

# دور العضلة الهيكيلية المخططة في تحويل الطاقة

تمهيد:

يمكن كل من التنفس والتلعر 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؟

## ١ - الدراسة التجريبية للتقلص العضلي.

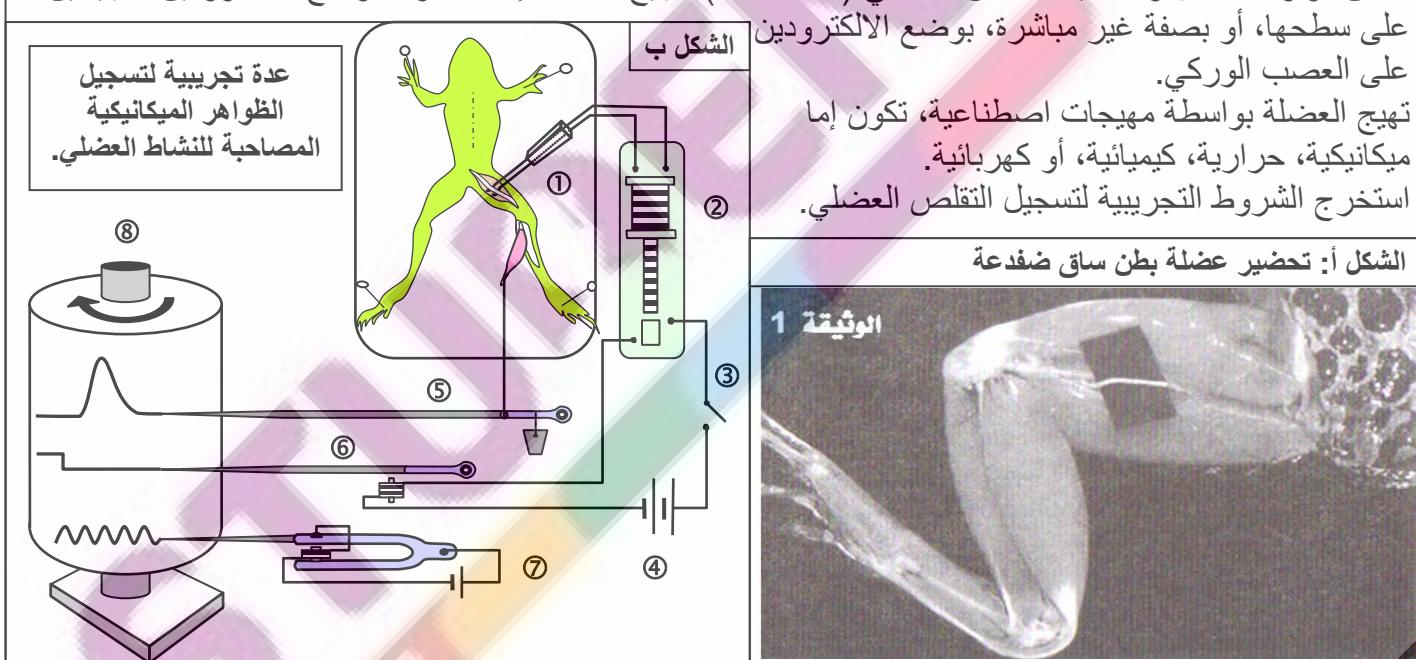
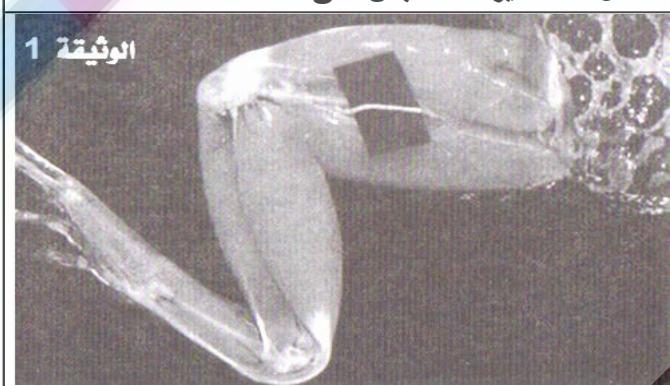
① تسجيل التقلص العضلي عند الضفدعه: انظر التركيب التجاري: الوثيقة ١.

### الوثيقة ١: تسجيل التقلص العضلي للطرف الخلفي لضفدعه.

لدراسة التقلص العضلي، يتم أخذ ضفدعه، فيخرب دماغها ونخاعها الشوكي، لإزالة كل ردود الفعل الإرادية واللارادية بعد تثبيتها على لوحة خشبية، نشرح الطرف الخلفي لإبراز العصب الوركي (الشكل أ)، نقطع وتر العقب لعضلة بطن الساق، ونوصله بجهاز تسجيل التقلص العضلي (الشكل ب). نهيج العضلة إما مباشرة، بوضع الألكترودين المهيجين على سطحها، أو بصفة غير مباشرة، بوضع الألكترودين على العصب الوركي.

تهيج العضلة بواسطة مهييجات اصطناعية، تكون إما ميكانيكية، حرارية، كيميائية، أو كهربائية. استخرج الشروط التجريبية لتسجيل التقلص العضلي.

### الشكل أ: تحضير عضلة بطن ساق ضفدعه

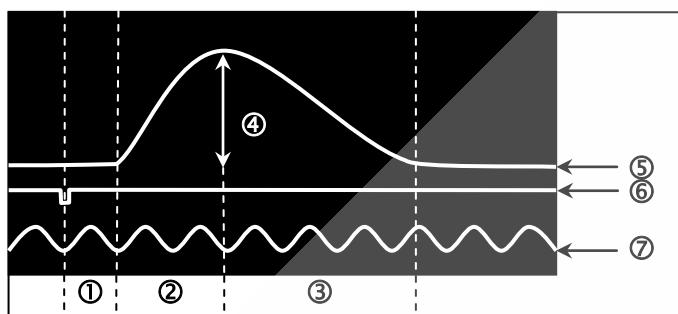


① = مسار التهيج، ② = مهييج، ③ = قاطع التيار الكهربائي، ④ = مصدر التيار الكهربائي،  
⑤ = مسجل، ⑥ = شوكة رنانة لتسجيل اشارة التنبية، ⑦ = مسجل اشارة التنبية، ⑧ = أسطوانة مسجلة

### لتتسجيل التقلص العضلي:

- ✓ نستعمل الراسمة العضلية myogramme، التي تعطينا تخطيطات عضلية.
- ✓ يجب أن تكون الضفدعه المستعملة مخربة الدماغ والنخاع الشوكي لحذف كل نشاط إرادي أو انعكاسي.
- ✓ التهيج يكون إما مباشرا على مستوى عضلة بطن الساق، أو عن طريق عصبها الوركي.
- ✓ يجب ضبط شدة التهيج أو التنبية، المدة، وتعدد التهيج وكذلك سرعة دوران الأسطوانة.

