المحاضرة السابعة

تنظيم الجهاز العصبي ... فيزيولوجيا الأعصاب ... فيزيولوجيا المشابك

تعمل أجهزة الجسم معاً بصورة متكاملة لإنجاز الوظائف الحيوية السوية للكائن الحي، وتضمن استمرار حياته بتوازن مع بيئته الداخلية والخارجية. ويتولى ضبط هذا التوازن والتكامل الوظيفي جهازا تنسيق وتواصل هما: الجهاز العصبي، وجهاز الغدد الصم.

يتكون الجهاز العصبي عند الانسان من خلايا نبيلة تدعى الخلايا العصبية أو العصبونات، وخلايا دبق عصبي.

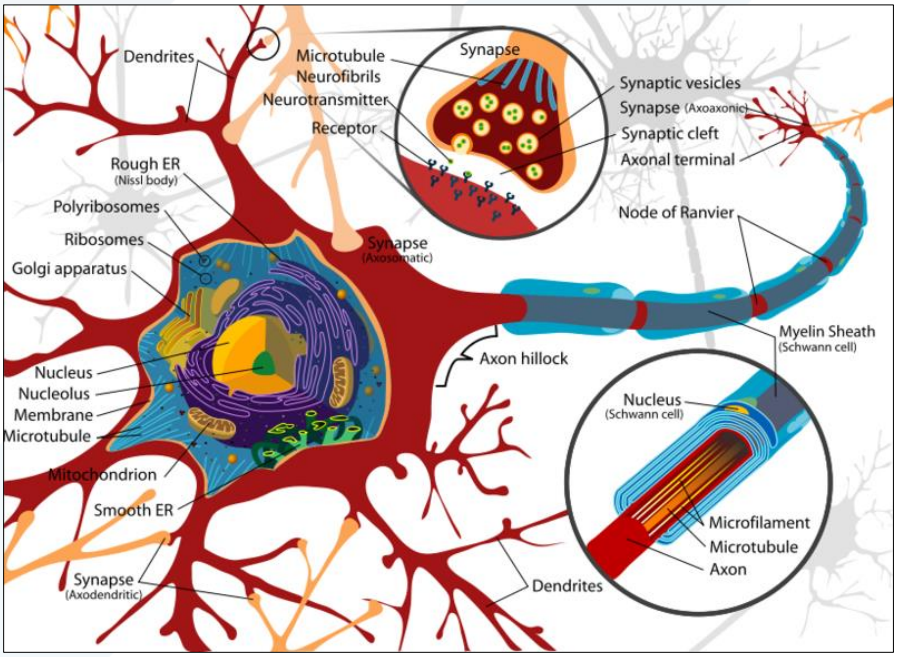
أولاً: الخلايا العصبية أو العصبونات Neurons

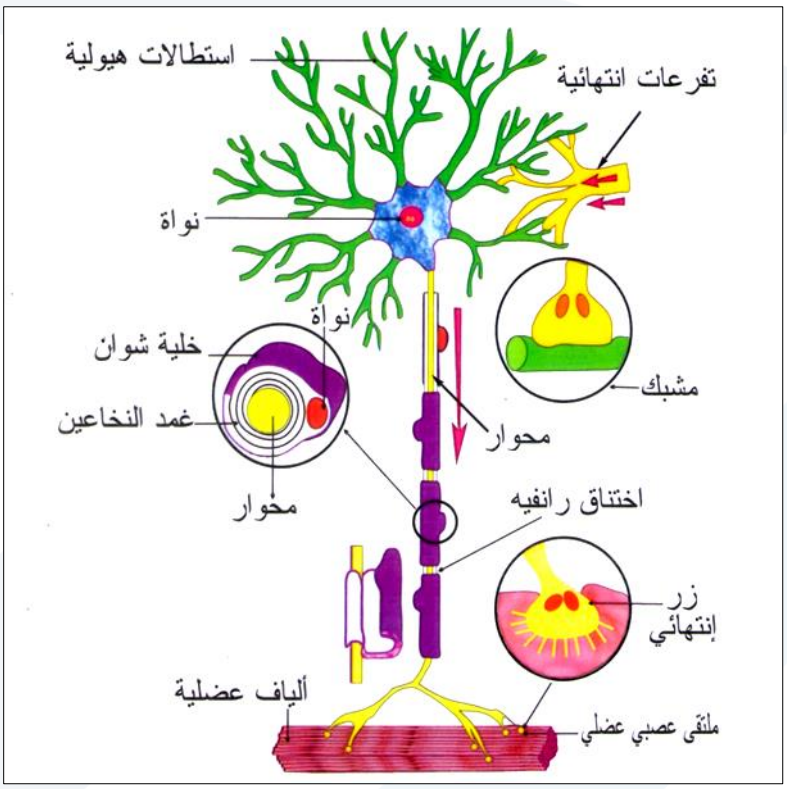
- **أقسام العصبون**

يتألف العصبون من ثلاث مناطق متميزة وظيفياً، وهي:

جسم العصبون Cell Body

تؤلف **أجسام** العصبونات المادة **السنجابية** (الرمادية) للجهاز العصبي، وينتج عن تجمعها في الجهاز العصبي المركزي **نوى وأعمدة**، في حين ينتج عن تجمعها في الجهاز العصبي **المحيطي** عقد **شوكية** أو **قحفية**، الشكل (1).



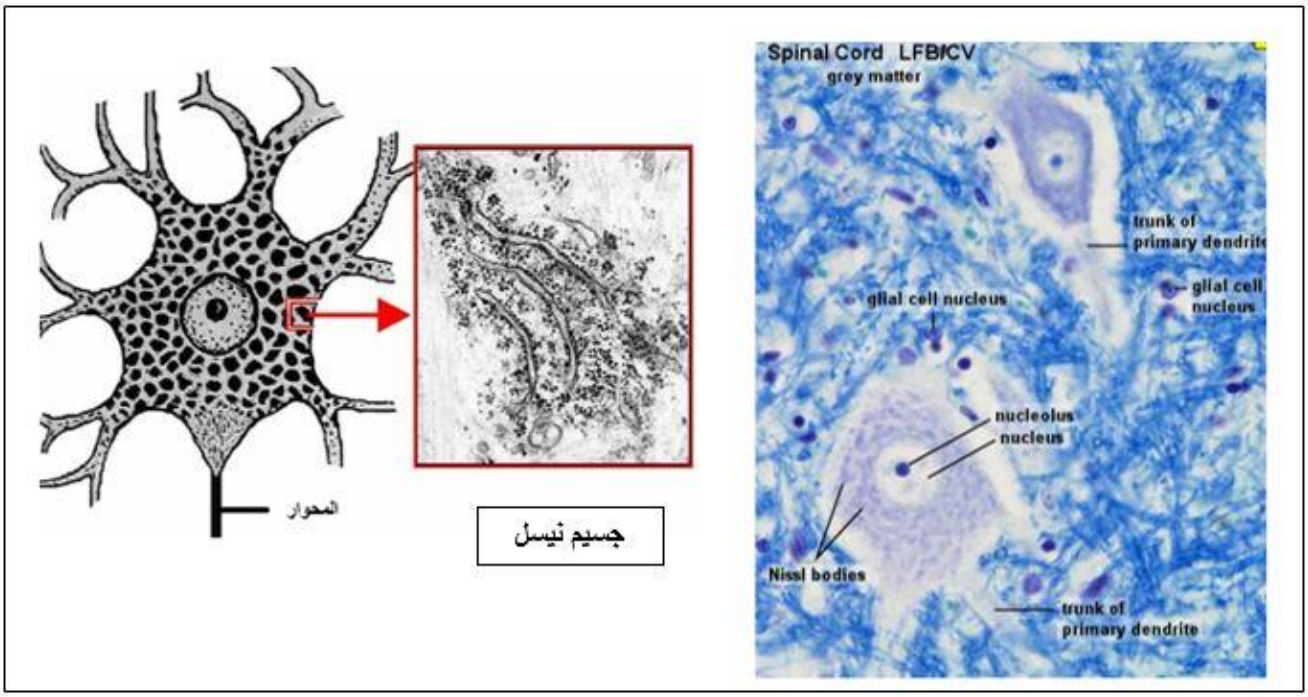


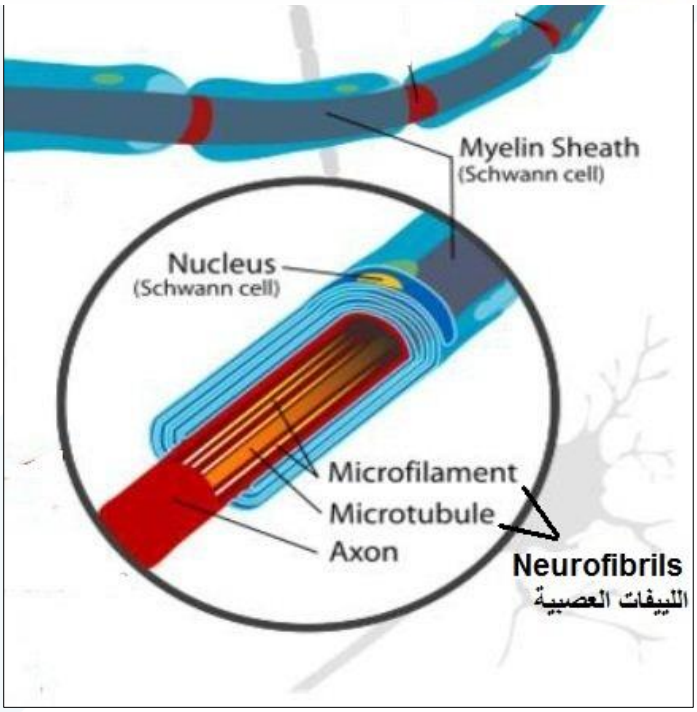
الشكل (1): الخلية العصبية أو العصبون.

تأخذ العصبونات **أشكالاً وأحجاماً** مختلفة، فمنها ما هو كروي أو نجمي أو مغزلي أو هرمي... الخ، ومنها ما هو صغير أو كبير، وكغيرها من الخلايا، تحيط بالخلايا العصبية **أغشية** خلوية، وتحوي بداخلها **نوى** ونويات، **وعصارات** خلوية فيها مكتنفات أو **عضيات** عامة، مثل: جهاز كولجي والمتقدرات الحيوية (الجسيمات الكوندرية) والشبكة السيتوبلاسمية الداخلية الخشنة والملساء والجسيمات الريبية (الريبوزومات أو الريباسات) ... الخ.

من جهة أخرى، تمتلك هذه الخلايا مكونات نوعية خاصة بالعصبونات وهي **جسيمات نيسل** Nissl Bodies **والليفات العصبية** Neurofibrils.

تغزر جسيمات نيسل في الجسم وتقل في الاستطالات وتنعدم في المحوار، وتتلون هذه الجسيمات بأزرق الميتلين نظراً لغناها بالـ RNA المحب للأساس (القلوي)، تعد جزءاً من **الشبكة الهيولية الداخلية الخشنة** وتؤدي دوراً في صناعة **بروتينات** الخلية، أما الليفات العصبية فتتألف من اجتماع **أنيبيبات** دقيقة Microtubule **وخيوط** دقيقة Microfilaments، وتنتشر في جميع أقسام العصبون (الجسم، والتغصنات، والمحوار)، الشكل (2).





الشكل (2): جسيمات نيسل، الليفات العصبية.

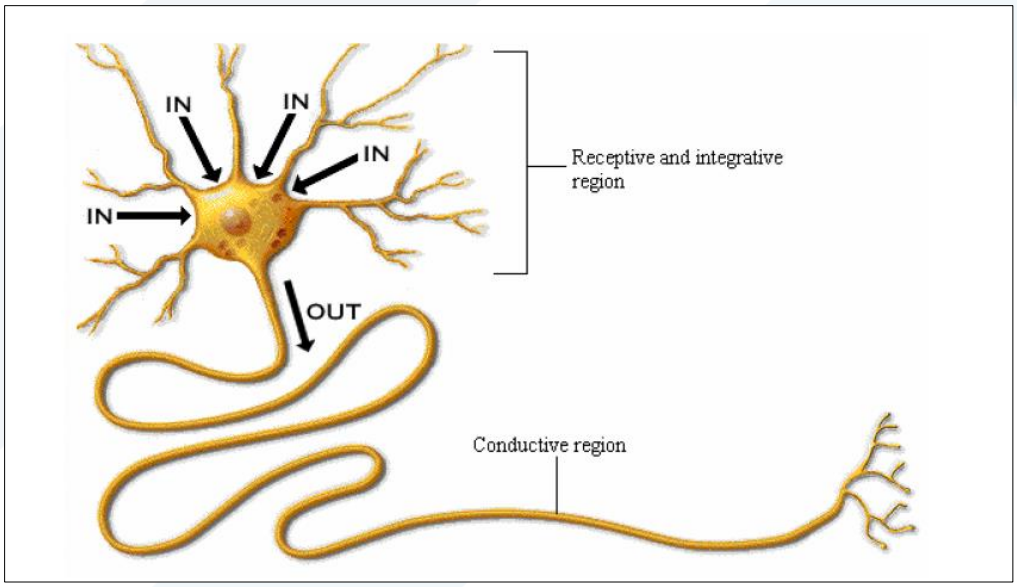
لا تحتوي العصبونات على **جسيمات مركزية**، الأمر الذي يفسر عدم انقسامها. تبرز من أجسام العصبونات استطالات خلوية قصيرة كثيرة العدد ومتفرعة تدعى **تغصنات** خلوية Dendrites تبدأ ثخينة ثم تستدق، وتؤدي دوراً مهماً في استقبال التنبيهات القادمة ونقلها نحو جسم الخلية.

محوار العصبون Axon

استطالة مفردة وطويلة تنبثق من جسم الخلية في منطقة تدعى سرة المحوار Axon Hillock (البرزة أو الربوة)، يتراوح طوله بين بضعة ميكرونات وأكثر من متر، ويبدي المحوار في نهايته القاصية تفرعات محدودة العدد، تنتهي بانتفاخات تدعى **أزراراً انتهائية** Axon Knobs، وتحتوي هذه الأزرار على حويصلات تختزن بداخلها مواد كيميائية تدعى بالنواقل الكيميائية أو العصبية، هذا وينقل المحوار السيالات العصبية من جسم الخلية إلى فروعه الانتهائية.

يعد المحوار الاستطالة الخلوية الأكبر والأطول في الخلية العصبية. ويغلف المحوار غشاء خلوي يسمح بقيام المبادلات الشاردية الضرورية لنشوء وسريان السيالة العصبية على طوله.

يوصف النقل في الخلية العصبية بأنه **مستقطب**؛ إذ تمثّل التغصنات الخلوية **المنطقة المستقبلة** Receptive **والمكاملة** Integrative للسيالة العصبية، بينما يمثّل المحوار المنطقة **المرسلة** أو **الموصلة** Conductive، الشكل (3).



