

النقل العصبي

مقاربة شخصية لآلية النقل العصبي عبر الألياف العصبية

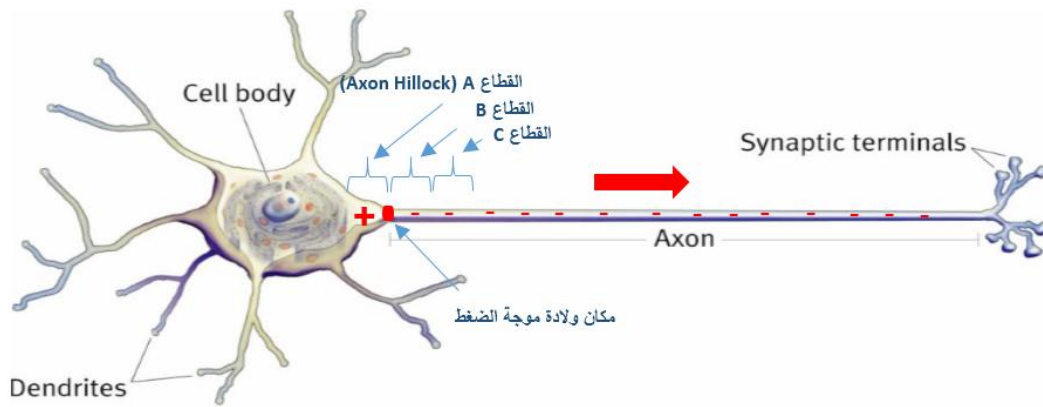
The Neural Conduction in Neural Fiber

"Personal View vs. International View"

النقل العصبي الـ Neural Conduction العابر لمكونات العصبون من جهة، والعابر لسطوح المشافهة أو ما يسمى بالمشابك العصبية الـ Neural Synapses من جهة ثانية، عملية دقيقة معقدة استغرقت عبر الزمن العقل والخيال معاً. جادت علينا العبقريات بالكثير من الفرضيات لم يتحمل معظمها وطأة النقد العلمي والتجريبي. أما الثابت منها والذي يلقي في زمننا قبولاً علمياً وعالمياً فما زال بنظري يفتقد إلى الكفاءة في سرعة التوصيل، كما المرونة في التنفيذ، عدا عن كونه فاقداً للسلاسة المفترضة في عملية خلقٍ بديع كهذا.

سأبدأ مقالتي بتشريح نظرية النقل العصبي عبر المحور العصبي للعصبون مما اعتاد باحثو زماننا ترويجاً. بعدها، أعلن فرضية النقل العصبي خاصتي متمنياً أن يتمدد صدر القارئ قبل خيالهم لقبول الجديد المحدث.

تتأثر العصبونات الـ Neurons وتتبادل باستمرار الرسائل فيما بينها. تتلقى العصبون الـ Neuron الوارد من الرسائل إما مباشرةً بجسمها الـ Soma، أو باستطالاتها القصيرة الـ Dendrites، ونادراً بمحورها العصبي الـ Axon. بالمقابل، تُصدر العصبون رسائلها العصبية إلى وجهتها الهدف عبر محورها العصبي. ينتهي المحور العصبي في مشابك عصبية يختلف موقعها باختلاف الهدف. الهدف قد يكون عصبوناتٍ أخرى، وقد يكون كينوناتٍ أخرى مما يزخر به الجسم البشري. المسافة بين موقع القرار، أي جسم العصبون، والعضو الهدف Effector Organ طويلة نسبياً قد تصل إلى متر تقريباً وقد تتعداه في أحيانٍ كثيرة. تعبر الرسالة العصبية المحور العصبي بسرعة كبيرة لتصل غايتها؛ انظر الشكل (1).



الشكل (1)

النقل في الألياف العصبية

The Neural Conduction

يتألف العصبون الـ Neuron من جسم الخلية الـ Cell Body (Soma) ومن عددٍ من الاستطالات القصيرة الـ Dendrites، ومن محورٍ طويلٍ وحيدٍ على الأغلب الـ Axon. لزم من طويل، اعتبرت منطقة التزخير الـ Axon Hillock مكان ولادة موجة النقل العصبي. بينما تقول الدراسات الحديثة بولادة موجة النقل العصبي في مكانٍ أبعد من ذلك بقليل، عند الحدود الفاصلة ما بين منطقة التزخير الـ Axon Hillock (القطاع A) وبداية المحور العصبي (القطاع B). شخصياً أعتقد الأمر ذاته، مع التأكيد على جوهرية الخلاف بين فرضيتي وتلك السائدة حالياً كما سأشرح لاحقاً.

النقل العصبي في الألياف العصبية "الفرضية الحالية"

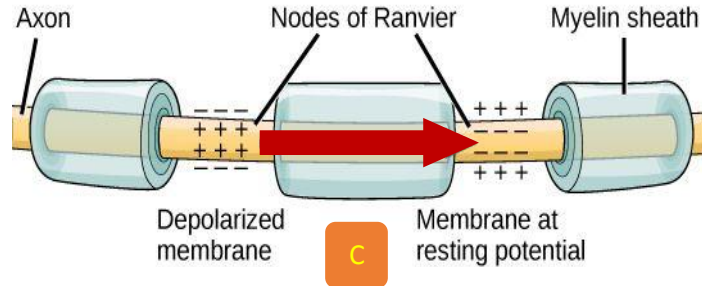
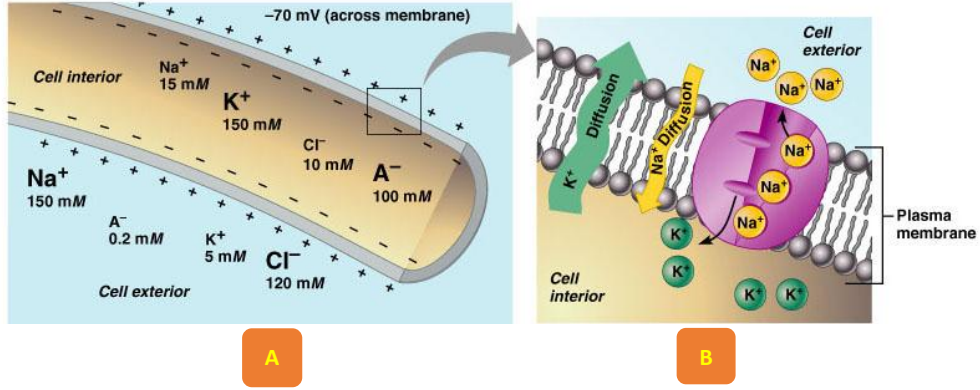
Neural conduction "International View"

يخضع عمل العصبون إلى قانون الكلّ أو اللّا شيء All-or-None law. فقد يحدث أن تجتمع في جسم العصبون محفزات القرار. وبلغ التحفيز عتبة الأمر الـ Threshold. تتبّع منطقة التنفيذ الـ Trigger Zone، وهي عند بداية المحور العصبي عند نقطة اتصاله مع منطقة الترخير الـ Axon Hillock، الأمر على شكل شحنة كهربائية موجبة محددة القيمة *انظر الشكل (1)*. وفي منطقة الترخير، تعمل الطاقة الوافدة على تفعيل بوابات جدارية خاصة نوعية لشاردة الصوديوم الـ Voltage gated Na^+ channels. تسمح البوابات هذه بتدفق شاردة الصوديوم الموجبة إلى داخل المحور العصبي ممّا يعني مزيداً من الإيجابية داخله، وهذا ما يُعرف اصطلاحاً بزوال القطبية الـ Depolarization.

يحدث ذلك خلافاً في الشحنة الكهربائية بين داخل المحور العصبي وخارجه لصالح الداخل، وهذا ما نسميه بكمون العمل الـ Action Potential. تبلغ إيجابية الداخل حدّاً أعظماً تتفعل معه بوابات جدارية أخرى نوعية لشاردة البوتاسيوم الموجبة الـ Voltage gated K^+ channels. تترد هذه البوابات البوتاسيوم خارج المحور العصبي ممّا يعني خفضاً في إيجابية الداخل، أي اصطلاحاً عودة القطبية الـ Repolarization. عمليّة إعادة القطبية تعود بشحنة الداخل خاصة المحور العصبي إلى قيمته الأساس السالبة، أي ما يُعرف اصطلاحاً بكمون الراحة الـ Resting Potential.

عملياً، مرحلة عابرة من فرط الاستقطاب الـ Hyperpolarization تسبق كمون الراحة نرجعها إلى التدفق الزائد لشاردة البوتاسيوم K^+ نحو خارج المحور العصبي. بعدها، سريعاً ما يعود التوازن إلى كمون الراحة بقيمته الأساس. تجتاح عمليّة إزالة الاستقطاب ومن ثمّ عودته خطياً جدار المحور العصبي نقطة بنقطة، من المركز باتجاه المحيط حتى تبلغ مُنتهاها في المشبك العصبي.

بكلمات أخرى، انقلاب فرق الكمون نحو الإيجابية، أي إزالة الاستقطاب، على جانبي الغشاء، بين داخل المحور العصبي وخارجه، وانطلاق هذه العمليّة بصورة خطية من قطعة جدارية (كالقطاع B مثلاً) إلى أخرى مجاورة لها مباشرة وأبعد منها بالنسبة للمركز (أي القطاع C)، يُشكّل الأساس لتيّار النقل العصبي العابر لجدار المحور العصبي؛ *انظر الشكل (2)*.



الشكل (2)

النقل العصبي في المحور العصبي "النظرية الحالية"

Neural Conduction in Axon "International View"

حركة الشوارد الموجبة الـ Na^+ والـ K^+ بين الداخل والخارج هي الأساس في عمليّة النقل عبر المحور العصبي.

أثناء الراحة يسيطر كمون الراحة بقيمته السالبة بين جنبات جدار المحور العصبي؛ *الشكل (A)*.

عند بدء التفعيل، وبلوغ عتبة الأمر الـ Threshold، تتدفق شاردة Na^+ إلى الداخل لتعلن انقلاب الشحنة وبناء كمون العمل في هذا القطاع

من المحور العصبي (القطاع A). في الجوار المباشر للسابق (أي في القطاع B) تكون الشحنة موجبة كافية لتفعيل بوابات أفنية شاردة الصوديوم. ممّا يعني تدفقاً إضافياً لشاردة الصوديوم Na^+ إلى الداخل الخلوي، وتالياً بناءً كمون عمل جديد.

وهكذا دواليك، وتبغذية ذاتية ينتقل كمون العمل باتجاه الهدف خطياً على طول المحور العصبي؛ **الشكل (C)**.

العودة إلى نقطة البدء، أي إلى كمون الراحة، واستعادة المحور العصبي القدرة على عملية نقل جديدة، مرهوتان بكفاءة مضخات الصوديوم والبوتاسيوم الـ Na^+/K^+ Pump. هي مضخات جدارية مستهلكة للطاقة من وحدات الـ ATP. تعمل الواحدة منها على طرح ثلاث شارادات من الصوديوم وإدخال اثنتين من البوتاسيوم. والثمن جزئية واحدة من الـ ATP؛ **الشكل (B)**.

من المناسب هنا الإشارة إلى عملية الهروب المستمر لشارد Na^+ والـ K^+ عبر جدار المحور العصبي. اختلاف تركيز الشوارد بين جنبات الجدار هي المبرر لعملية التسريب هذه. شاردة الصوديوم هي شاردة خارج خلوية أساساً، بينما شاردة البوتاسيوم تتجمع بتركيز عالية داخلها؛ **الشكل (A)**. مضخات الصوديوم والبوتاسيوم كقيلة بإعادة التوازن والمحافظة على كمون الراحة.

المفهوم الشخصي الحديث لآلية النقل في الليف العصبي

The Neural Conduction in Neural Fiber

"Innovated Conception"

أولاً، شخصياً أرى النقل العصبي الـ Neural Conduction في الليف العصبي الـ Neural Fiber موجة ضغطية Pressure Wave تسري ضمن اللمعة في المركز تحديداً. بينما أراه في المشابك العصبية فعلاً كهربائياً محضاً.

