الفصل الثاني:

دور العضلة الهيكلية المخططة في تحويل الطاقة

تمهيد:

يمكن كل من التنفس والتخمر من هدم المواد العضوية المستهلكة، وتحرير الطاقة الكامنة فيها، لتصبح على شكل ATP، قابل للاستعمال في مختلف الظواهر المستهلكة للطاقة، كالتفاعلات الكيميائية، مواجهة تغيرات درجة الحرارة، أو القيام بحركة. يعتبر التقلص العضلي اذن من الظواهر المستهلكة للطاقة.

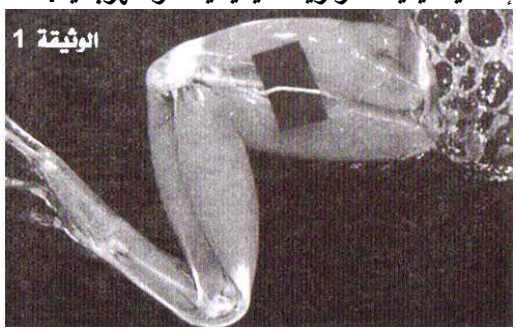
- ☒ ما مصدر الطاقة اللازمة للنشاط العضلي؟
- ☒ ما هي البنيات المسؤولة عن التقلص العضلي؟
- ☒ كيف يتم التقلص العضلي؟
- ☒ كيف تستعمل الخلايا العضلية الكليكوز كمصدر للطاقة؟

I – الدراسة التجريبية للتقلص العضلي.

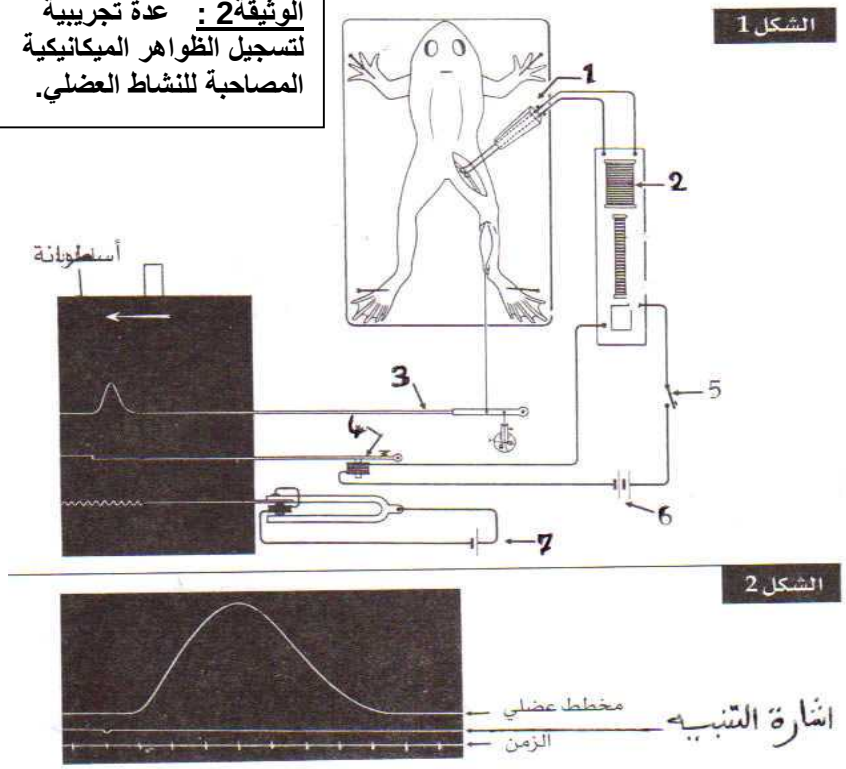
① تسجيل التقلص العضلي عند الضفدعة

أنظر التركيب التجريبي: الوثيقة 1، الوثيقة 2، لوحة 1.

الوثيقة1:
لدراسة التقلص العضلي، يتم أخذ ضفدعة، فيخرب دماغها ونخاعها الشوكي،لإزالة كل ردود الفعل الإرادية واللاإرادية.
بعد تثبيتها على لوحة خشبية، نشرح الطرف الخلفي لإبراز العصب الوركي :الوثيقة2. نقطع وتر العقب لعضلة بطن الساق، ونوصله بجهاز تسجيل التقلص العضلي الشكل 1.
نهيج العضلة إما مباشرة، بوضع الالكترودين المهيجين على سطحها، أو بصفة غير مباشرة، بوضع الالكترودين على العصب الوركي.
تهيج العضلة بواسطة مهيجات اصطناعية، تكون إما ميكانيكية، حرارية، كيميائية، أو كهربائية.

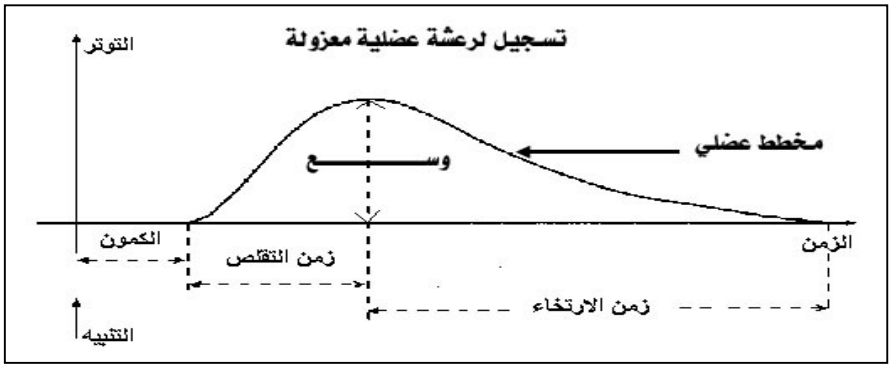


الوثيقة2 : عدة تجريبية لتسجيل الظواهر الميكانيكية المصاحبة للنشاط العضلي.



② – استجابة العضلة للتهييج الكهربائي:

a – استجابة العضلة لاهاجة منفردة: أنظر الوثيقة2 الشكل 2 لوحة 6.