الشكل (3): النقل العصبي المستقطب في الخلية العصبية.

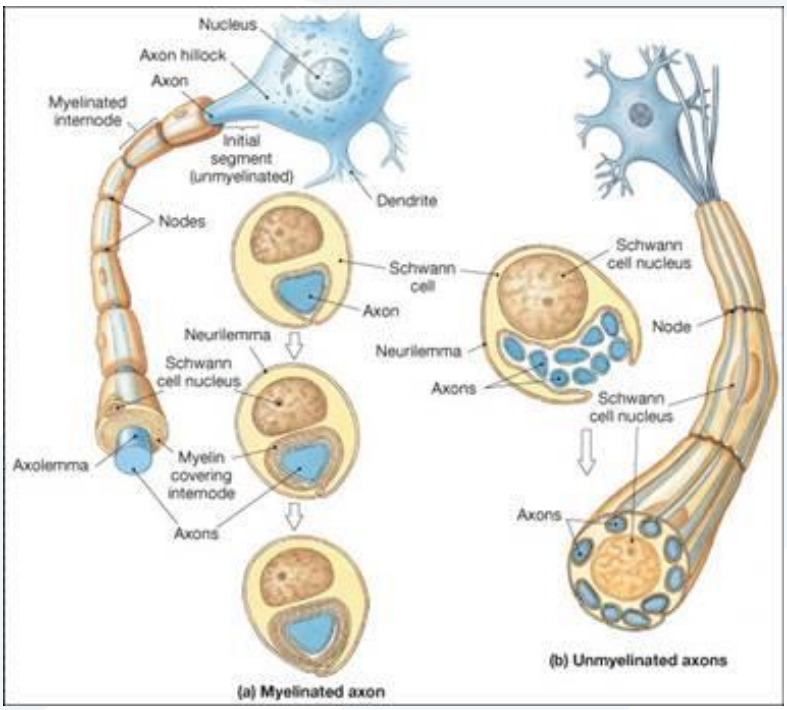
قد يحاط المحوار بغمد أو أكثر فيسمى عندها **بالليف** العصبي، وتشمل هذه الأغمدة:

- **غمد النخاعين Myelin sheath**

مادة **شحمية فسفورية**، على هيئة وريقات دائرية عديدة متحدة المركز، تختلف ثخانة غمد النخاعين من ليف عصبي لآخر، فهو ثخين في بعض الألياف العصبية، ويكسبها لونها **الأبيض** ونسميها أليافا مغمدة بالنخاعين Myelinated، ويشاهد ذلك في الألياف الجسدية للجهاز العصبي المحيطي أو الطرفي (الأعصاب)، والألياف قبل العقدة في الجهاز العصبي المستقل. وتشكل الألياف المغمدة بالنخاعين المادة البيضاء للجهاز العصبي المركزي.

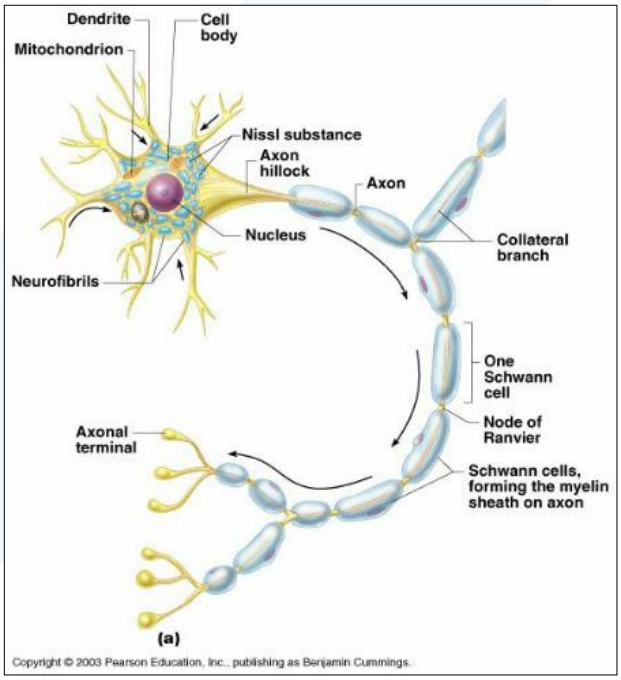
ومن جهة أخرى، تكون الزمرة الثانية من الألياف العصبية مجردة من النخاعين. Unmyelinated، مثل محاوير العصبونات بعد العقدة في الجهاز العصبي المستقل، والألياف العصبية الناقلة لإشارات الألم البطيء الشكل (4).

لا يغلف غمد النخاعين سطح الليف (سواء أكان محوارً أو استطالة حسية) العصبي بكامله، إذ أن بداية المحوار أي السرة، ونهايته (فروعه الانتهائية) مجردة من هذا الغمد.



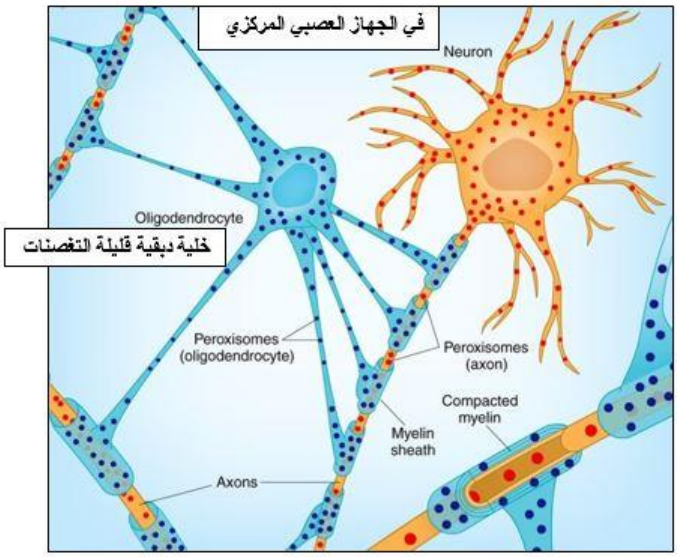
الشكل (4): الألياف المغمدة بالنخاعين (a)، والمجردة منه (b).

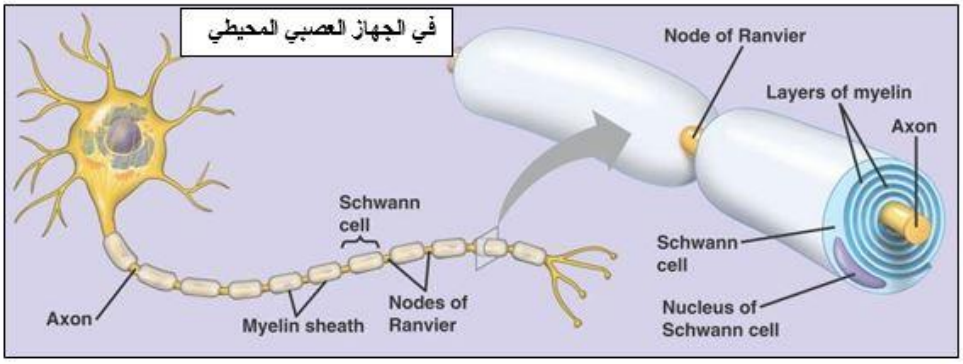
كذلك، فإن الغمد غير متواصل على طول الليف، فهو يتجزأ على مسافات معينة، مولداً قطعاً تفصل بينها اختناقات تدعى عقد رانفييه Ranvier nodes. وتجدر الاشارة إلى أن الفروع الجانبية للمحوار في حال وجودها تغادر من هذه العقد، الشكل (5).



الشكل (5): يظهر أحد الفروع الجانبية للمحوار وهي تغادر من عقدة رانفييه.

ينشأ غمد النخاعين في الجهاز العصبي المحيطي (الأعصاب) من خلايا دبق عصبي تدعي خلايا **شوان**، بينما ينشأ في الجهاز العصبي المركزي (الدماغ والنخاع الشوكي) من قبل خلايا دبق عصبي أخرى تدعى الخلايا **قليلة التغصنات** الشكل (6).



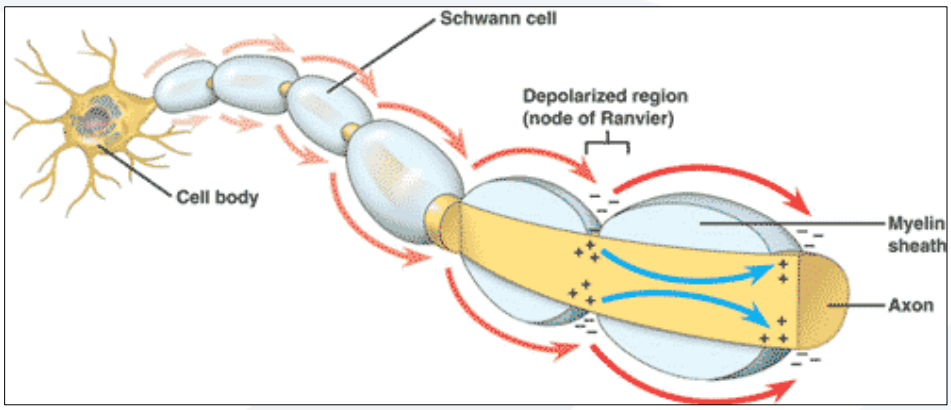


الشكل (6): منشأ غمد النخاعين في كل من الجهاز العصبي المركزي والمحيطي.

يؤدي غمد النخاعين دوراً **عازلاً**، كما أنه يسرّع انتقال السيالة العصبية في المحوار؛ إذ لا ينشأ كمون العمل Action potential في الألياف المغمدة بالنخاعين الا في عقد رانفييه، أي أن السيالات العصبية لا تنتقل من نقطة إلى أخرى مجاورة لها، وإنما تقفز من عقدة الى أخرى، بوثبات متتالية ويسمى ذلك بالنقل العصبي القفزي أو الوثّاب، الشكل (7).

وهذا يكسب الألياف المغمدة بالنخاعين ميزتين اضافيتين، وهما:

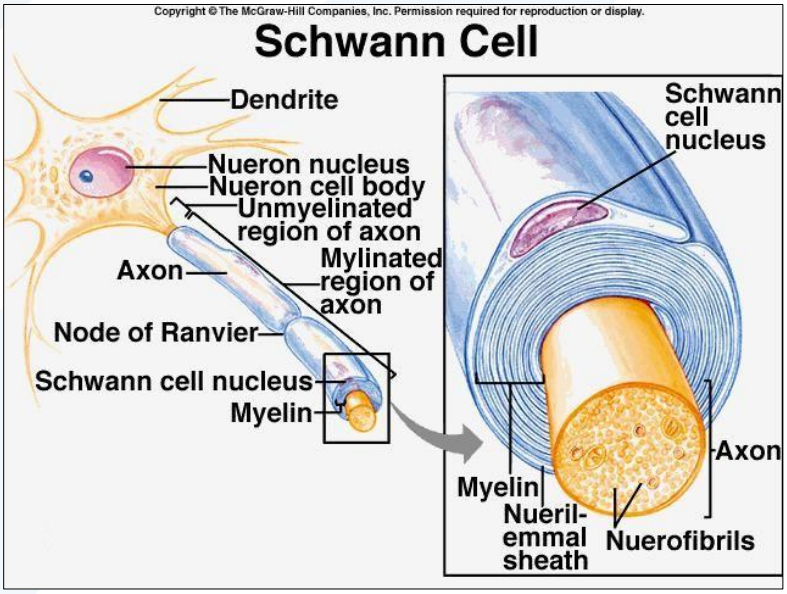
1. سرعة النقل العالية الناتجة عن وثبات كمونات العمل بين العقد.
2. توفير الطاقة اللازمة لتشغيل المضخات المعنية بصون التراكيز الشاردية على جانبي الغشاء الخلوي، لأن الطاقة تصرف في هذه الحالة على تشغيل مضخات الغشاء في مستوى عقد رانفييه بدلاً من مضخات غشاء المحوار بأكمله.



الشكل (7): النقل القفزي في الألياف المغمدة بالنخاعين.

- **غمد شوان Schwann sheath**

غلاف **رقيق وشفاف** يحيط بالنخاعين في الألياف النخاعية المحيطية (الأعصاب)، أو بالمحوار في الألياف المجردة من غمد النخاعين، يحوي نواة في مقابل كل قطعة نخاعية، يبقى غمد شوان محيطا بالمحوار حتى في مناطق وجود عقد رانفييه، ولكنه لا يغلف الليف العصبي بأكمله، إذ يختفي في منطقة اتصال المحوار مع جسم الخلية، وفي فروع المحوار الانتهائية. تكمن أهمية غمد شوان في الالياف العصبية المحيطية على التجدد بعد انقطاعها، خلافا لألياف الجهاز العصبي المركزي غير المحاطة بغمد شوان التي تفتقر لقابلية التجدد، الشكل (8).



الشكل (8): غمد – خلية شوان.

أنواع العصبونات

تصنف العصبونات بالاعتماد على معايير شكلية (مورفولوجية) في ثلاث مجموعات رئيسية، الشكل (9) هي:

- **عصبونات متعددة الأقطاب Multipolar**

بصورة عامة، يعد العصبون متعدد الأقطاب إذا امتلك أكثر من تغصن واحد ومحوار وحيد. الا أن النموذج النمطي لهذه العصبونات يتضمن **نشوء تغصنات** من **معظم** مناطق **جسم** الخلية، كما هو الحال في العصبونات المحركة الشوكية. ويشتق من هذا النموذج الأصلي، أنماط فرعية كالخلايا الهرمية في قشرة المخ، وخلايا بوركنج في القشرة المخيخية، الشكل (9).

