تتحوّل الرسالة من إشارة كهربائية إلى رسالة كيميائية ثم تعود إشارة كهربائية من جديد.

التشابك العصبي — Synapse

منطقة الاتصال الوظيفي بين عصبون وعصبون آخر (أو عضلة أو غدة)، تتضمن فجوة ضيقة تُنقل عبرها الرسالة العصبية بوساطة كيميائية.

تركيب التشابك العصبي

يتكوّن التشابك العصبي من الأجزاء الرئيسة الآتية:



شكل (5-1): تركيب التشابك العصبي — الزر التشابكي، والحويصلات التشابكية، والشق التشابكي، والمستقبلات على الغشاء بعد التشابكي

الزر التشابكي Synaptic Knob

انتفاخ في نهاية فرع المحور الأسطواني، يحوي حويصلات مليئة بالناقل العصبي.

الحويصلات التشابكية Synaptic Vesicles

أكياس غشائية صغيرة داخل الزر التشابكي تخزّن جزيئات الناقل العصبي قبل إطلاقها.

الشق التشابكي Synaptic Cleft

فجوة مجهرية ضيقة تفصل بين الغشاء قبل التشابكي والغشاء بعد التشابكي.

الناقل العصبي (أستيل كولين) Neurotransmitter (Acetylcholine)

مادة كيميائية تُطلَق من الحويصلات التشابكية وتعبر الشق التشابكي لتُحفّز الغشاء بعد التشابكي.

آلية انتقال السيال العصبي عبر التشابك العصبي

تتم عملية النقل التشابكي عبر خمس خطوات متتابعة وسريعة جدًا:

1. **وصول جهد الفعل** إلى النهايات الطرفية للعصبون (الزر التشابكي).
2. **زيادة نفاذية الغشاء** قبل التشابكي لأيونات الكالسيوم (Ca^{2+})؛ إذ تعمل قنوات الكالسيوم الموجودة في غشاء الخلية على إدخال أيونات الكالسيوم إلى داخل النهايات الطرفية للعصبون.
3. **ارتفاع تركيز الكالسيوم** في الزر التشابكي يعمل على التحام الحويصلات التشابكية بغشاء الزر التشابكي وانفجارها، وخروج محتوياتها من الناقل العصبي (أستيل كولين) في الشق التشابكي.

4. **ارتباط الناقل العصبي** (أستيل كولين) بمستقبلات خاصة على الغشاء بعد التشابكي، ليعمل كمؤثر كيميائي يؤدي إلى فتح قنوات أيونات الصوديوم والبوتاسيوم، وتكوين جهد فعل جديد في غشاء العصبون بعد التشابكي.
5. **تحطيم الناقل العصبي** بواسطة إنزيم **أستيل كولين إستريز**، حيث يُعاد امتصاص المواد الناتجة إلى داخل الزر التشابكي بوساطة النقل النشط، لتكوين أستيل كولين جديد.

أستيل كولين إستريز — Acetylcholinesterase

إنزيم يُحطّم الناقل العصبي أستيل كولين بعد أداء وظيفته، لضمان توقف التنبيه وإعادة استخدام المواد الناتجة.

قناة الكالسيوم البوابية — Voltage-gated Ca^{2+} Channel

قناة بروتينية على الغشاء قبل التشابكي، تفتح استجابة لوصول جهد الفعل، فتسمح بدخول أيونات الكالسيوم.

⚖ الفرق بين الانتقال عبر المحور والانتقال عبر التشابك

وجه المقارنة	عبر المحور الأسطواني	عبر الشق التشابكي
طبيعة النقل	كهربائي - كيميائي (أيوني)	كيميائي بالكامل (ناقل عصبي)
السرعة	سريعة جدًا	أبطأ نسبيًا (تأخير تشابكي)
اتجاه الانتقال	ثنائي الاحتمال نظريًا	باتجاه واحد فقط (من قبل إلى بعد التشابك)
الحاجة لمؤثر خارجي	لا يلزم تنبيه خارجي لكل عصبون	يلزم تنبيه كل عصبون قبل تشابكي عند وصول السيال إليه

تطبيق طبي: مرض الوهن العضلي الوبيل (Myasthenia Gravis)

في هذا المرض المناعي الذاتي، يهاجم الجهاز المناعي مستقبلات أستيل كولين على الغشاء بعد التشابكي في التشابك العصبي العضلي، فيقل عدد المستقبلات الفعّالة، وتضعف قدرة العضلات على الاستجابة رغم وصول السيال العصبي بشكل طبيعي، ما يُسبّب ضعفًا عضليًا يزداد مع الاستخدام المتكرر للعضلة ويتحسّن بالراحة.