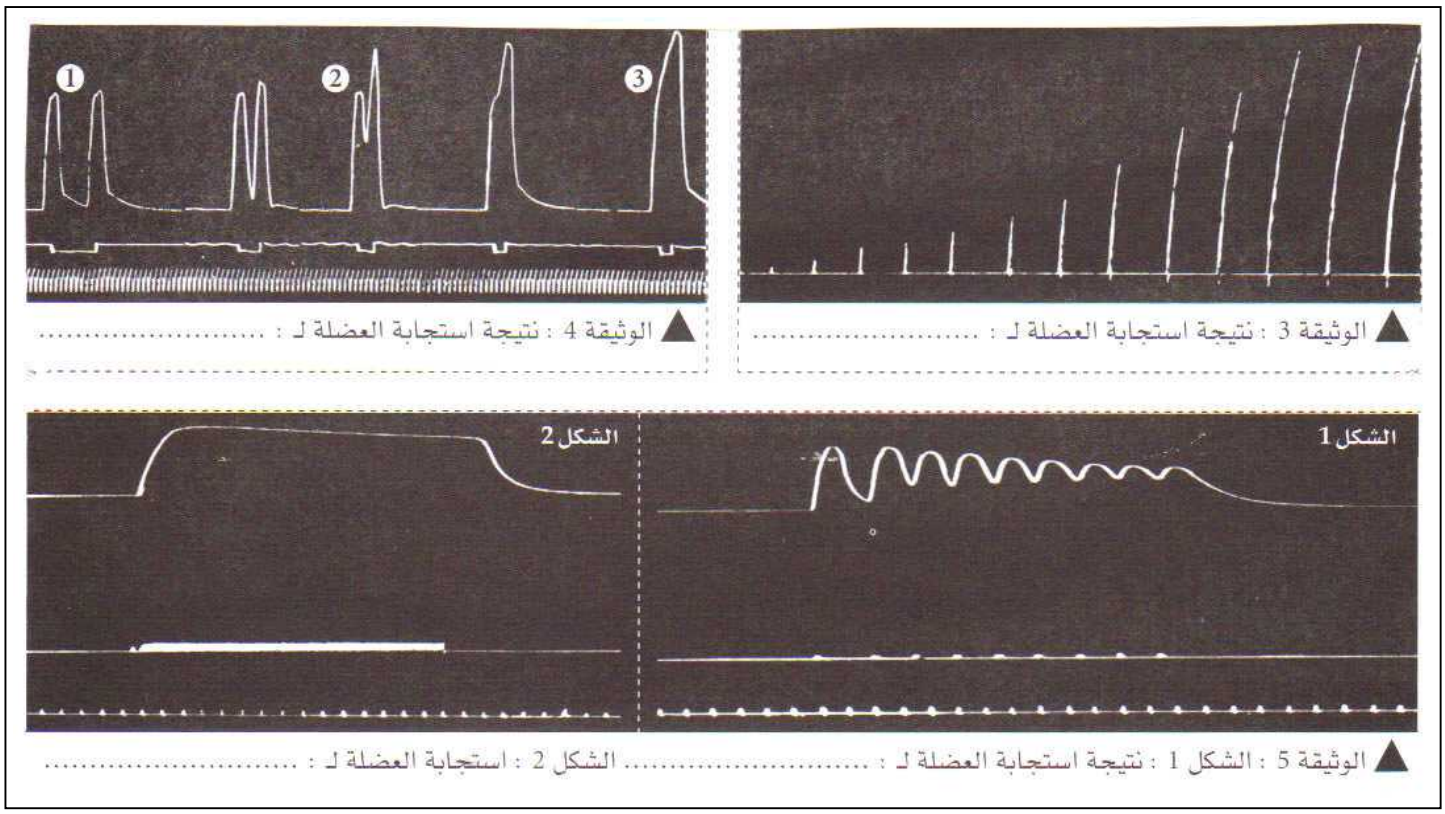


عند تسليط اهاجة فعالة، تستجيب العضلة للاهاجة، فنقول أنها هيوجة،(Excitable) ولها خاصية الاهتياجية.
كما تستجيب بالتقاص، فنقول أنها قلوصة، وتسمى هذه الخاصية بالقلوصية.
عند تطبيق اهاجة منفردة، نحصل على تقاص قصير الأمد، معزول، وبسيط، نتكلم عن رعشة عضلية (Secousse musculaire). والتي يمكن تقسيمها إلى ثلاث مراحل:

- فترة الكمون: هي الفترة الزمنية الفاصلة بين لحضة الاهاجة وبداية الاستجابة.
- مرحلة التقاص : يرتفع خلالها توتر العضلة.
- مرحلة الارتخاء : خلالها تأخذ العضلة أبعادها الأولية.

ملحوظات:

★ يتغير شكل التخطيط العضلي حسب سرعة الأسطوانة المسجلة.
★ أنظر الوثيقة3 لوحة 1 : عندما نخضع العضلة لاهاجات متباعدة، ذات شدة متصاعدة، لا تظهر الاستجابة إلا عندما تكون شدة التهييج تساوي أو أكبر من قيمة معينة، تسمى عتبة الاهاجة (Seuil d'excitation)، أو الريوباز.



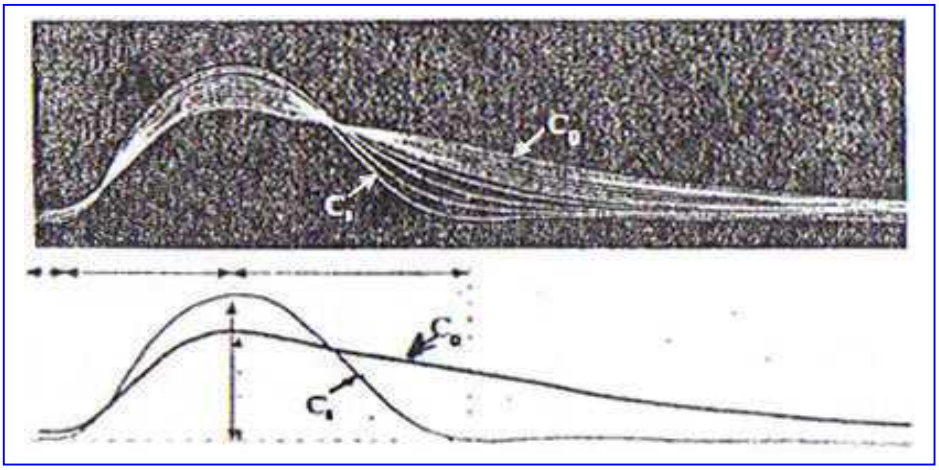
b – استجابة العضلة لاهاجتين متتاليتين: أنظر الوثيقة 4 لوحة1.

تختلف الاستجابة في هذه الحالة حسب اللحظة التي تسلط فيها الاهاجة الثانية، وهكذا نميز ثلاث حالات:
① إذا وقع التهييج الثاني بعد انتهاء الرعشة الأولى، تكون الرعشتان متماثلتين ومستقلتين.
② إذا وقع التهييج الثاني خلال مرحلة ارتخاء الاستجابة الأولى، يكون وسع الاستجابة الثانية أكبر من وسع الاستجابة الأولى، كما يبقى المنحنيان منفصلان. نتكلم عن الالتحام غير التام.
③ إذا وقع التهييج الثاني خلال مرحلة تقاص الاستجابة الأولى، يلاحظ تراكب المنحنيين. نتكلم عن الالتحام التام، يكون فيه وسع التوتر الاجمالى أكبر من وسع التوتر خلال رعشة معزولة.

c – استجابة العضلة لاهاجات متتالية: أنظر الوثيقة5 لوحة 1.
عند تطبيق سلسلة من الاهاجات المتتالية، نلاحظ حالتين:

الشكل 1: عندما يكون ترددالتهييجات ضعيف، نحصل على تسجيل مكون من ذبذبات متتالية، نسمي هذا التقلص الكزاز الناقص (Tétanos imparfait)، والذي يفسر بالتحام غير تام للرعشات العضلية، لأن كل تهييج يحدث خلال فترة الارتخاء للاستجابة السابقة.

الشكل 2: عندما يكون تردد التهييجات قوي، نحصل على تسجيل منبسط مستقيم، نسمي هذا التقلص الكزاز التام (Tétanos parfait)، والذي يفسر بالتحام تام للرعشات العضلية، لأن كل تهييج يأتي في فترة التقلص للاستجابة السابقة.



ملاحظة: استجابة العضلة المتعبة.

عندما تصبح العضلة متعبة، بعد خضوعها لعدة اهاجات، فان وسع الاستجابة يصبح ضعيفا، كما أن مدة الارتخاء تصبح طويلة.

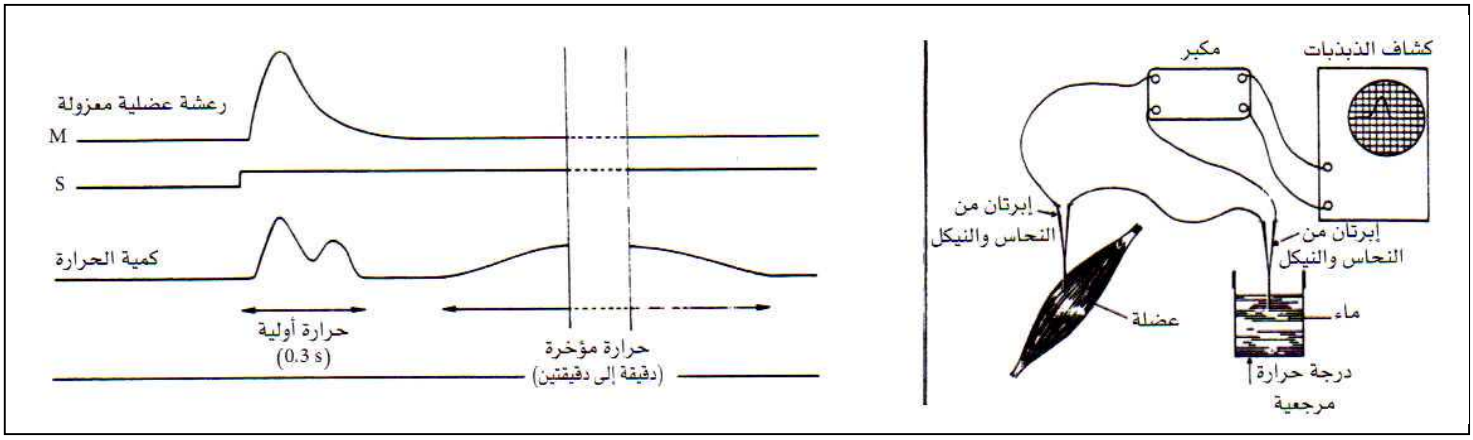
II – الظواهر التي تصاحب التقلص العضلي.