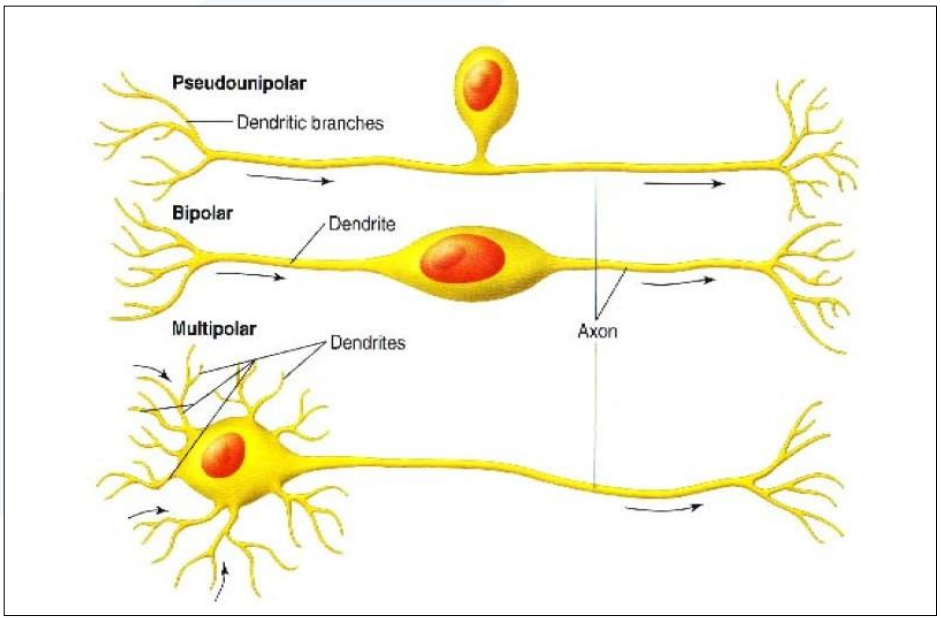
- **عصبونات ثنائية القطب Dipolar**

تمتلك هذه العصبونات أجساماً خلوية **بيضوية** تبرز منها **استطالتان** واحدة في كل جانب، يقوم التغصن الأول بجمع المعلومات من المحيط، بينما يقوم الثاني (المحوار) بنقل المعلومات الى الجهاز العصبي المركزي. وتعد خلايا شبكية العين مثالاً لهدا النمط، الشكل (10، 9).

- **عصبونات أحادية القطب الكاذبة Pseudounipolar**

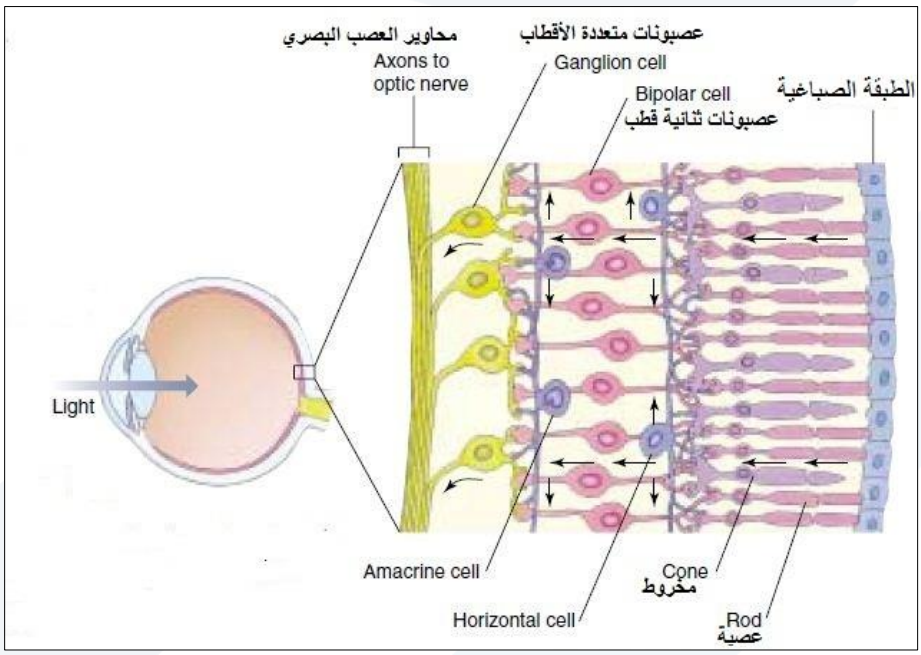
تمتلك العصبونات أحادية القطب استطالة **أساسية** يمكن أن تتفرق إلى **فرعين**، يؤدي الفرع الأول دور تغصنات تستقبل التنبيه، بينما يقوم الفرع الآخر مقام محوار العصبون. ويمثل هذه العصبونات عند الفقاريات عموماً الخلايا العصبية الموجودة بالقرب من النخاع الشوكي وبالتحديد في العقد الشوكية للجذر الحسي الخلفي، الشكل (9).

أما **أحادية القطب Unipolar** تشاهد أثناء تطور الجهاز العصبي جنينياً.



الشكل (9): أنواع العصبونات من الناحية الشكلية.

كذلك هناك خلايا **عديمة المحوار** تدعى الخلايا المقرنية Amacrine أي تمتلك تغصنات شجرية فقط، توجد في شبكية العين الشكل (10).



الشكل (10): شبكية العين والخلايا المقرنية.

كما تصنف العصبونات أيضاً بالاعتماد على معايير وظيفية إلى ثلاث مجموعات، الشكل (11) وهي:

- **عصبونات حسية Sensory Neurons**

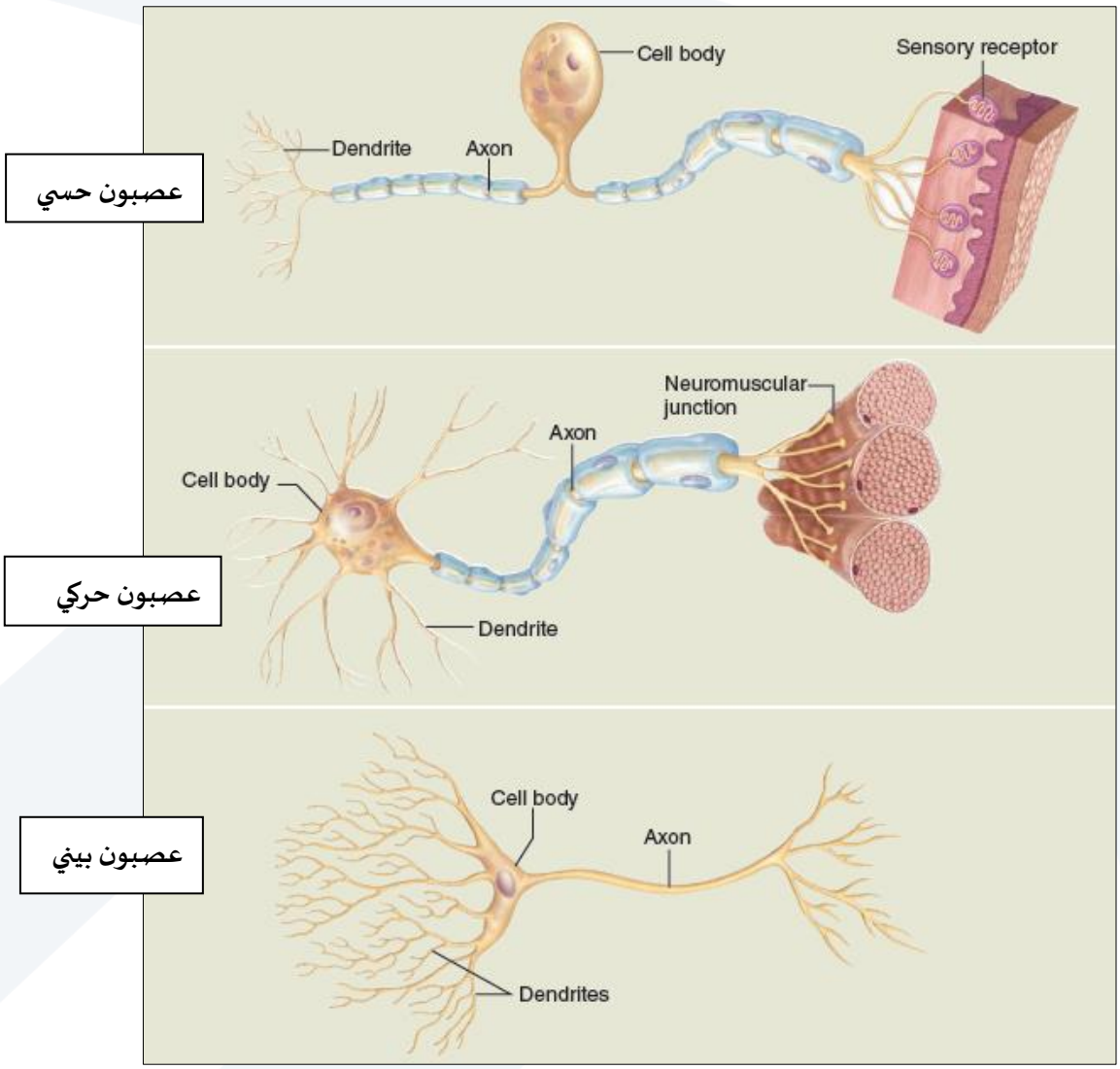
تنقل معلومات حسية إلى الجهاز العصبي المركزي، وقد تكون العصبونات الحسية **أحادية** أو **ثنائية** القطب، وتوجد أجسامها **خارج** الجهاز العصبي المركزي في عقد شوكية أو قحفية، وهي تنقل المعلومات الحسية من جميع مناطق الجسم كالجلد والأحشاء والعضلات. وكما أشرنا سابقاً، يمكن أن تتقسم استطالة العصبون الحسي إلى فرعين: محيطي يتجه إلى الأعضاء المستقبلة الموجودة في الجلد أو الأحشاء أو العضلات، ومركزي يتجه إلى الجهاز العصبي المركزي، وينتهي إلى عصبونات بينية وحركية.

- **عصبونات حركية Motor Neurons**

وهي **عديدة** الأقطاب، تقع أجسامها في المادة السنجابية (الرمادية)، كعصبونات القرن الأمامي للنخاع الشوكي التي تغادر محاويرها عبر الجذر الأمامي للأعصاب الشوكية، وتنقل **أوامر** الجهاز العصبي المركزي إلى الأعضاء المستهدفة أو المنفذة (الغدد أو العضلات).

- **عصبونات بينية Interneurons**

وهي خلايا **متعددة** الأقطاب، توجد كلياً ضمن الجهاز العصبي المركزي، **ولا ترسل** محاويرها إلى خارجه إطلاقاً، وهي أكثر عدداً من النوعين السابقين مجتمعين.



الشكل (11): تصنيف العصبونات من الناحية الوظيفية.

الخصائص البيولوجية للعصبون

تتمتع الخلية العصبية بعدد من الخصائص البيولوجية المميزة لها، ونذكر من هذه الخصائص ما يأتي:

1. **عدم تجدد** جسم العصبون عد تعرضه للتلف؛ فالإنسان يولد مع عدد محدد من الخلايا العصبية، (باستثناء خلايا بعض مناطق الحصين من هذه القاعدة، إذ يبدو أنها قادرة على إنتاج خلايا جديدة، تؤدي دوراً مهماً في الذاكرة والتعلم).
2. شكل العصيون بعد الولادة **ليس نهائياً**؛ إذ يمكنه تشكيل استطالات خلوية، وفروع محوارية جانبية، أو تفرعات انتهائية إضافية، تحت تأثير عوامل بيئية مختلفة.
3. تتأذى العصبونات بشكل شديد عند **نقص أكسجة** (التزوّد بالأكسجين) النسيج العصبي.
4. يستهلك العصبون **الغلوكوز** (سكر العنب) فقط.
5. تتميز الألياف العصبية **المحيطية** بأنها **قابلة للتجدد**، على خلاف الألياف العصبية المركزية.

تنكس الألياف العصبية المحيطية وتجددها

تختلف أثار الرض المؤدي لتنكس الألياف العصبية باختلاف موقع إصابة العصبون (في الجهاز العصبي المحيطي أو المركزي) والقسم المتأذي منه (جسم العصبون أو محواره)، ونبيّن فيما يأتي بعضاً من نتائج الإصابة العصبونية:

- **إصابة جسم العصبون:** تؤدي إلى موت الخلية العصبية المتأذية.
- **إصابة محوار العصبون:** يؤدي لظهور تبدلات في العصبون نفسه، وفي الخلايا الدبقية، وفي العصبونات المرتبطة بمشابك كيميائية مع العصبون المصاب، وفي هذه الحالة يمكن أن يحدث تنكس واليرياني Wallerian degeneration في محوار العصبون المصاب، وتنكس تقدمي في العصبون بعد المشبكي، وتنكس رجوعي في العصبون قبل المشبكي الشكل (12).

الشكل (12): التنكس عبر العصبوني.

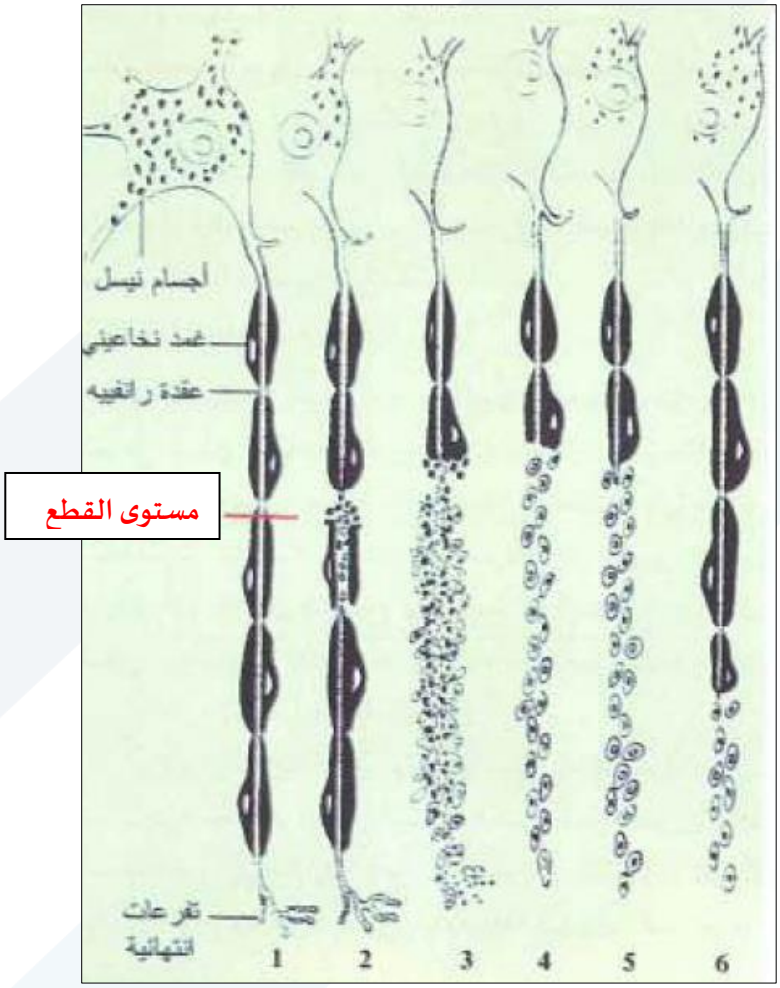
التنكس الواليرياني Wallerian degeneration

