

## الفصل الثاني:

# دور العضلة الهيكلية المخططة في تمويل الطاقة

### تمهيد:

يمكن كل من التنفس والتخمير 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 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 الكليوكوز كمصدر للطاقة؟

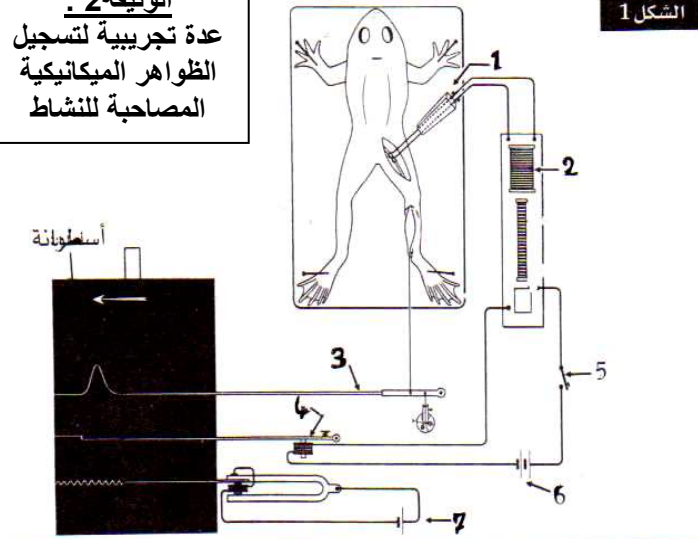
## 1 - الدراسة التجريبية للتقلص العضلي.

### ① تسجيل التقلص العضلي عند الضفدعة

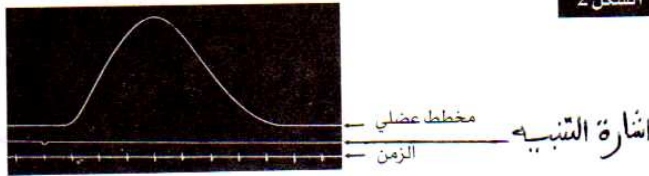
أ - التركيب التجريبي: أنظر الوثيقة 1، الوثيقة 2، لوحة 6.

### اللوحة 6

**الوثيقة 2:**  
عدة تجريبية لتسجيل  
الظواهر الميكانيكية  
المصاحبة للنشاط

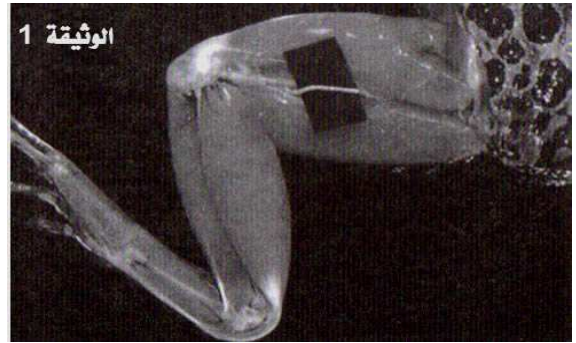


الشكل 2



### الوثيقة 1:

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: الوثيقة 2. 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 مهبجات اصطناعية، تكون إما ميكانيكية، حرارية، كيميائية، أو كهربائية.

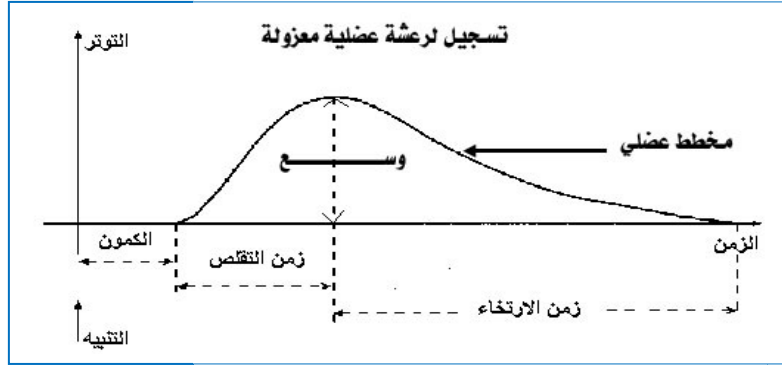


## ب - استجابة العضلة للتهيج الكهربائي:

a - استجابة العضلة لاهاجة منفردة: أنظر الوثيقة 2 الشكل 2 لوحة 6.

