فيزيولوجيا العضلات

المحاضرة 13

المراجع المعتمدة

- الاطلاع على المراجع:

- Ref1: Walter F. Boron, Emile L. Boulpaep, Medical Physiology. Updated Edition, 2006, p: 673-680.
- Ref 2: Bruce R. Johnson PH.D, Human Physiology, 5th edition, 2010, p: 406-444.
- Periodical: The Journal of Physiology, monthly journal.

العناوين الرئيسية:

1- مقدمة
2- العضلات الهيكلية
3- البناء النسيجي – الجزيئي للعضلات الهيكلية
4- الوصل العصبي العضلي أو اللوحة الانتهائية المحركة
5- الآلية العامة للتقلص
6- الوحدة الحركية
7- التقلص في العضلات الهيكلية
8- مصادر الطاقة
9- الحرارة المتولدة في العضلة الهيكلية
10- قطع العصب

1. مقدمة:

تتألف العضلة من أعداد كبيرة من الألياف العضلية، كل ليف يحوي بروتينات قابلة للتقلص، وتعصب العضلة في منتصفها بعصب، ويمكن أن تثار كهربائياً أو كيميائياً، وتكون الاستجابة بالتقلص نتيجة لانتشار كمون العمل على طول غشائها.

تقسم عضلات الجسم البشري إلى ثلاثة أنواع هي:

- العضلات الهيكلية وهي عضلات مخططة إرادية.
- عضلة القلب وهي مخططة لا إرادية.
- العضلات الحشوية وهي ملساء لا إرادية.

إن فعالية العضلات هي التقلص. منشأ فعالية العضلات الهيكلية عصبي، وتزول الفعالية بقطع العصب المحرك. منشأ الفعالية القلبية ذاتي، ويمكن للوسائط الكيميائية والجملة الذاتية أن تعدل هذه الفعالية، وكذلك منشأ فعالية العضلات الحشوية ذاتي أيضاً مع تدخل الجملة العصبية الذاتية.

على الرغم من الاختلاف النسيجي والفيزيولوجي بين الأنواع الثلاث تبقى آلية التقلص على المستوى الجزيئي واحدة تقريباً.

2. العضلات الهيكلية:

تسمى العضلات المخططة أو الإرادية لأنها تخضع لسيطرة الجهاز العصبي المركزي، ولمظهرها المخطط بخطوط عاتمة ونيرة منتشرة بشكل معترض منتظم، وتسمى بالهيكلية لارتباط وظيفتها بالهيكل العظمي، تشكل 40% من وزن الجسم, وتؤلف مع العظام الجهاز الحركي.

3. البناء النسيجي- الجزيئي للعضلات الهيكلية:

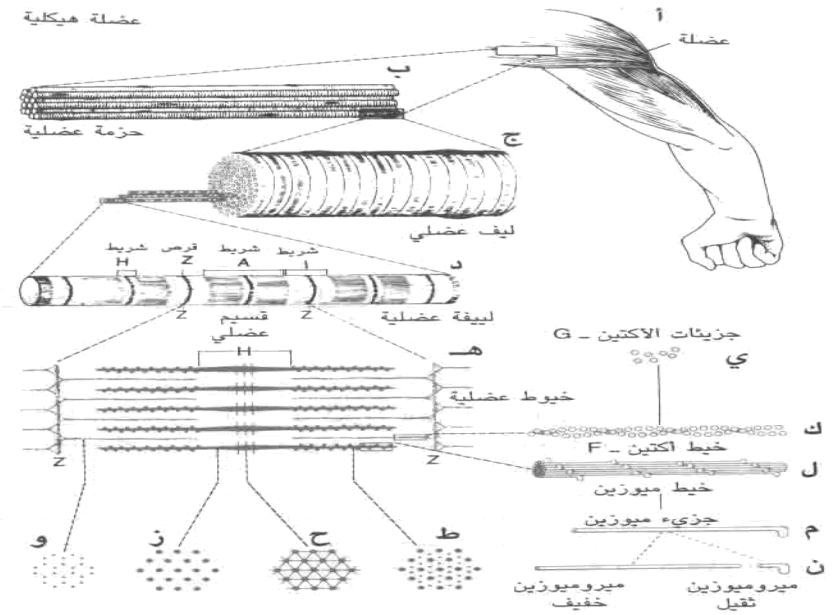
تتألف العضلات الهيكلية من مئات وحتى آلاف الخلايا العضلية المتطاولة ذات الشكل الأسطواني. يحيط بكل خلية عضلية غشاء خلوي يفصلها عن الخلايا الأخرى ويحقق استقلاليتها خاصة لغياب الجسور الخلوية بينها، وتحوي العديد من النوى. تسمى الخلية العضلية بالليف العضلي وتتوزع الألياف العضلية بشكل متواز بين نهايتي العضلة.

يبدو الليف بالمجهر العادي مؤلفاً من عدة حزم من الليفات العضلية، كل ليف يتألف من نوعين من الخيوط العضلية رفيعة وثخينة، متوازية فيما بينها، وهي جزيئات بروتينية مكوثرة، تسمى الخيوط الثخينة بالميوزين والرقيقة بالأكتين.

بالنظر إلى مقطع طولاني في الليف العضلي نشاهد مناطق نيرة وأخرى عاتمة متناوبة وممتدة على طول الليف، مما يعطيه الشكل المخطط, ومنه تسميتها بالعضلات المخططة. يعود وجود الحزم إلى اختلاف درجة كسر مكوناتها للضوء. تتألف الحزم العاتمة من خيوط الميوزين والنيرة من خيوط الأكتين.

اصطلح على تسمية مختلف أقسام الليف بأحرف رومانية، فالحزمة النيرة يرمز لها بحرف I من كلمة Isotropic أي متجانسة على الضوء المستقطب، وعلى الحزمة العاتمة حرف A من كلمة Anisotropic أي غير متجانسة، ويتوسطها منطقة نيرة تدعى H، تتصل نهايات الأكتين بالقرص Z, وهو بروتينات خيطية يعبر من ليف إلى آخر رابطاً إياها مع بعضها على كامل عرض الليف العضلي، لذلك يحدد الليف العضلي شرائط كما في الليف.