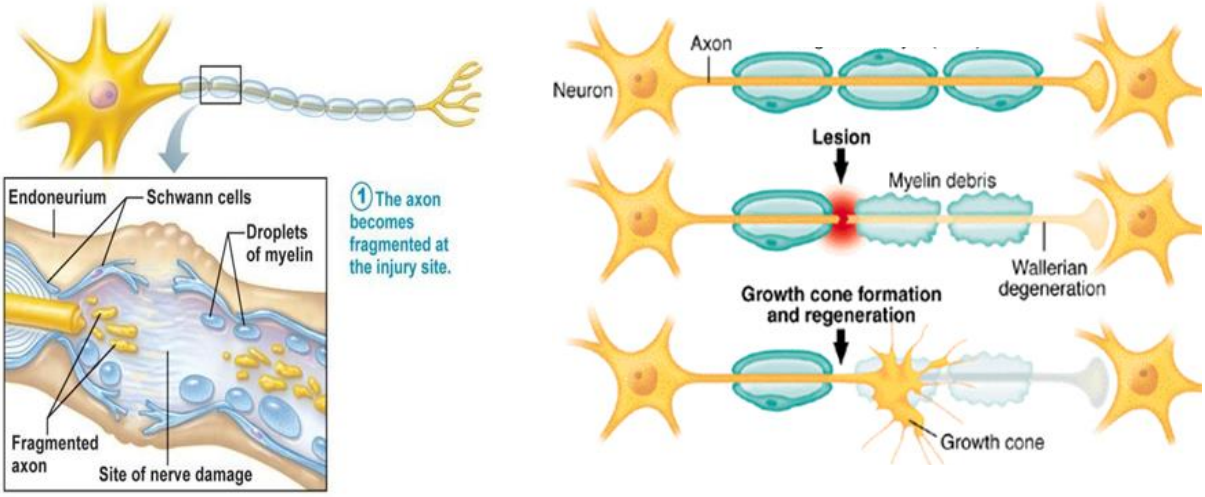
1. إذا تعرض ليف عصبي محيطي إلى قطع تام، فإن قسمه **القاصي** (البعيد) المفصول عن جسم الخلية **يتنكس**، فتتجزأ محتوياته ويتحلل غمد النخاعين.
2. وفي مرحلة تاليه تتكاثر خلايا غمد شوان فتزيل مخلفات التنكس والتحلل. وفي الجهة المقابلة، ينتشر التنكس إلى مسافة قصيرة في **القطعة الدانية** (القريبة) المرتبطة بجسم الخلية وعادة إلى **أول** عقدة رانفييه قريبة من منطقة الرض.
3. وبعد بضعة أيام تظهر **ردود فعل واضحة** في جسم الخلية ترتبط قوتها بقرب موقع الرض أو بعده عن جسم الخلية وتتنكس المشابك التي تؤلفها القطعة القاصية (البعيدة) بشكل تام وتدعى هذه العملية **تنكس النهايات**.
4. ويحتاج التنكس التام للقطعة القاصية الى **شهر** أو **شهرين**، وتدعى العملية **التنكس الواليرياني** نسبة إلى مكتشفها وهو العالم الإنكليزي Augustus Walles.

وكما أشرنا سابقاً فإن العصبونات المجاورة للعصبون المتأذي التي تحتل الموقع **قبل** المشبكي أو **بعد** المشبكي بالنسبة لهذا العصبون قد **تتأثر** أيضاً، ويتأذى النقل المحواري **التقدمي** إذا كانت الخلية **تستقبل** مشابك من العصبونات المتأذية، بينما يتأذى النقل المحواري **الرجوعي** إذا كانت الخلية المتأذية هي التي **تشكّل** مشابك الخلية المصابة.

وفي غضون أسبوعين تقريباً لا يبقى من القطعة القاصية لليف سوى **أنبوبة غشائية** يتكون جدارها من خلايا غمد شوان فقط.

تبزغ من النهاية الطرفية للقطعة الدانية **لييفات عصبية** تنمو ضمن القناة الغشائية التي شكلتها خلايا غمد شوان، ثم يتشكل فما بعد غشاء وغمد نخاعين جديد لليف المتجدد، وتعود لليف العصبي طبيعته ويستعيد وظيفته السابقة، ويعاود تشكيل مشابكه من جديد الشكل (13).





الشكل (13): تنكس الألياف المحيطية وتجددها.

النسيج الداعم ووظائفه

يتألف النسيج الداعم من نموذجين مختلفين من النسيج الضام، هما: النسيج الضام الليفي، والنسيج الضام الدبقي.

- **النسيج الضام الليفي**

هو نسيج داعم في الجهاز العصبي المحيطي، يتألف من خلايا ليفية وألياف كولاجين، وألياف مرنة، وخلايا شوان، بالإضافة للسائل الموجود بين المكونات السابقة.

- **النسيج الضام الدبقي**

هو نسيج داعم في الجهاز العصبي المركزي، يتألف من عدة أنماط من خلايا الدبق العصبي بالإضافة إلى السائل المحيط بها، وتجدر الإشارة إلى أن عدد خلايا الدبق العصبي يفوق بنحو 10-50 ضعفاً عدد الخلايا العصبية في الفقاريات.

وتصنف خلايا الدبق العصبي Neuroglia على النحو الآتي الشكل (14):

أولاً: الخلايا الدبقية ضمن الجهاز العصبي المركزي Central Nervous System (CNS)، وتضم:

1. **الخلايا البطانية Ependymal cells**

تبطن أجواف الجهاز العصبي المركزي (**البطينات وقناة السيساء**)، وتشكل ظهارة تفصل بين النسيج العصبي والسائل الدماغي الشوكي الداخلي. وتقوم بعض هذه الخلايا بإفراز هذا السائل الدماغي الشوكي والمحافظة على حجمه وتركيبه.

2. **الخلايا الدبقية الصغيرة Microglia**

توجد بعضها **بجوار الأوعية الدموية**، وهي تملك استطالات طويلة ومتشعبة تحيط بالأوعية وبأجسام العصبونات، كما يوجد بعضها الأخر في **المادة البيضاء** للجهاز العصبي. تؤدي هذه الخلايا دوراً مناعياً ودفاعياً؛ إذ تتحول إلى بالعات وتقوم ببلعمة الأجسام الغريبة.

3. **الخلايا النجمية Astrocyte**

توجد في **المادة الرمادية** للدماغ، تحيط بالعصبونات وترسل استطالاتها نحو الأوعية الدموية؛ إذ تتوسع نهايتها (أي الاستطالات) لتشكل **الأبواق الوعائية**، وبالتالي تساهم هذه الخلايا في تشكيل جزءاً من الحاجز الدماغي الوعائي الدموي، كما تقوم بتغذية العصبونات.

4. **الخلايا الدبقية قليلة التغصنات Oligodendrocyte**

توجد ضمن المادة **البيضاء** للجهاز العصبي المركزي، إذ تحيط استطالاتها بمحاوير العصبونات المركزية، وتسهم بتشكيل أغمادها النخاعينية.

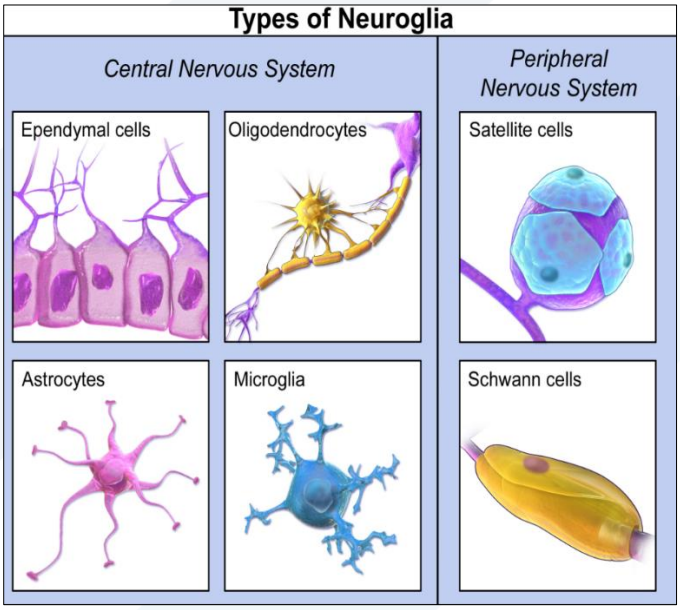
ثانياً: الخلايا الدبقية ضمن الجهاز العصبي المحيطي Peripheral Nervous System (PNS)، وتضم:

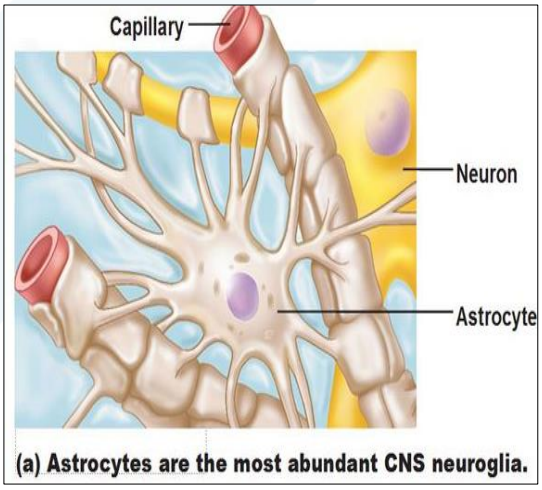
1. **خلايا شوان Schwann cells**

تسهم في تشكيل غمد النخاعين حول الأعصاب.

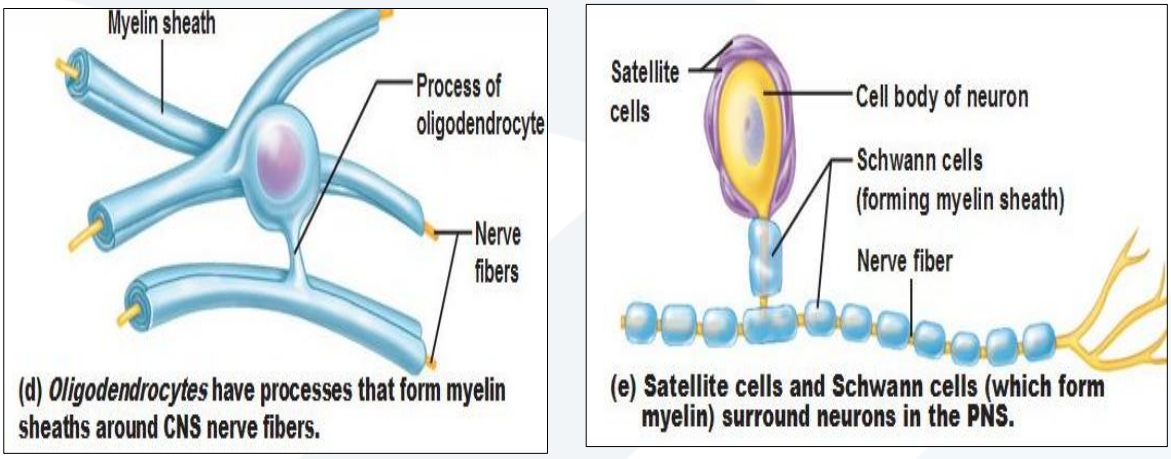
2. **الخلايا الساتلة Satellite cells**

تحيط بأجسام الخلايا العصبية في العقد الشوكية وتعمل على دعمها وحمايتها.





(a) Astrocytes are the most abundant CNS neuroglia.



الشكل (14): خلايا الدبق العصبي.

وظائف الدبق العصبي

1. **الدعم:** ويتمثل في منح التماسك والشكل والبنيوي للدماغ، وهو دور مشابه لوظيفة النسيج الضام في أجزاء الجسم الأخرى.
2. **الترميم:** يسهم تكاثرها بترميم جروح الجهاز العصبي المركزي.
3. **التغذية:** تشير الأدلة إلى قيام بعضها بوظائف مغذية للخلايا العصبية.
4. **البلعمة:** تبلعم خلايا الدبق العصبي الصغيرة المخلفات التالفة الناتجة عن تأذي الخلايا آو موتها.
5. **العزل:** تشكّل خلايا شوان والخلايا الدبقية قليلة التغصنات غمد النخاعين العازل الذي يغطي بعض المحاوير العصبية.
6. **درء وإزالة بعض المواد:** يقوم بعضها بدرء ارتفاع تركيز أيونات البوتاسيوم في الحيز خارج الخلايا، ويزيل بعضها الآخر النواقل الكيميائية المتحررة من العصبونات.
7. توجيه هجرة العصبونات خلال تنامي الجهاز العصبي.
8. يسهم بعضها في تكوين الحاجز أو الحائل الدموي الدماغي.

فيزيولوجيا الأعصاب

خصائص الألياف العصبية

تتميز الألياف العصبية بخاصتين أساسيتين هما:

- **الاستثارية Excitability:** أي أن الألياف العصبية قابلة للتأثر حتى بالمنبهات الضعيفة.
- **التوصيلية Conductivity أو قابلية النقل:** أي قدرة الألياف على نقل التنبيه المتشكّل من مكان حدوثه إلى أنحاء الخلية العصبية كلها، تنتقل السيالة العصبية على طول المحور بسرعة ثابتة، وتتطلب طاقة.

المنبهات و أنواعها:

المنبه: هو كل تبدل في الوسط الخارجي أو الداخلي يؤثر على استقرار الوسط الداخلي للخلية الحية.

تصنّف المنبهات حسب طبيعتها إلى:

- **منبهات كيميائية:** هي التغيرات الكيميائية التي تحصل في محيط الأنسجة الحية منها: O_2، pH ، H^+
- **منبهات فيزيائية:** كل تغير فيزيائي يحصل في محيط العضوية، وتشمل عدة أنواع:
  1. ميكانيكية: وخز، ضغط، شد، سحق.
  2. حرارية: ارتفاع درجة الحرارة أو انخفاضها.
  3. كهرطيسية.
  4. شعاعية: الأشعة فوق البنفسجية، وتحت الحمراء.
  5. كهربائية.

لكي يستطيع المنبه توليد استجابة في نسيج ما يجب أن يمتلك عناصر ضرورية:

- **أن يملك شدة معينة:** والمنبه الأصغري هو أضعف منبه يحدث أثراً، وهو يختلف من عصب إلى آخر، ومن هنا يأتي مفهوم حساسية العصب، فكلما صغرت العتبة الحدية اللازمة لتنبيه العصب ازدادت حساسيته. اصطلح على تسمية أصغر (أضعف) شدة منبه يولد استجابة في العصبون عندما يطبّق لفترة غير محدودة بالريوباز Rheobase وهي وحدة قياس شدة التنبيه.
- **أن يطبّق لمدة زمنية معينة:** لتتولد استجابة، إثر تطبيق منبه، يجب أن يستمر تطبيقه لمدة زمنية معينة، وأقصر زمن لازم لمنبه كي ينبه نسيجاً معيناً هو زمن الاستهلاك المفيد (أو الزمن المفيد الأساسي)، وكلما طالت المدة الزمنية قلت الشدة اللازمة لإحداث التنبيه (علاقة عكسية بين الزمن والشدة).