التقلص العضلي ظاهرة ميكانيكية ترافقها ظواهر حرارية، طاقية وكيميائية.

① الظواهر الحرارية المرافقة للتقلص العضلي:

عند القيام بمجهود عضلي، ترتفع درجة حرارة الجسم الداخلية، ويقاوم هذا الارتفاع بزيادة طرح الحرارة. هذا الطرح يختلف حسب شدة الجهد.

أ – التركيب التجريبي: أنظر الوثيقة 6 لوحة 1.



نستعمل في هذه الدراسة تقنية العمود الحراري Thermopile.

يتكون العمود الحراري من إبرتين كهروحراريتين، تتكون كل إبرة من معدنين مختلفين (نحاس ونيكل أو ذهب ونيكل).

إن اختلاف الحرارة بين الإبرتين، يولد فرق جهد كهربائي تتناسب شدته مع درجة حرارة العضلة المتقلصة.

ب – النتائج التجريبية: أنظر الوثيقة 6 لوحة 1.

انطلاقا من هذه النتائج، استخرج أنواع الحرارة المحررة من طرف العضلة في حالة نشاط.

ج – تحليل واستنتاج:

خلال التقلص العضلي تنتج الحرارة، ويتوزع إنتاجها على مرحلتين أساسيتين:

- الحرارة الأولية : هي الحرارة الابتدائية، وتحرر في جزأين: جزء خلال التقلص (حرارة التقلص)، وجزء خلال الارتخاء (حرارة الارتخاء)، وتدوم بضع أجزاء من الثانية.
- الحرارة المؤخرة: أو المتأخرة، وتحرر بعد التقلص العضلي، وتدوم من دقيقة إلى دقيقتين.

② الظواهر الكيميائية والطاقية :

أ – ملاحظات:

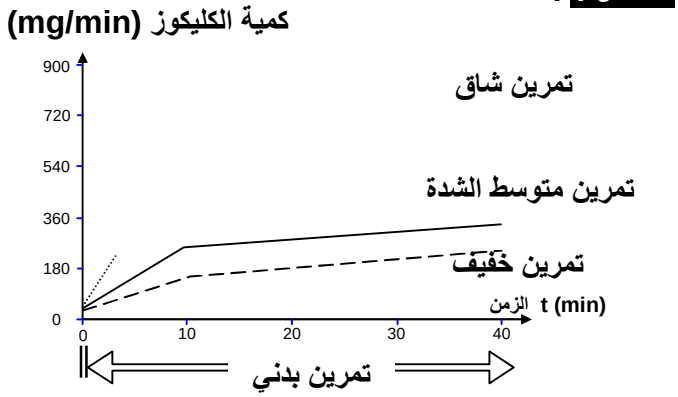
تبين الملاحظة المجهرية للنسيج العضلي، أنه غني بالشعيرات الدموية.
يبرر التعرق الشديد للنسيج العضلي، بكون النشاط العضلي يرفع من حاجيات العضلة من القيت والأوكسجين، والتي تصل إلى العضلة عن طريق الدم.

ب – نتائج تجريبية:

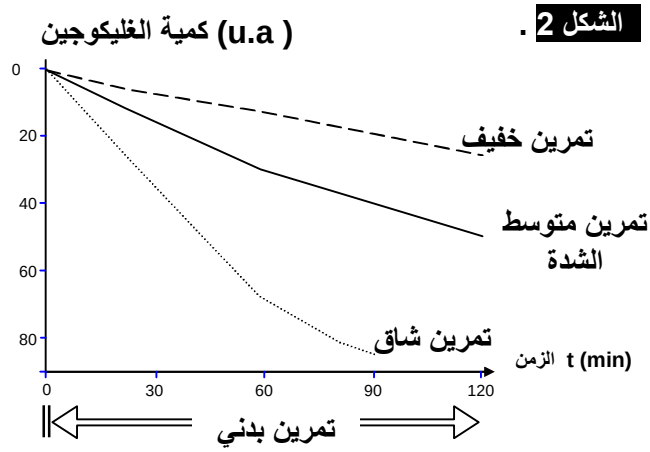
انطلاقا من تحليل معطيات هذه الوثائق 1؛2؛3، لوحة2، استنتج متطلبات العمل العضلي.

الوثيقة1: قياس كمية الكليكوز (شكل 1)، والغليكوجين (شكل 2)، المستعملة من طرف عضلات الطرفين السفليين عند شخص خلال مجهود عضلي متزايد الشدة. **(d'après manuel Hatier- mai 2000)**
حلل هذه المعطيات، واستنتج متطلبات العمل العضلي.

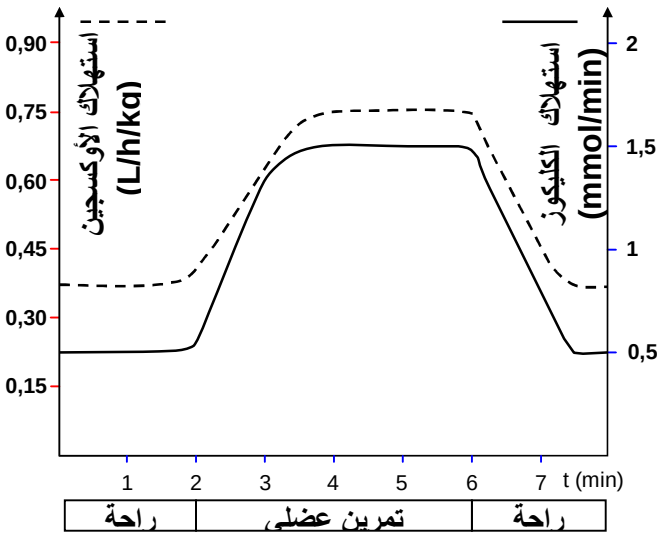
الشكل 1 .



الشكل 2 .



الوثيقة 2: نتائج قياس استهلاك الأوكسجين والكليكوز خلال مجهود عضلي.