يدعى الجزء من الليف العضلي المتوضع بين قرصي Z متتالين بالقسيم العضلي Sarcomer ويبلغ طوله 2-2,6 ميكرومتر عندما يكون في كامل تمدده، وفي هذا الطول تتخطى خيوط الأكتين الميوزين تماماً، والطول عندها قادر على توليد قدرة التقلص العظمى، ويمثل القسم العضلي وحدة التقلص الرئيسية في العضلة.



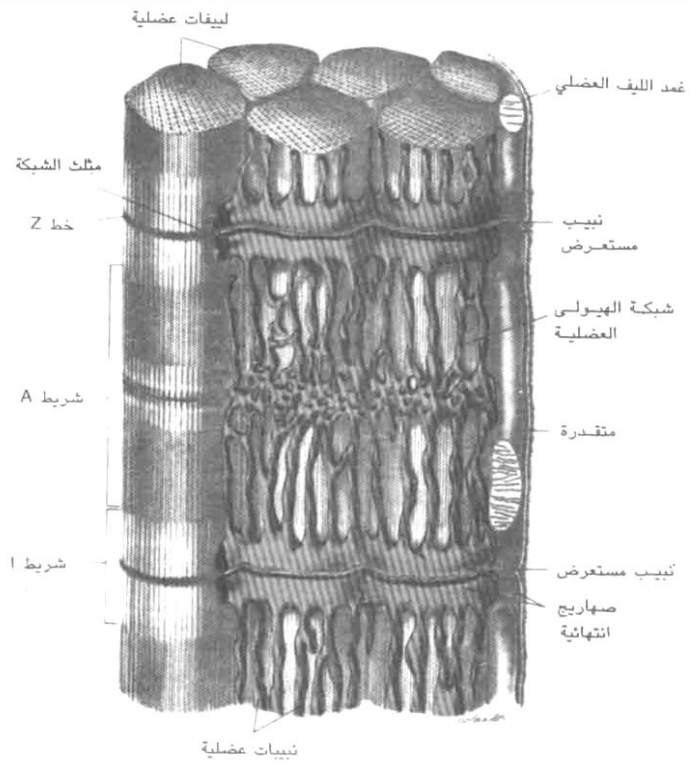
الشكل1: بنية العضلات المخططة.

الهيولى العضلية:

تتألف من المكونات داخل الخلية المعتادة، يعلق فيها الليف العضلي، وتحوي كميات كبيرة من البوتاسيوم والمغنزيوم والفوسفات والأنزيمات, بالإضافة إلى أعداد كبيرة من المتقدرات تتوضع بين الليفات بشكل موازٍ لها، مما يشير إلى حاجة الليفات الشديدة إلى ATP المصنوع في المتقدرات.

الشبكة الهيولية العضلية وجهاز النبيبات T:

تملك الخلية العضلية شبكة هيولية باطنة ذات أهمية كبيرة في التحكم بتقلص العضلة، يؤكد ذلك أن العضلات الأسرع تقلصاً تملك شبكة هيولية كبيرة. تشكل هذه الشبكة رداء غير تام حول كل ليف وتتألف من جزئين: نبيباتطولانية تمتد بشكل موازٍ لليفات العضلية, وتنتهي بحجيرات كبيرة تدعى الصهاريج الانتهائية، تجاور الجزء الثاني وهو الأنابيب المستعرضة T، وهي عبارة عن أنابيب صغيرة جداً تبدأ من الغشاء الخلوي وتخترق الليف إلى الجانب الآخر، أي تخترق الليف العضلي من طرفه إلى طرفه الآخر. تتفرع شبكة النبيبات T, وتتشابك فيما بينها لتمر بين جميع الليفات العضلية، تنفتح على المكان الذي نشأت منه أي على الوسط خارج الخلوي، وتحوي لمعتها السائل خارج الخلوي، وتعد استطالات داخلية للغشاء الخلوي. عندما ينتشر كمون العمل على طول الليف العضلي فإنه- وبشكل متواقت- سينتشر على طول الأنابيب T مما يحرض إطلاق شوارد الكالسيوم من الصهاريج الانتهائية.



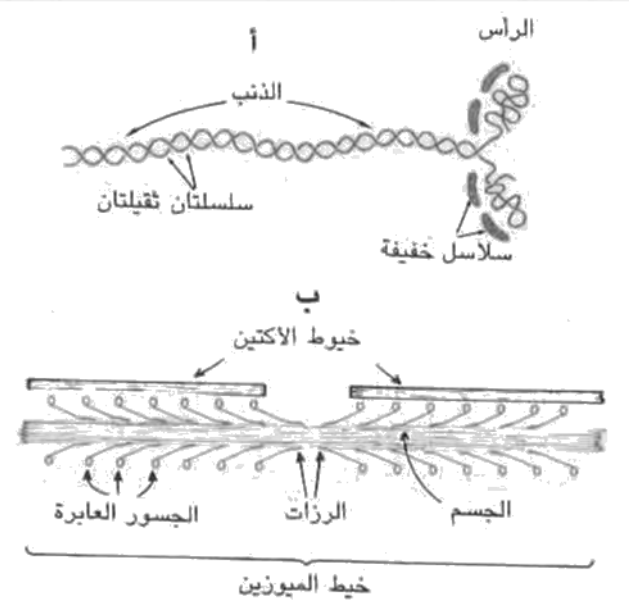
الشكل2: شبكة الأنابيب T والصهاريج الانتهائية.

العضلات عند الإنسان معدة بشكل أفضل للاستثارة السريعة, إذ لكل قسيم عضلي شبكتان من النبيبات T.