  ولمقارنة سرعة قابيلية التنبه بين النسج المختلفة، أوجد مفهوم الكروناكسي، وهو الزمن اللازم لحدوث تنبيه في نسيج ما عندما يمر فيه تيار شدته ضعفي الريوباز.
- **أن يملك تسارعاً:** يتميز الليف العصبي بالتكيّف، فكلما استمر المنبه في التأثير ازداد تدريجياً الحد العتبوي اللازم للتنبيه، فإذا كانت سرعة التكيّف أكبر من تسارع المنبه فلن يحدث التنبيه، وتختلف الأعصاب في سرعة تكيّفها.

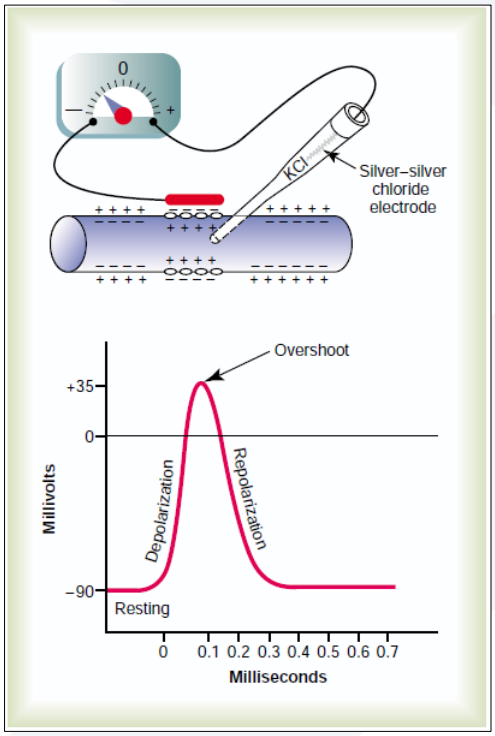
الفعالية (الظواهر) الكهربائية للألياف العصبية

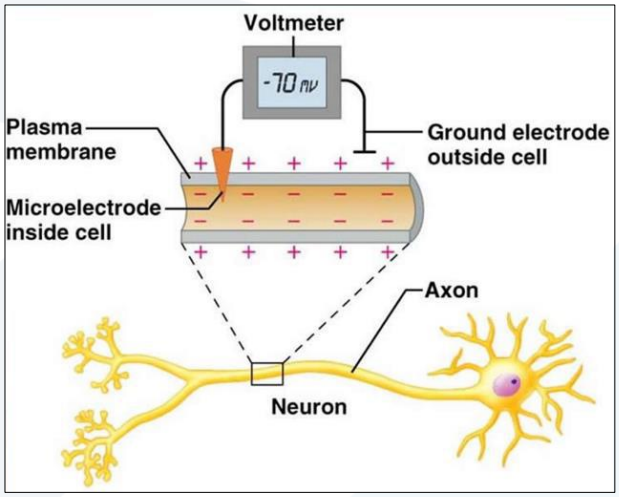
قدرة العصبون على إصدار ونقل السيالات العصبية مرتبطة بظاهرة استقطاب الغشاء في حالة الراحة (كمون الراحة)، وفي حالة العمل (كمون العمل أو الجهد أو الفعل).

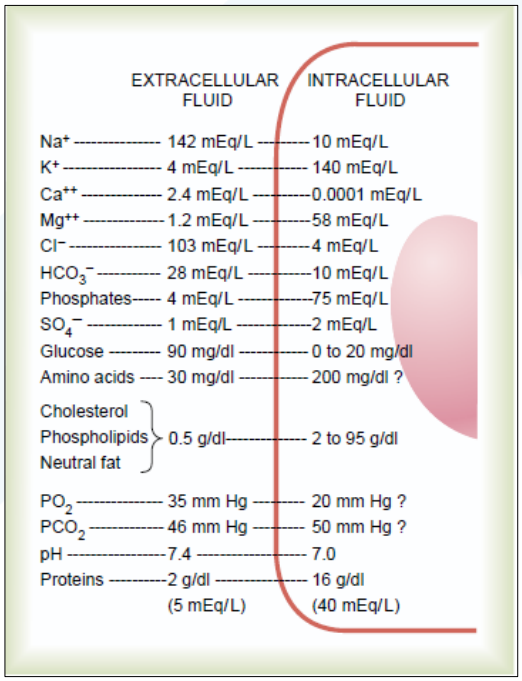
كمون الراحة Resting membrane potential

إذا وضعنا قطبين كهربائيين على سطح ليف عصبي في حالة الراحة موصولين بمقياس غلفاني حساس أو براسم اهتزاز مهبطي، نجد أن النقاط جميعها على سطح الليف متساوية في الجهد، وكذلك الأمر إذا وضعنا كلا القطبين داخل الليف.

ولكن إذا تركنا أحد القطبين في الداخل والآخر في الخارج تسجّل إبرة المقياس انحرافاً دالة على مرور تيار من السطح إلى الداخل يدعى تيار الراحة أو كمون الراحة (يعادل وسطياً 70 mv- وقد يصل إلى 90 mv- في الألياف العصبية الكبيرة) أي أن سطح الليف العصبي يحمل شحنة موجبة، في حين أن داخل الليف يحمل شحنة سالبة، وهذا يعود إلى توزع الشوارد بتراكيز مختلفة على جانبي الغشاء الشكل (15).







الشكل (15): كمون الراحة المسجّل ضمن الليف العصبي، وتراكيز الشوارد خارج وداخل الخلية.

إن نفوذية الغشاء مختلفة حسب الشوارد (اصطفائية)، فخلال كمون الراحة تكون النفوذية لشوارد البوتاسيوم كبيرة (عبر قنوات البوتاسيوم)، فإذا افترضنا أن نفوذية الصوديوم 1 تكون نفوذية البوتاسيوم 100 والكلور 50، ويؤدي هذا التركيز للشوارد على طرفي الغشاء إلى نشوء كمون راحة يعادل 66 mv- أو 86 mv- في حالة الألياف الكبيرة (الإشارة السالبة تدل على الشحنة داخل الليف العصبي).

تلعب مضخة Na^{+} - K^{+} ATPase دوراً في الحفاظ على كمون الراحة حيث تعمل على ضخ 3 شوارد صوديوم إلى خارج الخلية وادخال شاردتي بوتاسيوم، أي هناك ربح بمقدار شاردة موجبة واحدة لصالح خارج الليف العصبي، وتعزز بذلك المضخة كمون الراحة بمقدار 4 mv- ليصبح 70 mv- أو 90 mv- (وهو الكمون المسجّل على جانبي الغشاء في حالة الألياف العصبية الكبيرة).

كمون العمل Action potential

عندما ينبه ليف عصبي بمنبه كهربائي ينعكس كمون الراحة بسرعة إلى كمون إيجابي ويعود بالسرعة نفسها إلى حالة كمون الراحة.

يسجّل راسم الاهتزاز المهبطي كمون العمل، ويظهر الشكل المرفق ارتفاع كمون الراحة من -70 mv إلى -50 mv وعند هذه النقطة يبدأ زوال الاستقطاب بشكل سريع (انفجاري) فيصل الكمون إلى الصفر وينقلب ليصبح ايجابياً ويصل إلى +30 mv ، ليعود بعدها بسرعة إلى -70 mv ويبدى حالة من فرط الاستقطاب المتأخر.

يقسم كمون العمل إلى ثلاثة مراحل الشكل (16):

1. **زوال الاستقطاب Depolarization**

تزداد نفوذية الغشاء للصوديوم بشكل فجائي فتتدفق كميات كبيرة من شوارد **الصوديوم** إلى **داخل** الليف، وتحول كمون الراحة السلبي بعد أن يتجاوز الصفر إلى إيجابي ويصل إلى +30 mv (وحتى +35) وتبلغ فترة زوال الاستقطاب حوالي (0.3 – 0.4) ميلي ثانية.

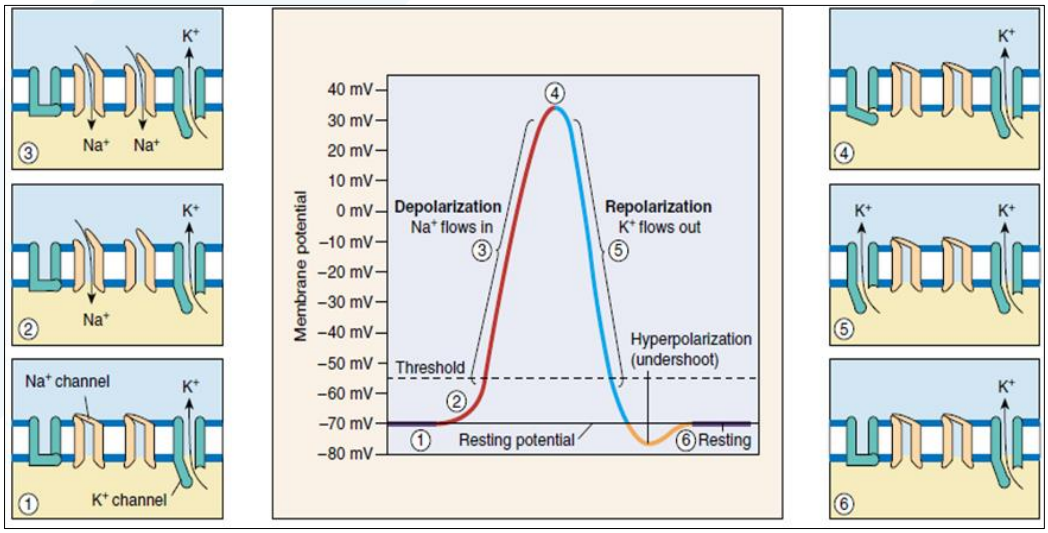
2. **مرحلة عودة الاستقطاب Repolarization**

تنغلق قنوات **الصوديوم**، **وتنفتح** قنوات **البوتاسيوم** فتنتشر شوارد البوتاسيوم باتجاه خارج الليف، ويعود الكمون داخل الخلية إلى السالب، ومدة عودة الاستقطاب حوالي0.5 ميلي ثانية.

3. **مرحلة فرط الاستقطاب Hyperpolarization المتأخر**

يصبح كمون الخلية **أكثر سلبية** مما هو عليه أثناء الراحة (قد يصل إلى -100 mv) في هذه المرحلة، ويعود ذلك إلى بقاء عدد من قنوات البوتاسيوم **مفتوحة** بعد مرحلة عودة الاستقطاب، مما يؤدي إلى خروج مفرط لشوارد البوتاسيوم لخارج الليف العصبي.

إن أهمية فرط الاستقطاب المتأخر تكمن في جعل انتشار كمون العمل **باتجاه واحد** يبتعد عن جسم الخلية باتجاه نهاية الليف العصبي.



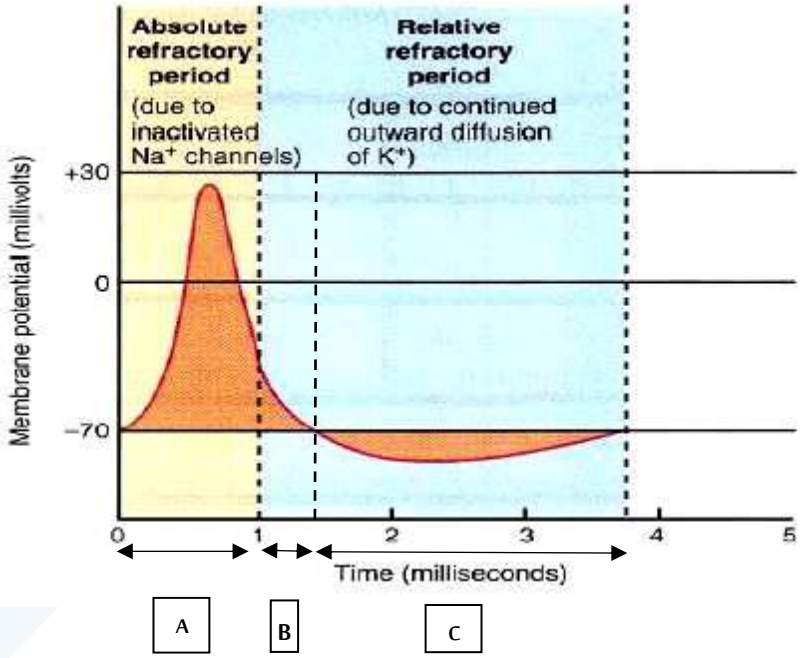
الشكل (16): مراحل كمون العمل.

- **عتبة التنبيه:** هي السوية التي يصل إليها الكمون لينطلق كمون العمل، وهي في الألياف الكبيرة 65 - ميلي فولت، وفي الصغيرة أعلى من ذلك 55 – ميلي فولت، مما يفسر سهولة التنبيه في الألياف الكبيرة.
- **مبدأ " كل شيء أو لا شيء":** عندما يصل كمون الغشاء إلى مستوى العتبة ينطلق كمون العمل في الليف ويكون بسعة عظمى وهذه السعة ثابتة في نفس الليف ولا يمكن أن تزداد مهما ازدادت شدة المنبه، يطبق هذا القانون على الليف العصبي والليف العضلي وعلى مجمل عضل القلب.

فترة العصيان (الاستعصاء أو الحران) Refractory

بعد بدء كمون العمل تتعطل أقنية الصوديوم ولا تنفتح بوابات التعطيل إلا بعد عودة كمون الغشاء إلى مستوى كمون الراحة أو مستوى قريب وبعد جزء صغير من الميلي ثانية، بعدها فقط يمكن أن ينطلق كمون عمل جديد، لذلك وخلال هذه الفترة فإن تطبيق منبه لن يؤدي إلى كمون عمل مهما كانت شدته وهذا ما يسمى **العصيان المطلق Absolute refractory.**

فترة **العصيان النسبي Relative refractory** (يمكن خلالها لمنبهات أقوى من السوية أن تطلق كمون عمل) بسبب استمرار انفتاح قنوات البوتاسيوم وحدوث حالة فرط الاستقطاب المتأخر مما يجعل تنبيه الليف أكثر صعوبة الشكل (17).