تطبيقات صناعية وزراعية على التشابك العصبي

الصناعات الزراعية: تعتمد بعض المبيدات الحشرية العضوية الفوسفاتية (Organophosphates) على تثبيط إنزيم أستيل كولين إستريز في الجهاز العصبي للحشرات، ما يُسبّب تراكم أستيل كولين وتنبيهًا عصبيًا وعضليًا مستمرًا يؤدي إلى شلل الحشرة وموتها؛ ولهذا يجب على العاملين في الزراعة ارتداء معدات الحماية الشخصية عند استخدام هذه المبيدات لتجنّب التسمم البشري بالآلية نفسها.

الصناعات الدوائية: تُستخدم أدوية مثبّطة لإنزيم أستيل كولين إستريز (مثل دونيبيزيل Donepezil) في علاج مرضى الزهايمر لزيادة تركيز أستيل كولين المتاح في الدماغ وتحسين الذاكرة مؤقتًا.

الصناعات التجميلية والعلاجية: يعتمد "البوتوكس" (سمّ البوتولينوم) على منع التحام الحويصلات التشابكية بالغشاء قبل التشابكي، فيمنع إطلاق أستيل كولين عند التشابك العصبي العضلي، مؤديًا إلى ارتخاء العضلة مؤقتًا؛ ويُستخدم ذلك تجميليًا لتقليل التجاعيد، وطبيًا لعلاج التشنجات العضلية والصداع النصفي المزمن.

نصيحة صحية

عند التعامل مع المبيدات الحشرية أو أي مواد كيميائية زراعية في المنزل أو الحديقة، احرص دائمًا على ارتداء القفازات والكمامة، والالتزام بتهوية المكان جيدًا؛ فبعض هذه المواد يؤثر في الجهاز العصبي البشري بالآلية نفسها التي تُستخدم بها لمكافحة الحشرات.

ماذا تعلّمت في هذا الفصل؟

- التشابك العصبي هو منطقة الاتصال بين عصبونين، ويتكوّن من زر تشابكي، وحويصلات، وشق تشابكي، ومستقبلات على الغشاء بعد التشابكي.
- ينتقل السيال عبر التشابك بخمس خطوات: وصول جهد الفعل، دخول الكالسيوم، انطلاق الناقل العصبي، ارتباطه بالمستقبلات، ثم تحطيمه بالإنزيم.
- النقل عبر التشابك كيميائي بالكامل، وأبطأ من النقل عبر المحور، لكنه يضمن اتجاهية السيال العصبي بشكل قاطع.

أسئلة الفصل الخامس

اختيار من متعدد سهل

1. ما اسم الإنزيم المسؤول عن تحطيم الناقل العصبي أستيل كولين بعد أداء وظيفته؟

أ) أستيل كولين إستريز

ب) أستيل كولين ترانسفيريز

ج) أدرينالين إستريز

د) دوبامين أوكسيديز

صواب / خطأ سهل

2. ينتقل السيال العصبي عبر التشابك العصبي في اتجاهين معًا. ( )

إكمال الفراغ متوسط

3. يؤدي ارتفاع تركيز أيونات ..... داخل الزر التشابكي إلى التحام الحويصلات التشابكية بالغشاء وإطلاق الناقل العصبي.

ترتيب خطوات متوسط

4. رتّب الخطوات التالية بحسب حدوثها في التشابك العصبي: (ارتباط الناقل العصبي بالمستقبلات — دخول الكالسيوم — وصول جهد الفعل — تحطيم الناقل العصبي — انفجار الحويصلات التشابكية)

استنتاجي صعب

5. ماذا يحدث لو لم تتمّ إزالة النواقل العصبية من الشق التشابكي بعد أداء وظيفتها (تخيّل أن إنزيم أستيل كولين إستريز مُثبَّط تمامًا)؟

تحليل ومقارنة صعب

6. قارن بين تأثير مادة تُثبّط مستقبلات أستيل كولين على الغشاء بعد التشابكي، ومادة تُثبّط إنزيم أستيل كولين إستريز، من حيث الأثر النهائي على انتقال السيال العصبي عبر التشابك.