## a - استجابة العضلة لاهاجة منفردة: انظر الوثيقة 2.



الوثيقة 2: استجابة العضلة لتهييج واحد.

تعطي الوثيقة أمامه تسجيلاً لرعشة عضلية معزولة ناتجة عن تسلیط اهاجة كهربائية واحدة فعالة على العضلة.

حل هذا التسجيل مع تحديد مختلف عناصره.

① = مرحلة الکمون ② = مرحلة النقلص ③ = مرحلة الارتخاء

وسع ⑤ = مخطط عضلي ⑥ = اشارة التهييج

اشارة التنبيه. ⑦

عند تسلیط اهاجة فعالة، تستجيب العضلة لاهاجة، فنقول أنها هيوجة (Excitable) ولها خاصية الاهتياجية. كما تستجيب بالنقلص، فنقول أنها قلوصة، وتسمى هذه الخاصية بالقلوصية.

عند تطبيق اهاجة منفردة، نحصل على تقلص قصير الأمد، معزول، وبسيط، نتكلم عن رعشة عضلية (Secousse musculaire). والتي يمكن تقسيمها إلى ثلاث مراحل:

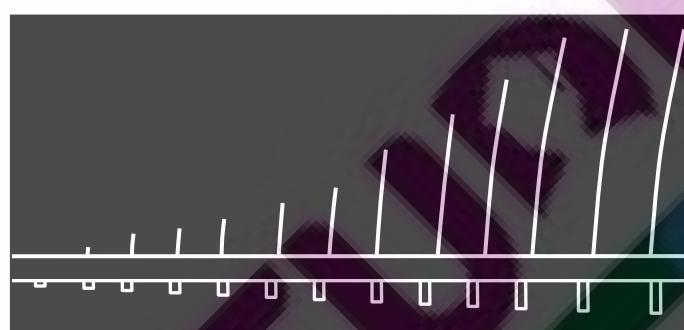
- فترة الکمون: هي الفترة الزمنية الفاصلة بين لحظة الاهاجة وبداية الاستجابة.
- مرحلة النقلص : يرتفع خلالها توتر العضلة.
- مرحلة الارتخاء : خلالها تأخذ العضلة أبعادها الأولية.

ملحوظات:

★ يتغير شكل التخطيط العضلي حسب سرعة الأسطوانة المسجلة.

★ انظر الوثيقة 3:

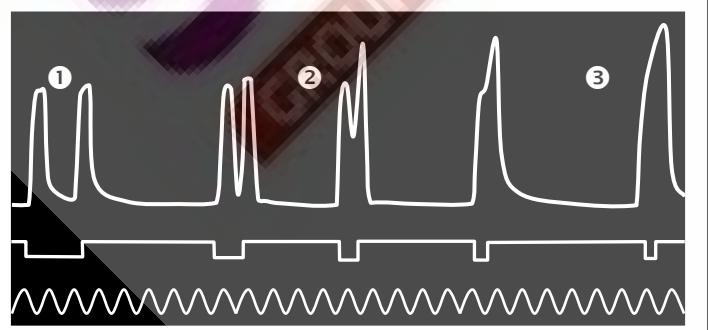
الوثيقة 3: استجابة العضلة لاهاجات منفردة.



عندما تخضع العضلة لاهاجات متباينة، ذات شدة متتصاعدة، 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: انظر الوثيقة 4

الوثيقة 4: استجابة العضلة لاهاجتين متتاليتين.



تختلف الاستجابة في هذه الحالة حسب اللحظة التي تسلط فيها الاهاجة الثانية، وهكذا نميز ثلاثة حالات:

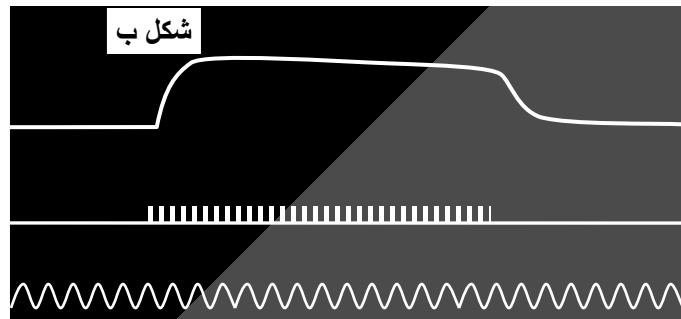
① إذا وقع التهييج الثاني بعد انتهاء الرعشة الأولى، تكون الرعشتان متصلتين ومستقليتين.

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.

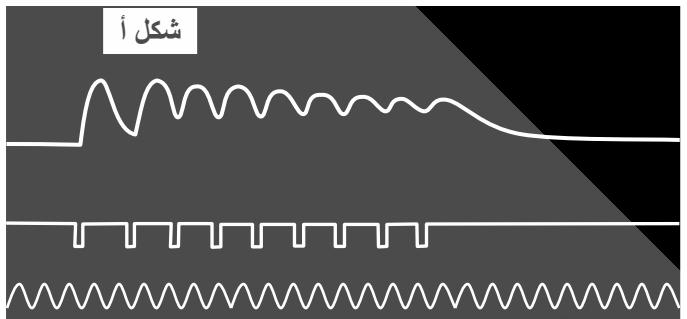
③ إذا وقع التهييج الثاني خلال مرحلة تقلص الاستجابة الأولى، يلاحظ تراكب المنحنيين. نتكلم عن الالتحام التام، يكون فيه وسع التوتر الاجمالي أكبر من وسع التوتر خلال رعشة معزولة.

الوثيقة 5: استجابة العضلة لاهاجات متتالية.

شكل ب



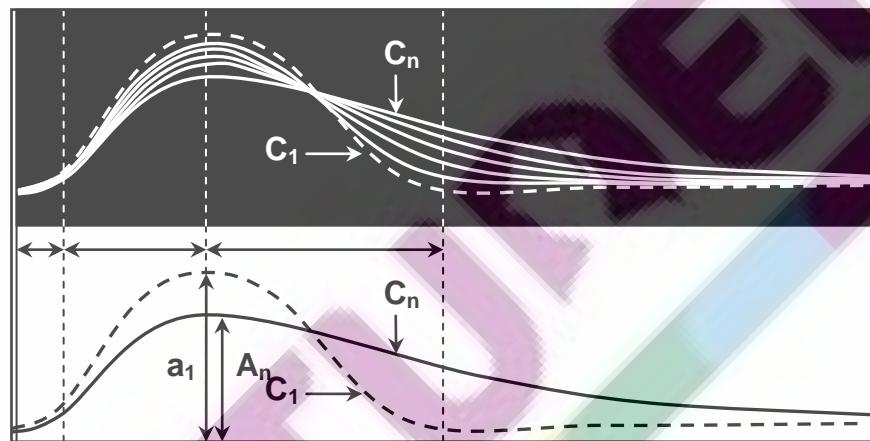
شكل أ



عند تطبيق سلسلة من الاهاجات المتتالية، نلاحظ التالي:

**الشكل أ:** عندما يكون تردد التهييجات ضعيف، نحصل على تسجيل مكون من ذبذبات متتالية، نسمى هذا التقلص الكراز الناقص (Tétanos imparfait)، والذي يفسر بالتحام غير تام للرعشات العضلية، لأن كل تهييج يحدث خلال فترة الارتخاء للاستجابة السابقة.

