الفصل

45

تنظيم الجهاز العصبي؛ الوظائف الأساسية للمشابك والمواد الناقلة

يوفر الجهاز العصبي، بالاشتراك مع الجهاز الصَمّاوي، معظم الوظائف التحكمية في الجسم. فهو يتحكم بصورة عامة في فعاليات الجسم السريعة، مثل التقلصات العضلية والحوادث الحشوية السريعة التغير، وحتى في سرعة إفراز بعض الغدد الصمّاء. وبالمقابل ينظم الجهاز الصمّاوي بصورة رئيسية وظائف الجسم الاستقلابية.

والجهاز العصبي فريد في فعالياته التحكمية البالغة التعقيد التي يتمكن من القيام بها. فهو يستلم الملايين من أجزاء المعلومات من مختلف الأعضاء الحسية ويكاملها كلها لتحديد الاستجابة المناسبة التي يقوم بها الجسم. وهدف هذا الفصل هو أولاً تقديم موجز عام لمجمل الآليات التي يستعين بها الجهاز العصبي للقيام بوظائفه، ثم نبحث بعد ذلك وظيفة مشابك الجهاز العصبي المركزي، التي تعتبر البنيات الأساسية التي تتحكم في مرور الإشارات إلى الجهاز العصبي وخلاله وعنه. وسنحلل في الفصول اللاحقة بالتفصيل وظائف أقسام الجهاز العصبي المختلفة. وقبل البدء بهذه الدراسة يجب على القارىء الرجوع إلى الفصلين الخامس والسابع اللذين يقدمان بالتتالي أسس الجهود الغشائية وانتقال الإشارات في الأعصاب وخلال المواصل العصبية العضلية.

التصميم العام للجهاز العصبي

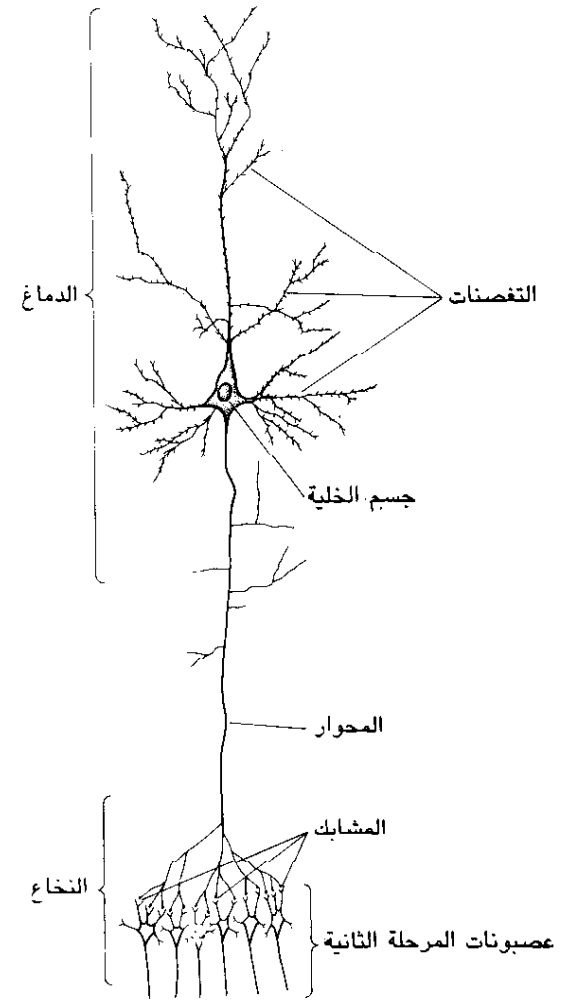
عصبون الجهاز العصبي المركزي ــ الوحدة الوظيفية الأساسية

يتكون الجهاز العصبي من أكثر من 100 بليون عصبون. ويبين الشكل 45-1 عصبوناً نموذجياً من النمط الذي يوجد في قشرة الدماغ الحركية. وتدخل المعلومات التي ترد إلى الخلية بصورة تامة تقريباً خلال المشابك على تَغَصُّنات العصبون أو على جسم الخلية. وللأنماط المختلفة للعصبونات، قد يكون هناك بضع مئات فقط من المشابك أو ما يصل إلى 200000 اتصال مشبكي من الآلياف الواردة. وعلى الطرف الآخر ترحل الإشارة الصادرة من العصبون عن طريق محواره axon الوحيد الذي يغادر العصبون، إلا أن لهذا المحوار الكثير من الفروع المنفصلة إلى الأجزاء الأخرى للجهاز العصبي أو إلى أجزاء الجسم المحيطية.