ثانياً، في الليف العصبي، يُختصر دور التيار الكهربائي في رفع كفاءة وسط انتشار موجة الضغط العاملة زيادة في سرعة انتشار هذه الأخيرة من جهة، وتقليلاً من ضياعات طاقتها من جهة أخرى؛ **انظر الشكل (1)**. بينما في المشبك العصبي الـ Neural Synapse، تكفي موجة الضغط العاملة ببناء القطب الموجب الـ Cathode لتيار النقل الكهربائي. على أن يمتلك هذا الأخير حصرية نقل الإشارة العصبية إلى العضو الهدف بعد المشبك الـ Postsynaptic Effector Organ؛ **انظر الشكل (2-B)**.

ثالثاً، أرى وجود نوعين من التيارات الكهربائية الوظيفية خلال عملية النقل العصبي الواحدة في الليف العصبي. فهناك تيار النقل الكهربائي بالخاصة وهو التيار الكهربائي الانتهائي الـ Terminal Electrical Current (TEC)، وهناك التيارات الكهربائية الوسيطة وهي التيارات القطعية الـ Segmental Electrical Currents (SECs). نضيف إلى هذه الأخيرة تيار النقل الكهربائي الأولي الـ Preliminary Electrical Current. هو شبيه بالتيارات القطعية من حيث الوظيفة، لكنه يختلف عنها بالشدة فقط ممّا اقتضى التخصيص الاسمي له.

فأما التيار الكهربائي الانتهائي فوحيد خلال عملية النقل الواحدة. وهو الفاعل أساساً حين النقل عبر المشابك العصبية؛ **انظر الشكل (2-B)**. وأما التيارات القطعية فعديدة بعدد القطع بين عقدتين للمحور العصبي. هي المُسرِّعات لموجة الضغط العاملة حين انتشارها عبر كثير القطع بين العقدتين الـ Internodal Segment من الليف العصبي. كل تيار قطعي يهتّم بشؤون موجة الضغط العاملة في قطعه الخاصة به؛ **انظر الشكل (2-A)**.

ورابعاً، بناءً كمون العمل الـ Action Potential يبدأ بارتفاع مفاجئ في قيمة الضغط الحلوي Hydrostatic Pressure داخل منطقة الترخير الـ Trigger Zone، والتي توافق تشريحياً الـ Axon Hillock. تحتاج نبضة الضغط الـ Pressure Impulse الوليدة المحور العصبي وتكون تحت مسمى موجة الضغط العاملة الـ Action Pressure Wave (APW). يتأسس كمون العمل، الأساس لولادة التيارات الكهربائية العاملة من تيارات قطعية (SECs) ومن تيار انتهائي (TEC)، بين ضفتي موجة الضغط العاملة داخل المحور العصبي، لا بين داخل وخارج الجدار؛ **انظر الشكل (3)**.

هي الفروق الجوهرية بين فرضيتي في النقل العصبي وتلك الرائجة عالمياً. هي العناوين العريضة لما ذهب إليه من جديد مُحدث في آلية النقل العصبي. وفيما يلي سيكون تشريح كل مرحلة منها موضعاً مبررات الحدوث وعناصر قوتها التفضيلية على النظرية السائدة حالياً.

1 - موجة الضغط العاملة الـ Action Pressure Wave

1-1 ضغط الراحة الـ Resting Pressure

تُشكل العصبون الـ Neuron باستطالاتها القصيرة ومحورها العصبي نظاماً أنوبيئياً مُحكَم الإغلاق. يمثل هذا النظام المغلق بالبلازما الـ Cytoplasm ذات الطبيعة السائلة والعناصر المتنوعة؛ **انظر الشكل (1)**. في حالة الراحة، يبني العصبون داخله ضغطاً مرتفعاً نسبياً نُسَمِيه اصطلاحاً ضغط الراحة الـ Resting Pressure. تتحدّد قيمة ضغط الراحة بكتلة المادة في

وحدة الحجم من البلاسما. بذلك، يسهل علينا كشف العلاقة الطردنية بين ضغط الرّاحة وكثافة البلاسما الخلويّة الـ Cytoplasmic Density.

لضغط الرّاحة هذا أهميّة قصوى. فهو يُحافظ على لمعة الـ Lumen البنى التّشريحيّة النّاقلة للأمر العصبيّ. ويضمن حرّيّة الملاحة والنّقل داخلها. أكثر من ذلك، تُحدّد قيمته سرعة موجة ضغط العمل العابرة لها، وتالياً سرعة النّقل العصبيّ فيها.

فصل الكلام، لا بدّ من قاعدة صليبة لإطلاق عمليّة النّقل العصبيّ عبر الألياف العصبيّة. والقاعدة الصّليبة هنا هي ضغط الرّاحة. إذ لا يمكن للمحور العصبيّ ابتداءً ضغط عمل كبير، وتالياً سرعات نقل كبيرة، دون قيم عالية نسبيّاً من ضغط الرّاحة. المعادلة بسيطة، ضغط راحة مرتفع نسبياً يعني حساسيّة أكبر لرصد تذبذبات قيم الضّغط المركزيّة، في منطقة التّحفيز الـ Axon Hillock، وتالياً على نقلها سريعاً إلى العضو الهدف للعمل دونما إبطاء تحقّقاً لمكسب أو إنقاذاً لوجود.

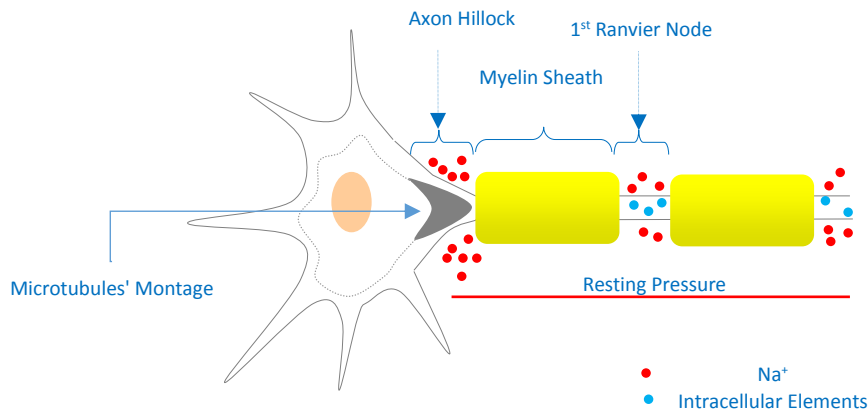
قراءة التّطبيقات العمليّة لأهميّة ضغط الرّاحة المرتفع داخل البنى العصبيّة، ولأثره العظيم على استمرار النّوع الحيوانيّ إجمالاً، هي أكثر من أن تُحصى. عند الحبار الـ Squid مثلاً، حيث الخطر داهم أبدأ يهدّد بقاء النّوع، نجد قيمة أكبر لضغوط الرّاحة كما قيمة أكبر لقطر المحاور العصبيّة مقارنةً بقيمتها عند الإنسان.

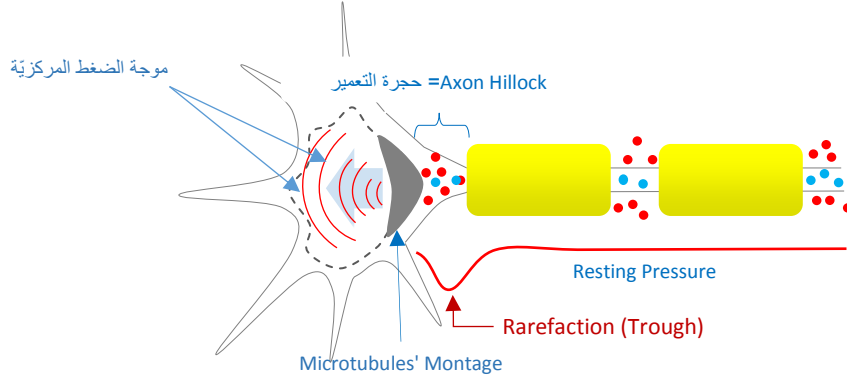
٢-١ موجة الضّغط المركزيّة "الجسميّة" الـ Central (Somatic) Pressure Wave وولادة موجة ضّغط العمل الـ Action Pressure Wave (APW)

متى بلغ التّنبية عتبة الفعل، أحدثت تقلّصاً مفاجئاً في التّشكيل الأنبوبيّ الـ Microtubules' Montage الشّاعل لمنطقة الـ Axon Hillock؛ انظر الشّكل (٣- A). تقلّص الأنابيب المجهرية، وانسحاب كتلتها العنيف داخل جسم العصبون الـ Soma، يولّد موجة الضّغط المركزيّة الـ Central Pressure Wave أو الجسميّة الـ Somatic Pressure Wave نسبةً إلى جسم العصبون الـ Soma.

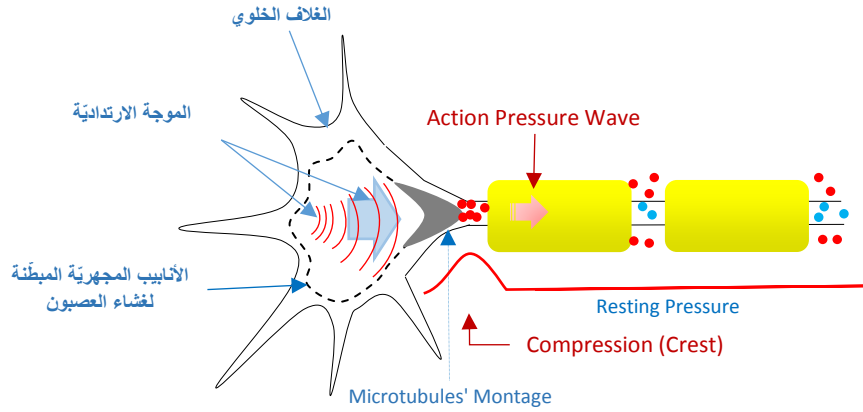
تحتاج موجة الضّغط المركزيّة هذه جسم الخليّة العصبيّة وصولاً إلى الجدار الخلويّ؛ انظر الشّكل (٣- B). الجدار الخلويّ لجسم العصبون مرّن مقاوم لتبدّلات الضّغط الداخليّة بفضل أقواسه المفتوحة على الخارج الخلويّ وبفضل شبكة الألياف المجهرية المستبينة له كذلك. فمتى وصلت إليه موجة الضّغط المركزيّة ردها على أعقابها، فتعود من حيث انطلقت أساساً إلى منطقة التّحفيز الـ Axon Hillock؛ انظر الشّكل (٣- C).

بدورها، وعند وصولها إلى منطقة التّحفيز الـ Axon Hillock، تصطدم الموجة الارتدادية بكتلة الأنابيب المجهرية المنسحبة خارج منطقتها. هو اصطدام عنيف سيعيد التّشكيل الأنبوبيّ بقوّة إلى مكانه الأصليّ عند بداية المحور العصبيّ. تقلّص وانسحاب كتلة الأنابيب المجهرية، ومن ثمّ تمدّدها وعودتها القويّة إلى حالتها الأولى، سيطلق موجة ضّغط العمل الـ Action Pressure Wave. تنتقل موجة الضّغط بعيداً Distally، داخل المحور العصبيّ، من قطاع إلى آخر حتى تصل غايتها في المشبك العصبيّ؛ انظر الشّكل (٣).





B



C

الشكل (3)

موجة الضَّغَطِ المركزيَّةُ مقدَّمة لإطلاق موجة ضغَطِ العمل

يشكّل الغشاءُ الخلويّ لجسم العصبون الحركيّ الـ Motor Neuron جداراً مقاوماً لتبدلات قيم الضَّغَطِ داخله. شكّل الغلاف الخلويّ، نجمي الشكل مع أضلاعه المفتوحة نحو الخارج الخلويّ، ترفع من كفاءته حيال تذبذبات قيم الضَّغَطِ الداخليَّة. إضافةً لذلك، تعمل الأنايبب المجهريَّة الـ Microtubules، في قسمها المبطن للغلاف، كمصدّ أوليٍّ لموجات الضَّغَطِ المركزيَّة.