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



ملاحظة: استجابة العضلة المتعبة.

نخضع العضلة لسلسلة اهاجات، فنسجل التخطيط العضلي الممثل على الشكل أ من الوثيقة أمامه. أما الشكل ب من نفس الوثيقة فيتمثل رسميا للرعشة الأولى  $C_1$ ، والرعشة الأخيرة  $C_n$ .

حدد من خلال الشكلين فيم يتمثل العياء العضلي؟

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

## II - الظواهر التي تصاحب التقلص العضلي.

التقلص العضلي ظاهرة ميكانيكية ترافقتها 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:** انظر الوثيقة 6، الشكل أ.

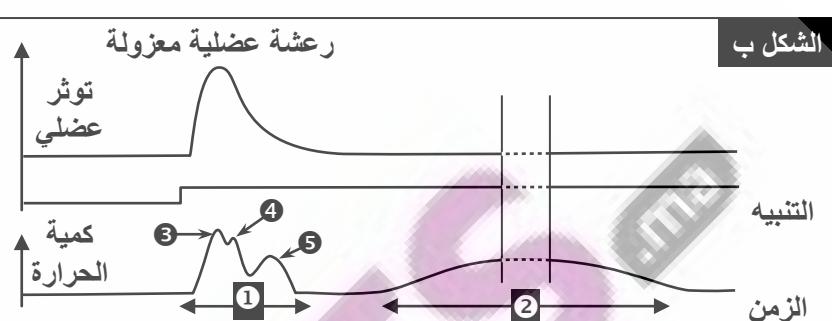
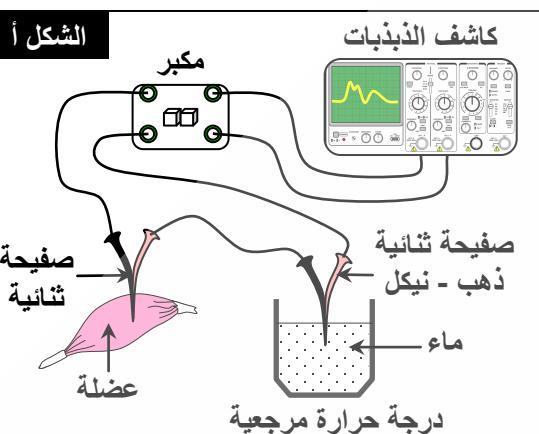
**ب - النتائج التجريبية:** انظر الوثيقة 6، الشكل ب.

**الوثيقة 6: الظواهر الحرارية المرافقة للتقلص العضلي.**

نستعمل في هذه الدراسة تقنية العمود الحراري Thermopile (شكل أ)، إذ يتكون العمود الحراري من إبرتين كهروحراريتين، تتكون كل إبرة من معدنين مختلفين (نحاس و نيكل أو ذهب ونيكل). تغز أحدي الإبرتين في العضلة ويحافظ على الأخرى في درجة حرارة ثابتة (إبرة مرجعية). إن اختلاف الحرارة بين الإبرتين، يولد فرق جهد كهربائي تناسب شدته مع درجة حرارة العضلة المقلقة.

يبين الشكل ب التسجيل المحصل عليه.

استخرج أنواع الحرارة المحررة من طرف العضلة في حالة نشاط.

**ج - تحليل واستنتاج:**

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

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

**② الظواهر الكيميائية والطاقة :****أ - ملاحظات:**

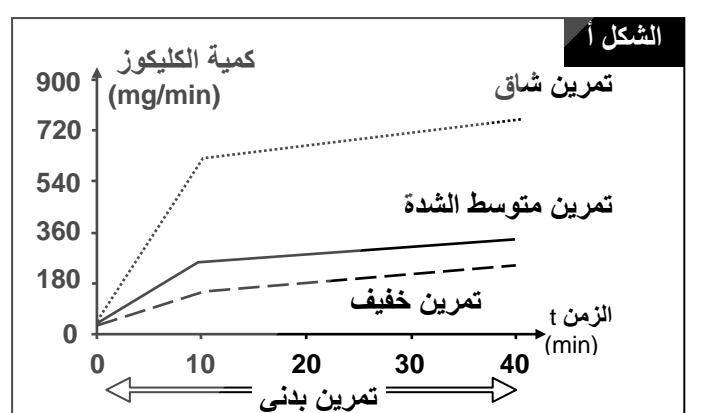
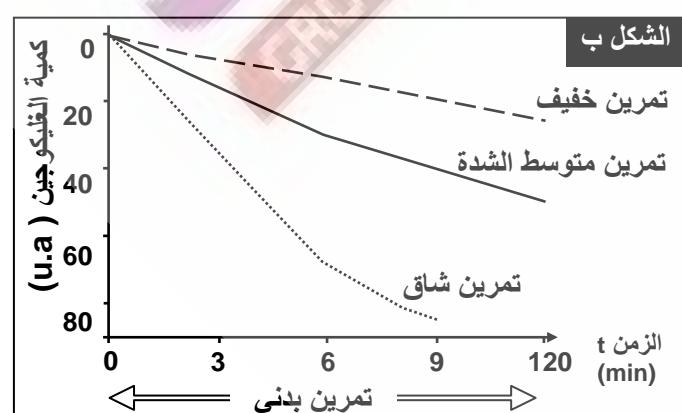
تبين الملاحظة المجهرية للنسيج العضلي، أنه غني بالشعيرات الدموية.

ببر التعرق الشديد للنسيج العضلي، يكون النشاط العضلي يرفع من حاجيات العضلة من القيت والأوكسجين، والتي تصل إلى العضلة عن طريق الدم.

**ب - نتائج تجريبية:** انظر الوثيقة 7 والوثيقة 8.**الوثيقة 7: الظواهر الطافية المصاحبة للتقلص العضلي.**

تقاس داخل قاعات مجهزة بمعدات خاصة، التغيرات التي تطرأ على مجموعة من الثوابت في مستوى العضلات، وذلك بتحليل عينات عضلية تؤخذ من رياضيين أثناء قيامهم بتمارين مختلفة. نتائج هذا القياس مماثلة على الشكلين أ وب.