وإحدى الخواص المهمة لمعظم هذه المشابك هي أن الإشارات بالحالة السوية تمر خلالها بالاتجاه الإمامي فقط ما عدا بعض الحالات النادرة. ويسمح ذلك بتوصيل الإشارات بالاتجاهات الضرورية للقيام بالوظائف العصبية المطلوبة. وسنرى أيضاً بأن العصبونات مرتبة بأعداد كبيرة من الشبكات العصبية التي تعين وظائف الجهاز العصبي.

القسم الحسي للجهاز العصبي ــ المستقبلات الحسية

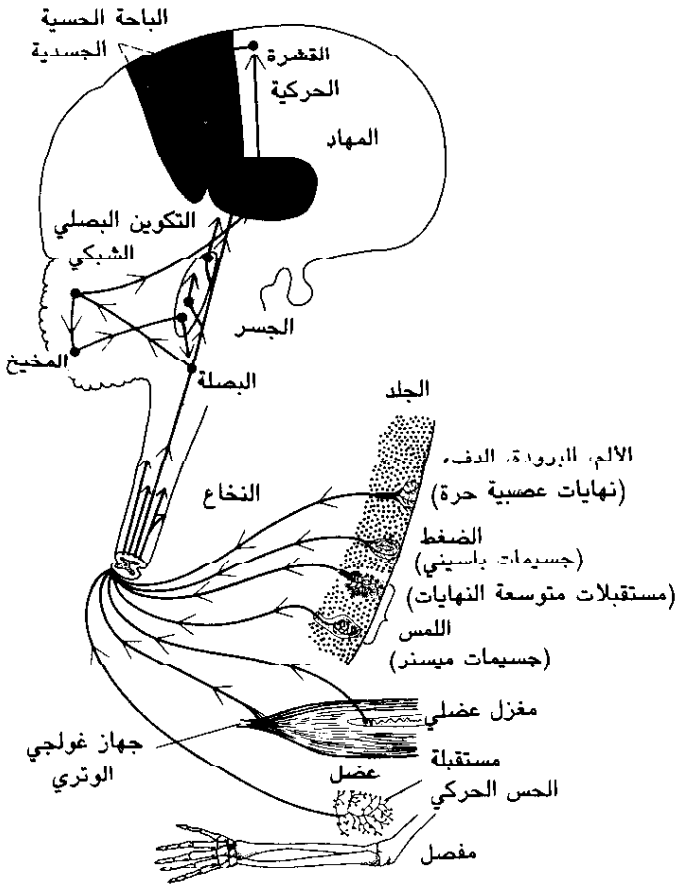
تبدأ معظم فعاليات الجهاز العصبي من الخبرة الحسية التي تبدأ من المستقبلات الحسية، سواء كانت هذه مستقبلات بصرية وسمعية أو لمسية على سطح الجسم أو أنواع أخرى من المستقبلات. ويمكن أن تتولد هذه الخبرة الحسية كرد فعل فوري أو تحفظ ذكراها في الدماغ لدقائق أو لأسابيع أو لسنين



الشكل 45-1. بنية عصبون دماغي كبير تظهر فيها أقسامه الوظيفية المهمة (عن: Guyton: Basic Neuroscience: Anatomy & Physiology. Philadelphia, W.B. Saunders Co, 1987).

وتساعد بعد ذلك في تعيين ردود فعل الجسم في وقت لاحق.