الشكل (B) مرحلة التَّزخير وإطلاق موجة الضَّغَطِ المركزيَّة: بعد وصول التَّنبيه إليها، تتقلَّص كتلة الأنايبب المجهريَّة في منطقة الـ Axon Hillock، وتتسحب باتجاه الداخل نسبة إلى جسم العصبون (السَّهم الأزرق). تنشأ بذلك موجة ضغَطِ مركزيَّة تنتشر باتجاه الغلاف الخلويّ لجسم العصبون. يعمل الغلاف الخلويّ والأنايبب المجهريَّة المستتبنة له على ردّ موجة الضَّغَطِ. الموجة الارتدادية هذه هي الأساس في إطلاق موجة ضغَطِ العمل داخل المحور العصبيّ.

الشكل (C) مرحلة الإطلاق وولادة موجة ضغَطِ العمل: تتلقَّى كتلة الأنايبب المجهريَّة الـ Microtubules' Montage في منطقة الـ Axon Hillock الموجة الارتدادية (السَّهم الأزرق) فتندفع محيطياً مطلقاً بذلك موجة ضغَطِ العمل (السَّهم الأحمر).

3-1 موجة ضغَطِ العمل الأولى Preliminary Action Pressure Wave وموجات ضغَطِ العمل القياسية Standard Action Pressure Waves

تبدأ موجة ضغَطِ العمل بمناسبة مبالغ فيها لا تتوافق وحاجة النُّقل العصبيّ من جهة، ولا تتسجم وشروط السَّلامة للبنى التَّشريحيَّة من جهة أخرى. كما وقد تأخذ الموجة بدايةً مساراً عشوائياً واسعاً نسبياً. يمكن له أن يحتلَّ كاملَ الحيز داخل الخلويّ للقطعة بين عقدتين الأولى. موجة ضغَطِ العمل غير المنضبطة هذه أسمينها موجة ضغَطِ العمل الأولى الـ Preliminary Action Pressure Wave.

إذاً هي فوضَّة في المناسيب والمسار. لكن لهذه الفوضى مُبرراتها. فالموجة المعنوية هي نتاج اصطدام انفجاريّ في منطقة التَّزخير الـ Axon Hillock بين الموجة الارتدادية وكتلة الأنايبب المجهريَّة. وكان بالقطعة بين عقدتين الأولى، بهذا المجاز التقنيّ، تستحيل حجرة احتراق لإطلاق موجة الضَّغَطِ العاملة. لذلك، تعمُّ الفوضى في البداية حيث يُستباح كلُّ شيء.

هي عقدة رانفيه الأولى الـ 1st Node of Ranvier، من يتكفل بتصحيح المسارات وإعادة الأمور إلى نصابها الصحيح. تعمل عقدة رانفيه الأولى على ضبط مناسيب الموجة الأوليّة ومسارها أيضاً. هي المرشحة والمصفاة لكل شاذ نافر فيها. بعدها، تصبح مناسيب الموجة العاملة أصغر وأكثر ملاءمة لحاجات النقل العصبي ولشروط السلامة العضوية. كما يصبح مسارها منتظماً شاعلاً لقطاع أنوبي مركزي من البلاسما العصبية يمتد بين عقدتي متالتين من عقد رانفيه. عندها، يصح لنا أن نتكلم عن موجة ضغط العمل القياسية الـ Standard Action Pressure Wave.

حفظ المسار الجديد لموجة ضغط العمل، كما حفظ مناسيب الموجة القياسية، ستكون الشغل الشاغل لعقد رانفيه التالية. فالرحلة طويلة بين المنبت والمنتهى، قد تبلغ المتر أو أكثر من ذلك في بعض الأحيان. واحتمالات الجنوح وانحراف المناسيب تبقى قائمة ما لم تصل الموجة إلى غايتها في المشبك العصبي الانتهازي. لكن لا خوف. فالعضوية الحية تمرست النقل، واعادت ترميم الضياعات وتصحيح الإعوجاجات. الأمانة مصونة، والشاهد بقاء النوع رغم الأحوال المحدقة أبداً.

أخيراً أقول، موجة ضغط العمل الـ Action Pressure Wave واحدة خلال عملية النقل العصبية الواحدة، وإن بدت خلاف ذلك. هي تبدأ بفوضى في المسار، وغلو في المناسيب، محكومة بنشأتها الصاخبة والعنيفة. لكنها سريعاً ما تنسخ عنها طابعها الخشن، وتلبس لبوساً قياسياً مناسباً لعملية النقل ولسلامة البنية التشريحية العصبية كذلك. هو المرور الأول لها عبر عقدة رانفيه من يعيد لها التوازن مساراً ومناسيباً.

مشاهدة فيديو قصير يشرح تفصيلاً موجات الضغط العاملة حين النقل العصبي، انقر على هذا الرابط

ملاحظة: الدراسة التفصيلية لآلية عمل عقد رانفيه الـ Nodes of Ranvier هي موضوع مقال منفصل، عنوانه "عقدة رانفيه، ضابطة الإيقاع"

1- خصائص موجة ضغط العمل ومناسيبها

الـ Parameters of Action Pressure Wave

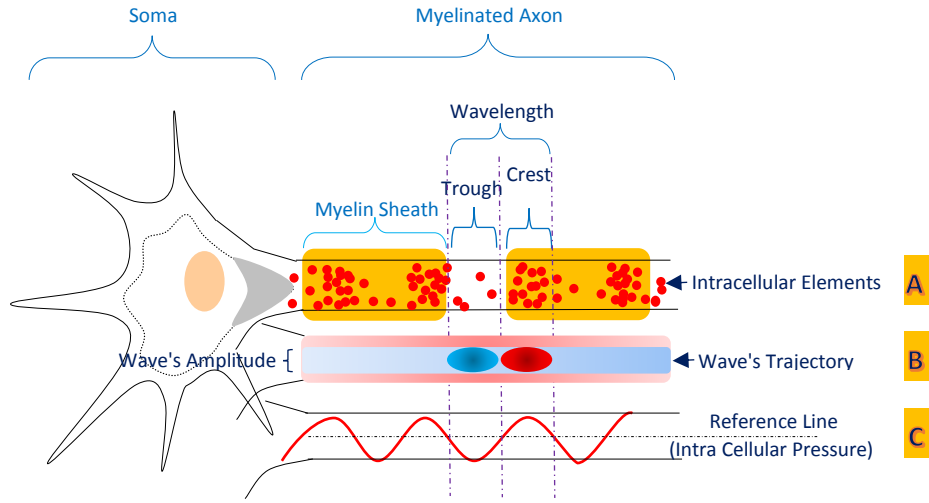
موجة ضغط العمل هي موجة طولانية الـ Longitudinal Wave، يتطابق فيها محور حركة عناصر المادة مع محور انتشار الموجة. نميز في الموجة منطقتين متباينتين في الوصف كما في الوظيفة. فأمّا الأولى فهضبة الـ Compression (Crest) تنصدر الموجة وتكون قيم الضغط فيها موجبة على الدوام. وأمّا الثانية فواد الـ Rarefaction (Trough) يتدلى الأولى ويلتزم قيم الضغط السالبة دوماً. كما نميز في الأولى قيمة من الضغط الموجب أعظمية، وفي الثانية قيمة من الضغط السالب أعظمية هي الأخرى. تتطابق القيمتان عددياً، وتتعاكسان إشارة فقط؛ انظر الشكل (C-4).

الطاقة الحركية لموجة ضغط العمل تُحتزن في جبهة الموجة الـ Wave's Front، أي في الهضبة الـ Crest. بينما يلعب الضغط السالب لذييل موجة الضغط الـ Trough دوراً أساسياً في خلق كمون العمل ومن ثم تيارات النقل الكهربائيّة على أنواعها، كما سنرى لاحقاً.

وفي المناسيب الـ Wave's Parameters، أبدأ بطول الموجة لأنه الأسهل تحديداً وفهماً من جهة، وهو الأساس لتحديد بقية المناسيب من جهة أخرى. فجميع المناسيب مترابط متلاحم، يوثق بعضه بعضاً في لحمه لا تنفصم عراها. طول الموجة الـ Wavelength (L) هو المسافة بين قمتين موجبتين متالتين مباشرة، أو بين قمتين سالبتين متالتين مباشرة أيضاً لا فرق. وهو بكلمات أخرى مجموع طولي الهضبة الـ Crest والوادي الـ Trough معاً. بناءً على طول الموجة، يتحدد ارتفاعها الـ Amplitude (A)، طاقتها الحركية والكامنة، كما سرعتها. فجميعها ينتظم بعلاقات خطية مع طول الموجة. ارتفع هذا الأخير ارتفعت معه جميع المناسيب الأخرى.

خلافاً للموجات العرضية الـ Transversal Waves، ارتفاع موجة الضغط الطولية عسير على القياس كما الفهم. لكن للتبسيط، تخيل معي مسار موجة الضغط الـ Wave's Trajectory أنوباً اسطوانياً ثلاثي الأبعاد معلقاً داخل وسط الانتشار (بلاسما الليف العصبي هنا). هو تصور يطابق الواقع تماماً، فذلك هو شكل مسارات جميع الموجات الطولية؛ انظر الشكل (B-4). خلال وحدة الزمن، يصبح مسار الموجة دائرة؛ قطرُها هو ارتفاع الموجة. العلاقة وثيقة بين طول الموجة وارتفاعها، ولهذا تبعاته الجليئة كما سنرى عند دراسة أثر قطر الليف العصبي على سرعة النقل العصبي.

سرعة موجة ضغط العمل الـ Wave's Velocity (V) هي الأخرى ملتنصفة بطول موجتها (L)، وتالياً بارتفاع الموجة الـ Amplitude (A). لعلك الآن استشرفت أثر قطر الليف العصبي على سرعة النقل العصبي فيه. إن لم تفعل فلا تطلق فشرحه باناً قريباً؛ انظر الشكل (4).



الشكل (٤)
مناسيب موجة الضغط العاملة
Parameters of Action Pressure Wave



كما في جميع الموجات الطولية، توجد علاقة تناسب طردي بين طول الموجة الـ (L) Wavelength ومحمولها من الطاقة الـ (E) Energy. كلما ارتفعت قيمة هذه الأخيرة ازدادت معه طول الموجة الناشئة عنها والناقلة لها في الوقت نفسه. معلوم كذلك أن سرعة الموجة الـ (V) تتناسب طردياً مع طولها؛ حيث السرعة $(V=Lf)$ يرمز الحرف (f) إلى تواتر الموجة. بتثبيت وسط الانتشار (بالسما الليف العصبي هنا)، ونوع الموجة (موجة الضغط هنا)، يصبح طول الموجة وارتفاعها الـ (A) Amplitude متلازمين لا يفترقان. فكل طول من أطوال الموجات ارتفاع موائمه له ومصاحب له على الدوام. خلافاً لواقع حال الموجات العرضية الـ Transversal Waves، لا يمكننا في الموجات الطولية الـ Longitudinal Waves، كموجة الضغط الـ Pressure Wave في مثالنا هنا، حساب ارتفاع الموجة بتلك السهولة. مع ذلك وتيسيراً للعرض، يتم غالباً تمثيل الموجة الطولية بمخطط الموجات العرضية جيبي الشكل. القواسم المشتركة بينهما كثيرة وتختلفان بطريقة تحديد ارتفاع الموجة. تنتشر الموجات الطولية على شكل أنبوب في فضاء ثلاثي الأبعاد. يمكن لنا إذاً أن نحدد لهذا المسار طولاً وارتفاعاً. هذا الأخير ما هو إلا ارتفاع الموجة الطولية؛ انظر الشكل (B). تنتشر موجة الضغط ببعديها الطولي والعرضي داخل الليف العصبي، لذلك كان من المحتم تأثرها بقطر هذا الأخير. **اختلف قطر الليف العصبي، اختلف معه نتيجة ارتفاع (عرض) وطول وتالياً سرعة موجة الضغط داخله بذات الاتجاه صعوداً أم هبوطاً.**

الشكل (A) التمثيل الحقيقي لموجة ضغط العمل: تسري موجة ضغط العمل في الليف العصبي باتجاه المشبك العصبي الانتهائي. أثناء مرورها، تتحرك عناصر البلازما الـ Intracellular Elements بجهة انتشار الموجة. تتراص العناصر في جبهة الموجة الـ Crest، وتتباعذ في ذيلها الـ Trough. تختزن جبهة الموجة طاقتها الحركية والكامنة، بينما يعمل ذيل الموجة سالب قيمة الضغط على بناء كمونات العمل.