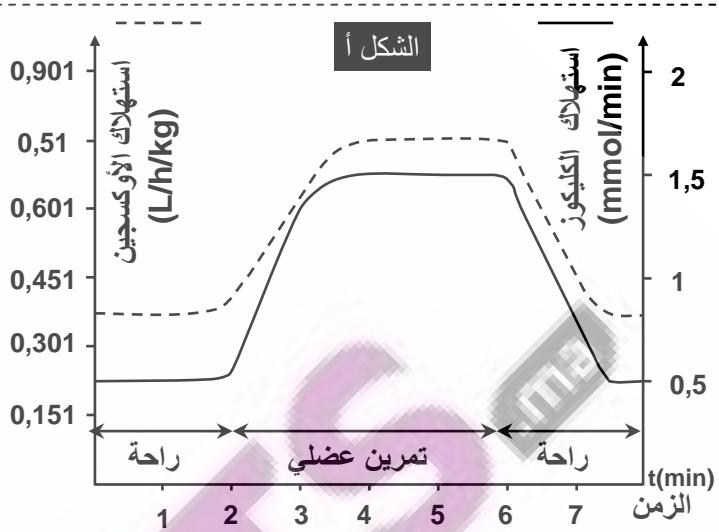
**الشكل أ:** قياس كمية الكليكوز المستعملة من طرف عضلات الطرفين السفليين عند شخص خلال مجهود عضلي متزايد الشدة. **الشكل ب:** قياس كمية الغليكوجين بعضلات الطرفين السفليين عند شخص خلال مجهود عضلي متزايد الشدة. حل الرسوم البيانية، واستنتاج متطلبات العمل العضلي.



**الوثيقة 8: تغيرات بعض المكونات الكيميائية للعضلة قبل وبعد التقلص العضلي.**

يعطي الشكل أ من الوثيقة تطور استهلاك ثاني الأوكسجين والكليكوز. والشكل ب، تغيرات بعض المكونات الكيميائية للعضلة، خلال الراحة وخلال المجهود العضلي. حل واستنتاج.

		خلال ساعة بالنسبة ل 1kg من العضلة	الشكل ب
في حالة نشاط	في حالة راحة		
56.325	12.220	حجم الدم الذي يعبر العضلة ب (I)	
5.207	0.307	حجم $O_2$ المستهلك ب (I)	
5.950	0.220	حجم $CO_2$ المطروح ب (I)	
8.432	2.042	كمية الكليكوز المستهلكة ب (g)	
0	0	البروتيدات المستهلكة ب (g)	
0	0	الدهون المستهلكة ب (g)	



### ج – تحليل واستنتاج:

نلاحظ خلال المجهود العضلي، ارتفاع استهلاك الكليكوز، ويلاحظ في نفس الوقت، انخفاض مدخلات العضلة من الغليكوجين. نلاحظ كذلك عند المجهود العضلي، ارتفاع استهلاك الأوکسجين، مع طرح المزيد من ثاني أكسيد الكربون.

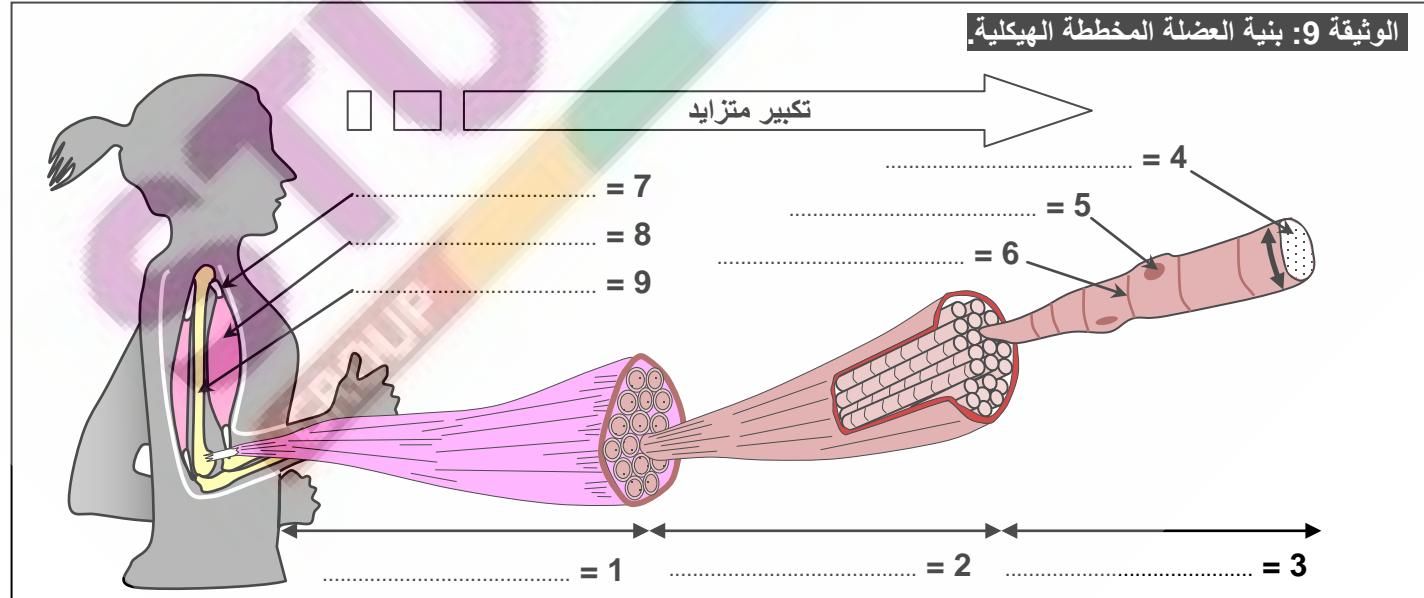
انطلاقاً من هذه المعطيات، نستنتج أن الطاقة اللازمة للنشاط العضلي، تأتي من تفاعل أكسدة الكليكوز، الناتج عن حلمأة الغليكوجين.