إذاً يعمل جهاز الأنابيب على إيصال كمونات العمل إلى جدر كل الليفات العضلية وإطلاق الكالسيوم الضروري للتقلص من الصهاريج الانتهائية في الشبكة الهيولية الباطنة.

<u>الميزات الجزيئية للخيوط القلوصة:</u>

أ- خيوط الميوزين: يتركب خيط الميوزين من 200 جزيء من جزيئات الميوزين، ويتألف جزيء الميوزين الواحد من 6 سلاسل عديدة الببتيد، سلسلتان ثقيلتان (وزن جزيئي 200000) وأربع سلاسل خفيفة (20000). تلتف السلسلتان الثقيلتان حول بعضهما لتشكلان حلزوناً مضاعفاً، وفي إحدى نهايتي الحلزون تنطوي نهايتا كل سلسلة لتشكل بروتيناً كروياً يدعى رأس الميوزين، وتشكل السلاسل الخفيفة أجزاء من رؤوس الميوزين بحيث سلسلتان لكل رأس تتحكمان بوظيفته أثناء التقلص، بذلك يتألف كل جزيء ميوزيني من حلزون متطاول مضاعف يدعى الذيل ورأسين.



الشكل-3: البنية الجزيئية للميوزين.

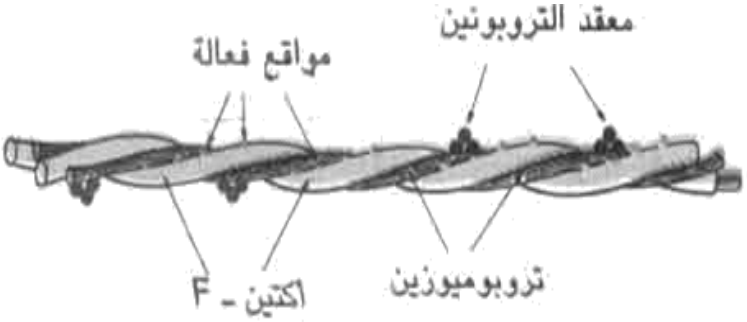
يجتمع 200 جزيء ميوزين لتشكيل خيط الميوزين، بحيث تجتمع ذيول الجزيئات لتشكل جسم الخيط وتبرز الرؤوس معلقة على جوانب الجسم ويبرز معها جزء من الحلزون لتشكل ذراعاً يتعلق به الرأس.

تدعى الأذرع والرؤوس الجسور المعترضة، وهي التي تتصالب مع الأكتين، وكل جسر قابل للطي في موضعين: الأول- عند اتصال الذراع بالجسم، والثاني- عند اتصال الرأس بالذراع. تسمح هذه الحركة للرأس بالاقتراب من الجسم أو الابتعاد عنه. لا يحتوي الجزء المركزي من خيط الميوزين على جسور معترضة, بينما في بقية الأجزاء تنتشر في جميع الاتجاهات حول الخيط.

يتميز رأس الميوزين بفعالية مشابهة لفعالية ATPase أي يمكن أن يشطر ATP للحصول على الطاقة الضرورية للتقلص.

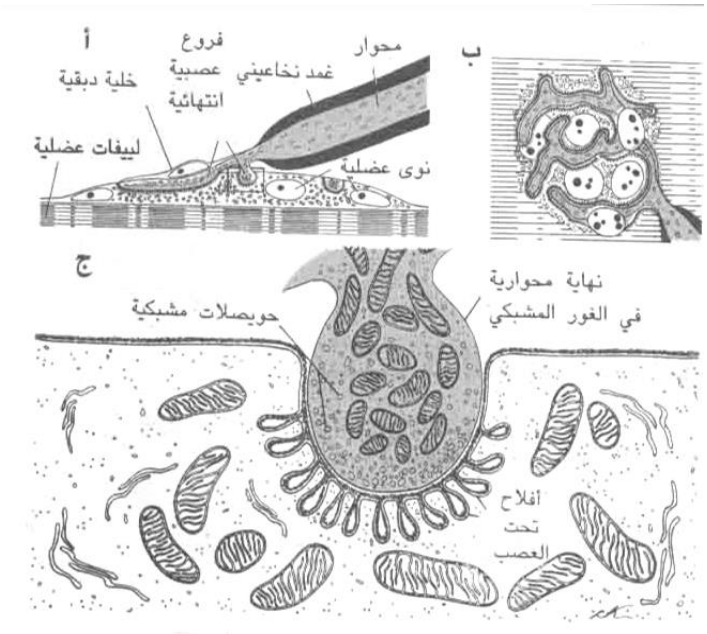
ب- خيط الأكتين: معقد، يتألف من 3 مكونات بروتينية مختلفة: هي الأكتين والتروبونين والتروبوميوزين.

يتألف الهيكل الرئيسي لخيط الأكتين من الأكتين F, ويتكون من سلسلتين مجدولتين بشكل حلزوني، وتتألف كل سلسلة من جزيئات مكوثرة من الأكتين G، ويرتبط كل جزيء من الأكتين G بجزيئات ADP تمثل المواقع الفعالة على خيوط الأكتين، والتي تتآثر فيها خيوط الميوزين لتسبب التقلص العضلي وتأخذ هذه المواقع شكلَ سلسلة تفصلها مسافات محددة. تتحد قواعد الخيوط بقوة مع الأقراصZ وتتبارز نهاياتها على جانبي الأقراص باتجاه القسيمين العضليين المتجاورين.