الوثيقة 3:	خلال ساعة بالنسبة ل 1kg من العضلة	
	في حالة راحة	في حالة نشاط
حجم الدم الذي يعبر العضلة ب (l)	12.220	56.325
حجم الأكسجين المستهلك ب(l)	0.307	5.207
حجم ثاني أكسيد الكربون المطروح ب(l)	0.220	5.950
كمية الكليكوز المستهلكة ب (g)	2.042	8.432
البروتيدات المستهلكة ب (g)	0	0
الدهون المستهلكة ب (g)	0	0

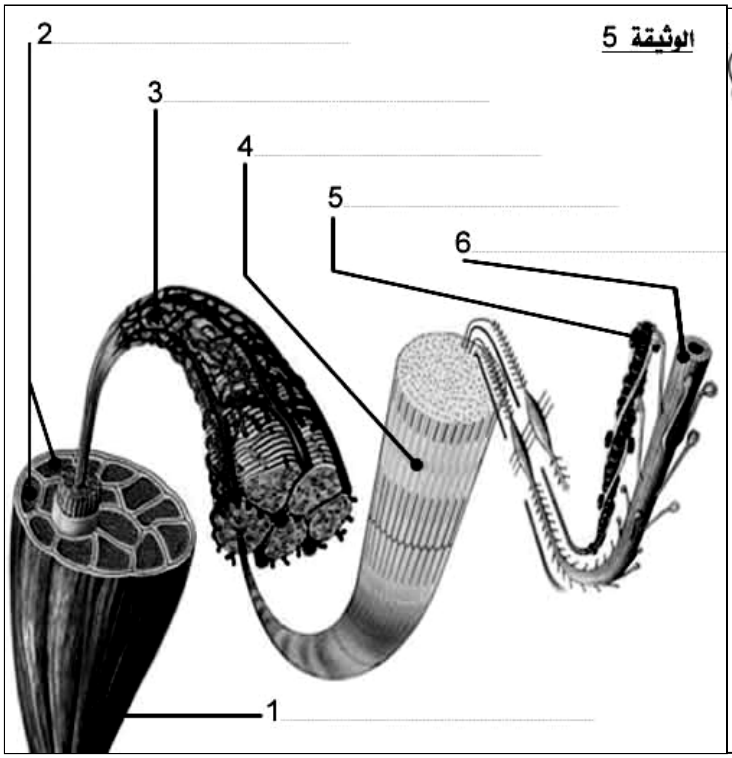
ج – تحليل واستنتاج:

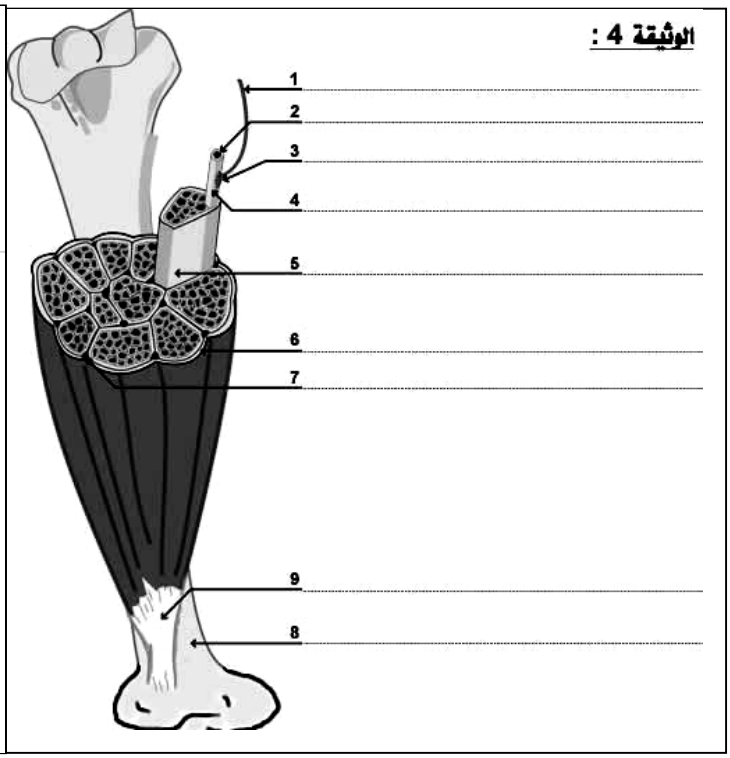
نلاحظ خلال المجهود العضلي، ارتفاع استهلاك الكليكوز،ويلاحظ في نفس الوقت، انخفاض مدخرات العضلة من الغليكوجين.
نلاحظ كذلك ارتفاع استهلاك الأوكسجين، عند المجهود العضلي، مع طرح المزيد من ثاني أكسيد الكربون.
انطلاقا من هذه المعطيات، نستنتج أن الطاقة اللازمة للنشاط العضلي، تأتي من تفاعل أكسدة الكليكوز، الناتج عن حلمأة الغليكوجين.

III – بنية وفوق بنية النسيج العضلي.

① بنية العضلة الهيكلية المخططة:

أ – ملاحظات بالعين المجردة: أنظر الوثيقة 4، لوحة 2:



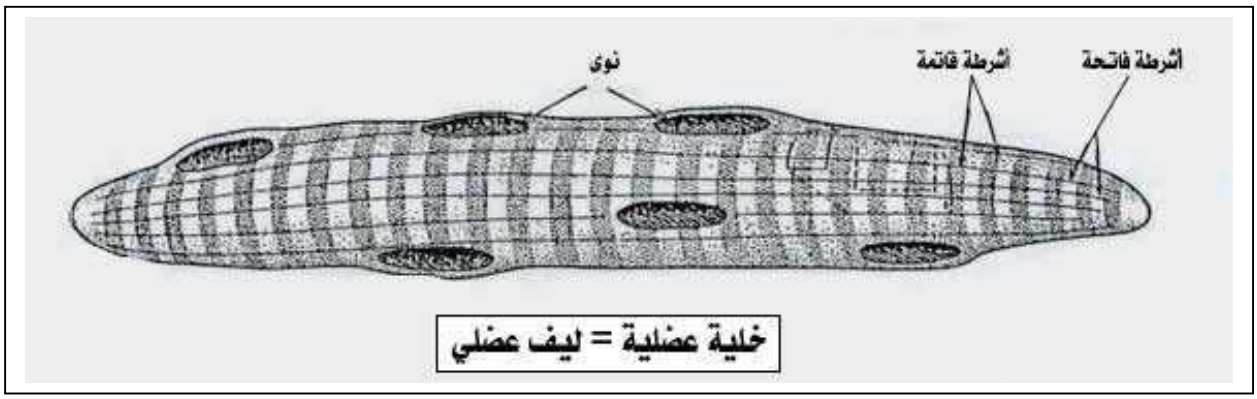


تكون العضلات مثبتة على العظام، وتظهر جزأين: جزء أحمر مرن، يسمى بطن العضلة، وهو أحمر بوجود بروتين خاص يسمى الخضاب العضلي (Myoglobine)، وجزء أبيض لؤلئي (nacré)، يوجد في نهايتي العضلة، ويسمى وتر عضلي (Tendon).
تبين ملاحظة المقطع العرضي للعضلة أنها تتكون من كتل مفصولة عن بعضها بواسطة نسيج ضام، هي الحزم العضلية (Faisceau musculaire).
يتبين من تأريب العضلة (Délacération) أنها ذات بنية ليفية.

ب – ملاحظات مجهرية: أنظر وثيقة 5، لوحة 7

تبرز الملاحظة المجهرية أن العضلة الهيكلية المخططة تتكون من عدد كبير من الألياف، كل ليف هو عبارة عن خلية مستطيلة مخططة (طولها ما بين 0.1 مم وعدة سنتيمترات). وتحتوي على عدة مئات من النوى مرتبة على المحيط، نتكلم عن مختلط خلوي.
كل ليف عضلي يكون محاطا بغشاء سيتوبلازمي، يدعى ساركوليم، ويحتوي على سيتوبلازم يدعى ساركوبلازم.