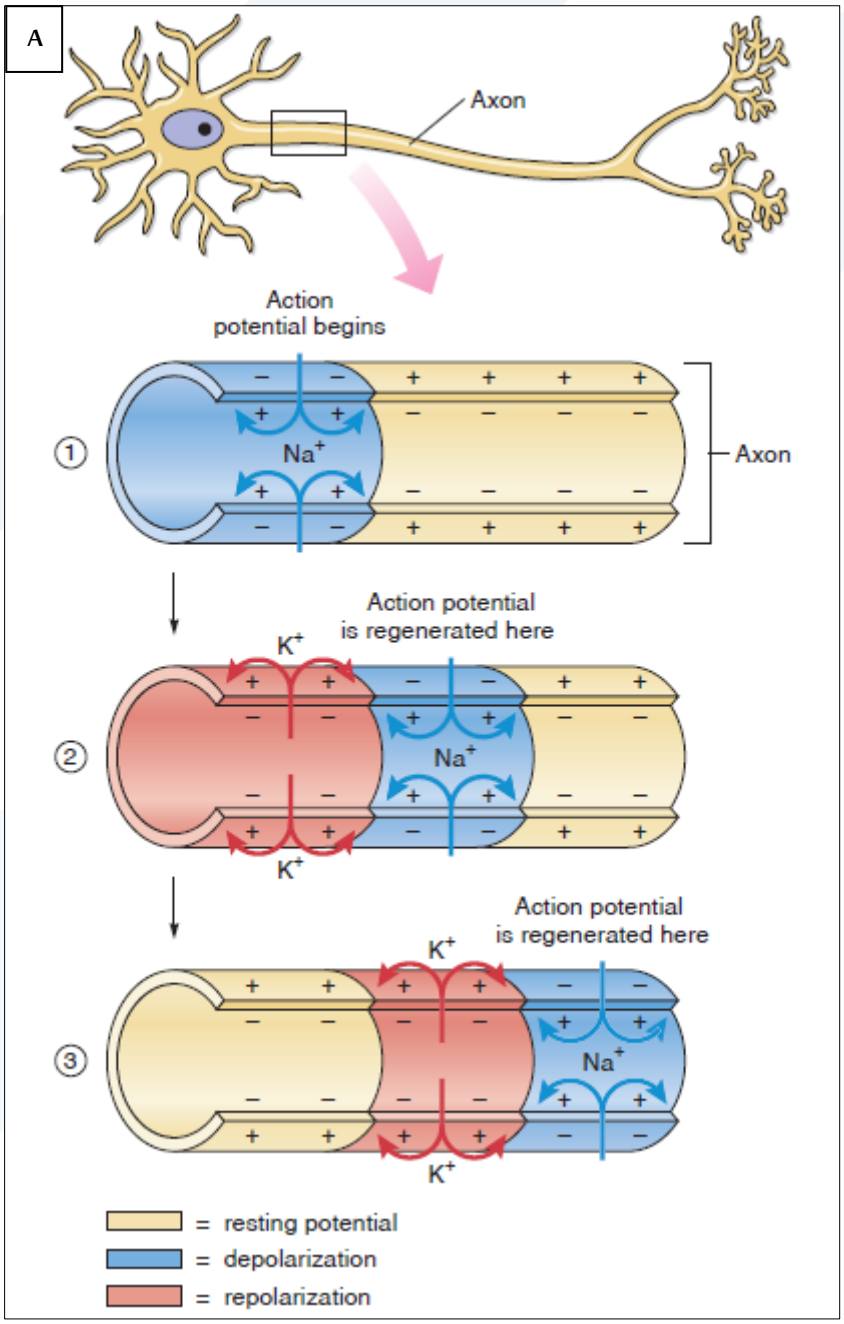
الشكل (17): العصيان المطلق والنسبي، حيث (A) تمثّل العصيان المطلق، (B) تمثّل العصيان النسبي، (C) تمثّل العصيان النسبي لفرط الاستقطاب المتأخر.

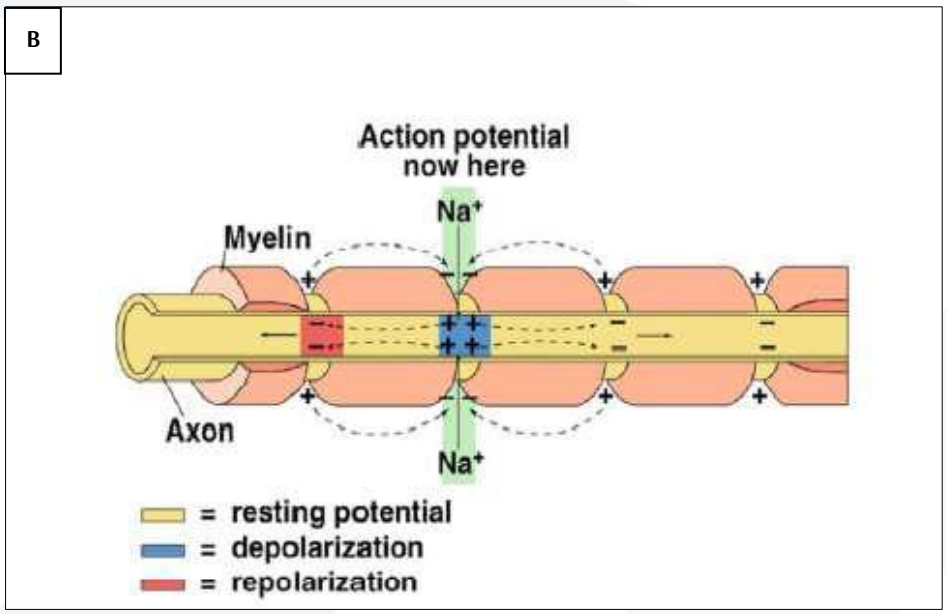
انتقال كمون العمل

يتلقى العصبون في الحالة الطبيعية التنبيه من الاستطالات الخلوية وجسم الخلية باتجاه المحور، والسيالة الوظيفية وحيدة الاتجاه بسبب ظاهرة فرط الاستقطاب، أي عندما تتنبه منطقة يمكن أن تنبه المنطقة التالية لها،

بينما المنطقة السابقة تكون في حالة فرط استقطاب متأخر فلا يعود التنبيه إليها كما في حالة الألياف المجردة بالنخاعين.

أما النقل عبر الألياف النخاعينية فيحدث بشكل قفزي بين عقد رانفييه، مما يؤمن سرعة عالية في النقل، ويوفر الطاقة اللازمة لإعادة توزيع الشوارد التي لا تخرج إلا من العقد، لذلك فإن سرعة النقل تتعلق بقطر الليف وتتناسب معه، الشكل (18).





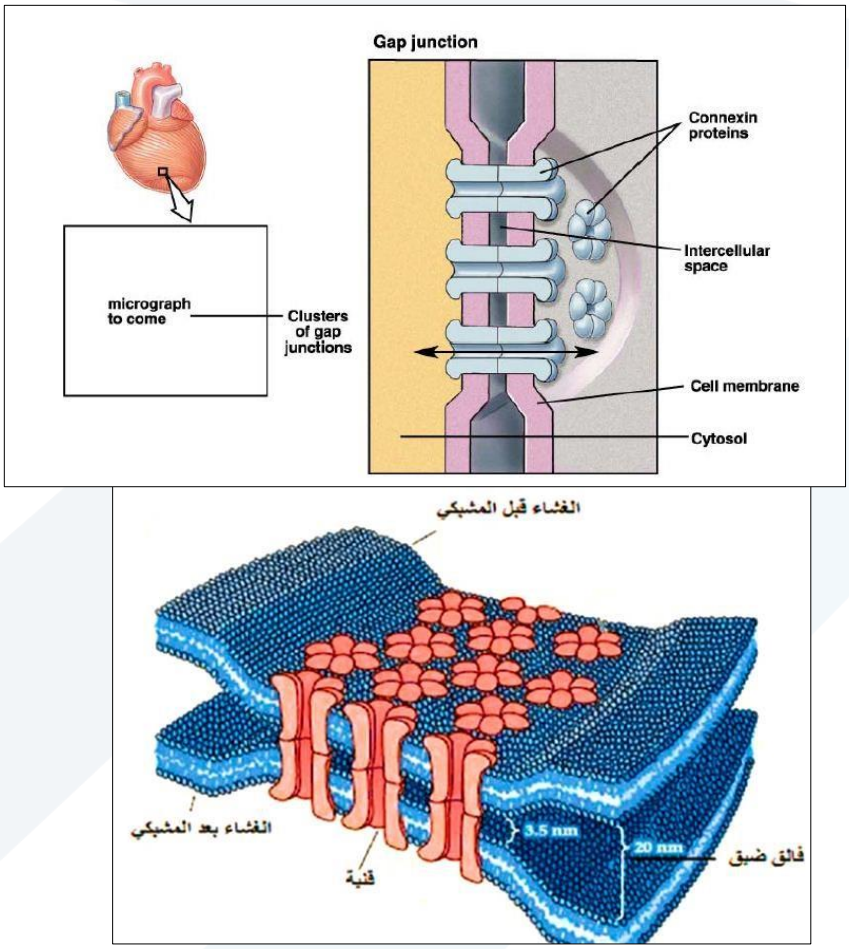
الشكل (18): النقل في الألياف العصبية، (A) المجردة من النخاعين، (B) المغمدة بالنخاعين.

فيزيولوجيا المشابك

المشبك :هو منطقة الاتصال بين التفرعات الانتهائية لمحور أسطواني للعصبون الأول (تسمى بنهايات ما قبل المشبك Presynaptic) مع الغشاء الخلوي للاستطالات العصبية، أو لجسم، أو محوار، عصبون اخر(النهاية ما بعد المشبك Postsynaptic)، يفصل بينها مسافة تسمى بالشق أو الفالق المشبكي Synaptic cleft.

يوجد في الجسم نمطان من المشابك، هما: المشابك الكهربائية والمشابك الكيميائية، ويمكن العثور عليهما في أماكن متفرقة.

وتتميز **المشابك الكهربائية** الشكل (19)، بإحداثها زوال استقطاب (نزع استقطاب) أو كمون عمل متزامن في الخلايا. فعند وجود موصل فجوي (فضوة اتصال أو قنية اتصال من طبيعة بروتينية) بين خليتين ينشأ بينهما مشبك كهربائي، تستطيع التيارات الكهربائية الأيونيّة عبوره مباشرة بكلا الاتجاهين، وتمتاز هذه المشابك بكونها تولّد الإشارة حصراً، وبنقلها السريع للإشارة، الأمر الذي يجعل كل العصبونات أو الخلايا المقترنة كهربائياً تعمل معاً بصورة متزامنة.



الشكل (19): المشبك الكهربائي.

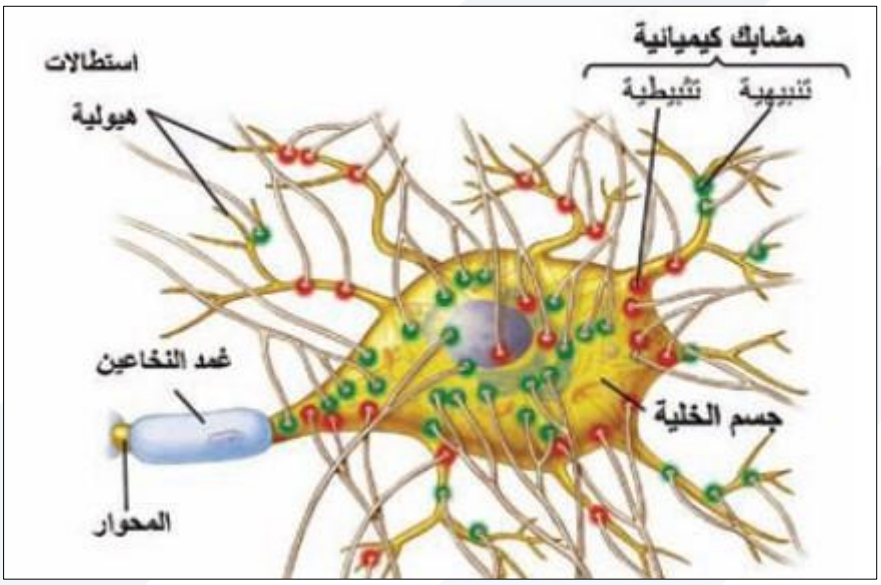
- **المشابك الكيميائية Chemical Synapses**

مكوناتها و أنماطها

تكون أغشية العصبونين في مستوى المشبك الكيميائي مفصولة بعضها عن بعض بحيز ضيق يدعى الفالق أو الشق المشبكي، ولا يستطيع التيار الكهربائي عبور الفالق المشبكي مباشرة من عصبون لآخر، ويتطلب ذلك تحرر مادة كيميائية، تدعى ناقلاً عصبياً من العصبون المرسل للإشارة لتؤثر في العصبون المستقبل لها.

ينقل المشبك الكيميائي الإشارات ببطء أكبر مقارنة بالمشبك الكهربائي، وتكون هذه الإشارات تنبيهيه (كمون بعد مشبكي تنبيهي Excitatory Post Synaptic Potential: E.P.S.P) أو تثبيطيه (كمون بعد مشبكي تثبيطي Inhibitory Post Synaptic Potential: I.P.S.P). والمشابك الكيميائية هي الأكثر شيوعاً، وهي معنية بسلوكيات بشرية شديدة التعقيد، مثل التعلم والذاكرة وغيرها.

يحوي الدماغ تشكيلة من المشابك الكيميائية، تؤمن أشكالاً متنوعة من التواصل فيما بين العصبونات وعلى سبيل المثال، توجد المشابك بين التفرعات الانتهائية لمحاوير بعض العصبونات وتغصنات خلايا أخرى، أو أجسامها الخلوية، أو محاويرها (في منطقة السرة أو البرزة)، الشكل (20).



الشكل (20): أنماط المشابك الكيميائية.

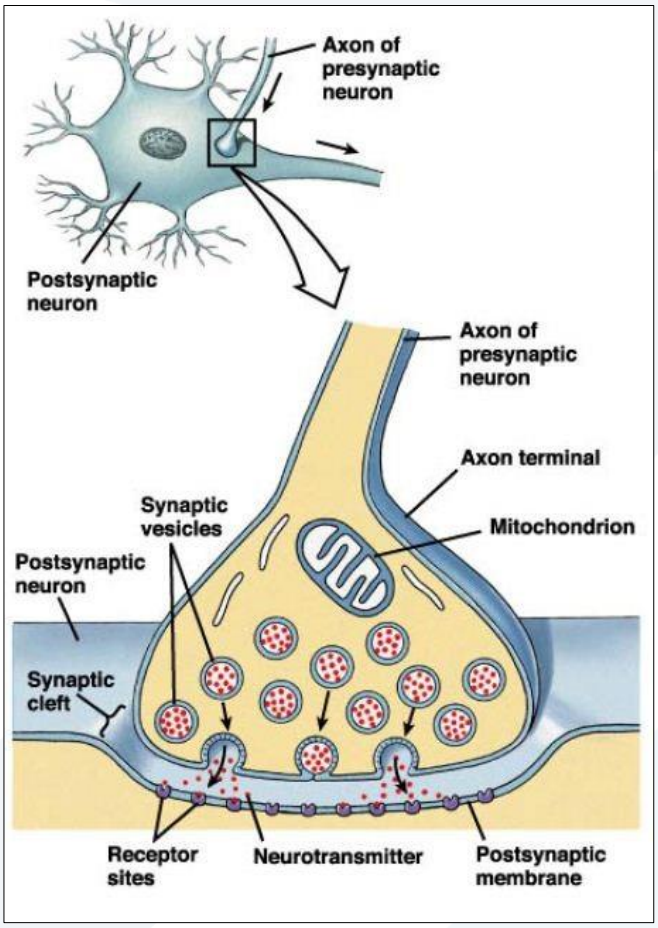
وبينما تزود المشابك المحوارية_التغصنية، والمشابك المحوارية_الجسمية العصبونات المستقبلة بإشارات المدخل، فإنّ المشابك المحوارية لا تزود العصبونات المستقبلة بإشارات مدخل، وإنما بإشارات تنظيم تتحكم بكمية الناقل العصبي الذي تحرره النهايات المحوارية استجابة للإشارات التي تتلقاها من عصبون آخر.