ويبين الشكل 45-2 قسماً من الجهاز الحسي، وهو القسم الجسدي الذي ينقل المعلومات الحسية من مستقبلات سطح الجسم كله وبعض بنياته العميقة. وتدخل هذه المعلومات بعد ذلك إلى الجهاز العصبي المركزي خلال الأعصاب المحيطية وتُرحَّل إلى العديد من المناطق الحسية في (1) كل مستويات النخاع الشوكي، (2) والمادة الشبكية للنخاع والجسر والدماغ المتوسط، (3) والمخيخ، (4) والمهاد، (5) والباحات الحسية الجسدية في قشرة الدماغ. ولكن الإشارات تُرَحَّل بالإضافة لهذه المناطق الحسية الأولية أساساً إلى كل أقسام الجهاز العصبي الأخرى أيضاً.

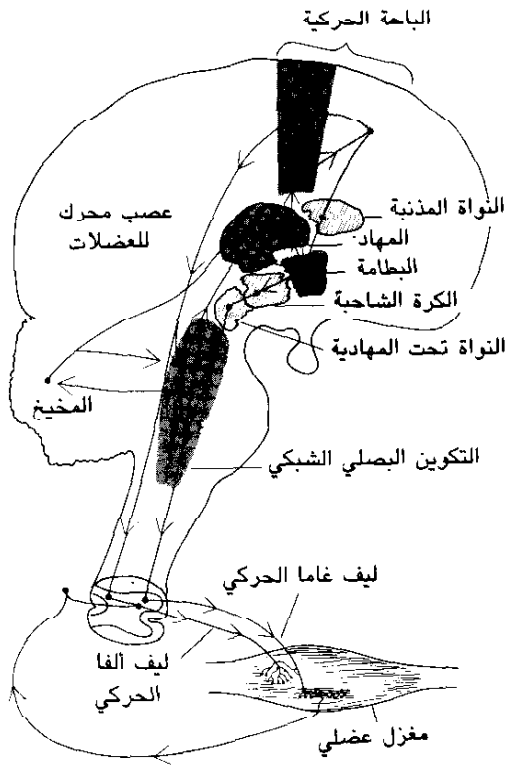


الشكل 45-2. المحور الحسي الجسدي للجهاز العصبي.

القسم الحركي ـ المستفعلات

إنّ أهم دور أساسي للجهاز العصبي هو التحكم في فعاليات الجسم المختلفة. ويتحقق ذلك من خلال التحكم في (1) تقلص العضلات الهيكلية في كل مكان من الجسم، (2) وتقلص العضلات الملساء في الأعضاء الداخلية، (3) وإفراز الغدد الصماء والغدد خارجية الإفراز في العديد من أقسام الجسم. وتسمى هذه الفعاليات بمجموعها الوظائف الحركية motor functions للجهاز العصبي، وتسمى العضلات والغدد المستفعلات effectors لأنها تقوم بالوظائف التي تفرضها عليها الإشارات العصبية.

ويبين الشكل 45-3 المحور الحركي للجهاز العصبي الذي يتحكم في تقلص العضلات الهيكلية. ويعمل بالتوازي مع هذا المحور جهاز مشابه للتحكم بالعضلات الملساء والغدد والأجهزة الجسمية الداخلية الأخرى، وهو يسمى الجهاز العصبي المستقل



الشكل 45-3. المحور الحركي للجهاز العصبي.

autonomic nervous system الذي سيبحث في الفصل 60. ويلاحظ في الشكل 45-3 بأنه يمكن التحكم في العضلات الهيكلية من عدد من مستويات الجهاز العصبي المركزي والتي تشمل: (1) النخاع الشوكي، (2) والمادة الشبكية في النخاع والجسر والدماغ المتوسط، (3) والعقد القاعدية، (4) والمخيخ، (5) والقشرة الحركية. وتقوم كل منطقة من هذه المناطق بالدور الخاص بها، حيث تهتم المناطق السفلية بصورة مبدئية بردود فعل الجسم الأوتوماتية والآنية للمنبّهات الحسية، وتعنى المناطق العالية بالحركات المتأنّية التي تتحكم فيها العمليات الفكرية للمخ.