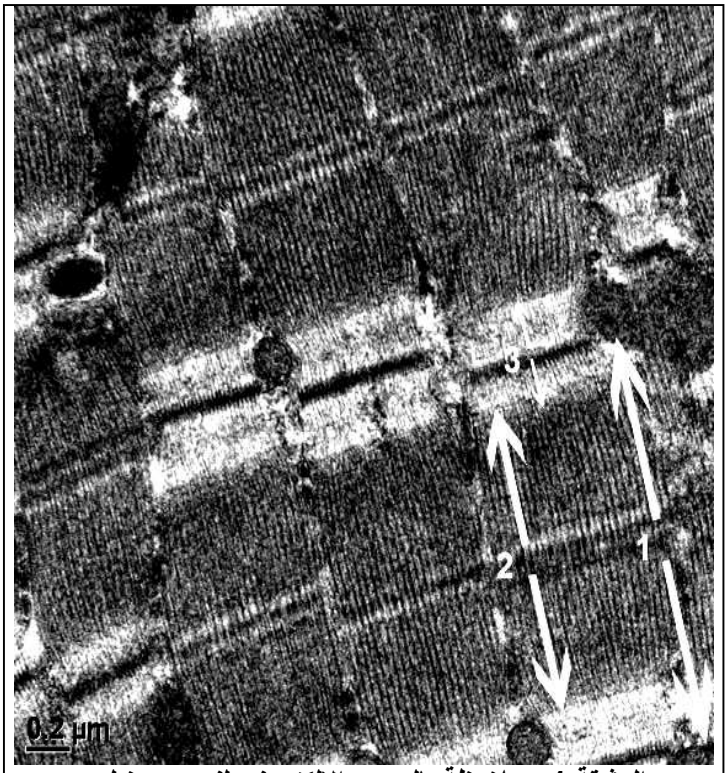
تظهر الخلية العضلية (الليف العضلي) مخططة طوليا، لوجود لييفات عضلية داخل الساركوبلازم. وتظهر هذه الخلية مخططة عرضيا، لكون اللييفات العضلية تتكون من تناوب أشرطة قاتمة وأشرطة فاتحة.
(أنظر الرسم أسفله)



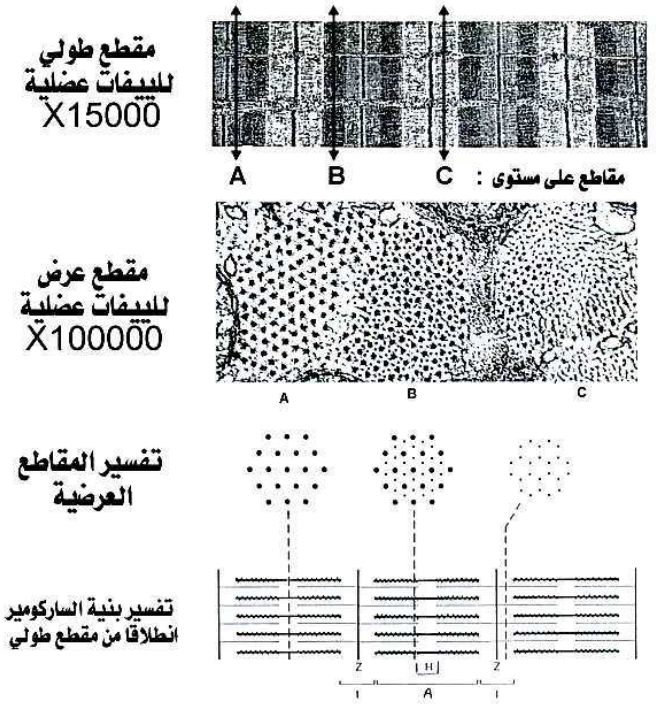
② فوق بنية الليف العضلي:

أ – الملاحظات بالمجهر الالكتروني:

☒ انطلاقا من معطيات الوثيقة 1؛ 2؛ 3، و4، لوحة 3، صف بنية المقاطع المستعرضة للييفات العضلية، ثم بين أن الساركومير يعتبر الوحدة البنيوية لليف العضلي.



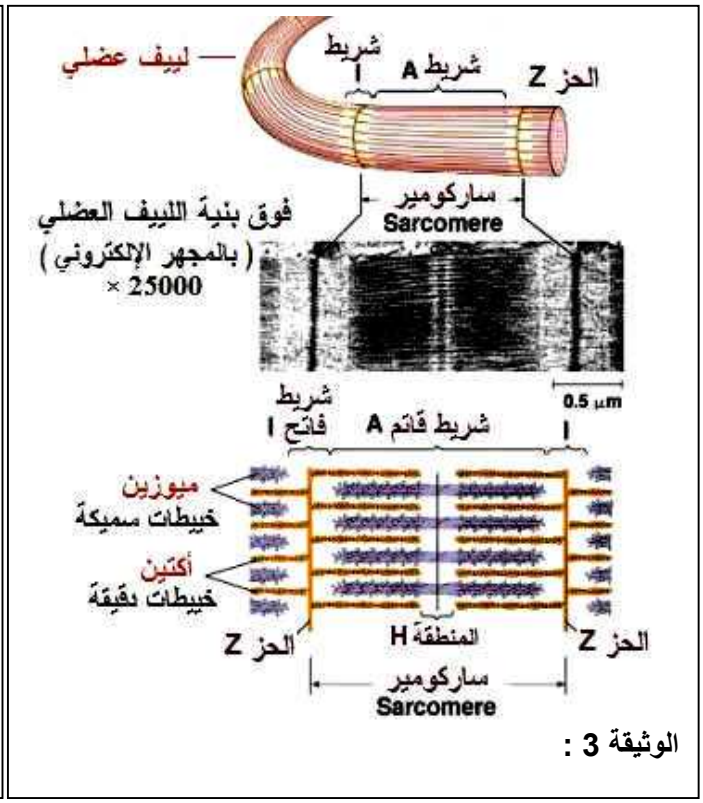
الوثيقة 1: ملاحظة بالمجهر الالكتروني لنسيج عضلي.



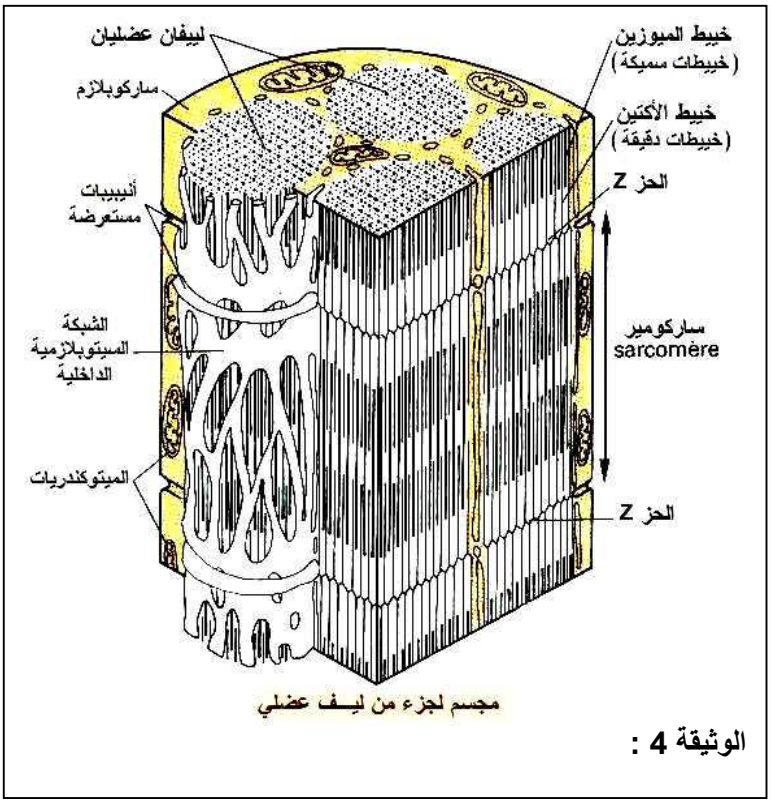
الوثيقة2 : نقوم بمقاطع مستعرضة لليف عضلي على مستويات مختلفة : C , B , A.

☑ تبين هذه الملاحظة أن اللييفات العضلية تتكون من تناوب نوعين من الأشرطة:

- أشرطة فاتحة (Isotropique=I) تتكون من خييطات دقيقة من بروتين يسمى الأكتين (Actine) ؛ ويتوسطها الحز Z. (Strie Z) (de l'allemand *zwischen*, signifiant "entre")
- أشرطة قاتمة (Anisotropique=A)، تتكون من خييطات الأكتين، وخييطات سميكة من بروتين يسمى الميوزين (Myosine)، وتتوسطها المنطقة H (de l'allemand *heller*, plus pâle) . التي تحتوي على خييطات الميوزين فقط.