الشكل4: بنية الأكتين

تحوي خيوط الأكتين أيضاً بروتيناً آخر هو التروبوميوزين بشكل خيوط، ويلتف أيضاً بشكل حلزوني حول الأكتين وهو في أثناء الراحة يغطي المواقع الفعالة للأكتين.
أما التروبونين وهو جزيء بروتيني يرتبط بإحدى نهايتيه بالتروبوميوزين، فيتألف من ثلاث وحدات الأولى- تربونين A ذات إلفة للأكتين، والثانية T ذات إلفة قوية للتربوميوزين، والثالثة C ذات إلفة للارتباط بالكالسيوم، وبسبب ارتباط الكالسيوم بالتروبونين تبدأ عملية التقلص إذ يقود هذا الارتباط إلى تغير شكلي تبتعد على أثره خيوط التروبوميوزين عن المواقع الفعالة للأكتين فتنـزلق على خيوط الميوزين ويحدث التقلص.



الشكل5: بينة الوصل العصبي.

4. الوصل العصبي العضلي أو اللوحة الانتهائية المحركة:

يتفرع الليف العصبي عند نهايته- بعد أن يتجرد من غمد النخاعين – ليشكل مجموعة من النهايات العصبية، تنغلف كل نهاية بليف عضلي لكن دون أن تخترق الغشاء، وتغطى النهاية العصبية مع الجزء من غشاء الليف العضلي المقابل بخلية أو أكثر من خلايا شوان مما يؤمن عزلاً جيداً لليف. هذا التركيب أي النهاية العصبية والجزء المقابل من الغشاء والمسافة المشبكية بينهما مع الخلايا العازلة تشكل ما يسمى بالوصل العصبي العضلي.

القدم الانتهائية في النهاية العصبية بالوصل غنية بالمتقدرات, وبحويصلات إفرازية تحوي كميات كبيرة من وسيط عصبي هو الأستيل كولين، بينما يحوي غشاء الليف العضلي المقابل مستقبلات خاصة نيكوتينية، هي قناة صوديوم تنفتح بارتباط الأستيل كولين بها مما يؤدي إلى إطلاق كمون عمل.

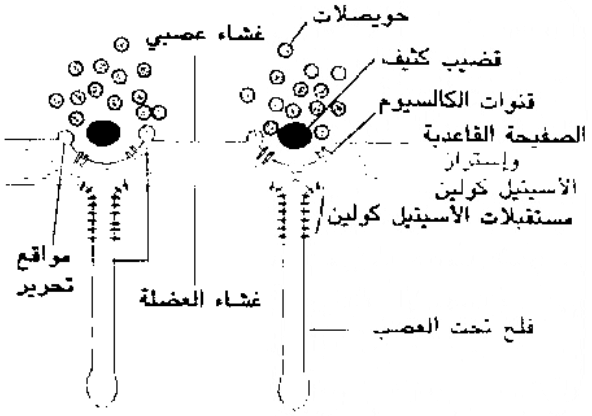
يتخرب الأستيل كولين في الشق المشبكي بأنزيم الكولين إستيراز.

كل فرع من فروع الليف العصبي يتصل بليف عضلي واحد, ولا يتصل بالليف العضلي فرع عصبي آخر.

عندما تصل السيالة إلى القدم الانتهائية تنفتح أقنية الكالسيوم, فيدخل إلى النهاية ويحرض إفراز الوسيط العصبي (الأستيل كولين) منها، يحوي غشاء الليف المقابل للقدم الانتهائية مستقبلات خاصة نيكوتينية Nm, وهي أقنية شاردية بشكل وحدات بروتينية تخترق غشاء الخلية العضلية، تبقى مغلقة وتنفتح عندما يرتبط الأستيل كولين بها, فتتدفق شوارد الصوديوم إلى داخل الليف العضلي (الكمون داخل الخلية سالب –80-90 ميللي فولط)، فتزداد الإيجابية داخل الليف العضلي، وإذا ارتفع إلى المستوى الحرج، تنفتح الأقنية السريعة وينطلق كمون عمل بنفس آلية الكمون بعد المشبك الاستثاري.

يتخرب أغلب الأستيل كولين المفرز مما يمنع تأثيره ثانية بعد زوال كمون العمل الأول.

إن زيادة (15-30) ميللي فولط تكفي لبدء تلقيم راجع إيجابي يفعل قنوات الصوديوم، إن كمون اللوحة المحركة الناجم عن تأثير الأستيل كولين أكثر من كافٍ لبدء كمون الفعل في الليف العضلي، أي تملك اللوحة المحركة عامل سلامةٍ كبيراً, ومن النادر أن يحدث تعب في الوصل العصبي العضلي في الحالات السوية.



الشكل6: آلية عمل الوصل العصبي العضلي

الأدوية المؤثرة على الوصل العصبي العضلي:

تملك بعض المركبات مثل النيكوتين والكاربكول- تأثيرات مماثلة لتأثير الأستيل كولين, ولا تتخرب بالكولين إستراز, فيبقى تأثيرها لفترة طويلة، وتسمى بمقلدات الأستيل كولين.

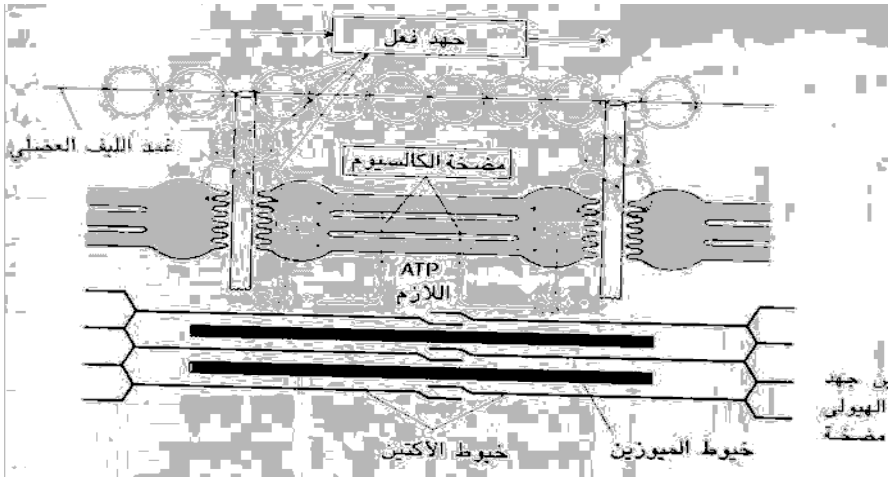
يمكن لمجموعة من المركبات أن تثبط الأستيل كولين إستيراز، فيبقى الأستيل كولين دون حلمهة ويستمر تأثيره لفترة طويلة. يستمر تنبيه الليف العضلي بتأثير بعض هذه المركبات لساعات مثل النيوستغمين والفيزوستغمين, وبعضها يستمر تأثيره لأسابيع مثل مركب إيزوبروبيل فلوروفوسفات وبالتالي يصبح تأثيره قاتلاً (وهو غاز الأعصاب).