### III – بنية وفوق بنية النسيج العضلي.

#### ① بنية العضلة الهيكلية المخططة:

**أ – ملاحظات بالعين المجردة:** انظر الوثيقة 9.

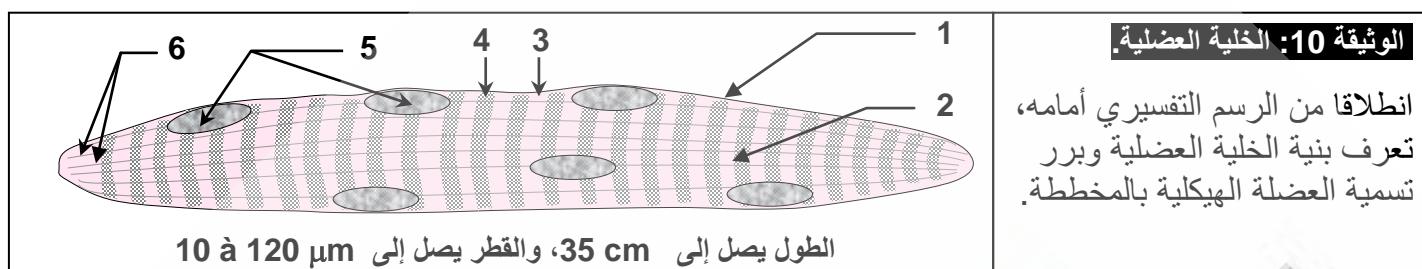
**الوثيقة 9: بنية العضلة المخططة الهيكلية.**



تكون العضلات مثبتة على العظام، وتظهر جزأين: جزء أحمر مرن، يسمى بطن العضلة، وهو أحمر بوجود بروتين خاص يسمى **الخضاب العضلي** (Myoglobin)، وجزء أبيض لؤلئي (nacré)، يوجد في نهاية 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). يتبيّن من تأريب العضلة (Délacération) أنها ذات بنية ليفية.

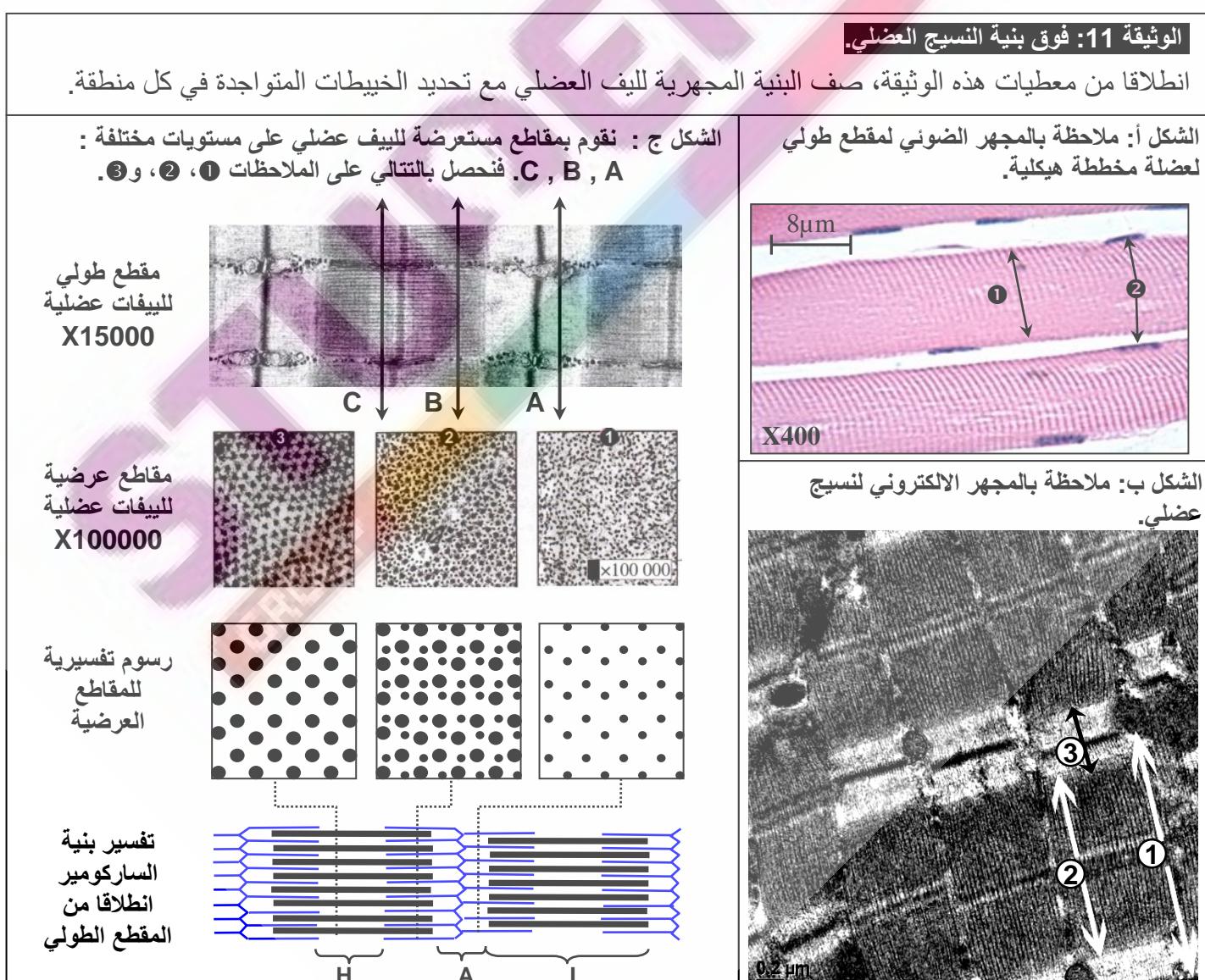
## ب - ملاحظات مجهرية: انظر الشكل أ، وثيقة 11 والوثيقة 10.



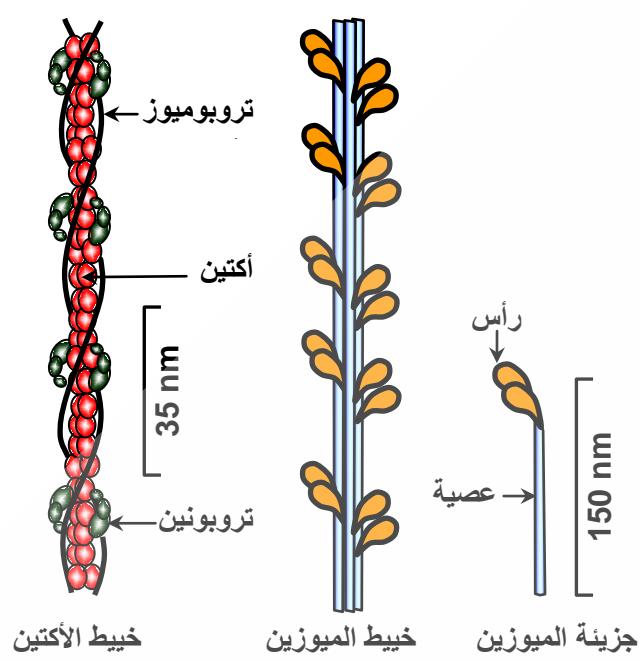
تتكون العضلة الهيكيلية المخططة من عدد كبير من الألياف، كل ليف هو عبارة عن خلية مستطيلة مخططة، وتحتوي على عدة مئات من النوى مرتبة على المحيط، نتكلم عن مختلط خلوي. كل ليف عضلي يكون محاطاً بغضاء سيتوبلازمي (ساركوليم)، ويحتوي على سيتوبلازم (ساركوبلازم). تظهر الخلية العضلية (الليف العضلي) مخططة طولياً، لوجود ليفات عضلية داخل الساركوبلازم. وتظهر هذه الخلية مخططة عرضياً، لكون الليفبات العضلية تتكون من تناوب أشرطة قائمة وأشرطة فاتحة.