الوثيقة 3 :

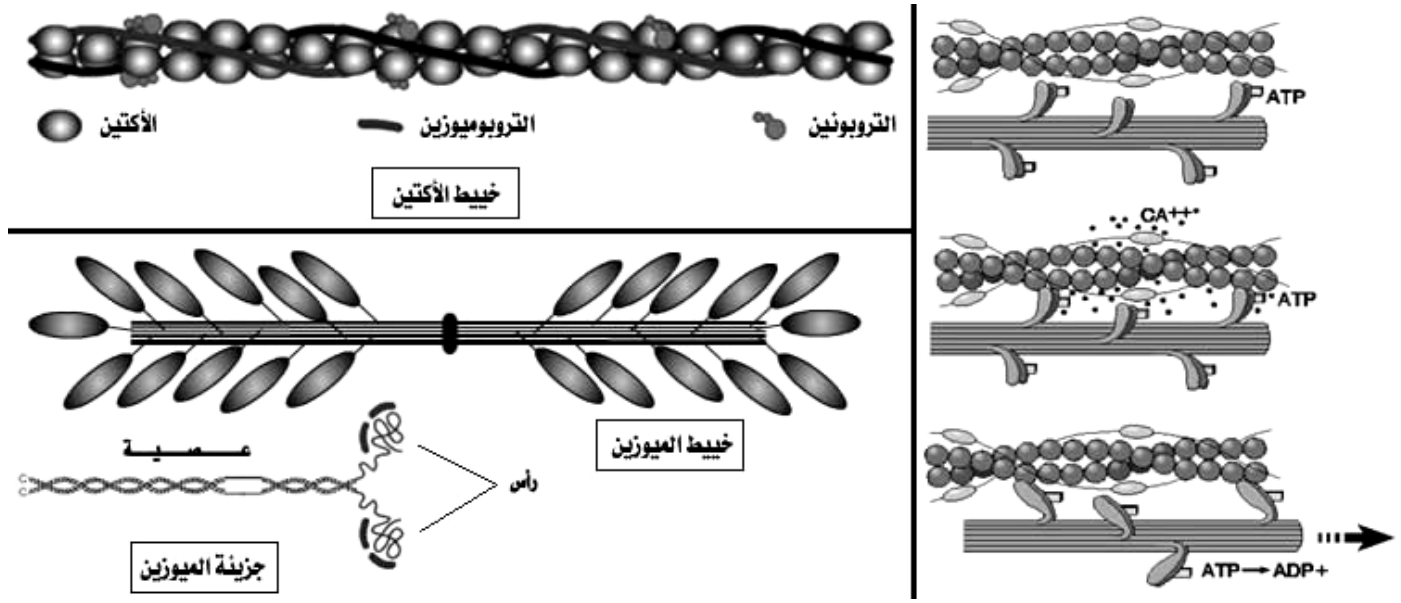


الوثيقة 4 :

يتكون كل ليف عضلي من وحدات متتالية تسمى الساركوميرات (Sarcomère)، توجد بين حزي Z. ويعتبر الساركومير الوحدة البنيوية لليف العضلي.
يحتوي الساركوبلازم على عدد كبير من الميتوكندريات، وكمية هامة من الغليكوجين، كما يحتوي على شبكة ساركوبلازمية وافرة، تحتوي على كمية كبيرة من الكالسيوم.

ب – البنية الجزيئية للخيوطات العضلية: أنظر الوثيقة 1 لوحة 4.

الوثيقة 1 :



يتكون كل خيط دقيق، أو خيط الأكتين من بروتين يدعى الأكتين، وهو الطاغي، بالإضافة إلى بروتينين آخرين هما التروبونين والتروبوميوزين.

يتكون الخيط السميك أو خيط الميوزين، من حزمة من جزيئات بروتين الميوزين، وكل جزيئة ميوزين تتكون من رأسين كرويين وعصية.

IV – آلية التقلص العضلي.

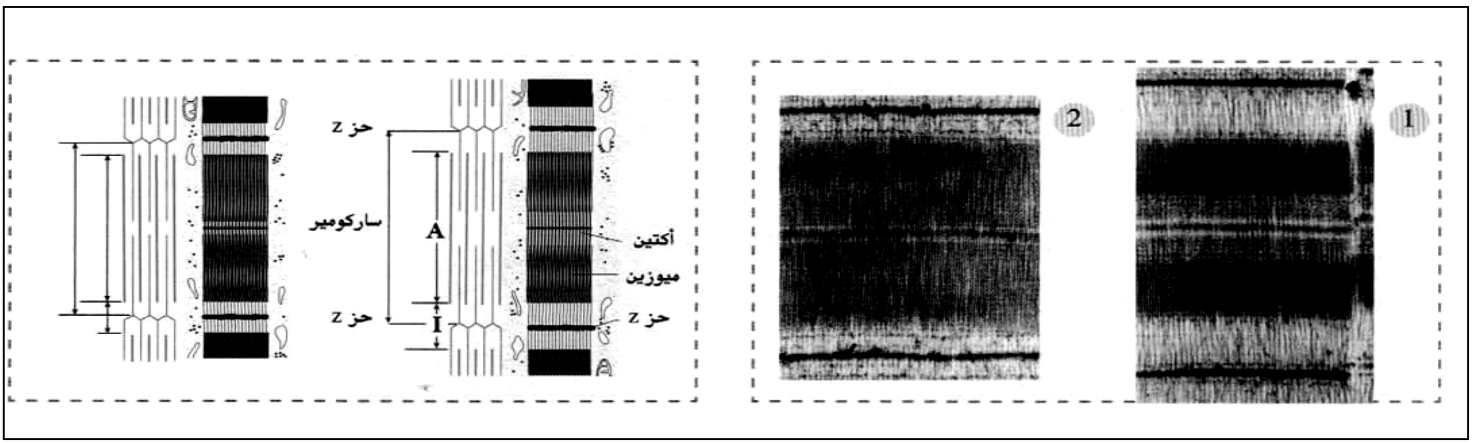
① ماذا يحدث أثناء التقلص العضلي؟

أ – ملاحظات مجهرية:

☒ تم تجميد عضلة في حالة راحة، وعضلة متقلصة. بعد ذلك تم انجاز مقاطع على مستوى العضلتين، لتتم ملاحظتهما بالمجهر الالكتروني.

تمثل الوثيقة 5 لوحة 3، نتيجة هذه الملاحظة.

حدد التغيرات الملاحظة على الليف المتقلص، ثم فسر هذه التغيرات.



☑ نلاحظ أن تقلص العضلة يصاحبه :

- تقصير على مستوى الساركوميرات (تقارب حزي z).
- ينقص طول الشريط الفاتح I، والمنطقة H.
- يبقى طول الشريط القاتم A ثابت.

ب – تفسير واستنتاج:

بما أن طول الأشرطة القاتمة يبقى ثابت، نستنتج أن التقصير الملاحظ في الساركومير ليس ناتجا عن تقصير في الخيوطات العضلية، بل عن انزلاق هذه الخيوطات بعضها بالنسبة لبعض، في اتجاه مركز الساركومير (انزلاق الأكتين على الميوزين)، فينتج عن ذلك اقتراب حزي Z