يمكن لمجموعة من المركبات مثل الكورار ومثيلاته أن تحصر مرور الدفعات عبر اللوحة المحركة إلى العضلة عن طريق التنافس مع الأستيل كولين على المستقبلات فلا يستطيع النفوذ إليها وإطلاق كمون العمل.

اقتران الاستثارة بالتقلص:

تحوي الشبكة الهيولية العضلية شوارد الكالسيوم بتركيز مرتفع. يؤدي وصول التنبيه عبر الأنابيب T إلى خروج الكالسيوم من الصهاريج الانتهائية التي ترتبط بالتروبونين C, وتزيل تأثير معقد الاسترخاء, فتنكشف المواقع الفعالة على الأكتين وتنطلق عملية التقلص.

يستمر التقلص طالما شوارد الكالسيوم موجودة. تعمل مضخات الكالسيوم على إعادة ضخ الكالسيوم باتجاه الشبكة الهيولية وينخفض تركيزها فيعود معقد الاسترخاء ويزول التقلص، أي فقط بعد كمون العمل يرتفع الكالسيوم ويحدث التقلص، ومن هنا ثنائية الاستثارة – تقلص, أي يطلق التنبيه الكالسيوم الذي بدوره يطلق التقلص، وفقط التنبيه يطلق الكالسيوم. الظواهر الكهربائية لّليف العضلي وحركة الشوارد عبر الغشاء تشابه مثيلاتها في الليف العصبي مع بعض الاختلافات، مستوى كمون الراحة متقارب حوالي –90، مدة كمون العمل حوالي (1-5) ميللي ثانية (في العصب 1 ميللي ثانية)، سرعة التوصيل (5-3) م/ثا, وتساوي 18/1 من سرعة التوصيل في الليف العصبي. توزّعُ الشوارد على جانبي غشاء الليف العضلي مماثلٌ لتوزعها في الليف العصبي، زوال الاستقطاب يحدث لدخول الصوديوم، وعودة الاستقطاب تحدث لخروج شوارد البوتاسيوم.



الشكل 7: انتشار كمون العمل عبر النبيبات.

5. الآلية العامة للتقلص:

نلخص الخطوات الأساسية لعملية التقلص:

1. يصل التنبيه على شكل كمون عمل عبر الليف العصبي إلى النهاية العصبية في الوصل العصبي العضلي فيؤدي:
2. إلى دخول شوارد الكالسيوم التي تغير من خصائص الحويصلات
3. مما يؤدي إلى إطلاق الوسيط الناقل وهو الأستيل كولين
4. يرتبط الأستيل كولين بالمستقبلات النيكوتينية في غشاء الخلية العضلية
5. فتنفتح أقنية الصوديوم المرتبطة بالمستقبلة وتتدفق شوارد الصوديوم
6. مما يؤدي إلى نشوء كمون عمل في الليف العضلي ينتشر عبر جهاز الأنابيب T
7. فتتحرر شوارد الكالسيوم من الصهاريج الانتهائية, وتنتشر بين خيوط الأكتين والميوزين, وترتبط بالتروبونين
8. مما يؤدي إلى تغير في طبيعته، فتنفك خيوط التروبوميوزين عن الأكتين تاركةً المواقع الفعالة للأكتين مكشوفة
9. فتنزلق خيوط الأكتين على الميوزين ويتقاصر طول الليف العضلي.

تعمل مضخات الكالسيوم على إعادة شوارد الكالسيوم نحو مخازنها في الشبكة الهيولية والصهاريج الانتهائية، فيتحرر الكالسيوم من التروبونين, ويعود التروبوميوزين ليغطي المواقع الفعالة للأكتين، أي يحدث الاسترخاء وهو بدورة يحتاج إلى طاقة من أجل عمل مضخات الكالسيوم.

أنماط الألياف العضلية:

يوجد نمطان رئيسيان هما: الألياف السريعة والألياف البطيئة، وتوجد أنماط وسطية بينهما.

تكثر الألياف السريعة في العضلات سريعة التقلص, والبطيئة في العضلات بطيئة التقلص.

أهم ما يميز الألياف السريعة هو حجم ألياف أكبر مع شبكة هيولية واسعة، تحرر بشكل سريع كميات كبيرة من الكالسيوم، وتحوي كميات كبيرة من أنزيمات تحلل السكر دون تطور لعدد المتقدرات أو الإمداد الدموي.

بينما الألياف البطيئة أصغر حجماً وأليافها المعصبة أصغر، لكنها تملك تروية دموية متطورة وأعداداً كبيرة من المتقدرات, مع كميات كبيرة من الميوغلوبين الذي يخزن الأكسجين.

نفهم من هذا الوصف أن الألياف السريعة متلائمة مع التقلص العضلي شديد السرعة والقوة مثل القفز والجري لمسافة قصيرة، على حين الألياف البطيئة متلائمة مع الفعالية المديدة، مثل دعم الجسم ضد الجاذبية والرياضات الطويلة كالماراثون.

6. الوحدة الحركية:

تتلقى العضلات الهيكلية تعصيباً من أعصاب حركية تعتمد عليها في أدائها الوظيفي.