معالجة المعلومات ــ الوظيفة «التكاملية» للجهاز العصبي

إن الوظيفة الرئيسية للجهاز العصبي هي معالجة المعلومات الواردة بطريقة تؤدي إلى توليد استجابات حركية مناسبة. ويهمل الدماغ عادة أكثر من 99% من كل المعلومات الحسية لأنها غير مهمة أو ليست ذات علاقة. فمثلاً لا يدرك الشخص عادة بأقسام جسمه الملامسة لملابسه ولا بضغط مقعده عند الجلوس، ولكن اهتمامه يتركز فقط على أي شيء عارض يظهر في حقل بصره، وحتى الضوضاء المستمرة في محيط الشخص تُبْعَد إلى خلفية الدماغ.

وبعد أن يتم اختيار المعلومة الحسية المهمة فإنها توصّل إلى المناطق الحركية المناسبة من الدماغ لتولد الاستجابات المرغوبة. ويسمى هذا التوصيل للمعلومة الوظيفة التكاملية integrative function للجهاز العصبي. فمثلاً إذا وضع شخص يده على موقد ساخن تكون الاستجابة المطلوبة سحبها، ويرافق ذلك استجابات أخرى مثل تحريك كل الجسم بعيداً عن الموقد، ويحتمل أن يصرخ الشخص متألماً ولكن هذه الاستجابات لا تمثل إلا فعاليات قسم صغير من الجهاز العصبي الحركي للجسم.

دور المشابك في معالجة المعلومات. المَشْبَك synapse هو نقطة الاتصال بين عصبون وآخر، ولهذا فهو موقع مفيد في التحكم بتوصيل الإشارات. وسنبحث في هذا الفصل تفاصيل وظيفة المشابك ولكن المهم أن نشير هنا إلى أن المشابك تعيّن اتجاه انتشار الاشارات العصبية في الجهاز العصبي. كما تنقل بعض المشابك الإشارات من عصبون لآخر بسهولة وينقل البعض الآخر الإشارات بصعوبة كما يمكن أيضاً أن تتحكم بعض الإشارات الميسّرة والمثبّطة من مناطق أخرى من الجهاز العصبي بالانتقال المشبكي، إذ أنها تفتح أحياناً بعض المشابك لتنقل الإشارات أو تغلق بعضها الآخر. وبالإضافة لذلك تستجيب بعض العصبونات بعد المشبكية عن طريق توليد عدد كبير من الدفعات بينما يستجيب بعضها الآخر ببضعة دفعات فقط. ولهذا فإن المشابك تقوم بفعالية انتقائية، فهي تحصر غالباً الإشارات الضعيفة ولكنها تسمح للإشارات القوية بالمرور، وغالباً ما تنتقي بعض الإشارات فتضخم الضعيف منها. وهي تمرر الإشارات في الغالب بالعديد من الاتجاهات بدلاً من إمرارها باتجاه واحد فقط.

خزن المعلومات ــ الذاكرة

يولّد جزء صغير من المعلومات الحسية المهمة استجابة حركية آنية، بينما يُخزن الكثير الآخر منها للتحكم المستقبلي في الفعاليات الحركية ولاستعمالها في عمليات التفكير. ويتم معظم خزن المعلومات في

قشرة المخ cerebral cortex وليس كله، فحتى المناطق القاعدية للدماغ وربما النخاع الشوكي، يمكنها خزن كميات محدودة من المعلومات.