## ② فوق بنية الليف العضلي: انظر الوثيقة 11 والوثيقة 12.

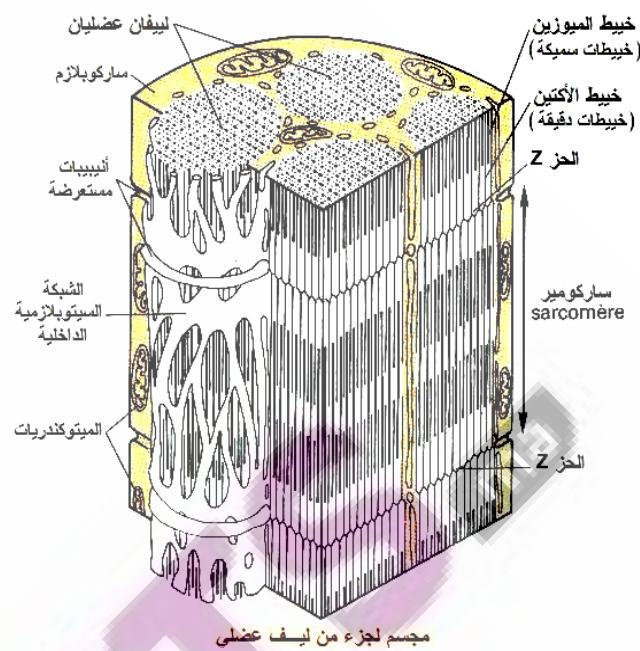
### أ - الملاحظات بالمجهر الإلكتروني:



الوثيقة 13: البنية الجزيئية للخيوط العضلية.



الوثيقة 12: مجسم لجزء من ليف عضلي.



تبين هذه الملاحظة أن الليفوفات العضلية تتكون من تناوب نوعين من الأشرطة:

- أشرطة فاتحة (Isotrope=I) تتكون من خيوط دقيقة من بروتين يسمى الأكتين (Actine)، ويتوسطها الحز Z. (de l'allemand zwischen, signifiant "entre") (Strie Z).
- أشرطة قائمة (Anisotrope=A)، تتكون من خيوط الأكتين، وخيوط سميك من بروتين يسمى الميوزين (Myosine) (de l'allemand heller, plus pâle H)، وتتوسطها المنطقة H. التي تحتوي على خيوط الميوزين فقط.

يتكون كل ليف عضلي من وحدات متتالية تسمى الساركوميرات (Sarcomère)، توجد بين حز Z. ويعتبر الساركومير الوحدة البنائية للليف العضلي.  
يحتوي الساركومير على عدد كبير من الميثوكندريات، وكمية هامة من الغликوجين، كما يحتوي على شبكة ساركوبلازمية وافرة، تحتوي على كمية كبيرة من الكالسيوم.

### ب - البنية الجزيئية للخيوط العضلية: انظر الوثيقة 13.

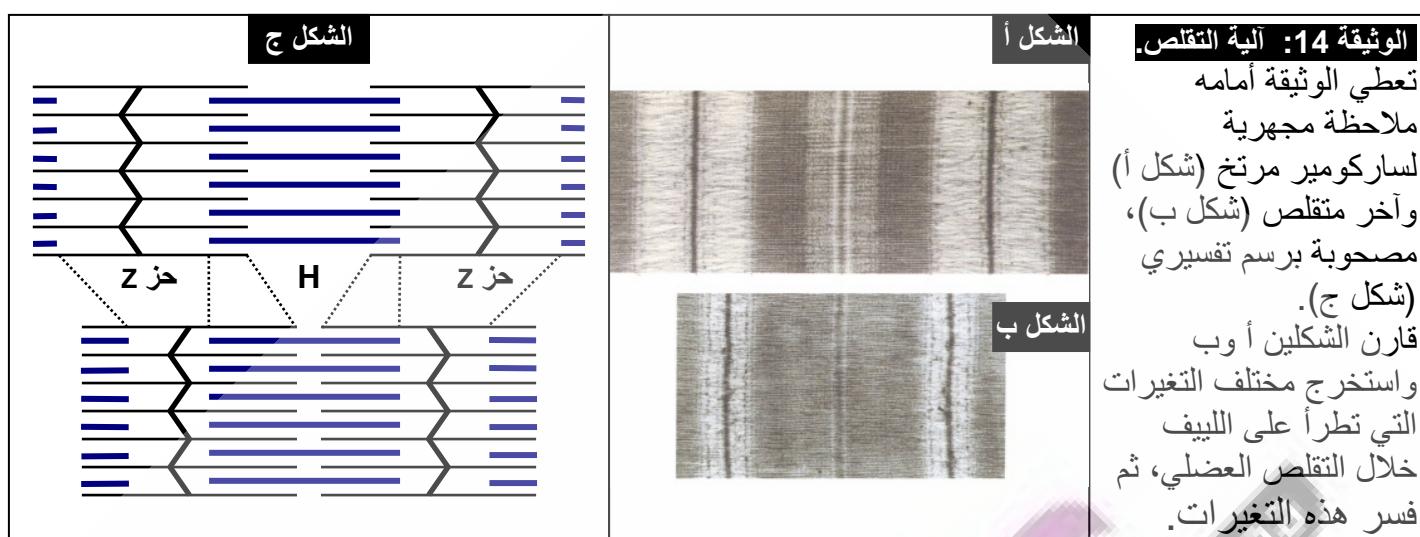
يتكون كل خيط دقيق، أو خيط الأكتين من بروتين يدعى الأكتين، وهو الطاغي، بالإضافة إلى بروتينين آخرين هما التروبونين والتروبوميوزين.  
يتكون الخيط السميك أو خيط الميوزين، من حزمة من جزيئات بروتين الميوزين، وكل جزيئة ميوزين تتكون من رأسين كرويين وعصبية.

## 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، لتم ملاحظتها بالمجهر الإلكتروني.  
تمثل الوثيقة 14، نتيجة هذه الملاحظة.



نلاحظ أن تقلص العضلة يصاحبه :

- تقصير على مستوى الساركوميرات (تقرب حزى Z).
- ينقص طول الشريط الفاتح I، والمنطقة H.
- يبقى طول الشريط القائم A ثابت.