الشكل (B) تمثيل مجازي لموجة ضغط العمل: غالباً ما أشير إلى القسم موجب القيمة من موجة الضغط الـ Crest باستعمال مصطلح جبهة الموجة الـ Wave's Front (الجسم البيضوي أحمر اللون). جبهة الموجة تعبير دقيق عن واقع الحال، فهو يتقدم ويختزن طاقة الموجة العاملة. بالمقابل، لا أدق من تعبير ذيل الموجة (الجسم البيضوي أزرق اللون) للدلالة على القسم الثاني سالب القيمة من موجة الضغط الـ Trough. جمع طول الجبهة إلى طول الذيل يعطينا طول الموجة الحقيقي.

الشكل (C) تغيرات قيمة الضغط داخل الليف العصبي عند مرور موجة ضغط العمل: بدهي القول بارتفاع قيمة الضغط داخل الليف العصبي عند جبهة الموجة، وتراجعها إلى قيم سالبة عند ذيلها. عند مطابقتها ذلك مع واقع الحال، نجد كثافة المادة في وحدة الحجم عند الجبهة، وتخلخلها وتندرته عند الذيل.

٢- كمون العمل الـ Action Potential

١-٢ كمون الراحة الـ Resting Potential

كمون الراحة هو التعبير اللغوي عن الحالة الكهربائية لحيز تشريحي بعينه وذلك عند الراحة، حين تتعطل كامل الوظيفة المنوطة بهذا المكان ويعود إلى حالته الأساس التي فطر عليها. ففي حالة الراحة، تسيطر على الداخل الخلوي

الـ Intracellular Space قطبيّة كهربائيّة سالبة الـ Negative Polarity، بينما تهيمُن القطبيّة الموجبة الـ Positive Polarity على الخارج الخلويّ الـ Extracellular Space.

تراكمُ الشّوارد الموجبة الـ Positive Ions، لا سيّما شاردة الصّوديوم Na^+ ، في الحيز الخارج خلويّ أعطاه القطبيّة الموجبة. بالمقابل، نجدُ في الحيز داخل الخلويّ جمعاً كبيراً طاعياً من العناصر سالبة القطبيّة، كالبروتينات مثلاً.

٢-٢ كمون العملِ الأوّليّ الـ Preliminary Action Potential

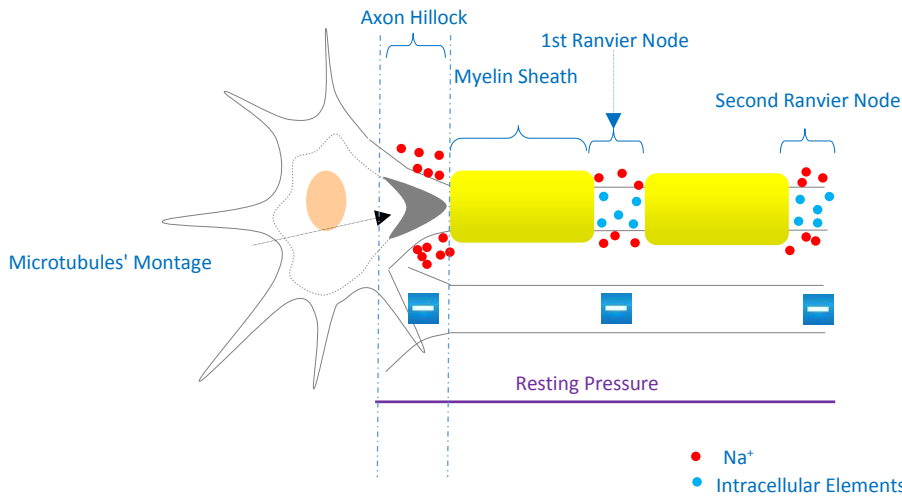
حين يبلغُ التّنبُّه عتبةَ الأمر الـ Threshold، ويصلُ إلى منطقة التّحفيز الـ Axon Hillock، يحدثُ انفراجٌ مفاجئٌ داخلُ هذه المنطقة. فتقلُّصُ كتلة الأنايبب المجهريّة الـ Microtubules' Montage وانسحابها السّريع إلى داخلِ جسم الخلية العصبية، يُحدثُ خلاءً فانقلاباً في قيمة الضّغط فيها. فبعدَ ضغط الرّاحة الـ Resting Pressure الموجب، تحلُّ سلبية في الضّغط تقلبُ الأوضاع وتحرّكُ السّواكن؛ انظر الشّكلين (A-٥) & (B-٥).

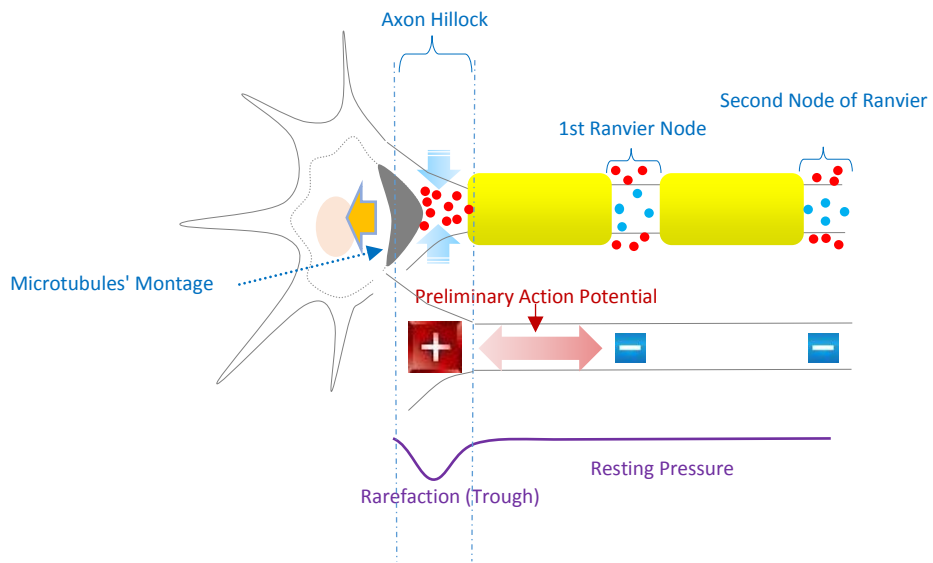
الضّغطُ السّالبُ الوليدُ في منطقة التّحفيز الـ Axon Hillock سيفتحُ بوابات أفنية شاردة الصّوديوم كثيفة التّواجد فيها، هذا من جهة. وسيسحبُ شوارد الصّوديوم إلى الدّاخل الخلويّ إعلاناً بقطبيّة جديدة لهذا الدّاخل، من جهةٍ أخرى. هي قطبيّة موجبة على ما يظهرُ جلياً. قطبيّة موجبة تعاكسُ قطبيّة باقي الدّاخل الخلويّ السّالبة أساساً. ما بين قطبيّة موجبة ناشئة في منطقة التّرخير الـ Axon Hillock، وقطبيّة سالبة مسيطرة أساساً داخل اللّيف العصبيّ، يُخلقُ كمونُ عملٍ أسميته كمونُ العملِ الأوّليّ الـ Preliminary Action Potential؛ انظر الشّكل (C-٥).

هو أوّليّ لأنّه الأصلُ والأساسُ لأوّل شرارة كهربائيّة في عمليّة النّقل العصبيّ، هذا أوّلاً. ولأنّ فعله ينتهي عند أعتاب أوّل عقدة رانفيه الـ 1st Node of Ranvier، هذا ثانياً. ولأنّه يختلفُ بالقيمة عمّا سيأتي بعده من كمونات عملٍ قياسيةّ سنكونُ متطابقه فيما بينها، ثالثاً.

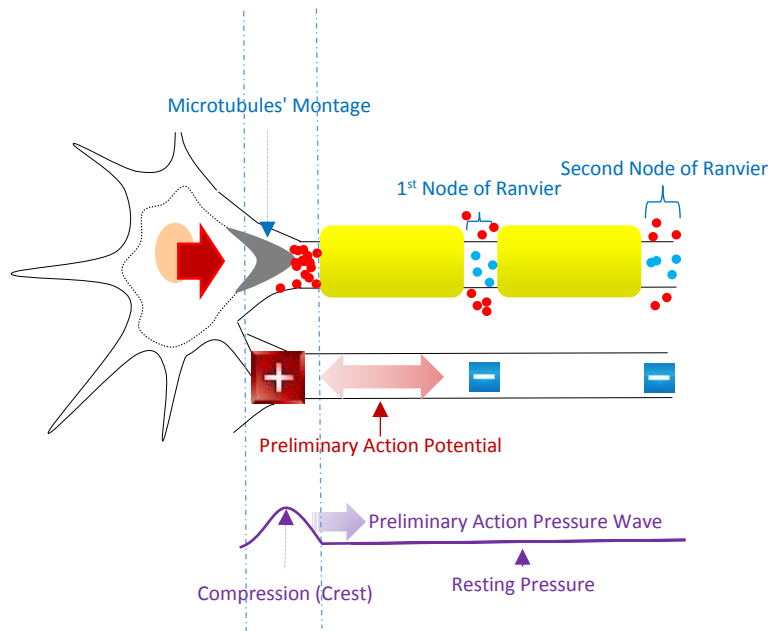
مباشرةً بعد تخلّفه، يحدثُ انفراجٌ كهربائيّ ما بين قطبيّة موجبة طارئة يمثّلها وقطبيّة سالبة مقيمة يمثّلها باقي الدّاخل الخلويّ. في الوقت ذاته، تكون موجة الضّغط الارتداديّة قد صدمت عنيفاً كتلة الأنايبب المجهريّة معلنةً ولادة موجة ضغط العمل.

أخيراً، صحیح القول أنّ كمون العملِ الأوّليّ هو السّابق لجميع كمونات العملِ العاملة في عمليّة النّقل العصبيّ الواحدة، لكنّ تأثيره ينتهي تماماً عند حدود عقدة رانفيه الأولى، دون أن يكون هو سبباً في ولادة كمون العملِ القادم. وبذلك يختلفُ بالجوهريّ عن موجة ضغط العملِ الأوّليّة في أسباب التسمية، فاقتضى التّوضيح.