وخزن المعلومات هو العملية التي نسميها الذاكرة memory، وهذه هي أيضاً إحدى وظائف المشابك. فكلما مرَّ أحد أنواع الإشارات الحسية خلال سلسلة من المشابك تصبح هذه المشابك أكثر قدرة على إمرار مثيلاتها من الإشارات خلالها في المرات اللاحقة، وتسمى هذه العملية التيسير facilitation. وبعد مرور نفس هذه الإشارات خلال هذه المشابك لمرات عديدة كثيرة فإنها تصبح ميسّرة لدرجة عالية بحيث تتمكن بعض الإشارات التي تتولد في الدماغ نفسه من أن تؤدي إلى نقل إشارات في نفس سلسلة المشابك بالرغم من عدم استثارة مداخلها الحسية، فيولّد ذلك لدى الشخص إدراكاً حسياً بالحس الأصلي بالرغم من أن ذلك لم يكن إلا مجرد ذكريات له فقط.

ولسوء الحظ لا نعرف لحد الآن الآلية الدقيقة لحدوث التيسير في المشابك في عملية الذاكرة، ولكننا سنبحث في الفصل 57 ما نعرفه عن ذلك وعن تفاصيل عملية الذاكرة الأخرى.

ومتى ما اختزنت الذاكرة في الجهاز العصبي فإنها تصبح جزءاً من آلية العملية الفكرية. وتقارن عمليات الدماغ الفكرية بين الخبرات الحسية الجديدة مع الذكريات المخزونة، وتساعد هذه في انتقاء المعلومات الحسية الجديدة وترسلها إلى مراكز الخزن المناسبة لاستعمالها في المستقبل وإلى المراكز الحركية لتوليد استجابات جسمية.

المستويات الرئيسية لوظيفة الجهاز العصبي المركزي

لقد ورث الجهاز العصبي الإنساني خواصّ معينة من كل مرحلة من مراحل التطور. وتوجد من هذا الإرث ثلاثة مستويات رئيسية للجهاز العصبي المركزي لها مميزات وظيفية خاصة هي: (1) مستوى النخاع الشوكي، (2) ومستوى الدماغ السفلي، (3) ومستوى الدماغ العلوي أو المستوى القشري.

مستوى النخاع الشوكي

غالباً ما نفكر بالنخاع الشوكي على أنه مجرد ممر للإشارات من محيط الجسم إلى الدماغ أو بالاتجاه المعاكس من الدماغ رجوعاً إلى الجسم. ولكن ذلك بعيد عن الحقيقة، إذ يستمر حدوث الكثير من وظائف النخاع الشوكي العالية التنظيم حتى بعد قطعه في منطقة الرقبة العليا. فمثلاً تتمكن الدارات العصبونية في النخاع الشوكي من توليد (1) حركات السير، (2) والمنعكسات التي تسحب أجزاء من الجسم بعيداً عن بعض الأشياء المؤلمة، (3) ومنعكسات تصلّب الساقين لإسناد الجسم ضد الجاذبية، (4) والمنعكسات التي تتحكم في الأوعية الدموية الموضعية والحركات المعدية المعوية وما شابه، بالإضافة للعديد من الوظائف الأخرى.

وفي الحقيقة، فإن المستويات العليا من الجهاز العصبي تعمل غالباً بواسطة الإشارات المرسلة إلى مراكز التحكم في النخاع الشوكي وليس بواسطة الإشارات المرسلة مباشرة إلى محيط الجسم، آمرة ببساطة مراكز التحكم في النخاع بإنجاز وظائفها.

مستوى الدماغ السفلي

تتحكم المناطق السفلية من الدماغ ـ النخاع والجسر والدماغ المتوسط والوطاء والمهاد والمخيخ والعقد القاعدية ـ بالعديد إن لم نقل بمعظم ما نسميه فعاليات الجسم اللاشعورية. ويتم التحكم اللاشعوري في الضغط الشرياني وفي التنفس بصورة رئيسية في النخاع والجسر. أما التحكم في التوازن فهو وظيفة مشتركة بين أقسام المخيخ القديمة والمادة الشبكية للنخاع الشوكي والجسر والدماغ المتوسط. وتتحكم بعض مناطق النخاع والجسر والدماغ المتوسط واللوزة والوطاء بمنعكسات الإطعام مثل الإلعاب salivation استجابة لتذوّق الطعام وتلمّظ الشفتين. ومن الممكن أن يتولد العديد من الأشكال الانفعالية، مثل الغضب والتهيج والاستجابة الجنسية ورد الفعل للألم والفرح لدى الحيوانات التي لا تملك قشرة المخ.