### ب - تفسير واستنتاج:

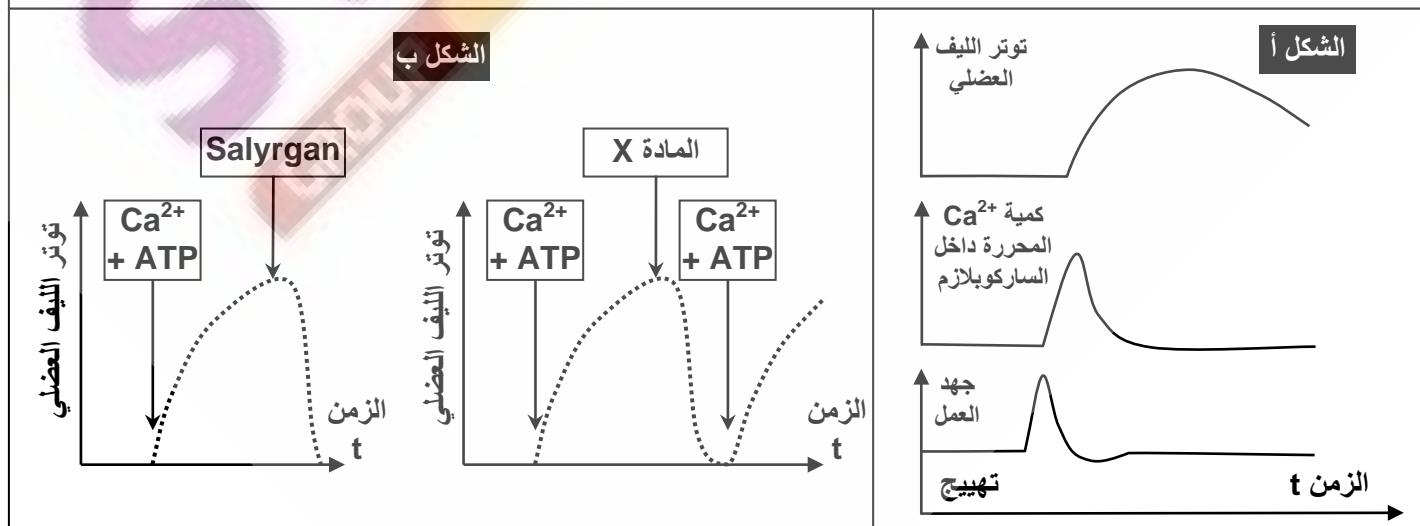
بما أن طول الأشرطة القائمة يبقى ثابت، نستنتج أن التقصير الملاحظ في الساركومير ليس ناتجاً عن تقصير في الخيوط العضلية، بل عن انزلاق هذه الخيوط بعضها بالنسبة لبعض، في اتجاه مركز الساركومير (انزلاق الأكتين على الميوزين)، فinent عن ذلك اقتراب حزى Z واختزال المنطقة H. نتكلم عن آلية انزلاق الخيوط. Glissement des filaments.

### ② آلية انزلاق الخيوط ؟

**أ - معطيات تجريبية:** أنظر الوثيقة 15.

#### الوثيقة 15: دور الكالسيوم و ATP في حدوث التقلص العضلي.

يعطي مبيان الشكل 1، نتائج قياس كل من كمية  $\text{Ca}^{2+}$  داخل ساركومير وتوترها بعد تهييجها. يعطي مبيان الشكل 2، نتائج تأثير وجود أو عدم وجود ATP و  $\text{Ca}^{2+}$  على توتر الليف العضلي. المادة X هي مادة كيميائية ترتبط بالكالسيوم وتمنع فعله. المادة Salyrgan، هي مادة كابحة لحملة ATP (ATPase inhibitor). حل هذه المنحنيات، واستنتج دور ATP و أيونات الكالسيوم في حدوث التقلص العضلي.



لقد بينت دراسات أخرى أن هناك تالف بين رؤوس الميوزين والأكتين، وبوجود أيونات الكالسيوم، ترتبط رؤوس الميوزين بالأكتين فيتشكل مركب الأكتوميوزين الذي يكون بنيات خاصة تسمى القناطر المستعرضة (Ponts transversals). بالاعتماد على هذه المعطيات والمعطيات السابقة، بين العلاقة بين أيونات الكالسيوم ونشوء القناطر المستعرضة.

## ب - تحليل واستنتاج:

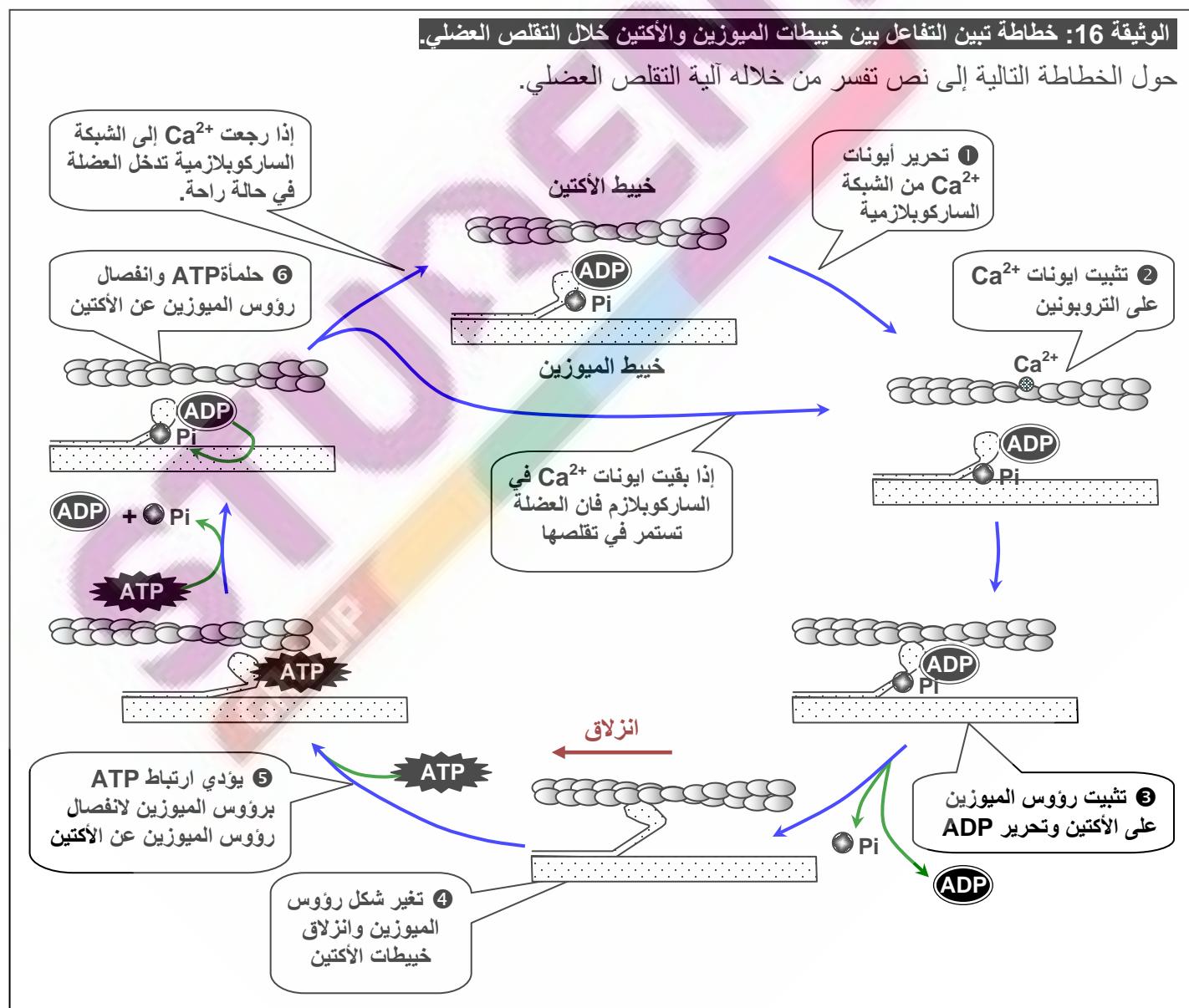
- الشكل أ : بعد تهيج العضلة مباشرة، نلاحظ ارتفاع تركيز الكالسيوم داخل ستيوبلازم الخلية العضلية، متبعا بارتفاع توتر الليف العضلي.
- الشكل ب : نلاحظ أن الليف العضلية تقلص بسرعة عند وجود ATP، وأيونات الكالسيوم. وعندما نمنع حلماء ATP بفعل Salyrgan، يختفي توثر الليف. أما عندما نمنع فعل  $\text{Ca}^{++}$ ، يختفي توثر الليف، رغم وجود ATP.