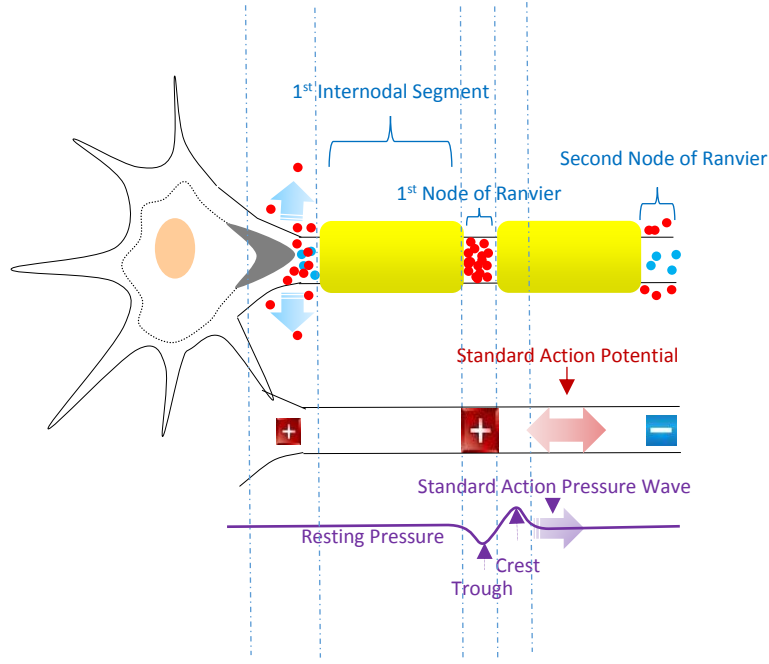




B



C



D

الشكل (٥)

كُمون العمل الأولي & كُمونات العمل القياسية Preliminary & Standard Action Potentials الـ

- (A) في حالة الراحة الوظيفية:** تندخل كتلة الأنايبب المجهريّة برأسها في بداية المحور العصبي. ويكون الوسط داخل المحور لعصبي سالب القطبية بسبب كتلة البروتينات الداخليّة، سالبة القطبية، أساساً. في الحقيقة، معظم عناصر الداخل الـ Intracellular Elements هي سالبة القطبية كذلك. بالمقابل، يُشحن الوسط خارج الخلايا الـ Extracellular Space إيجاباً بفعل تراكم الشوارد موجبة القطبية، كشاردة الصوديوم Na^+ خصوصاً.
- (B) في مرحلة التّرخير:** عندما يصل التّنبية إلى منطقة التّرخير الـ Axon Hillock، تتقلّص كتلة الأنايبب المجهريّة وتتراجع للخلف (السّم الأَصفر). تراجعها الخاطفُ يخلق فراغاً الـ Rarefaction في المنطقة. يعمل الفراغ الوليد على شغط شوارد الصوديوم Na^+ إلى الداخل الخلوي (السّم الأزرق). الدُخول الكثيف لشوارد الصوديوم يقلب قطبية المنطقة نحو الإيجاب. فنقول، بولادة قطبية موجبة في منطقة التّرخير تُقابل القطبية السالبة لباقي المحور العصبي. وكما نعلم، قطبية موجبة مقابل قطبية سالبة هي التّجسيد العمليّ لمفهوم كُمون العمل الـ Action Potential.
- (C) في مرحلة الإطلاق الـ Firing:** ترتدّ موجة الضّغط المركزيّة صادمة كتلة الأنايبب المجهريّة في منطقة التّرخير. فتتمدّد هذه الأخيرة وتندفع بعيداً حتى حدود المحور العصبيّ معلنة ولادة موجة ضغط العمل الـ Action Pressure Wave. ما بين تراجع وانفراج خاطفين، تعمل كتلة الأنايبب المجهريّة كذراع ضاغط الـ Piston لخلق موجة ضغط العمل هذه.

ملاحظة: يسبق كُمون العمل الأولي موجة ضغط العمل الأوليّة في التّشاة. وهي ترتيبية هامّة يفرضها الاختصاص الوظيفي لكلّ منهما. فالأول، يهتّم بتنظيم عناصر البلاسما داخل المسار المُستقبليّ الـ Future Trajectory للتّانية. وسنرى قريباً أهميّة ذلك في زيادة سرعة موجة ضغط العمل، وفي تقليل الضّيعات الطاقية، على حدّ سواء.

- (D) كُمونات العمل القياسية الـ Standard Action Potentials:** عند وصولها إلى أوّل عقدة رانفيه، وبمشهدية مطابقة لما حدث في منطقة التّرخير، يعمل الضّغط السّلبّي لذيبل موجة ضغط العمل على فتح مغاليقٍ أقتية شاردة الصوديوم، وعلى سحب هذه الأخيرة إلى الداخل الخلوي. فنقول بولادة قطبية موجبة جديدة داخل عقدة رانفيه. القطبية الموجبة الجديدة أقلّ قيمة من سابقتها الأوليّة. القطبية الموجبة الجديدة ستكون المنطلق لكُمون عمل قياسيّ يتجدّد عند كلّ عقدة رانفيه وصولاً إلى المشبك الانتهائي حيث تكون ولادة القطبية الموجبة الأخيرة في عمليّة النقل العصبيّ.

ملاحظة (١) القطبية الموجبة الأخيرة في عمليّة النقل العصبيّ ستكون الأساس لكُمون العمل الانتهائي العابر لشقّ المشبك الـ Synaptic Cleft.

ملاحظة (٢): بسبب عدم اكتمال نزوح شوارد الصوديوم إلى الحيز خارج الخلايا، تستمرّ درجة خفيّة من القطبية الموجبة في منطقة التّرخير. فنقول أنّ الأخيرة في حالة عصيان. وبذلك ندرك سبب الوجهة الثابتة لعمليّة النقل العصبيّ، وباتجاه المشابك العصبيّة على الدوام.

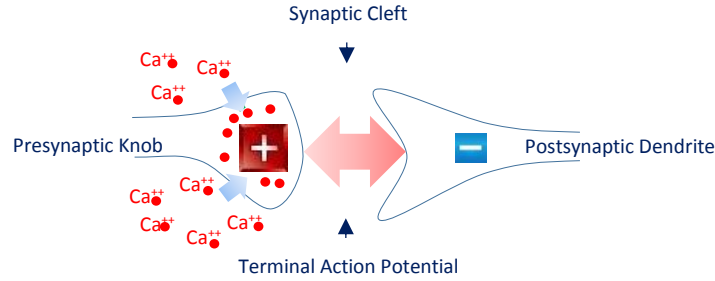
٢-٣ كمونات العمل القياسية الـ Standard Action Potentials

هنا مجموعة متماثلة من كمونات العمل، يختلف عددها باختلاف عدد عقد رانفييه في الألياف العصبية. يبدأ أولها في عقدة رانفييه الأولى، وينتهي آخرها في آخر عقدة من الألياف العصبية. يتلو بعضها بعضاً في متوالية حركية منتظمة. كل مفردة منها تهتم بشؤون القطعة بين عقدتين الموافقة.

في عقدة رانفييه، وحين وصول موجة ضغط العمل، يعمل الضغط السالب لذيل الموجة على فتح بوابات أفنية شاردة الصوديوم Na^+ ، واستدعاء هذه الأخيرة إلى الداخل الخلوي. نقول عندها بولادة قطبية موجبة جديدة تعمل مع القطبية السالبة المسيطرة أساساً في الداخل الخلوي للقطعة بين عقدتين الموافقة على بناء كمون عمل جديد قياسي. تتكرر هذه المشهيدة بتفاصيلها الدقيقة عند كل عقدة رانفييه وصولاً إلى الانتفاخ ما قبل المشبك العصبي الـ Presynaptic Knob حيث ولادة كمون العمل الانتهازي؛ انظر الشكل (D-٥).

٢-٤ كمون العمل الانتهازي الـ Terminal Action Potential

هو كمون عمل أيضاً، لكنه بمواصفات خاصة. فهو آخر كمون عمل خلال عملية النقل العصبي الواحدة. وهو الأساس لتيار النقل الكهربائي الانتهازي الـ Terminal Current. هو كمون عمل عابر للمشبك العصبي؛ قطبيته الموجبة تبتنى في الانتفاخ ما قبل المشبك العصبي الـ Presynaptic Knob، وقطيته السالبة تستوطن الداخل الخلوي للعضو الهدف ما بعد المشبك العصبي الـ Postsynaptic Effector Organ. هو يعتمد شاردة الكالسيوم Ca^{++} لبناء القطبية الموجبة. وأخيراً، هو أعلى قطبية من باقي كمونات العمل القياسية لسببين؛ قطبيته شاردة الكالسيوم Ca^{++} أعلى قيمة من قطبية شاردة الصوديوم Na^+ ، هذا أولاً. وثانياً، هو يستدعي كمّاً أكبر من شاردة الكالسيوم إلى داخل الانتفاخ ما قبل المشبك كبير القطر نسبياً؛ انظر الشكل (٦).



الشكل (٦)

كمون العمل الانتهازي

الـ Terminal Action Potential

هو آخر الكمونات العاملة. تبتنى القطبية الموجبة في الانتفاخ ما قبل المشبك العصبي الـ Presynaptic Knob. وتكون القطبية السالبة في الداخل الخلوي للعضو الهدف بعد المشبك الـ Postsynaptic Effector Organ (اخترت في الرسم عصبوناً ثانٍ كعضو هدف الـ Postsynaptic Dendrite). يتميز عن كل ما سبقه بالتالي:

- ١- هو كمون بيني، الوحيد العابر للشق المشبكي الـ Synaptic Cleft.
- ٢- هو الأساس لتيار النقل الكهربائي الانتهازي الناقل الأوحده للإشارة العصبية الـ Neural Signal.
- ٣- هو أكبر شدة من الكمونات القياسية.
- ٤- يتميز بالدور الأساس لشاردة الكالسيوم Ca^{++} في بناء قطبيته الموجبة الـ Positive Polarity.

[لمشاهدة فيديو قصير يشرح تفصيلاً كمونات العمل حين النقل العصبي، انقر على هذا الرابط](#)

٣- تيار النقل الكهربائي الـ Electrical Current

١-٣ تيار النقل الكهربائي الأولي الـ Preliminary Electrical Current

هو الانفراغ الكهربائي الـ Electrical Discharge الخاطف بين قطبيّة موجبة طارئة في منطقة الترخير الـ Axon Hillock، وقطبيّة سالبة مقيمة فطرياً داخل القطعة بين عقدتين الأولى الـ 1st Internodal Segment. أثناء عمليّة النقل العصبي، وفي مرحلة الترخير تحديداً، يتخلّق خلافاً فسلبيّة في قيمة الضّغط داخل منطقة الترخير. وقد علمنا ما لذلك من عظيم فعل في بناء قطبيّة موجبة، وتالياً كمون عمل، ممّا يعني عن إعادة الشرح هنا.

سريعاً بعد نشأة كمون العمل الأولي، ينفرع تيار كهربائي يجتاح بلاسما القطعة بين عقدتين الأولى كاملاً حتى أعتاب عقدة رانفيه الأولى الـ 1st Node of Ranvier. يعمل كمون العمل وتياره على رصّ جزيئات المادّة في الحيز الدّاخل خلويّ الـ Intracellular Space، رفعاً لكثافته، وتمهيداً لقوم موجة ضغط العمل الـ Action Pressure Wave وشبكة الولادة. انظر الشّكل (A-٧).

٢-٣ تيارات النقل الكهربائيّة القياسيّة الـ Standard Electrical Currents

في النّشأة، هي المشهديّة ذاتها تتكرّر على الدّوام. موجة ضغط تسري ضمن لمعة اللّيف العصبي. وضغط سلبيّ يتبدّل موجة ضغط العمل، يفتح مغاليق أقنية ويستدعي كمّاً من شاردة الصّوديوم Na^+ إلى الدّاخل الخلويّ. فقطبيّة موجبة تنشأ، تقابل قطبيّة سالبة مقيمة أساساً. ثمّ يكون الانفراغ الكهربائيّ حتميّة، ويكون تيار النقل الكهربائيّ واقعاً عمليّاتياً.