واختزال المنطقة H.نتكلم عن آلية انزلاق الخيوطات.Glissement des filaments

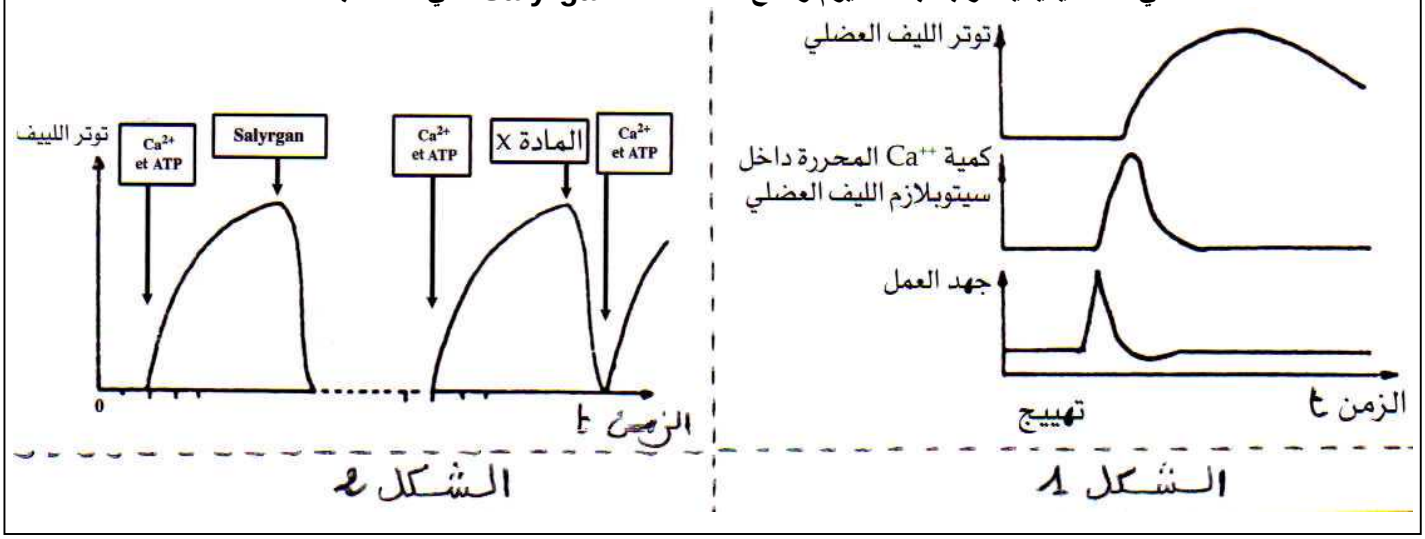
② آلية انزلاق الخيوطات ؟

أ – معطيات تجريبية:

انطلاقا من معطيات الوثيقة 2، لوحة 4، استنتج دور كل من ATP و Ca^{++} في حدوث التقلص العضلي.

لقد بينت دراسات أخرى أن هناك تالف بين رؤوس الميوزين والأكتين، وبوجود ايونات الكالسيوم، ترتبط رؤوس الميوزين بالأكتين فيتشكل مركب الأكتوميوزين الذي يكون بنيات خاصة تسمى القناطر المستعرضة (Ponts transversals) (الوثيقة 1، لوحة 4). بالاعتماد على المعطيات السابقة ومعطيات الوثيقة 2،لوحة 9، بين العلاقة بين ايونات الكالسيوم ونشوء القناطر المستعرضة.

الوثيقة 2: يعطي مبيان الشكل 1، نتائج قياس كل من كمية Ca^{2+} داخل ساركوبلازم الخلية العضلية وتوترها بعد تهييجها.
يعطي مبيان الشكل 2، نتائج تأثير وجود أو عدم وجود ATP و Ca^{2+} ، على توتر الليف العضلي.
المادة X هي مادة كيميائية ترتبط بالكالسيوم وتمنع فعله. المادة Salyrgan، هي مادة كابحة لحلمأة ATP.



ب – تحليل واستنتاج:

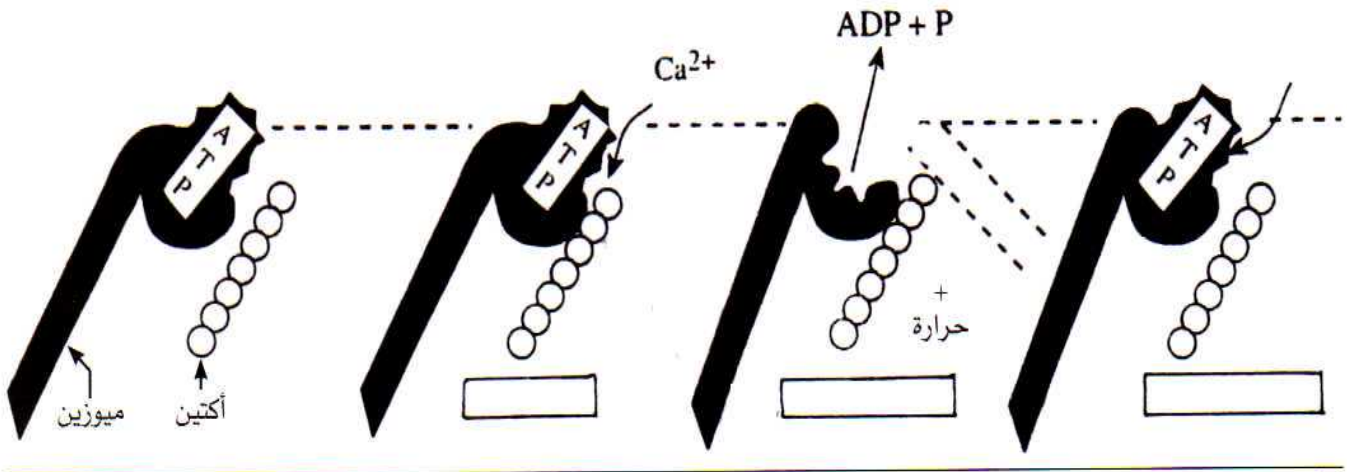
- الشكل 1 : بعد تهييج العضلة مباشرة، نلاحظ ارتفاع تركيز الكالسيوم داخل سيتوبلازم الخلية العضلية، متبوعا بارتفاع توتر الليف العضلي.

- الشكل 2 : نلاحظ أن الليفات العضلية تتقلص بسرعة عند وجود ATP، وايونات الكالسيوم. وعندما نمنع حلمأة ATP بفعل Salyrgan، يختفي توتر الليف.
أما عندما نمنع فعل Ca^{++} ، يختفي توتر الليف، رغم وجود ATP.

نستنتج من هذه المعطيات أن توتر الليف العضلي يستلزم وجود ATP و Ca^{++}. هذا الأخير يعمل على تحرير مواقع الارتباط بين الميوزين والأكتين، لتتكون قناطر مستعرضة.