يعصب الليفُ العصبي عدداً من الألياف العضلية يختلف عددها بحسب نمط العضلة. يتفرع كل ليف عصبي إلى فروع عديدة، بحيث كل فرع عصبي يشكل وصلاً عصبياً عضلياً مع ليف عضلي واحد, ولا يتلقى الليف العضلي أي تعصيب آخر. يشكل الليف العصبي مع الألياف العضلية التي يعصبها وحدة وظيفية تسمى الوحدة الحركية.

تتميز العضلات ذات الارتكاس السريع والدقة في الأداء بعدد قليل من الألياف العضلية في وحداتها الحركية، كما في العضلات الحنجرية التي تتألف وحداتها الحركية من (2-3) ألياف عضلية، بينما الوحدات الحركية للعضلات التي لا تتطلب دقة في الأداء تحوي أعداداً كبيرةً من الألياف العضلية تصل حتى المئات.

إن الألياف العضلية المؤلفة لوحدة حركية لا تجتمع مع بعضها بشكل حزمة واحدة، وإنما تنتشر في العضلة بشكل حزم صغيرة وتتوضع مع ألياف من وحدات حركية أخرى، مما يسمح للوحدات الحركية أن تتقلص داعمةً بعضها بعضاً أكثر مما لو كانت منفصلة تماماً.

تشكل الوحدة الحركية الوحدة الوظيفية للعضلة وهي تخضع لقانون كل شيء أو لا شيء. عندما يتنبه ليف عصبي بشكل كاف تتجاوب ألياف الوحدة الحركية التابعة له بشكل أعظمي، لكن على مستوى العضلة كلما ازدادت شدة التنبيه ازداد عدد الوحدات الحركية المنبهة, وبالتالي تزداد شدة استجابة العضلة، أي إن العضلة ككل لا تخضع لقانون كل شيء أو لا شيء لأن استجابتها متغيرة مع تغير شدة التنبيه.

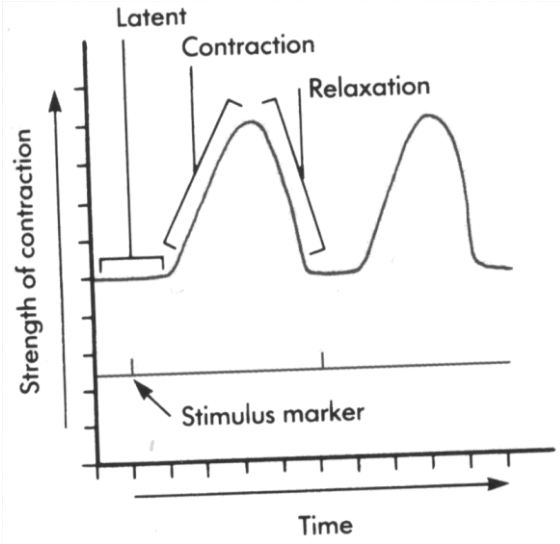
7. التقلص في العضلات الهيكلية:

يجب التفريق بين الظواهر الكهربائية والتغيرات الميكانيكية في العضلة. لا يوجد تقلص عضلي دون تغير في الفعالية الكهربائية, وكل تبدل كهربائي يؤدي إلى التقلص.

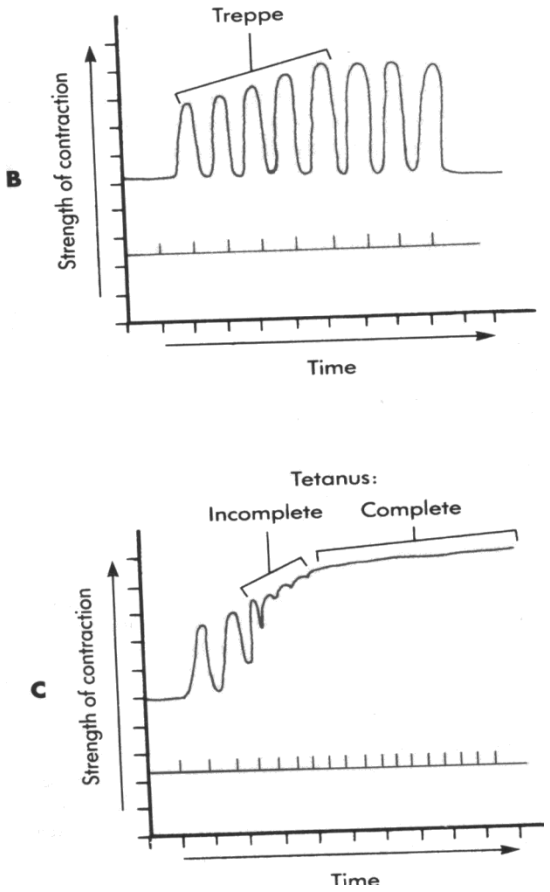
النفضة العضلية:

عندما تنبه ليفاً عضلياً بمنبه كافٍ فإنه يتقلص بسرعة ثم يسترخي لمدة أطول من التقلص, ويسجل جهاز التسجيل موجة تسمى النفضة العضلية.

يحدث كمون العمل والنفضة بوقت واحد، حيث تبدأ النفضة بعد 2 ميللي ثا من زوال الاستقطاب، وتختلف مدتها بحسب طبيعة الألياف، ففي السريعة لا تتجاوز 7 ميللي ثانية كما في عضلات اليد، وتصل إلى 100 ميللي ثانية في عضلات الظهر.



الشكل8: التكزز التام والناقص.



الشكل5-9: النفضة العضلية.

a مرحلة وصول التنبيه.

b- مرحلة صعود المخطط وهي مرحلة التقلص, ويتعلق ارتفاعه بشدة التقلص.

c- مرحلة الاسترخاء وعودة الليف إلى مستوى الراحة, وتختلف المدة حسب أنماط الليف.