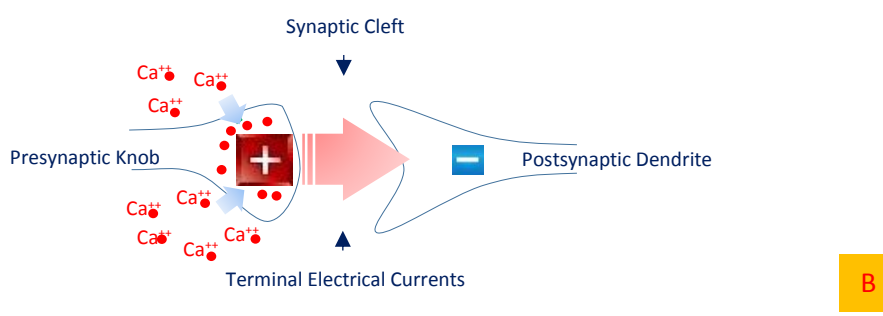
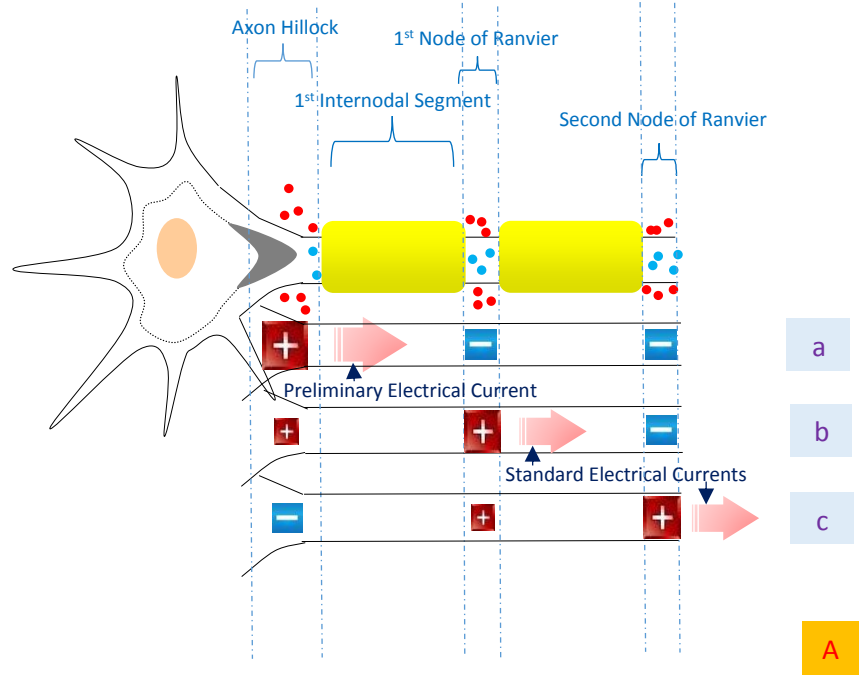
ووظيفياً، لا تختلف في شيء عن التيار الأولي. فهي تيارات وظيفيّة تساعد على انتشار موجة ضغط العمل، وتقليل ضياعات الطّاقة فيها، بخلق مسارات انتشار لها ذات مواصفات قياسية. كلُّ تيار قياسيّ يهتمّ بشؤون المسار في قطعه الخاصّة. وكأنّ الواحد منها ينظم مسار موجة الضّغط العاملة في قطعه منه. تكامل القطع الجزئيّة هذه يصنع مسار الموجة الكليّ الـ Wave's Trajectory.

أمّا فيما خصّ الشّكل، فيمكننا تمييز بعض الفروق البسيطة. فهي مجموعة تيارات كهربائيّة متماثلة في الشدّة ووجه شعاع قوتها. يطابق عديدها عديد عقدة رانفيه. فكلُّ عقدة منها هي المنطلق لتيار منها. يتبع بعضها بعضاً في متواليّة حركيّة مدهشة. حيث يبدأ الأحقق منها من حيث انتهى السّابق وصولاً إلى الانتفاخ ما قبل المشبك العصبيّ الـ Knob. كما هي أقلّ شدّة من التيار الأولي، وبالتالي أكثر انسجاماً مع معايير السّلامة التّسجيّة. هي أكثر احتراماً لمبدأ النسبة والتّناسب بين ضرورات الوظيفة وضرورات السّلامة انظر الشّكل (A-٧).

٣-٣ تيار النقل الكهربائيّ الانتهايي الـ Terminal Electrical Current

هو التيار الكهربائيّ الوحيد العابر للمشبك العصبيّ. ينقل الإشارة العصبيّة من العصبون حيث منطلقه، إلى العضو الهدف الـ Effector Organ حيث مستقره. إذاً، هو ناقل للإشارة العصبيّة، وليس مسرعاً لموج ضغط العمل وحسب. وبذلك، يكون تيار النقل الكهربائيّ الانتهايي الوحيد الحامل لصفة ناقل عن استحقاق وجدارة.

ينطلق التيار الانتهايي من الانتفاخ ما قبل المشبك العصبيّ الـ Knob، وينتهي في العضو الهدف ما بعد المشبك. يبتنى قطبه الموجب بدخول سريع وكثيف لشاردة الكالسيوم Ca^{++} إلى الدّاخل الخلويّ. وشاردة الكالسيوم Ca^{++} يتمايز ثانياً عمّا سبقوه من تيارات كهربائيّة. مستفيدة من حجم مستوعبها الجديد، أي الـ Knob، الكبير نسبياً، ومن قطبيّتها الموجبة الكبيرة أيضاً، تخلّق شاردة الكالسيوم Ca^{++} كمون عمل بقيمة كبيرة، أكبر نسبياً من سابقاتها من كمونات العمل. وبشدّة نختم ثلاثيّة الفروق النوعيّة التي تميّز تيار النقل الانتهايي عن غيره من تيارات النقل الكهربائيّة؛ انظر الشّكل (B-٧).



الشكل (٧)

تيارات النقل الكهربائية الـ Electrical Currents

- خلال عملية النقل العصبية الواحدة، نميز ثلاث تيارات كهربائية وظيفية.
- الشكل (٧-أ) تيار النقل الكهربائي الأولي Preliminary Electrical Current: هو أولها، ينطلق سريعاً بعد ابتداء كمن العمل الأولي الـ Preliminary Action Potential في منطقة التزخير الـ Axon Hillock. وينتهي فعله عند حدود عقدة رانفييه الأولى الـ 1st Node of Ranvier. يتميز بشدته قياساً للتيارات القياسية. لكنه يخضع لآليات الشوء ذاتها.
- الشكل (٧-ب) & (٧-ج) تيارات النقل الكهربائية القياسية Standard Electrical Currents: هي التالية، متطابقة، وعديدة بعدد عقدة رانفييه في الليف العصبي الـ Neural Fiber. يبدأ باكورتها في عقدة رانفييه الأولى، وينتهي في العقدة الثانية. كل واحد منها مسؤول عن تنظيم مسار موجة ضغط العمل وشبكة القدم في قطعه الخاصة. لا تتزامن أبداً، فاللاحق منها يبدأ بعد انقضاء السابق له تماماً.
- الشكل (٧-ب) تيار النقل الكهربائي الانتهائي Terminal Electrical Current: هو آخرها بالمطلق. يبدأ من الانتفاخ ما قبل المشبك العصبي الـ Presynaptic Knob، وينتهي في الداخل الخلوي للعضو الهدف فيما بعد المشبك العصبي الـ Postsynaptic Effector Organ (اخترت في الرسم عصبوناً ثان كعضو هدف الـ Postsynaptic Dendrite). يتميز عن كل ما سبقه بالتالي:
- ٥- هو تيار بيني، الوحيد العابر للشق المشبكي الـ Synaptic Cleft.
 - ٦- هو الوحيد الناقل للإشارة العصبية الـ Neural Signal، بينما التيارات السابقة له هي مسرعات للنقل لا أكثر.
 - ٧- هو أكبر شدة من التيارات القياسية.
 - ٨- يتميز بدور شاردة الكالسيوم Ca⁺⁺ الأساس في بناء القطبية الموجبة الـ Positive Polarity لكونه العامل؛ أي لمصدر أو منطلق التيار الـ Cathode.

لمشاهدة فيديو قصير يشرح تفصيلاً التيارات الكهربائية العاملة حين النقل العصبي، انقر على هذا الرابط

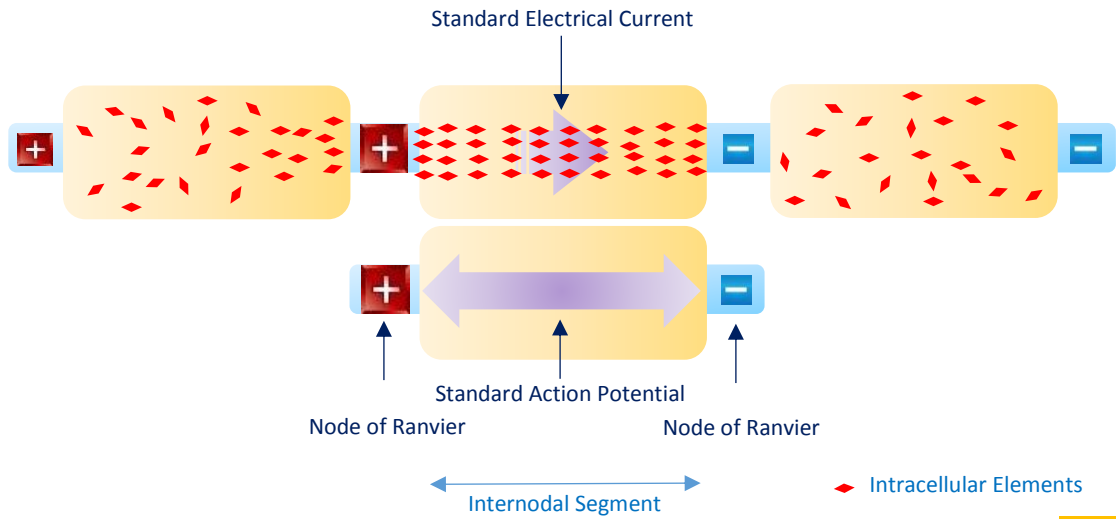
٤-٣ وظيفة تيارات النقل الكهربائية "الأولي والقياسية"

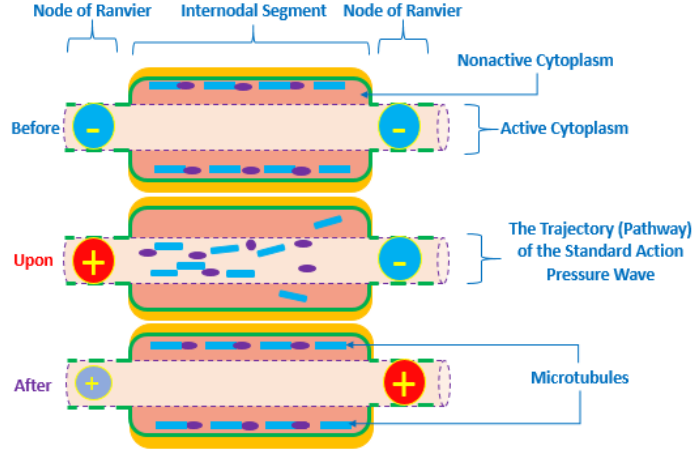
The Real Function of Preliminary & Standard Electrical Currents

من أجل سرعة كبيرة لموجة ضغط العمل الـ Action Pressure Wave، ومن أجل تقليل ضياعات الطاقة فيها، كان لزاماً رفع كفاءة وسط انتشارها. عملياً، تقوم تيارات العمل الكهربائية القياسية خصوصاً الـ Standard Electrical Currents بهذا الدور الجليل، ووسائلها في ذلك عبقرية وفعالة. كل تيار قياسي يعني بقطعة من المسار المستقبلي للموجة العاملة الـ Future Wave's Trajectory. تكامل القطع الجزئية سيصنع مسار الموجة الكلي.