أما المشبك القائم بين تغصن خلوي وتغصن آخر، فلا يعد مشبكاً نموذجياً.

بنية المشبك الكيميائي

يتألف المشبك الكيميائي من مكونين أساسيين، وهما: نهاية محواريّة (زر انتهائي) تابعة للأحد العصبونات، وغشاء خلوي تابع لخلية أخرى، أو بتعبير آخر، عنصر قبل مشبكي، عنصر بعد مشبكي.

يحوي الزر الانتهائي Axon knob للعصبون قبل مشبكي أكياساً غشائية مملوءة بناقل عصبي Neurotransmitter تدعى حويصلات مشبكية Synaptic vesicles، ويدعى الحيز الضيق الذي يفصل بين المكونين السابقين فالقاً (مسافة أو فراغ) مشبكياً Synaptic cleft ويبلغ حوالي 20 نانو متر، الشكل (21).



Axon المحوار

Presynaptic قبل مشبكي

Terminal طرفي

Synaptic vesicles حويصلات مشبكية

Synaptic cleft الفالق المشبكي

Postsynaptic بعد مشبكي

Neuron العصبون

Neurotransmitter الناقل العصبي

Membrane غشاء

الشكل (21): بنية المشبك الكيميائي.

يمكن ترتيب المكونات البنيوية للمشابك الكيميائية كالآتي: الزر الانتهائي (الغشاء قبل المشبكي) – الفالق المشبكي – غشاء الخلية التالية (الغشاء بعد المشبكي).

يتميز الغشاء قبل المشبكي ببنية مناسبة لتماس الحويصلات المشبكية، وتحرر جزيئات الناقل العصبي الكيميائي في الفالق المشبكي، بينما يتميز الغشاء بعد المشبكي بوجود قنوات بروتينية ترتبط بها مستقبلات نوعية للنواقل العصبية (القنوات المبوبة الكيميائية) Chemically – gated channel.

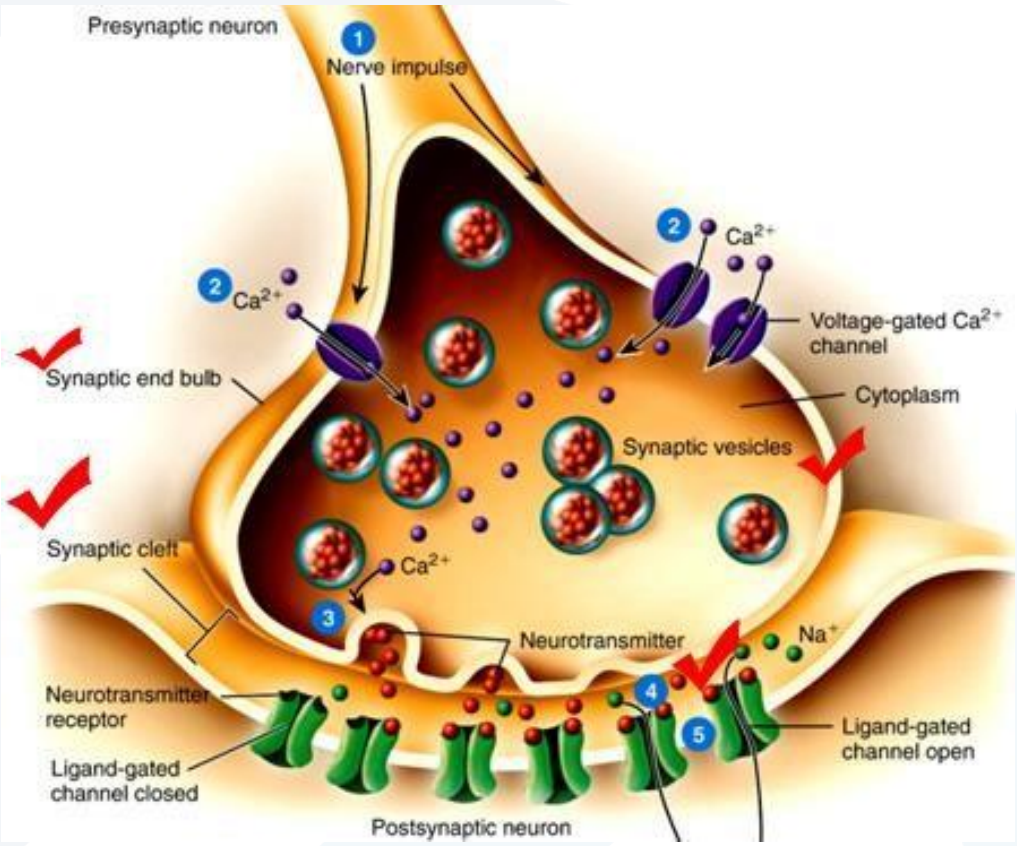
يختلف عدد المشابك المنتشرة على الخلية الواحدة، فعلى خلايا الدماغ المتوسط مثلاً نجد مشبكاً واحداً، وعلى خلية حركية نخاعية نجد أكثر من 5000 مشبكاً، ويقدر وسطياً عدد المشابك في دماغ الإنسان بحوالي 10^{14} مشبكاً، وقد تبلغ المساحة التي تغطيها المشابك حوالي 60% من سطح الخلية العصبية.

- **مراحل النقل المشبكي**

1. وصول كمون العمل إلى الزر الانتهائي.
2. نفوذ أيونات الكالسيوم إلى داخل الزر الانتهائي.
3. التحام الحويصلات المشبكية مع الغشاء قبل المشبكي للزر، وتحرير مخزونها من الناقل العصبي في الفالق المشبكي.
4. ينتشر الناقل العصبي المحرر في الفالق المشبكي قبل بلوغ مستقبلاته النوعية الموجودة في الغشاء بعد المشبكي (للعصبون التالي) وارتباطه بها.
5. ينتج عن ارتباط الناقل العصبي مع مستقبلاته فتح قنوات غشائيّة بعد مشبكية، وحركة الأيونات عبرها تخلق إشارة كهربائية موضعية تدعى الكمون المشبكي (الجهد المشبكي) الشكل (22).
6. يحدث الكمون بعد المشبكي التنبيهي أو التهيجي أو الاستثاري عندما تفتح قنوات الصوديوم و (أو) الكالسيوم ودخولهم إلى الخلية، بينما يحدث الكمون بعد المشبكي التثبيطي عندما تفتح قنوات الكلور لدخوله و (أو) قنوات البوتاسيوم لخروجه.

ترتبط أيونات الكالسيوم بعد دخولها للزر الانتهائي عبر قنوات الكالسيوم (المبوبة الفولطية) بمستقبلات بروتينية تقع على السطح الداخلي للغشاء قبل المشبكي، يؤدي هذا الارتباط إلى التحام الحويصلات المشبكية مع الغشاء قبل المشبكي.

تتباين الكمونات المشبكية من حيث مدة الكمون المشبكي، ومطاله (مداه)، والمسافة التي ينتشر إليها قبل أن يتلاشى، وسرعة تلاشيه، لذلك فهي مختلفة تماماً عن كمون العمل.



الشكل (22): مراحل النقل المشبكي.

أنماط النواقل العصبية

- نواقل سريعة التأثير، وصغيرة الجزيء.
- ببتيدات عصبية بطيئة التأثير، وذات وزن جزيئي كبير.

أولاً: النواقل السريعة التأثير، وتضم:

- **الأستيل كولين Ach**

يتركب في النهاية قبل المشبك من أستيل مساعد (تميم) الأنزيم Acetyl-Co A، والكولين، وذلك بوجود الأنزيم أستيل كولين ترانسفيراز، ويخزن في حويصلات الإفراز، وعندما يحرر إلى المسافة المشبكية ينشطر بعد قيامه بوظيفته تحت تأثير أنزيم الأستيل كولين إستيراز إلى أسيتات وكولين.

يعاد نقل الكولين مجدداً بشكل فعال لتشكيل أستيل كولين جديد.

- **النورادرينالين أو النورابنفيرين NE**

ناقل عصبي رئيس تحرره العصبونات بعد العقدة في الجهاز الودي، وهو ناقل عصبي مهم في مشابك الجهاز العصبي المركزي.

- **الدوبامين Dopamine**

يصطنع من قبل خلايا المادة السوداء في جذع الدماغ، له دور مهم في الوظيفة الحركية، وغالباً ما يكون مثبطاً.

- **السيروتونين**

يصطنع في نوى جذع الدماغ، ويحرر في مواقع كثيرة من الجهاز العصبي المركزي، خصوصاً في المهاد، والقرون الخلفية للنخاع الشوكي، يثبط سبل الألم، وله دور في الحالة النفسية للمريض.

- **الغابا GABA (Gamma-Aminobutyric Acid)**

هو من النواقل العصبية المثبطة الرئيسية في الدماغ.

- **الغلوتامات Glutamate**

تفرز من السبل الحسية وباحات في القشرة، ويعتقد أنها منبهة دائماً.

ثانياً: الببتيدات العصبية

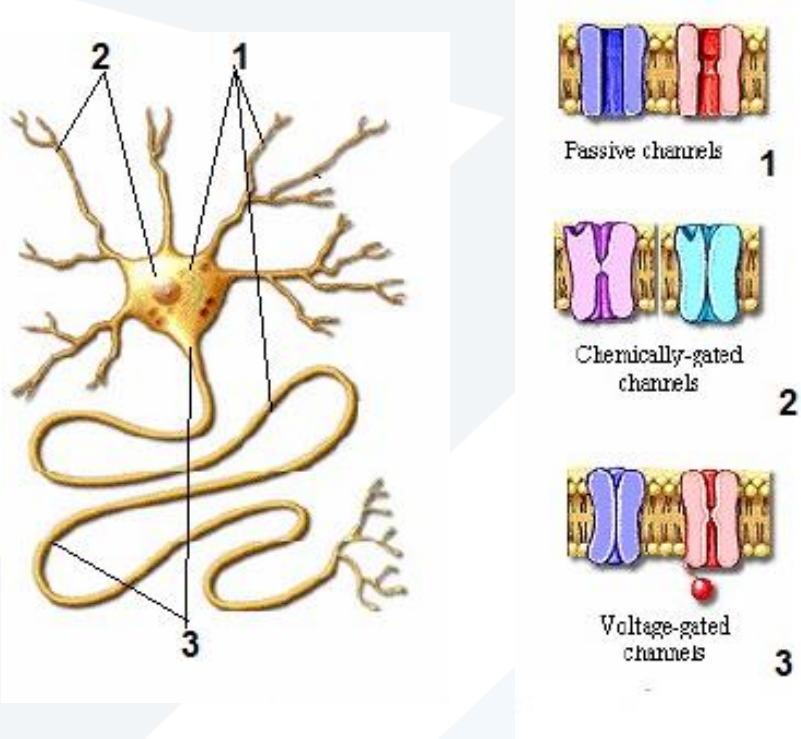
هي مجموعة نواقل ذات تأثير أبطأ عادة مثل: الأنكيفالين، والأندروفين، والمادة P.

يثبط الأنكيفالين نقل الاحساسات المؤلمة، تتحرر المادة P من عدة عصبونات ولها تأثير منبه، تصطنع هذه الببتيدات في جسم الخلية بالتعاون مع جهاز كولجي، وتنقل عبر المحوار إلى نهاية الليف العصبي، تفرز بكميات قليلة ولكن فعاليتها قوية ومديدة؛ إذ تستمر هذه الفعالية لأيام أو حتى لسنوات.

- **القنوات الأيونية**

تمتاز القنوات الأيونية عموماً بتوزعها الموضعي في العصبون بما يناسب وظائفها المختلفة، الشكل (23) وتضم:

1. **القنوات المنفعلة (المفتوحة بصورة دائمة)** الموجودة في الغشاء الخلوي لتغصنات الخلية، وفي جسم الخلية ومحوارها، وتكون مسؤولة عن نشوء كمون الراحة الغشائي RMP.
2. **القنوات المبوبة الكيميائية** الموجودة في جسم الخلية وتغصناتها، وتكون مسؤولة عن إنتاج الكمونات المشبكيّة.
3. **القنوات المبوبة فولطياً** ويوجد معظمها في سرة محوار العصبون، وفي غشاء المحوار غير المغمد بالنخاعين، وفي عقد رانفييه في المحاوير المغمدة بالنخاعين، وتكون هذه القنوات ضرورية لإضرام (إنتاج) كمون العمل وانتشاره.



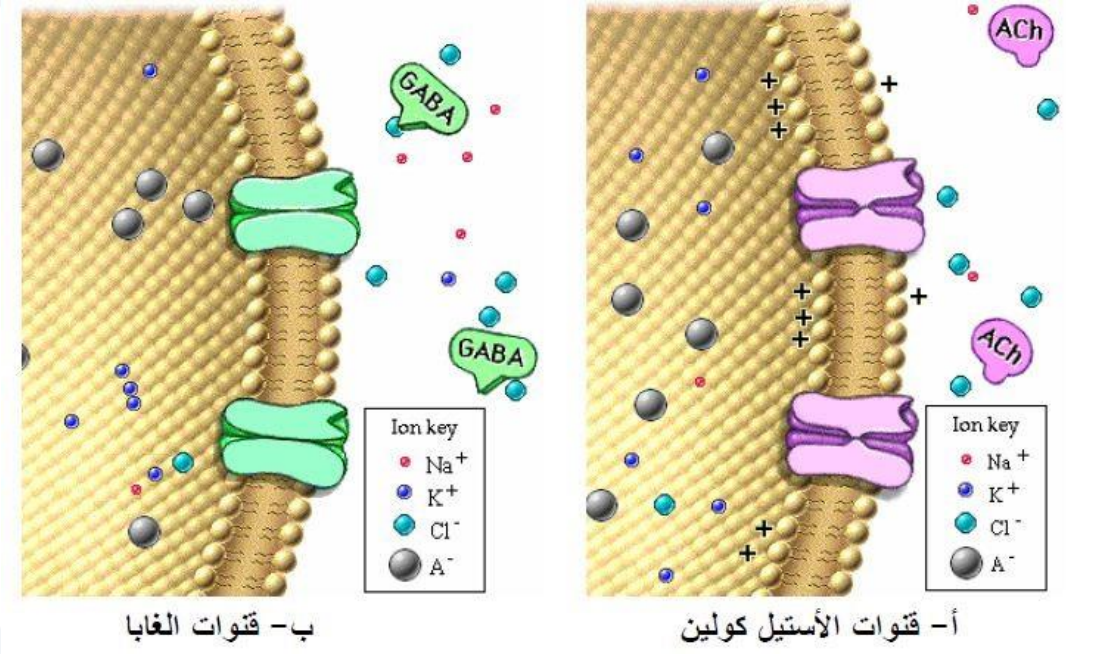
الشكل (23): القنوات الأيونية وتوزعها في العصبون.