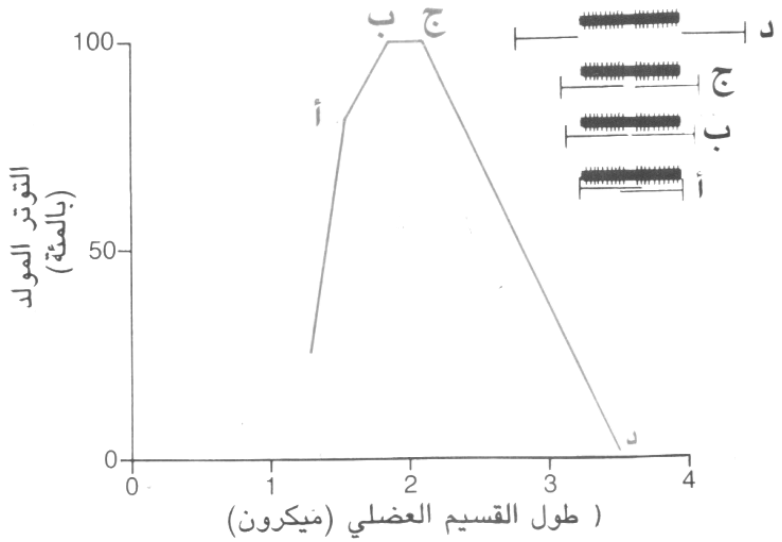
دمج التقلصات:

تستجيب العضلة للتحريض الكهربائي بحدوث نفضة عضلية, وإذا تكرر التحريض بفواصل زمنية أطول من الزمن اللازم لنفضة بسيطة نلاحظ حدوث سلسلة من النفضات العضلية البسيطة ذات ارتفاعات متساوية، وعندما يزداد تواتر التحريض إلى درجة لا تمكن العضلة من الاسترخاء ينطلق تقلصٌ قبل عودة العضلة إلى طولها الأصلي أي قبل الاسترخاء، وعند درجة معينة تندمج التقلصات في تقلص مشترك واحد يقال له التقلص التكززي. وتردد التنبيه الذي يؤدي إلى هذا التقلص مختلف حسب نوع العضلات، فالعضلات عالية الدقة تتطلب تردداً أعلى من العضلات منخفضة الدقة، فمثلاً عضلات العين المحركة تستجيب لـ -350 منبه/ثا, بينما العضلة الخياطية الفخذية تستجيب لِـ-30 منبه/ثا.

إن اندماج التقلصات لا يرافقه اندماج في جهود العمل والتي تبقى منفصلة عن بعضها.
القوة التي نصل إليها في مرحلة التكزز أكبر ب-4 مرات من القوة في نفضة واحدة.
عندما يقع التحريض أثناء الاسترخاء يحدث التكزز الناقص، وإذا وقع في فترة التقلص دعي بالتكزز التام.
تزداد قوة التقلص أثناء التكزز سواء التام أو الناقص بسبب تراكم شوارد الكالسيوم لعدم توفر الوقت الملائم لمضخات الكالسيوم لإعادتها إلى مخازنها.
ويمكن أن يتكرر التنبيه مباشرة بعد تمام الاسترخاء، ونلاحظ هنا زيادة في قوة التقلص دون حدوث تكزز، والسبب هو ارتفاع درجة الحرارة الناجم عن تكرار التقلص.

العلاقة بين الطول والقوة:

يتقلص الليف العضلي عندما يتنبه، وتتناسب القوة مع عدد الروابط بين الأكتين والميوزين، تكون القوة التكززية عظمى عندما يكون طول القسم 2,2 ميكرومتر، لأنه عند هذا الطول يكون عدد الروابط أعظمياً، وتقل القوة بسرعة عندما يزداد طول القسم إلى أطول من3,20 حيث تنعدم الروابط بين الأكتين والميوزين.
وتقل عندما يكون طول القسم أقل من 2,05 حين تجتاز الخطوط الرفيعة إلى الجهة المقابلة فتشكل منها روابط وتسحبها بالاتجاه المعاكس، فالقوة الفعلية تنقص عندما تلتصق الخيوط الغليظة بخيوط Z. نلاحظ من المخطط أن قوة التقلص تزداد بازدياد طول الليف حتى الحد الذي يحقق أكبر تراكب بين خيوط الأكتين ورؤوس الميوزين، لتبدأ بعدها قوة التقلص بالتناقص إذا ما ازداد طول الليف أكثر من ذلك.
هذا ينطبق على العضلة ككل مع تغير بالمخطط، لأن العضلة تحتوي على كمية كبيرة من النسيج الضام.



الشكل9: العلاقة بين الطول والقوة.

للتقلص العضلي نوعان:
- تقلص متساوي الطول: يترافق بزيادة في الضغط داخل العضلة دون تغير في طولها.
- تقلص متساوي الضغط: تقصر المسافة بين طرفيها بسبب التقلص, ويبقى الضغط فيها ثابتاً.

تتصف العضلات بالمرونة. وإذا قطعت العضلة من مرتكزاتها يقصر طولها بمعدل 20 %, ويسمى بطول التوازن.

في حالة الراحة عندما تكون العضلة غير خاضعة لأي تقلص يمكن أن تكون خاضعة لقوة منفعلة وهي القوة التي تبديها العضلة في حالة الشد عليها. وتزداد القوة المنفعلة كلما زاد الشد على العضلة وزاد طولها بدءاً من طور الراحة.

تبدي العضلة عندما تتقلص قوة كلية تمثل مجموع القوة الفاعلة الناجمة عن التقلص والمنفعلة الناجمة عن الشد (إذ كان موجوداً قبل بدء التقلص), وتتناسب القوة الفاعلة والكلية طرداً مع طول العضلة حتى طور الراحة وبعدها يصبح التناسب عكسياً.