فسريعاً بعد تشكّل كمون العمل القياسي الـ Standard Action Potential الخاص بقطعه الـ Internodal Segment، ينطلق التيار الكهربائي القياسي مباشرةً مهامه التنظيمية. ينظم ما توافر من عناصر البلازما الخلوية الـ Intracellular Elements، من بروتينات وشوارد داخل خلوية، في تنسيق عالي الكثافة، هذا من جهة. كما ويستدعي عناصر إضافية لم تكن موجودة من قبل في حالة الراحة؛ وأعني هنا مكونات الأنابيب المجهرية الـ Microtubules، من جهة أخرى. ثمّ يُقحمها جميعاً في المسار الافتراضي لموجة ضغط العمل وشبكة القدوم؛ انظر الشكل (A-1).

تتألف الأنابيب المجهرية من مفردات أصغر، هي الـ β Tubulin & α Tubulin. تتحطم هذه الأنابيب المجهرية ومن ثمّ تعيد تركيب ذاتها دائماً وأبداً وبسرعة كبيرة جداً، على ما انتهت إليه أحدث الدراسات. يعمل التيار القياسي على فك ارتباط هذه المكونات، ومن ثمّ يستدعيها إلى داخل المسار المستقبلي المفترض لموجة ضغط العمل وشبكة القدوم. فزيادة كثافة وسط الانتشار من الروافع الهامة لسرعة انتشار الموجات الطولية ومنها موجة ضغط العمل موضع اهتمامنا. أخيراً، وبعد مرور الموجة العاملة وانقضاء الوظيفة، تُعيد هذه العناصر تجميع بعضها في تنسيق أنبوبي مجهرية جديد؛ انظر الشكل (B-1).





B

الشكل (٨)

وظيفة تيارات النقل الكهربائية

يعمل تيار النقل الكهربائي الأولي الـ Preliminary Electrical Current، وتيارات النقل الكهربائي القياسية بشكل أساسي الـ Standard Electrical Currents، كمسرات لموجة ضغط العمل الـ Action Pressure Wave. وذلك باليتين اثنتين:

الشكل (A) أولاً: هي تنظم عناصر البلازما الخلوية الـ Intracellular Elements، وترصها جنباً إلى جنب، رافعةً بذلك كثافة وسط انتشار موجة الضغط العاملة. وكلّ كلّ تيارٍ منها يهتّم برصف وتعبيد قطعة من المسار المستقبلي الـ Future Wave's Trajectory للموجة العاملة وشبكة القدم. والفيزيائيون يعلمون ما لذلك من عظيم فعلٍ مسرّعٍ لانتشار الموجات الطولانية خصوصاً، ومنها موجة ضغط العمل الأساس في عملية النقل العصبي عبر الليف العصبي كما أراه شخصياً.

الشكل (B) وثانياً: هي تحطم الأنابيب المجهرية الـ Microtubules إلى مفرداتها الأساسية من β Tubulin & α Tubulin، ومن ثمّ تُحمّل العناصر الوليدة هذه في المسار المستقبلي الـ Future Wave's Trajectory المُفترض لموجة ضغط العمل وشبكة القدم. بعد مرور موجة ضغط العمل، تُعيد هذه المكونات تجميع بعضها للعودة إلى حالتها السابقة قبل حالة الاستنفار الوظيفية.

٤- غمد النخاعين الـ Myelin Sheath

أثناء عملية النقل العصبي، يرتفع الضغط داخل المحور العصبي ليلبغ قيمة أكبر ندعوها اصطلاحاً بقيمة ضغط العمل الـ Action Pressure. تحتاج موجة ضغط العمل الـ Action Pressure لمعة الليف العصبي باتجاه المشبك العصبي الانتهاء الـ Synapse.

يمكن لغشاء المحور العصبي الـ Axon Membrane أن يتحمل وحيداً قيم ضغط الراحة المرتفعة أساساً. كما، وقد ينجح أثناء عملية النقل العصبي في الثبات أمام أحمال إضافية صغيرة. بيد أنه يفشل حكماً في تحمل ضغوط العمل الأعلى قيمة لزوم النقل العصبي السريع. تُمارس موجات الضغط عالية الطاقة فعلاً مُشوهاً على غشاء المحور العصبي. فيتمدد هذا الأخير خارجاً وتنفخ لمعته، وتفقد نتيجتها موجة النقل العصبي زخمها جزءاً من سرعة عبورها. هذا ما يفسر لنا تخصص المحاور العصبية وحيدة الجدار، أي المحاور العصبية غير النخاعينية الـ Unmyelinated Axons، في النقل العصبي صغير الحموله، بطيء سرعة النقل العصبي.

كما دوماً، تدبّرت العضوية حلّ تلك النقيصة باستدعاء خلايا شوان الـ Schwann Cells ومنتجها الثمين غمد النخاعين الـ Myelin Sheath. يشكّل غمد النخاعين طبقة ثانية تحيط بغشاء المحور العصبي. غمد النخاعين، ذو البنية القاسية والسماكة الهامة، يرفع قدرة الجدار على تحمل قيم أعلى من ضغوط الراحة وقيم أعلى من ضغوط العمل. كما يسمح بابتناء محاور عصبية أوسع قطراً لزوم النقل العصبي السريع.

٥- قطر الليف العصبي وتأثيره على سرعات النقل العصبي

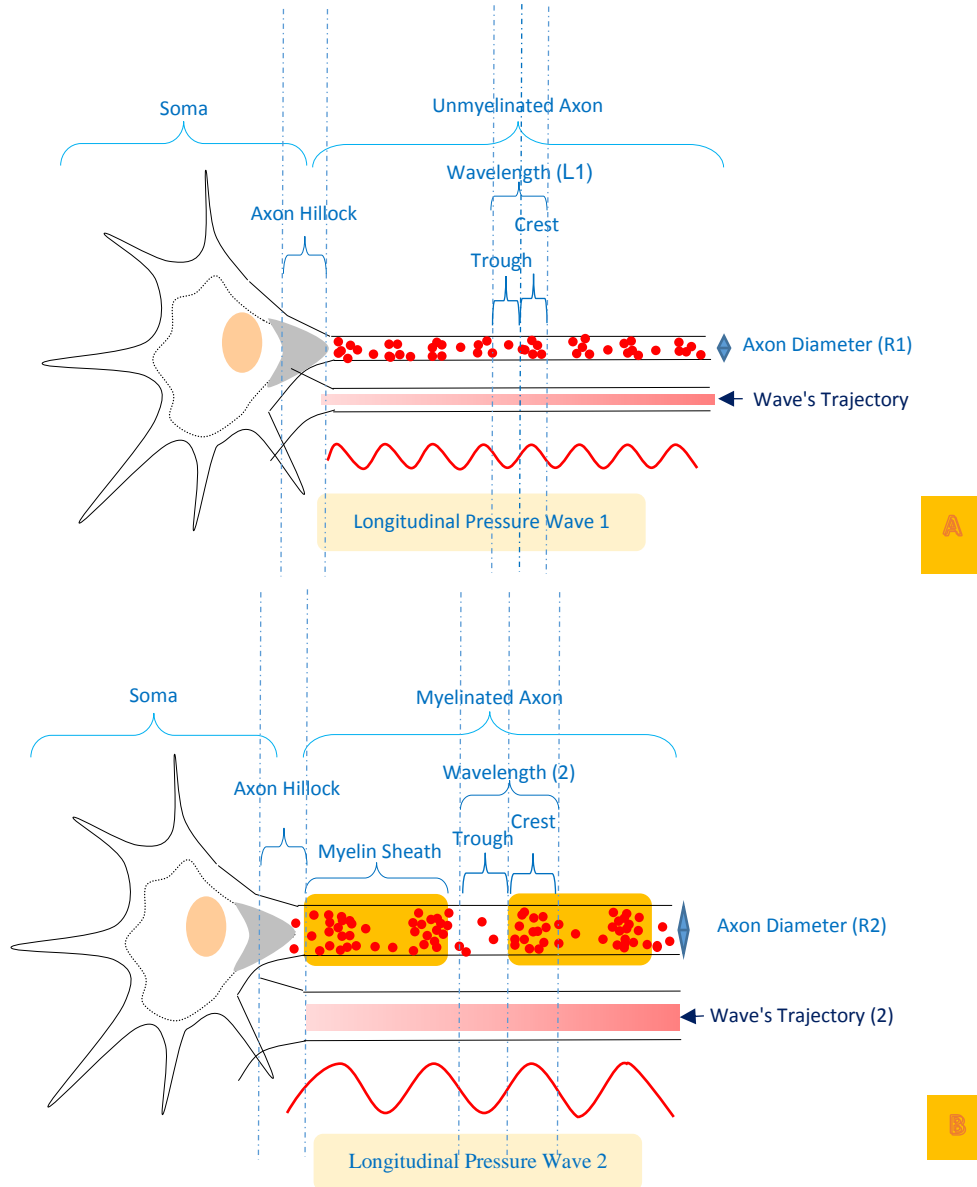
كما موج البحر، ينفقل ضغط العمل على شكل موجة طولانية بقيمة ضغطٍ أعظمية وأخرى أصغرية. المسافة ما بين أعلى قيمة وأصغرها تمثل سعة الموجة الـ Wave's Amplitude. كلما ازدادت سعة الموجة ازدادت معها طاقتها الكامنة والحركية، كما يقية المناسب بالخاصة بالموجة. وبما أنّ فضاء عمل موجة الضغط العاملة هو الداخل العصبي، فلندرس أبعاد هذا الفضاء وأثره على عملية النقل العصبي.

هي الفيزياء ثنائية. تمارس جزيئات المادة فعلاً ضاغطة الـ Pressure Potential على جدار الوعاء الحافظ لها يتناسب طردياً وكمية هذه المادة. بذلك، يكون ضغط الراحة الـ Resting Pressure داخل الليف العصبي مرهوناً إذاً بقدرة هذا الداخل على احتواء وتخزين عناصر المادة، أي مرهوناً بسعته. فمتى اتسع المحور العصبي، ارتفعت قدرته التخزينية، وارتفع معها ضغط الراحة كما كفاءة الوسط الداخلي في النقل العصبي. والنتيجة كما علمناها تعاضد في سرعة النقل العصبي.

عملياً، لا يسمح المحور العصبي صغير القطر بالنقل العصبي السريع، فالحدود واضحة لا يمكن تجاوزها. المتوافر من عناصر المادة في فضاء محدود السعة لا يسمح في حال من الأحوال بتأسيس قيم عالية من ضغوط الراحة أساساً. ولا يسمح بابتداء موجات ضغط العمل ذات السعات والسرعات العالية تالياً.

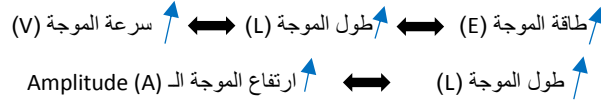
بالمقابل، المحاور العصبية كبيرة القطر تسمح بتحقيق الاثنين معاً؛ ضغط راحة عالي القيمة، وموجات ضغط عمل عالية السعة. ولا يخفى ما لهذا الأخير من كبير أثر على سرعات النقل العصبي. اجتماع هذه العناصر جميعاً، يفسر سرعة النقل العصبي الكبيرة في المحاور العصبية كبيرة القطر النخاعية والذي أكدت عليه جميع الدراسات المقارنة.

من جهة أخرى، ولملء الفراغ المتدبّل لموجة الضغطة العاملة، تسمح اللمعة الواسعة للمحور العصبي بتوافد كمية أكبر من شاردة الصوديوم Na^+ ذات الدور الأساس في بناء كمون العمل. بالنتيجة، قطر أكبر للمحور العصبي يعني موجات عمل أكبر سعة وكمون عمل عالي القيمة على حدّ سواء؛ انظر الشكل (9).



الشكل (٩)

العلاقة بين قطر المحور العصبي وسرعة النقل العصبي



وكانت بموجة ضغط العمل الـ Action Pressure Wave، حين انتشارها من حجرة التزخير الـ Axon Hillock إلى المشبك العصبي الانتهازي الـ Synapse، ترسم شكلاً أنبوبياً اسطوانياً معلقاً داخل بلاسما الليف العصبي. هذا الشكل الأنبوبي ما هو في الحقيقة إلا مسار الموجة الحقيقي الـ Wave's Trajectory. طول المسار هو طول الليف العصبي نفسه، أما مساحته مقطعه فيحدد بارتفاع الموجة العاملة. وقد علمنا العلاقة الوثيقة بين ارتفاع الموجة وطولها، وتالياً سرعتها (راجع خصائص الموجات طولانية).