الدماغ العلوي أو المستوى القشري

بعد أن عددنا كل وظائف الجهاز العصبي التي يمكن أن تتم في مستويات النخاع الشوكي والدماغ السفلي، فماذا يتبقى لقشرة المخ من وظائف؟ والجواب عن ذلك معقد ولكنه يبدأ من أن قشرة المخ هي مخزن كبير الذاكرة. ولا تعمل القشرة لوحدها أبداً ولكنها تعمل دائماً بالمشاركة مع المراكز السفلى من الجهاز العصبي.

فمن دون قشرة المخ غالباً ما تكون وظائف مراكز الدماغ الأسفل غير دقيقة. فالمخزون الكبير من المعلومات القشرية يحوّل هذه الوظائف في العادة إلى عمليات محددة ودقيقة.

وأخيراً فإن القشرة المخية ضرورية لمعظم العمليات الفكرية، بالرغم من أنها لا تتمكن من القيام بذلك لوحدها. والحقيقة أن المراكز السفلية هي التي تسبب اليقظة في القشرة المخية فتفتح بذلك مصرف ذكرياتها لآلية التفكير في الدماغ.

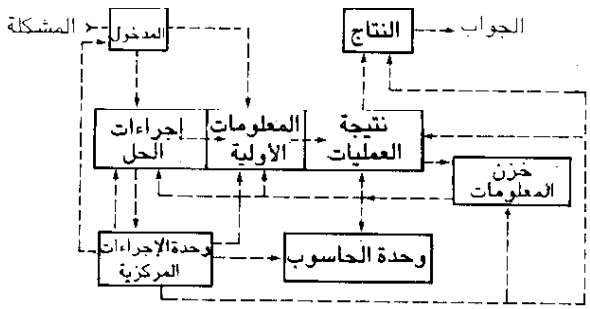
ولهذا فإن كل قسم من أقسام الجهاز العصبي يقوم بوظائف معينة، ولكن القشرة هي التي تفتح العالم كله للعقل.

مقارنة الجهاز العصبي بالحاسوب الالكتروني

عندما طوّر العلماء الحواسيب في العديد من المختبرات العالمية سرعان ما تبيّن لهم أن لهذه الآلات العديد من الخواص المشتركة مع الجهاز العصبي. إذ لاحظوا أولاً أن لكل هذه الآلات دارات دخل شبيهة بالقسم الحسي للجهاز العصبي ودارات خرج شبيهة بقسمه الحركي. كما توجد في الطرق الموصلة بين دخلها وخرجها آليات تقوم بمختلف أنواع الحسابات.

وفي الحواسيب البسيطة، تتحكم إشارات الدخل مباشرة في إشارات الخرج، ويتم ذلك بطريقة شبيهة بمنعكسات النخاع الشوكي البسيطة. ولكن في الحواسيب المعقدة تتعين إشارات الخرج بإشارات الدخل وبالمعلومات التي سبق خزنها في ذاكرة الحاسوب، وهذا شبيه بالمنعكسات الأكثر تعقيداً وبآليات التعامل في جهازنا العصبي العلوي. وبالإضافة لذلك تضاف للحاسوب، كلما زاد تعقيده، وحدة إضافية تسمى وحدة المعالجة المركزية central processing unit التي تعين تسلسل كل العمليات. وهذه الوحدة شبيهة بآلية دماغنا التي تساعدنا على تركيز انتباهنا أولاً لفكرة واحدة أو لفعالية حسية أو حركية، ثم إلى واحدة أخرى، ثم تتوالى الواحدة بعد الأخرى حتى يتم تسلسل الأفكار والفعاليات.