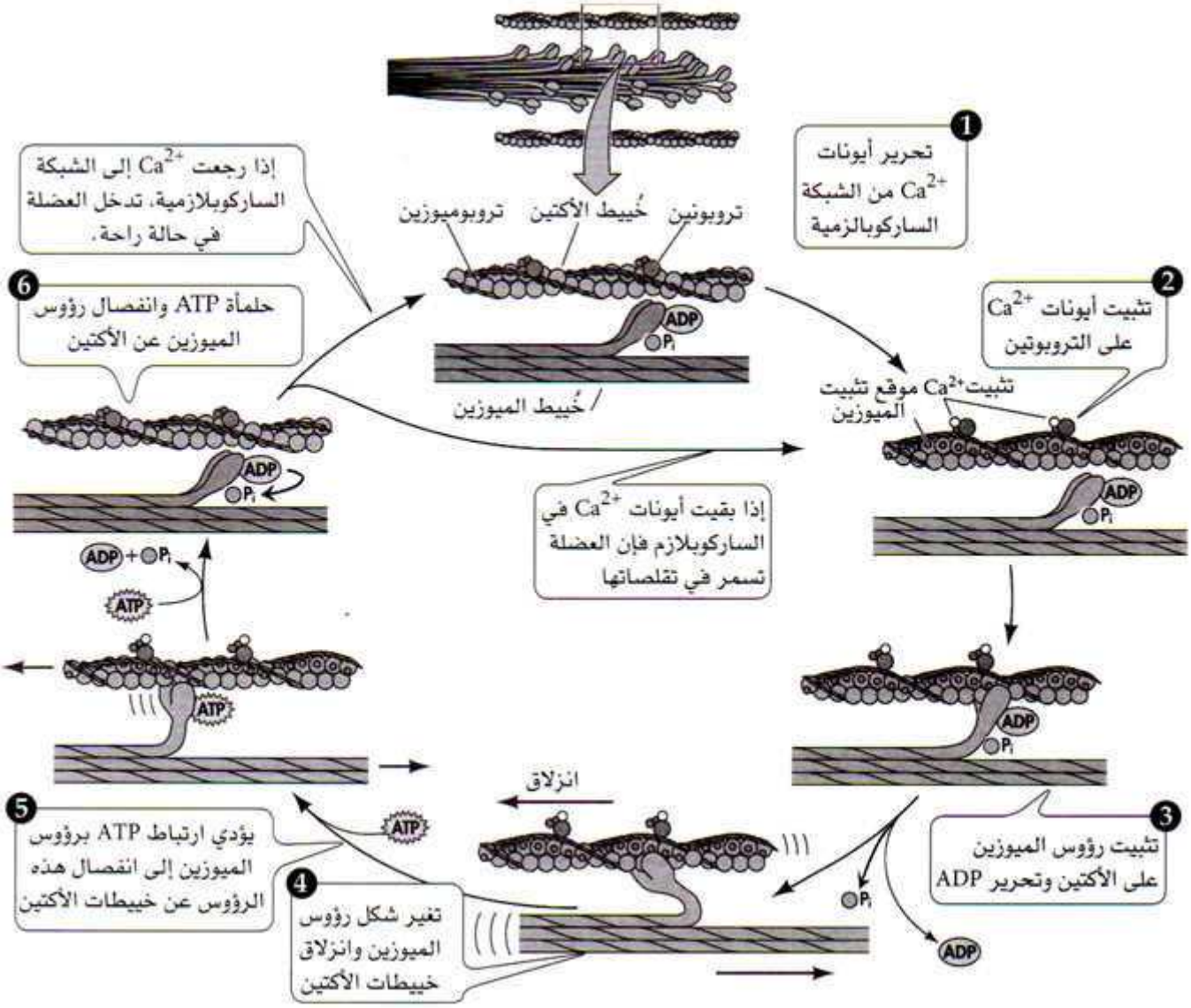
ج – خلاصة : آلية التقلص العضلي. أنظر الوثيقة3، لوحة4، الوثيقة 1، لوحة5.

الوثيقة 3:



الوثيقة 3 : تمثيل مبسط لتحويل الطاقة الكيميائية إلى طاقة ميكانيكية على مستوى البروتينات المحركة (الميوزين والأكتين).

الوثيقة 1 : التفاعل بين خيطات الميوزين والأكتين خلال التقلص العضلي.



يتطلب التقلص العضلي وجود ATP، وايونات الكالسيوم، ويتم كما يلي:

- عند تنبيه الليف العضلي، تحرر الشبكة الساركوبلازمية ايونات الكالسيوم.
- بحضور Ca^{++}، يتم تحرير مواقع ارتباط رؤوس الميوزين على الأكتين، والتي كانت محجوبة ببروتينات التروبوميوزين، فتتكون بذلك قناطر الأكتوميوزين.
- تلعب مركبات الأكتوميوزين دور أنزيم محفز لحلمأة ATP، وتحرير طاقة تؤدي إلى دوران رؤوس الميوزين في اتجاه مركز الساركومير، وهذا ما يؤدي إلى تقلصه.
- عند انتهاء التنبيه، يضخ Ca^{++} داخل الشبكة الساركوبلازمية، فترتبط جزيئة أخرى ل ATP برؤوس الميوزين، مما يؤدي إلى انفصال الأكتين عن الميوزين، وحدوث الارتخاء.

V – كيف يتم تجديد الطاقة اللازمة للتقلص العضلي ؟

أ – معطيات تجريبية:

تعطي الوثيقة 2، لوحة 5، تغيرات بعض المكونات الكيميائية للعضلة، قبل وبعد التقلص. قارن معطيات جدول الوثيقة، واقترح تفسيرا لقيم ATP، قبل التقلص وبعده.

الوثيقة 2: تغيرات بعض المكونات الكيميائية للعضلة قبل وبعد التقلص..

التجارب	الملاحظات	المواد المعايرة	نتائج المعايرة		الإستنتاجات
			قبل التقلص	بعد التقلص	
إهاجة العضلة كهربائيا	تقلص العضلة لمدة 3 دقائق	كليكوجين حمض لبني ATP فوسفوكرياتين	1,62 1,5 2 1,5	1,21 1,95 2 1,5	
إهاجة عضلة بوجود الحمض الأيودي الأستيك (مادة توقف انحلال الكليكوز)	تقلص العضلة في نفس ظروف التجربة السابقة	كليكوجين حمض لبني ATP فوسفوكرياتين	1,62 1,5 2 1,5	1,62 1,5 2 0,4	
إهاجة عضلة بوجود الحمض الأيودي الأستيك ومادة مانعة للفوسفوكرياتين كيناز (أنزيم ضروري لانحلال الفوسفوكرياتين)	العضلة تتقلص بصفة عادية ثم تتوقف	كليكوجين حمض لبني ATP فوسفوكرياتين	1,62 1,5 2 1,5	1,62 1,5 0 1,5	

ب – تحليل واستنتاج:

نلاحظ خلال التجربة الأولى أن نسبة الغليكوجين تنخفض، ونسبة الحمض اللبني ترتفع، بينما نسبة ATP والفوسفوكرياتين، تبقى ثابتة.

يدل ثبات نسبة ATP في هذه التجربة، رغم استهلاكه خلال التقلص العضلي، على أنه يتجدد باستمرار. ويتم هذا التجديد بواسطة التخمر اللبني، حيث تمت حلمأة الكليكوجين إلى كليكوز، يخضع هذا الأخير للتخمر ليعطي حمض لبني + ATP.

خلال التجربة الثانية، انخفاض نسبة الفوسفوكرياتين فقط. تدل هذه النتائج على أن تجديد ATP في هذه الحالة يتم بواسطة الفوسفوكرياتين، وهي مادة غنية بالفوسفات، تجدد ATP، حسب التفاعل التالي:

$$ATP + C\ (\text{الكرياتينين}) \xrightarrow[\text{أنزيم خاص}]{} ADP + CP\ (\text{الفوسفوكرياتين})$$

خلال التجربة الثالثة، توقفت العضلة عن التقلص بعد استنفاذ مخزونها من ATP ، يدل هذا على عدم تجديد ATP.

ج – طرق تجديد ATP:

حسب سرعة تدخلها يمكن تصنيف الطرق المجددة ل ATP، إلى ثلاثة أنواع:

a – الطرق اللاهوائية السريعة:

في أقل من 30 ثانية ينطلق تفاعلان لتجديد ATP:

- بواسطة التفاعل بين ADP، تحت تأثير الأنزيم الميوكيناز MK (myokinase)

$$ADP + ADP \xrightarrow{MK} ATP + AMP$$

- بواسطة الفوسفوكرياتين : $ADP + CP \dashrightarrow ATP + C$

يكون هذا التفاعل مصحوبا بتحرير حرارة، هي الحرارة الأولية.

b – الطرق اللاهوائية المتوسطة السرعة:

تتمثل في التخمر اللبني، حيث تتم حلمأة الغليكوجين العضلي إلى كليكوز، يخضع للانحلال في الجبلة الشفافة إلى حمض البيروفيك، الذي يتحول إلى حمض لبني.

$(C_6H_{12}O_6)_n$ غليكوجين + H_2O ⟶ (حلمأة الغليكوجين) $C_6H_{12}O_6$ كليكوز
$C_6H_{12}O_6 + 2ADP$ (كليكوز) ⟶ (التخمر اللبني) $2CH_3 - CHOH - COOH + 2ATP$ (حمض لبني + طاقة)

c – الطرق الهوائية البطيئة:

تتمثل في التنفس الخلوي، حيث تتم حلمأة الكليكوجين العضلي إلى كليكوز، يتم هدمه بشكل تام بوجود الأوكسجين، ليتحول إلى CO2 وماء، مع تحرير كمية كبيرة من الطاقة (ATP)، مع تحرير طاقة على شكل حرارة، هي الحرارة المؤخرة.