إذا يصبح جلياً القول، أنه لا إمكانية لإقحام موجة طولانية طويلة الموجة وسريعة الانتشار في ليف عصبي صغير القطر. بكلمات أخرى، أنه لا إمكانية لنقل عصبي سريع في ليف عصبي صغير القطر.

الشكل (A) في الألياف العصبية غير النخاعية حيث القطر الـ R1 صغير نسبياً: لا يسمح قطر المحور العصبي الصغير بتمرير موجات ضغط طولانية عالية الطاقة، وطويلة الموجة، ووسيع العرض. بالتالي، تكون سرعات النقل العصبي فيها صغيرة نسبياً.

الشكل (B) في الألياف العصبية النخاعية الأكبر قطراً الـ R2: يسمح القطر الكبير هذا بتمرير موجات ضغط طويلة الموجة، عالية الارتفاع، مما يعني سرعات أكبر في النقل العصبي.

إذاً، فيما خص العلاقة بين المحاور العصبية وسرعات النقل تصح العلاقة الذهبية التالية:

$$R1 < R2 \quad \leftarrow \quad V1 < V2$$

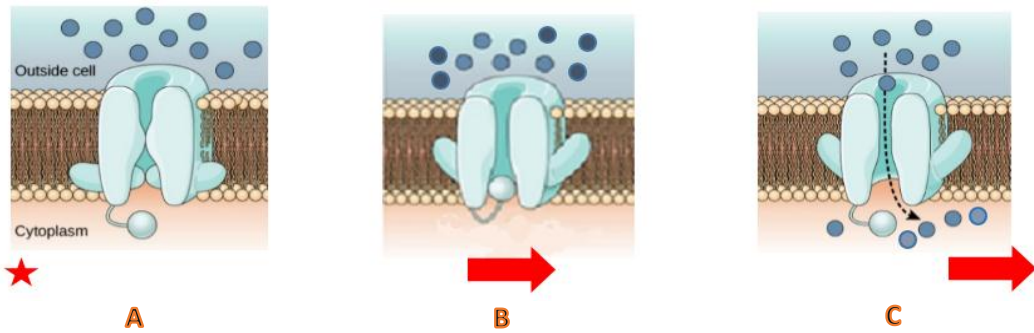
ملاحظة: الكرات الحمراء في الرسم هي العناصر داخل الليف العصبي من بروتينات، حويصلات، وشوارب داخل خلوية.

٦ - أقتنية شوارب الصوديوم ذات الأبواب العاملة بفرق الضغط

Pressure-Gated Na⁺ Channels

كما يدل اسمها، لهذه الأقتنية بوابات خاصة تتحكم بمرور شوارب الصوديوم Na⁺ عبرها. البوابات هذه داخلية التوضع وتمفصلت مع الأقتنية من جانبها القريب من جهة قدوم الإشارة العصبية. في حال كانت الإشارة العصبية أمراً بالحركة مثلاً، تهب موجة ضغط العمل من المركز باتجاه المحيط. عندها، تكون المفصلات مركزية التوضع.

عند الفعل، تعمل جبهة الموجة العاملة على إغلاق الأقتنية. بعدها مباشرة، يعمل الضغط السلبي المتبدل للموجة على فتح مصاريعها. لذلك يصح أكثر تسمية هذه القنوات بالقنوات ذات الأبواب العاملة باختلاف قيمة الضغط على جانبي البوابات، لا العاملة كهربائياً. فتكون تسميتها بالـ Pressure gated Na⁺ channels أكثر انسجاماً مع طريقة عملها. وأياً تكن التسمية، تعمل شاردة الصوديوم Na⁺ الوافدة على خلق قطبية موجبة الـ Positive Polarity حيث يجب، وخلق كمونات العمل الـ Action Potentials تالياً؛ انظر الشكل (١٠).



الشكل (١٠) الأقنية ذات الأبواب العاملة بفرق الضغط Pressure Gated Na⁺ Channels

الشكل (A) التَّشْرِيح الوَصْفِي: البوابة معقَّدة بروتينيُّ الـ Polypeptide، يتنا داخل لمعة اللَّيْف العَصْبِيِّ في الـ Cytoplasm، ويتمفصل مع الجدار الأقرب لجهة النقل العَصْبِيِّ، أي مع الجدار الأقرب إلى جسم العصبون (النَّجْمَةُ الحمراء) في العصبونات الحركيَّة الـ Motor Neurons. تتواجد شوارد الصُّوديوم Na⁺ بكثافةٍ في الحيز الخارج خلويِّ الـ Outside Cell (الكرات الزرقاء).
الشكل (B) في حالة الرَّاحة، كما عند وصول جبهة موجة ضغط العمل (السَّهْمُ الأحمر) إلى مستوى القناة، تنحني البوابة باتجاه الجدار تحت تأثير قيمة الضَّغط المرتفعة لموجة العمل، مغلقةً بذلك قناة العبور.
الشكل (C) بعد تجاوز جبهة الموجة للقناة، يعمل الضَّغط سالب القيمة المتذبذب لموجة الضَّغط على شفت البوابة نحو الدَّاخل الخلويِّ، ومن ثمَّ على فتح قناة العبور. كما يعمل الضَّغط السَّلْبِيُّ ذاته على تندُّق شوارد الصُّوديوم Na⁺ إلى الدَّاخل (السَّهْمُ الأسود النَّقْطِيُّ) معلنةً ولادة القطبيَّة الموجبة لكمون العمل في المنطقة.

٧- الأطوار الثلاثة للنقل العَصْبِيِّ

The Three Phases of Neural Conduction

تستخدم الخليَّة العَصْبِيَّة التيارات الكهربائيَّة من أجل تحطِّي المسافات البيئيَّة الـ Interspaces التي تفصلها عن غيرها من عناصر وظيفيَّة. وهذا الغير قد يكون خليَّة عصبية أخرى، وقد يكون عضواً هدفاً الـ Effector Organs. أي بكلمات أخرى، هي تستخدم الكهرباء من أجل تجاوز الشق المشبكي الـ Synaptic Cleft على أنواعه، إذا ما أردنا الدقَّة.

بالمقابل، ومن أجل نقل الإشارة العَصْبِيَّة داخل مكوناتها البيئيَّة من محاور الـ Axons وتفرعات عصبية الـ Dendrites، تستعمل العضويَّة موجات الضَّغط الـ Pressure Waves دون غيرها. ولهذا مبرراته المنطقيَّة على ما أرى. فالمسافات ما بين موقع القرار في الدماغ، والأعضاء الهدف هي طويلة نسبياً. لذلك كان أسهل على العضويَّة استعمال موجات الضَّغط بدل التيارات الكهربائيَّة. فالأولى أكثر أماناً وحفظاً لسلامة المكونات البيئيَّة. وهي أسهل استخداماً وضبطاً من التيارات الكهربائيَّة. كما أنَّ شروط عملها أكثر تساهلاً من شروط عمل التيارات الكهربائيَّة.

لا تحتاج الخليَّة العَصْبِيَّة لعمل موجات الضَّغط أكثر من نظام أنبوبيِّ محكم الإغلاق يحافظ على قيمة مرتفعة من الضَّغط داخله. لأجل ذلك إذا سلحت الخليَّة العَصْبِيَّة استطالاتها بغمد النخاعين الـ Myelin Sheath ذي المقاومة العالية لتبذلات الضَّغط داخلها. وللغرض ذاته أيضاً، زودت الأقنية الجداريَّة الخاصَّة بنقل الشوارد ببوابات داخلية تتغلق تلقائياً في أوقات الرَّاحة كما حين العمل حين تسود إيجابيَّة في قيمة الضَّغط الدَّاخليِّ. ولا تفتح إلا عند اتِّجاه قيمة هذا الأخير نحو السَّلْبِيَّة.

إذا كانت الحالة كما وصفت، ألا يحتاج ذلك منا وقفة تأملية لمراجعة آليات النقل العَصْبِيِّ الرَّاهنة وصولاً إلى آليات نقل جديدة تكون أكثر انسجاماً مع عفوية الحياة وسلاسة منطقتها؟ نشرح البنيان العَصْبِيِّ حقيقة لا جدال فيه. فعين الآلة الفاحصة وصلت حدَّ الاتقان صورةً. بالمقابل، بقيت إرھاصات الإنسان في توظيف مخرجات الكشف البصريِّ دون عتبة الطموح وحدَّ الإقناع.

لمشاهدة فيديو قصير يشرح تفصيلاً الأطوار الثلاثة للنقل العَصْبِيِّ، انقر على هذا الرَّابط

في السِّياق ذاته، أنصح بقراءة المقالات التَّالِيَّة:

-هل يفيد التَّدَاخُل الجراحيُّ الفوريُّ في أدبَات النخاع الشوكيِّ وذيل الفرس الرضِيَّة؟
-النقل العَصْبِيِّ، بين مفهوم قاصر وجديد حاضر

[The Neural Conduction.. Personal View vs. International View](#)

-عرض تمثيليٍّ لآلية النقل العَصْبِيِّ في اللَّيْف العَصْبِيِّ [Innovated View of Neural Conduction](#)

-المستقبلات الحسيَّة، عبقرية الخلق وجمال المخلوق

[The Sensory Receptors, The Genius of Creation and the Beauty of Creature](#)

-النقل في المشابك العَصْبِيَّة [The Neural Conduction in the Synapses](#)

-النقل في المشابك العَصْبِيَّة (PowerPoint Presentation)

-عقدة رانفييه، ضابطة الإيقاع [The Node of Ranvier, The Equalizer](#)

-عرض مصوّر لدور عقدة رانفييه كضابط إيقاع في النقل العصبي
Node of Ranvier, The Equalizer (PowerPoint)
-في فقه الأعصاب، الألم أولاً The Pain is First
-في فقه الأعصاب، الشكل.. الضرورة The Philosophy of Form
-تخطيط الأعصاب الكهربائي، بين الحقيقي والموهوم
-الصدمة النخاعية (مفهوم جديد) The Spinal Shock (Innovated Conception)
-أذيات النخاع الشوكي، الأعراض والعلامات السريرية، بحث في آليات الحدوث
The Spinal Injury, The Symptomatology
-التنكس الفاليري، يهاجم المحاور العصبية الحركية للعصب المحيطي.. ويعف عن محاوره الحسية
Wallerian Degeneration, Attacks the Motor Axons of Injured Nerve and Conserves its Sensory Axons

كما أنصح بقراءة رؤى جديدة في سياقات أخرى:

- خلقت المرأة من ضلع الرجل، رائعة الإحياء الفلسفي والمجاز العلمي
- نعم، خلقت المرأة من ضلع الرجل، والشاهد جسيم بار (PowerPoint)
- المرأة تقرّر جنس وليدها، والرجل يدعي!
- كما النطاف، هناك بويضة مؤنثة وأخرى ذكر (PowerPoint)
- الرّوح والنّفس.. عطية خالق وصنعة مخلوق
- خلق السماوات والأرض أكبر من خلق الناس.. في المرامي والدلالات
- مكاشفات قرآنية، فآحة آدم، خلق حواء من ضلع آدم، حواء.. دلالات ومعنى
- حواء.. هذه
- سفينة نوح، طوق نجاته لا معراج خلاص
- المصباح الكهربائي، بين التجريد والتنفيذ رحلة ألف عام
- هكذا تكلم إبراهيم الخليل
- فقه الحضارات، بين قوة الفكر وفكر القوة
- العدة وعلّة الاختلاف بين مطلقية وأرملية ذات عفاف
- تعدد الزوجات وملك اليمين.. المنسوخ الأجل