ويبين الشكل 45-4 رسماً تخطيطياً مقطّعاً بسيطاً لحاسوب حديث، وتوضح الدراسة البسيطة لهذا الشكل تشابه الحاسوب مع الجهاز العصبي. وهي تبين أن المكونات الأساسية لحاسوب الاستعمالات الاعتيادية شبيهة بتلك التي في الجهاز العصبي للإنسان وبأن الدماغ نفسه هو في الأساس حاسوب يجمع باستمرار معلومات حسية ويستعملها بجانب المعلومات المخزونة ليحسب وينظم مجرى فعاليات جسمه اليومية.



الشكل 45-4. رسم تخطيطي مقطّع للحاسوب الالكتروني الشائع الاستعمال، مبيناً مكوناته الأساسية وعلاقاتها ببعضها البعض.

مشابك الجهاز العصبي المركزي

من المعروف لدى كل طالب طبّ بأن المعلومات تُنقل في الجهاز العصبي المركزي بصورة رئيسية في شكل جهود فعل عصبية، تدعى ببساطة «دفعات عصبية»، خلال سلسلة من العصبونات المتتالية واحداً بعد الآخر. ولا يبدو للوهلة الأولى بأن كل دفعة (1) يمكن أن تُحصر أثناء نقلها من عصبون لآخر، (2) أو يمكن تغييرها من دفعة مفردة إلى دفعات متكررة، (3) أو يمكن تكاملها مع دفعات من عصبونات أخرى لتوليد نمط معقد جداً من الدفعات في العصبونات المتعاقبة. ومن الممكن تصنيف كل هذه الوظائف كوظائف مشبكية للعصبونات.

أنماط المشابك ــ الكيميائية والكهربائية

تنقل الإشارات العصبية من عصبون لآخر خلال المواصل بين العصبونات التي تسمى المشابك synapses. وهناك نمطان من المشابك: (1) المشابك الكيميائية، (2) والمشابك الكهربائية.

وتكون كل المشابك التي تستعمل لنقل الإشارات في الجهاز العصبي المركزي في الإنسان تقريباً مشابك كيميائية. ويفرز العصبون الأول لهذه المشابك مادة كيميائية تسمى ناقلة عصبية neurotransmitter في المشبك، وتؤثر هذه الناقلة بدورها على بروتينات المستقبلات الموجودة في غشاء العصبون الثاني لإثارته أو تثبيطه أو تحوير حساسيته بطريقة أخرى. وقد اكتشفت حتى الآن أكثر من 40 مادة ناقلة مختلفة. ومن بين أكثر الناقلات المعروفة الأسيتيل كولين والنورابينفرين والهستامين وحمض غاماأمينوبوتريك

(غابا) GABA والغليسين والسيروتونين والغلوتامات.

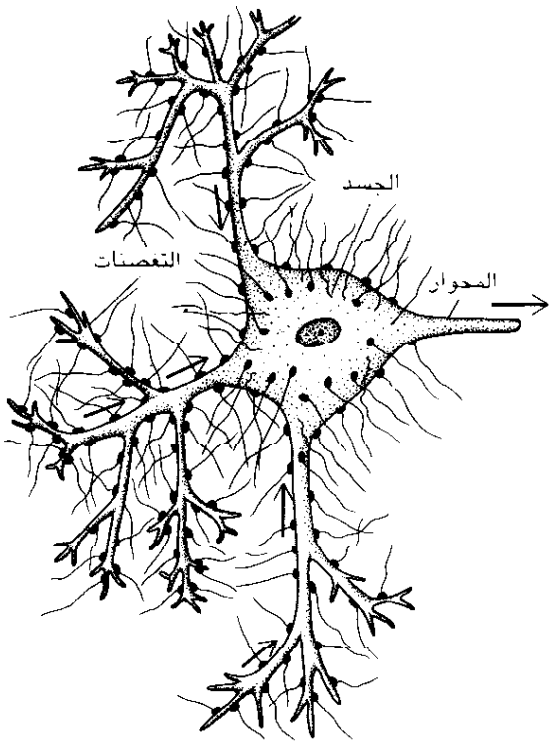
ومن الناحية الأخرى، تتصف المشابك الكهربائية بقنوات مباشرة توصل الكهرباء من خلية لأخرى. وتتكون معظم هذه القنوات من بنيات أنبوبية بروتينية صغيرة تسمى مواصل فرجوية gap junctions تسمح بحركة الأيونات بحرية من داخل إحدى الخلايا إلى الخلية التالية. وقد بحثت هذه المواصل في الفصل 4. وقد وجدت بضعة مواصل فرجوية فقط في الجهاز العصبي المركزي، وبصورة عامة لا يعرف شيء عن دلالتها. ومن الناحية الأخرى تنقل عن طريق هذه المواصل الفرجوية والمواصل الشبيهة الأخرى جهود الفعل من إحدى الألياف العضلية الملساء إلى الألياف الأخرى في العضلات الملساء الحشوية (الفصل 8) وكذلك من خلية عضلية قلبية إلى خلية أخرى في العضلة القلبية (الفصل 10).