التأثير المباشر للناقل العصبي في القنوات المبوبة كيميائياً

تكون مستقبلات الناقل العصبي في هذه الحالة **جزءاً لا يتجزأ** من القناة الأيونية. ويؤدي ارتباط الناقل العصبي بها لإحداث تبدلات في هيئة المستقبل، وفتح قنوات أيونية أو إغلاقها، الشكل (24).

ويعرف عن النواقل التي ترتبط مباشرة بالقنوات الأيونية فعلها المباشر، وإحداثها تبدلاً سريعاً في كمون غشاء العنصر بعد المشبكي يدوم لفترة وجيزة.

ونذكر من النواقل المعروفة بتأثيرها المباشر الأستيل كولين، والغلوتامات، والغابا، والغلايسين، وتمتلك القنوات الأيونية عادة أكثر من موقع ارتباط واحد للنواقل العصبية، وفي هذه الحالة يحتاج فتح القناة أو إغلاقها لربط أكثر من جزيئة من الناقل العصبي.



الشكل (24): التأثير المباشر للناقل العصبي في القناة المبوبة كيميائياً.

- **التأثير غير المباشر للناقل العصبي في القنوات الأيونية**

يؤدي ارتباط المرسال الأول (الناقل العصبي) بالمستقبل **الغشائي** إلى **تنشيط بروتين G**؛ إذ يكون البروتين G في حالة الراحة مرتبطاً مع الغوانزين ثنائي فوسفات **GDP**.

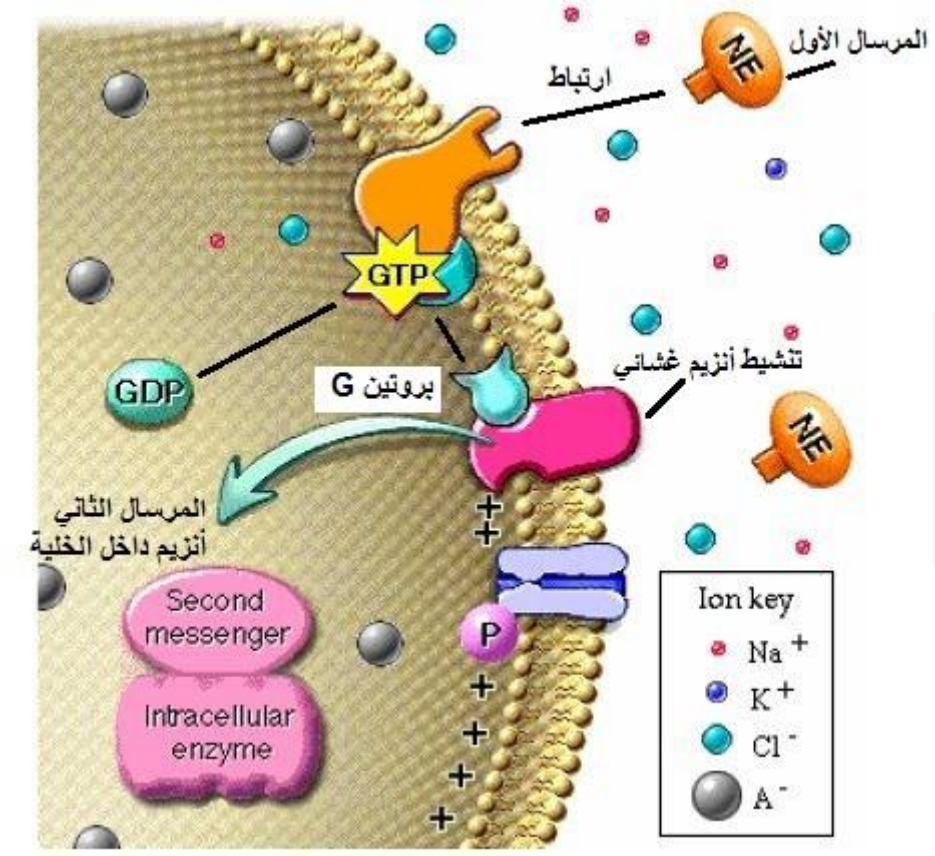
يتخلى البروتين G عن الغوانزين ثنائي فوسفات، ويستبدل به مركب الغوانزين ثلاثي فوسفات GTP.

يتحرك أحد نواتج تفكك البروتين G ويقوم بدوره بتنشيط أنزيم غشائي يتوسط إنتاج مرسال ثاني.

يعمل المرسال الثاني المتشكل داخل الخلية على تفعيل أنزيم حامل يفسفر قناة البوتاسيوم مؤدياً لإغلاقها، وبالتالي توقف حركة البوتاسيوم إلى خارج غشاء، مما سيزيد من الشحنة السالبة خارج الغشاء، وبالتالي توليد كمون العمل، الشكل (25).

يمكن للنواقل العصبية ذات التأثير غير المباشر أن تكون استثاريّة أو تثبيطية حيث:

1. تعمل مجموعة من النواقل العصبية كالأستيل كولين، والغلوتامات، والغابا والسيروتونين، بشكل مباشر أو غير مباشر، وفقاً لنمط المستقبل الذي يربطها.
2. تعمل مجموعة من النواقل العصبية الأخرى كالنورإبنفيرين والإبنفيرين (النورأدرينالين والأدرينالين) والدوبامين والنواقل العصبية الببتيدية حصراً بآلية غير مباشرة.

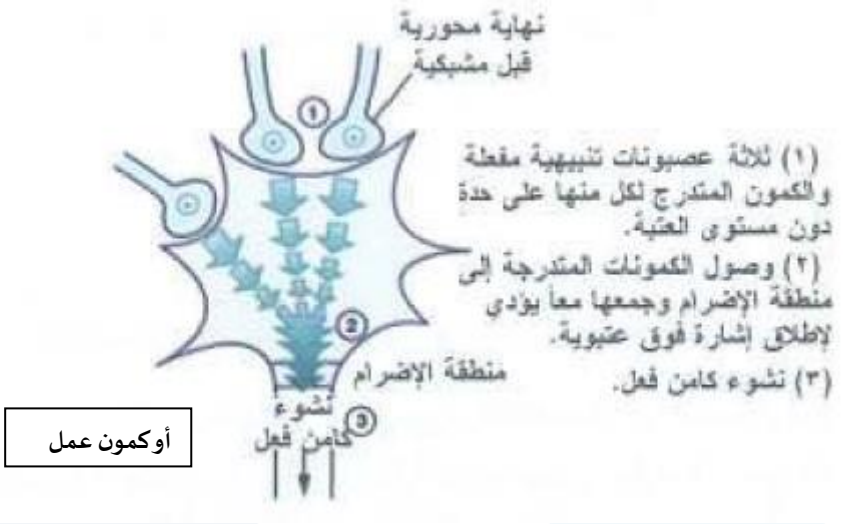


الشكل (25): التأثير غير المباشر للناقل العصبي (النورأدرينالين) على قناة البوتاسيوم.

خواص الكمونات المشبكية

1. **صغر** الكمونات المشبكية بالمقارنة مع كمون العمل (فعل أو الجهد).
2. **تغير مطالات الكمونات المشبكية**؛ حيث يكون مطال الكمون المشبكي متغيراً، ويتعلق بعدد الحويصلات المشبكية المحررة للناقل العصبي، وترتبط أعداد الحويصلات المحررة للناقل بكمية الكالسيوم التي تدخل إلى الزر الانتهائي.
3. **تلاشي** الكمونات المشبكية.
4. **جمع الكمونات بعد المشبكية التنبيهية**؛ إذ يؤدي إضرام (إنتاج) كمون عمل واحد في العصبون قبل المشبكي لنشوء كمون بعد مشبكي تنبيهي واحد في الغشاء بعد المشبكي، ويكون الكمون بعد المشبكي الناتج صغيراً جداً، ولا يكفي لنزع استقطاب العصبون لمستوى العتبة الحدية، إلا أن العصبون يستطيع ضم أو إضافة الكمونات بعد المشبكية التنبيهية المتتالية معاً لإحداث نزع استقطاب أكبر، ويعد ذلك نموذجاً للجمع الزماني Temporal Summation للكمونات المشبكية، وهو يحدث عند إضرام عدد من كمونات العمل في العنصر قبل المشبكي تصل إلى النهاية المحورية للعصبون في أزمنة متتالية. ومن جهة أخرى، يمكن جمع الكمونات بعد المشبكية المتشكلة في المشابك المختلفة للعصبون، ويعد ذلك مثالاً للجمع المكاني

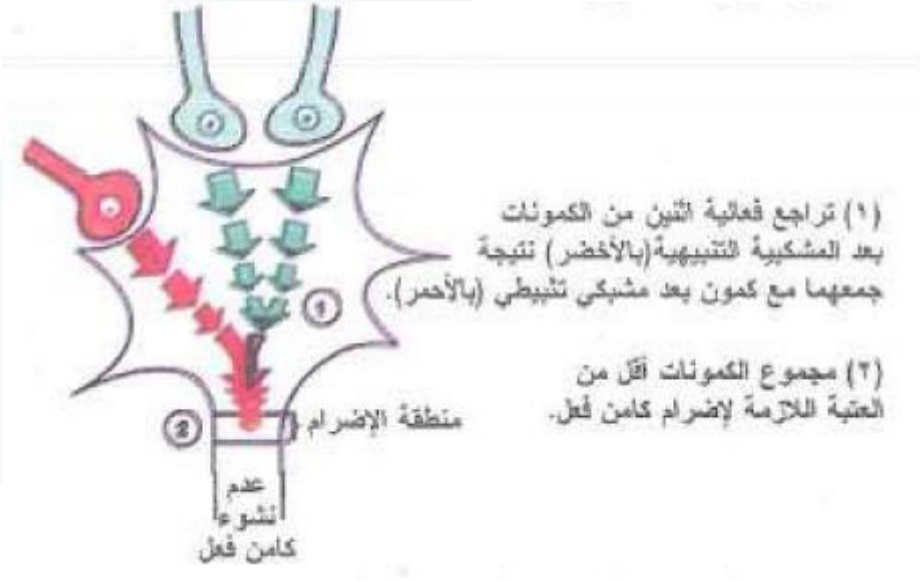
أو الحيّزي Spatial Summation للكمونات المشبكية، هذا ويتطلب نزع استقطاب العصبون حتى مستوى العتبة بضعة كمونات تنبيهية بعد مشبكية، الشكل (26).



الشكل (26): الجمع المكاني للكمونات بعد المشبكية التنبيهية.

5. **جمع الكمونات بعد المشبكية التثبيطية**؛ إذ يتم الأمر على نحو مشابه للحالة السابقة، حيث يؤدي الأثر الإجمالي للفعالية التثبيطية إلى المحافظة على كمون الغشاء دون مستوى العتبة، وبالتالي يمنع الخلية بعد المشبكية من توليد كمون عمل.

6. **جمع الكمونات بعد المشبكية التثبيطية والتنبيهية معاً**؛ إذ يؤدي ذلك إلى تخفيف آثار الفعالية التنبيهية، وقد يمنع ذلك الخلية بعد المشبكية من إضرام أو توليد كمون عمل الشكل (27).



الشكل (27): الجمع (التراكمي) المكاني للكمونات بعد المشبكية التنبيهية والتثبيطية.

خصائص المشابك الكيميائية

1. تنسيق وتنظيم فعالية العصبونات.
2. الإبطاء أو التأخير المشبكي أو الإعاقة المشبكية.
3. التعب المشبكي.
4. القطبية أو النقل باتجاه واحد.
5. يعمل عمل آلة محولة للطاقة.
6. التسهيل المشبكي.
7. التسهيل التكززي البعدي.

- تحويل الطاقة يتم من خلال تحويل الطاقة الكهربائية إلى كيميائية في الخلية قبل المشبك، والعكس في الخلية بعد المشبك.
- عند التنبيه المتكرر يطلق العصبون في البداية سيالات متكررة بسرعة، ولكن بعد ذلك يصبح العدد أقل وهذا ما يسمى بالتعب المشبكي، أي يحدث بعد فرط الاستثارة.
- يمكن للكمون بعد المشبكي التنبيهي ألا يرتفع إلى مستوى عتبة التنبيه (أي انتاج كمون عمل)، ولكن هذا الأمر يجعل كمون الغشاء أقرب إلى هذه العتبة، مما يمكن إشارة أخرى ضعيفة في حال حدوثها من إطلاق كمون العمل، وهذا ما يسمى بالتسهيل المشبكي.
- يؤدي التنبيه المتكرر إلى حدوث التعب المشبكي لبعض الوقت، ليعقب ذلك فترة من قابلية التنبيه المرتفعة في العصبون بعد المشبكي، ويمكن لهذه الفترة أن تدوم لثواني قليلة أو لعدة ساعات، وهذا ما يسمى بالتسهيل التكززي البعدي، ويعتقد أنه نتيجة تراكم أيونات الكالسيوم في الأزرار الانتهائية (قبل المشبك)، ويعد هذا التسهيل أحد الآليات العصبية المعنية بالذاكرة قصيرة الأمد.

العوامل المؤثرة على المشابك الكيميائية

1. تغيرات درجة الحموضة الـ pH.
2. المنبهات كالكافئين (في القهوة) والتيوفيلين (في الشاي).
3. المخدرات.
4. بعض أنواع الأدوية.
5. نقص الأكسجين.

- إذا انخفضت درجة الحموضة فان الشخص يدخل في حالة سبات، أما إذا ارتفعت فإن الشخص يصاب بنوبات صرع واختلاجات.
- يؤدي نقص الأوكسجين إلى انعدام الاستثارية (فقدان الوعي).
- بعض الأدوية الخاصة بالعضلات الملساء والجهاز العصبي تؤثر على المشابك.
- المنبهات تزيد من استثارية العصبونات بخفض عتبة التنبيه.
- المخدرات تنقص من استثارية العصبونات برفع عتبة التنبيه.

انتهت المحاضرة ... بالتوفيق للجميع