سؤال مفتوح للنقاش (بلا إجابة نموذجية): تُستخدم بعض غازات الأعصاب في الحروب كأسلحة كيميائية تعمل بآلية مشابهة لتثبيط أستيل كولين إستريز. ناقش، من منظور أخلاقي وعلمي، أهمية اتفاقيات حظر الأسلحة الكيميائية في ضوء فهمك لآلية التشابك العصبي.

سؤال مفتوح للنقاش: بعد أن أكملت دراسة الرحلة الكاملة للسيال العصبي من العصبون إلى التشابك، اكتب فقرة تُلخّص بأسلوبك الخاص هذه الرحلة، مستخدمًا خمسة مصطلحات علمية على الأقل وردت في الكتاب.

الاختبار الشامل

يغطّي هذا الاختبار جميع فصول الكتاب — من العصبون إلى التشابك العصبي

30	اختيار من متعدد	٤
سؤالًا	نوع الأسئلة	خيارات لكل سؤال

1. الوحدة التركيبية والوظيفية للنسيج العصبي هي:

أ) الخلية الدبقية

ب) العصبون

ج) خلية شفان

د) الغمد الميليني

2. نسبة العصبونات من إجمالي النسيج العصبي تبلغ تقريبًا:

أ) 10%

ب) 50%

ج) 75%

د) 90%

3. الجزء المسؤول عن استقبال السيالات العصبية القادمة من عصبونات أخرى ونقلها لجسم الخلية هو:

أ) المحور الأسطواني

ب) الزوائد الشجرية

ج) الغمد الميليني

د) الزر التشابكي

4. سبب عجز العصبون عن الانقسام هو:

أ) غياب النواة

ب) غياب السنتريولات (المريكزات)

ج) غياب الميتوكوندريا

د) غياب الريبوسومات

5. الخلايا التي تُكوّن الغمد الميليني حول المحور في الجهاز العصبي الطرفي تُسمّى:

أ) الخلايا الدبقية النجمية

ب) خلايا شفان

ج) الخلايا الميكروغليا

د) الخلايا البطانية

6. تُسمّى الفجوات غير المغلّفة بالميلين بين خليتَي شفان متجاورتين:

أ) الشق التشابكي

ب) عُقد رانفييه

ج) الأزرار التشابكية

د) الحويصلات التشابكية

7. العصبون الذي يتّصل بأعضاء الاستقبال الحسي وينقل المعلومات إلى الجهاز العصبي المركزي هو:

أ) العصبون الحركي

ب) العصبون الموصل

ج) العصبون الحسي

د) جميع ما سبق

8. توجد أجسام خلايا العصبونات الحركية في:

أ) عقدة الجذر الظهري

ب) المادة الرمادية بالجهاز العصبي المركزي

ج) الزر التشابكي

د) الغمد الميليني

9. العصبونات التي تُشكّل حلقة وصل بين عصبونات متجاورة داخل الجهاز العصبي المركزي هي:

أ) العصبونات الحسية

ب) العصبونات الحركية

ج) العصبونات الموصلة

د) خلايا شفان

10. النسيج الضام الذي يحيط بجميع حزم العصب مجتمعة يُسمّى:

أ) غلاف المحور الأسطواني

ب) غلاف الحزمة

ج) غلاف العصب

د) الغمد الميليني

11. فرق الجهد الكهربائي لغشاء العصبون في حالة الراحة (الاستقطاب) يبلغ تقريبًا:

أ) صفر مللي فولت

ب) −70 مللي فولت

ج) +35 مللي فولت

د) −90 مللي فولت

12. مضخة الصوديوم والبوتاسيوم تضخّ:

أ) 3 أيونات صوديوم للداخل مقابل أيونَي بوتاسيوم للخارج

ب) 3 أيونات صوديوم للخارج مقابل أيونَي بوتاسيوم للداخل

ج) أيونَي صوديوم وأيونَي بوتاسيوم للخارج معًا

د) 3 أيونات بوتاسيوم للخارج فقط

13. أقل جهد فعل يلزم لاستمرار فتح قنوات الصوديوم يُسمّى:

أ) جهد الراحة

ب) جهد العتبة

ج) جهد الفعل الكامل

د) فترة الجموح

14. في مرحلة إزالة الاستقطاب:

أ) تُغلق قنوات الصوديوم وتُفتح قنوات البوتاسيوم

ب) تُفتح قنوات الصوديوم وتبقى قنوات البوتاسيوم مغلقة

ج) تُغلق كل القنوات

د) يخرج البوتاسيوم بكثافة

15. عند انعكاس الاستقطاب، يصل فرق الجهد تقريبًا إلى:

أ) −70 مللي فولت

ب) صفر مللي فولت

ج) +30 إلى +35 مللي فولت

د) −90 مللي فولت

16. في مرحلة إعادة الاستقطاب:

أ) تُفتح قنوات الصوديوم وتُغلق قنوات البوتاسيوم

ب) تُغلق قنوات الصوديوم وتُفتح قنوات البوتاسيوم

ج) تبقى كل القنوات مفتوحة

د) يدخل الصوديوم بكثافة أكبر

17. فوق الاستقطاب هو الحالة التي يصل فيها فرق الجهد إلى نحو:

أ) صفر مللي فولت

ب) +35 مللي فولت

ج) −90 مللي فولت

د) −55 مللي فولت

18. فترة الجموح هي الفترة التي:

أ) يستجيب فيها الغشاء لأي مؤثر بقوة أكبر

ب) لا يستجيب فيها الغشاء لأي مؤثر جديد مهما كانت شدته

ج) تتوقف فيها مضخة الصوديوم والبوتاسيوم نهائيًا

د) يتضاعف فيها عدد قنوات الصوديوم

19. تستمر فترة الجموح تقريبًا:

أ) 1 - 3 مللي ثانية

ب) 1 - 3 ثانية

ج) 10 - 30 مللي ثانية

د) دقيقة كاملة

20. آلية انتقال السيال العصبي في العصبون اللاميليني تُسمّى:

أ) النقل القافز

ب) النقل المتواصل

ج) النقل التشابكي

د) النقل العكسي

21. في العصبون الميليني، لا يتولّد جهد الفعل إلا عند:

أ) جسم الخلية فقط

ب) عُقد رانفييه

ج) الزوائد الشجرية فقط

د) كل نقطة على الغمد الميليني

22. تصل سرعة النقل القافز تقريبًا إلى:

أ) 12 م/ث

ب) 60 م/ث

ج) 120 م/ث

د) 1200 م/ث

23. النقل القافز أسرع من النقل المتواصل بنحو:

أ) 5 مرات

ب) 20 مرة

ج) 50 مرة

د) 100 مرة

24. أيّهما يستهلك طاقة (ATP) أكبر لإعادة توزيع الأيونات؟

أ) النقل المتواصل

ب) النقل القافز

ج) كلاهما بالتساوي

د) لا علاقة للطاقة بنوع النقل

25. منطقة الاتصال الوظيفي بين عصبونَين، تتضمّن فجوة كيميائية، تُسمّى:

أ) العُقدة العصبية

ب) التشابك العصبي

ج) غلاف الحزمة

د) عقدة رانفييه

26. الأيون الذي يزداد دخوله إلى الزر التشابكي مسببًا التحام الحويصلات التشابكية بالغشاء هو:

أ) الصوديوم (Na^+)

ب) البوتاسيوم (K^+)

ج) الكالسيوم (Ca^{2+})

د) الكلور (Cl^-)

27. الناقل العصبي المذكور في آلية التشابك العصبي في هذا الكتاب هو:

أ) الدوبامين

ب) السيروتونين

ج) أستيل كولين

د) الأدرينالين

28. الإنزيم المسؤول عن تحطيم أستيل كولين بعد أداء وظيفته هو:

أ) أستيل كولين إستريز

ب) أميليز

ج) ببسين

د) ليباز

29. ينتقل السيال العصبي عبر التشابك العصبي في:

أ) اتجاهين معًا بالتساوي

ب) اتجاه واحد فقط من قبل التشابك إلى بعده

ج) اتجاه عشوائي غير محدد

د) لا ينتقل عبر التشابك أصلًا

30. الأدوية المستخدمة لعلاج الزهايمر والتي تزيد من تركيز أستيل كولين المتاح في الدماغ تعمل على:

أ) تنشيط إنزيم أستيل كولين إستريز

ب) تثبيط إنزيم أستيل كولين إستريز

ج) إغلاق قنوات الكالسيوم

د) منع تكوين الحويصلات التشابكية

مفتاح الإجابات

1-ب 2-أ 3-ب 4-ب 5-ب 6-ب 7-ج 8-ب 9-ج 10-ج

11-ب 12-ب 13-ب 14-ب 15-ج 16-ب 17-ج 18-ب 19-أ 20-ب

21-ب 22-ج 23-ج 24-أ 25-ب 26-ج 27-ج 28-أ 29-ب 30-ب

معجم المصطلحات

العصبون — Neuron — الوحدة التركيبية والوظيفية للجهاز العصبي.

الخلايا الدبقية — Glial cells — خلايا داعمة للنسيج العصبي.

الزوائد الشجرية — Dendrites — تستقبل السيالات وتنقلها نحو جسم الخلية.

جسم الخلية — Cell body / Soma — المركز الأيضي للعصبون.

المحور الأسطواني — Axon — ينقل السيال بعيدًا عن جسم الخلية.

الغمد الميليني — Myelin sheath — عازل دهني يسرّع انتقال السيال.

خلية شفّان — Schwann cell — تكوّن الغمد الميليني في الجهاز الطرفي.

عُقدة رانفييه — Node of Ranvier — فجوة بين قطع الغمد الميليني.

العصبون الحسي — Sensory Neuron — ينقل السيال من المؤثر إلى المركز.

العصبون الحركي — Motor Neuron — ينقل السيال من المركز إلى المستجيب.

العصبون الموصل — Interneuron — يربط بين عصبونات متجاورة داخل المركز.

العصب — Nerve — حزم من محاور عصبونات محاطة بأغلفة ضامة.

السيال العصبي — Nerve Impulse — إشارة كهروكيميائية تنتقل عبر العصبون.

الاستقطاب — Polarization — حالة راحة الغشاء العصبي (-70 mV).

مضخة الصوديوم والبوتاسيوم — Na^+/K^+ Pump — تحافظ على حالة الاستقطاب باستهلاك ATP.

جهد العتبة — Threshold Potential — أقل جهد لازم لبدء جهد الفعل.

إزالة الاستقطاب — Depolarization — دخول الصوديوم وتراجع فرق الجهد نحو الصفر.

انعكاس الاستقطاب — Reverse Polarization — يصبح داخل الغشاء موجبًا.

إعادة الاستقطاب — Repolarization — خروج البوتاسيوم وعودة الشحنة السالبة.

فوق الاستقطاب — Hyperpolarization — تجاوز الجهد للقيمة الطبيعية نحو −90 mV.

فترة الجموح — Refractory Period — فترة عدم استجابة الغشاء لمؤثر جديد.

النقل المتواصل — Continuous Conduction — انتقال السيال نقطة بنقطة في الألياف اللاميلينية.

النقل القافز — Saltatory Conduction — انتقال السيال قفزًا بين عُقد رانفييه.

التشابك العصبي — Synapse — منطقة الاتصال بين عصبونين.

الزر التشابكي — Synaptic Knob — نهاية المحور المحتوية على الحويصلات.

الحويصلات التشابكية — Synaptic Vesicles — تخزّن الناقل العصبي.

الشق التشابكي — Synaptic Cleft — الفجوة بين العصبونين.

أستيل كولين — Acetylcholine — الناقل العصبي الرئيس في هذا الكتاب.

أستيل كولين إستريز — Acetylcholinesterase — إنزيم يحطّم أستيل كولين.

"فهم أصغر خلية في جسدك، هو مفتاح فهم أعقد شبكة اتصالات في الكون المعروف — جهازك العصبي."