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

## ج - خلاصة : آلية التقلص العضلي. انظر الوثيقة 16

**الوثيقة 16: خططة تبين التفاعل بين خيطي الميوزين والأكتين خلال التقلص العضلي.**

حول الخططة التالية إلى نص تفسر من خلاله آلية التقلص العضلي.



- عند تبييه الليف العضلي، تحرر الشبكة الساركوبلازمية ايونات الكالسيوم.
- بحضور  $\text{Ca}^{++}$ ، يتم تحرير موقع ارتباط رؤوس الميوزين على الأكتين، والتي كانت محجوبة ببروتينات التروبوميوزين، فت تكون بذلك قنطر الأكتوميوزين.
- تلعب مركبات الأكتوميوزين دور أنزيم محفز لحلمة ATP، وتحrir طاقة تؤدي إلى دوران رؤوس الميوزين في اتجاه مركز الساركومير، وهذا ما يؤدي إلى تقلصه.
- عند انتهاء التبيه، يضخ  $\text{Ca}^{++}$  داخل الشبكة الساركوبلازمية، فترتبط جزيئات أخرى لـ ATP برؤوس الميوزين، مما يؤدي إلى انفصال الأكتين عن الميوزين، وحدوث الارتخاء.

## ٧ - كيف يتم تجديد الطاقة اللازمة للتقلص العضلي ؟

### أ - معطيات تجريبية:

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

الاستنتاجات	نتائج المعايرة		المواضيع	الملاحظات	التجارب
	قبل التقلص	بعد التقلص			
①	1.21	1.62	غликوجين	تقلص العضلة لمدة 3 دقائق	اهاجة العضلة كهربائيا
	1.95	1.5	حمض لبني		
	2	2	ATP		
	1.5	1.5	فوسفوكرياتين		
②	1.62	1.62	غликوجين	تقلص العضلة في نفس ظروف التجربة السابقة	اهاجة العضلة بوجود الحمض الايودي الأسيتيك (مادة توقف احلال الكليكورز)
	1.5	1.5	حمض لبني		
	2	2	ATP		
	0.4	1.5	فوسفوكرياتين		
③	1.62	1.62	غликوجين	العضلة تتقلص بصفة عادية ثم تتوقف	اهاجة العضلة بوجود الحمض الايودي الأسيتيك ومادة مانعة للفوسفوكرياتين كيناز (أنزيم ضروري لانحلال الفوسفوكرياتين )
	1.5	1.5	حمض لبني		
	0	2	ATP		
	1.5	1.5	فوسفوكرياتين		

### ب - تحليل واستنتاج:

① : نلاحظ خلال التجربة الأولى أن نسبة الغликوجين تتحفظ، 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 التحمر اللبني، حيث تمت حلمة الكليكورز إلى كليكورز، يخضع هذا الأخير للتحمر ليعطي حمض لبني + ATP.

② : خلال التجربة الثانية، انخفضت 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:



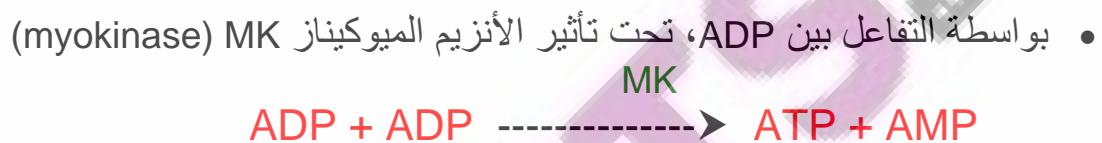
③ : خلال التجربة الثالثة، توقفت العضلة عن التقلص بعد استنفاذ مخزونها من ATP ، يدل هذا على عدم تجديد ATP.

### ج - طرق تجديد ATP:

حسب سرعة تدخلها يمكن تصنيف الطرق المتجدد لATP، إلى ثلاثة أنواع:

#### a - الطرق اللاهوائية السريعة:

في أقل من 30 ثانية ينطلق تفاعلاً لتجديد ATP:



#### b - الطرق اللاهوائية المتوسطة السرعة:

تمثل في التخمر اللبناني، حيث تتم حلماة الغليكوجين العضلي إلى كليكوز، يخضع للانحلال في الجبلة الشفافة إلى حمض البيروفيك، الذي يتحول إلى حمض لبنى.



#### c - الطرق الهوائية البطيئة:

تمثل في التنفس الخلوي، حيث تتم حلماة الكليكوجين العضلي إلى كليكوز، يتم هدمه بشكل تام بوجود الأوكسجين، ليتحول إلى CO<sub>2</sub> وماء، مع تحرير كمية كبيرة من الطاقة (ATP)، مع تحرير طاقة على شكل حرارة، هي الحرارة المؤخرة.