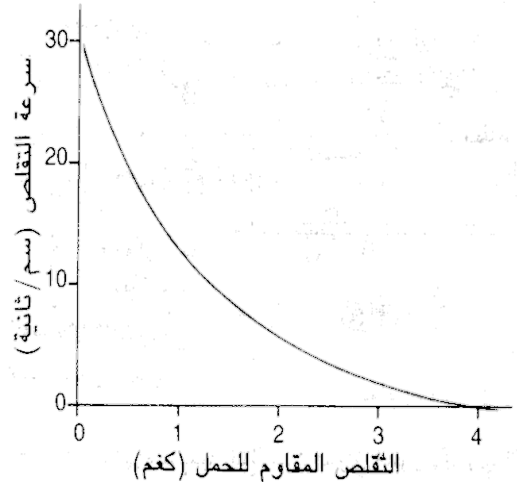
نلاحظ من الشكل أن أقصى قوة تقلص تحصل عليها العضلة عندما تتقلص بدءاً من طول الراحة، وأن قوة التقلص تزداد بزيادة الطول حتى الوصول إلى طور الراحة وبعده تتناقص. توتر العضلة (القوة المنفعلة) يزداد مع زيادة طول العضلة بدءاً من طور الراحة، ونلاحظ أن القوة الفاعلة (الكلية- المنفعلة) تقل عندما تتمدد العضلة إلى أطول من طولها السوي.

هذه العلاقة بين القوة والطول تؤكد نظرية القسيمات العضلية بآلية التقلص العضلي.

العلاقة بين الثقل وسرعة التقلص:

تتناسب سرعة التقلص وتحريك الأجسام عكساً مع ثقل الجسم، تكون السرعة في حدها الأقصى عندما تكون العضلة في طور الراحة ولا تواجه أي حمل.

تنقص سرعة التقلص كلما أخذ طول العضلة بالابتعاد عن طور الراحة سواء أكان زيادة أو نقصاناً، وكذلك تنقص سرعة التقلص كلما زاد الحمل, وعندما يبلغ الحمل القوة القصوى للعضلة لا يتولد أي تقلص.



الشكل10: العلاقة بين المقاومة وسرعة التقلص

8. مصادر الطاقة:

تحتاج عمليتا التقلص والاسترخاء إلى طاقة, والمصدر السريع هو الفوسفات العضوية الموجودة في العضلة، واستقلاب الشحوم والسكريات يمثل المصدر الأساسي.

العضلات ما هي إلا محولات للطاقة تحول الطاقة الكيميائية إلى ميكانيكية. يحتاج التقلص العضلي إلى طاقة ATP في عملية ارتباط الجسور المعترضة مع خيوط الأكتين, ولإعادة توزيع الشوارد بمضخة Na, k ATPase, ولإعادة ضخ الكالسيوم إلى الشبكة الهيولية الباطنة.

كمية الـ ATP المتوفرة تكفي لتقلص عضلي لمدة 1- 2 ثانية. لذلك يجب أن تعاد فسفرة ADP إلى ATP, ومصادر إعادة الفسفرة هي:

1- الفوسفوكرياتين: ينشط ويحرر طاقة مما يعيد الـ ADP إلى ATP, لكن كلا الجهازين لا يكفيان لأكثر من (7- 8) ثانية.

2- الغليكوجين: يخزن مسبقاً في الخلايا العضلية, ويمكن أن يتفكك بسرعة إلى بيروفيك (حمض الحصرم), واللاكنيك (حمض اللبن)، وتستخدم الطاقة لإعادة قلب ADP إلى ATP الذي يستخدم في التقلص أو لإعادة بناء الفوسفوكرياتين، إن أهمية الغليكوجين تكمن في إمكانية تحلله دون وجود الأوكسجين وسرعة تشكيله لـATP ضعف ونصف سرعة تشكيله باستخدام أكسدة الطعام، لكن المشكلة في تراكم منتجات التحلل مما يجعل إمكانية استعمال الغليكوجين محدودة ولا تتجاوز الدقيقة الواحدة.

3- المصدر الأخير هو الاستقلاب التأكسدي أي اتحاد O_2 مع عناصر الطعام المختلفة لتحرير الطاقة ونحصل على 95% من الطاقة اللازمة للتقلص.

ويستعمل هنا السكريات والدسم والبروتينات والأهم على المدى الطويل هو الدسم، تستعمل الطاقة لإعادة تشكيل الـ ATP.

9. الحرارة المتولدة في العضلة الهيكلية:

يجب أن تتساوى الطاقة المقدمة للعضلة مع الطاقة الناتجة والتي تكون بشكل عمل عضلي وحرارة. المردود الميكانيكي للعضلة يعادل 50%, أي نسبة طاقة العمل/ الطاقة المقدمة (التقلص متساوي الضغط), ويكون في التقلص متساوي الطول صفر%.

ندرك من هذا كمية الحرارة المنتجة في العضلة في أثناء العمل. أثناء الراحة تنتج حرارة لعملية الاستقلاب الداخلي.

وبعد التقلص تستمر العضلة بإنتاج الحرارة بسبب العمليات الاستقلابية التي تبديها حالة العضلة من حيث الطاقة إلى ما سبق التقلص. أي إن الحرارة تنتج في حالة الراحة وفي أثناء التقلص، ثم بعد التقلص لإعادة المحتويات لما كانت عليه.

10. قطع العصب:

لا تتقلص العضلة إلا استجابة لتحريض وارد بالعصب المحرك التابع لها. يؤدي قطع العصب لشلل رخو وضمور العضلة، ويحدث فرط استثارة وتزداد حساسيتها للأستيل كولين، وتظهر تقلصات غير منتظمة تسمى بالرجفان العضلي الليفي، وهي تقلصات دقيقة وغير منتظمة في بعض الألياف وتختلف عن التقلصات الجزئية التي تحدث بشكل فعال بسبب إفراغ شحنة كهربائية من العصبونات الحركية الشوكية. ومع استمرار القطع لأكثر من سنة تتحول العضلة إلى نسيج ليفي شحمي.

المحاضرة

إضافات مدرس المقرر