التوصيل باتجاه واحد خلال المشابك الكيميائية. للمشابك الكيميائية خاصية مهمة جداً تجعلها مرغوبة بكثرة كناقلة لإشارات الجهاز العصبي. فهي تنقل الإشارات دائماً باتجاه واحد ـ أي من العصبون الذي يفرز الناقلة، والذي يسمى العصبون قبل المشبكي presynaptic neuron، إلى العصبون الذي تؤثر عليه الناقلة، والذي يسمى العصبون بعد المشبكي postsynaptic neuron. وهذا هو أساس التوصيل باتجاه واحد في المشابك الكيميائية، وهو يختلف عن التوصيل خلال المشابك الكهربائية التي يمكنها نقل الإشارات بالاتجاهين.

ولنفكر قليلاً في الأهمية الكبيرة لآلية التوصيل باتجاه واحد، فهي توجّه الإشارات نحو أهداف معينة. والواقع أن هذا النقل الخاص للإشارات نحو مناطق محدَّدة ومركزة في الجهاز العصبي وعند نهايات الأعصاب المحيطية هو الذي يجعل هذا الجهاز يؤدي وظائفه الحسية الكثيرة والتحكم الحركي والذاكرة والعديد من الوظائف الأخرى بكل كفاءة.

التشريح الفيزيولوجي للمشبك

يبين الشكل 45-5 عصبوناً حركياً نمطياً في القرن الأمامي من النخاع. وهو يتكون من ثلاثة أقسام رئيسية: الجسد soma وهو الجسم الرئيسي للعصبون، والمحوار axon ويمتد من الجسد إلى العصب المحيطي الذي يترك النخاع الشوكي، والتغصّنات dendrites وهي



الشكل 45-5. عصبون حركي نمطي مبيناً النهايات قبل المشبكية على جسد العصبون وتغصناته، كما يلاحظ فيه المحوار الوحيد.

امتدادات رفيعة تمتد من الجسد لحوالي مليمتر واحد إلى الباحات المحيطة بالنخاع.

ويتوضع عدد من الكنبات knobs الصغيرة التي يصل عددها لحوالي 10 000 كُنْب أو أكثر، والتي تسمى النهايات قبل المشبكية presynaptic terminals على سطوح التغصنات وجسد العصبون الحركي. ويتوضع حوالي 80-95% منها على التغصنات وحوالي 5-20% على جسد العصبون. وهذه الكنبات هي نهايات الليفات العصبية التي تتأصل من العديد من العصبونات الأخرى. وسيتضح لنا فيما بعد بأن العديد من هذه النهايات قبل المشبكية هي نهايات استثارية تفرز مادة تستثير العصبون بعد المشبكي. كما يوجد أيضاً عدد آخر من النهايات المثبطة التي تفرز مادة تثبط العصبون بعد المشبكي.

وتختلف العصبونات التي توجد في أقسام أخرى من النخاع والدماغ بصورة ملحوظة عن العصبون الحركي الأمامي في (1) حجم جسد الخلية، (2) وطول وحجم وعدد التغصّنات التي تتراوح أطوالها من اللاشيء تقريباً إلى العديد من السنتيمترات، (3) وطول وحجم