عند تسليط اهاجة فعالة، تستجيب العضلة لاهاجة، فنقول أنها هيوجة، (Excitable) ولها خاصية الاهتياجية. كما تستجيب بالتقلص، 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:

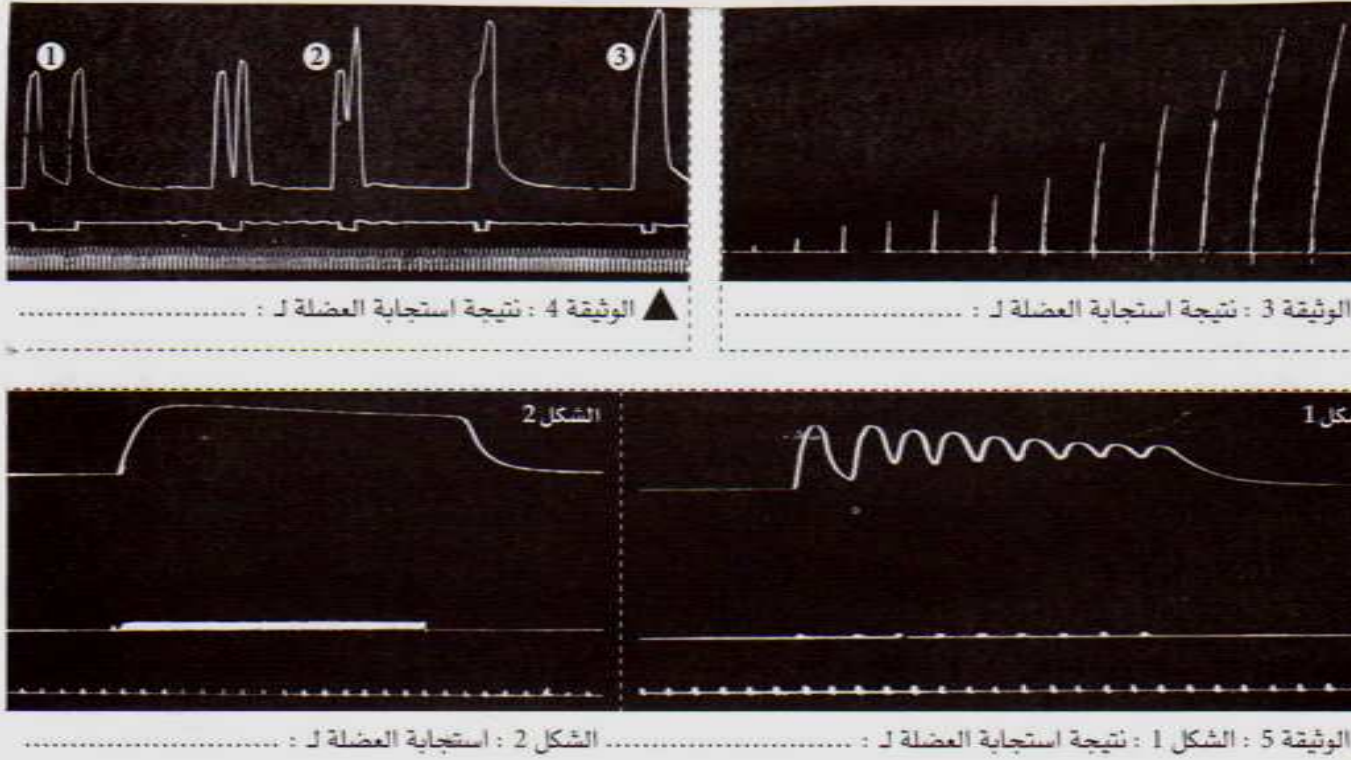
- فترة الكمون: هي الفترة الزمنية الفاصلة بين لحظة الاهاجة وبداية الاستجابة.
- مرحلة التقلص: يرتفع خلالها توتر العضلة.
- مرحلة الارتخاء: خلالها تأخذ العضلة أبعادها الأولية.



### ملحوظات:

- ★ يتغير شكل التخطيط العضلي حسب سرعة الأسطوانة المسجلة.
- ★ أنظر الوثيقة 3 لوحة 6 : عندما نخضع العضلة لاهاجات متباعدة، ذات شدة متصاعدة، لا تظهر الاستجابة إلا عندما تكون شدة التهيج تساوي أو أكبر من قيمة معينة، تسمى عتبة الاهاجة (Seuil (d'excitation، أو الريباز.

### اللوحة 6



### b - استجابة العضلة لاهاجتين متتاليتين: أنظر الوثيقة 4 لوحة 6.

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

- ① إذا وقع التهيج الثاني بعد انتهاء الرعشة الأولى، تكون الرعشتان متماثلتين ومستقلتين.
- ② إذا وقع التهيج 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 التهيج الثاني خلال مرحلة تقلص الاستجابة الأولى، يلاحظ تراكم المنحنين. نتكلم عن الالتحام التام، يكون فيه وسع التوتر الاجمالي أكبر من وسع التوتر خلال رعشة معزولة.  
**C - استجابة العضلة لاهجات متتالية:** أنظر الوثيقة 5 لوحة 6.

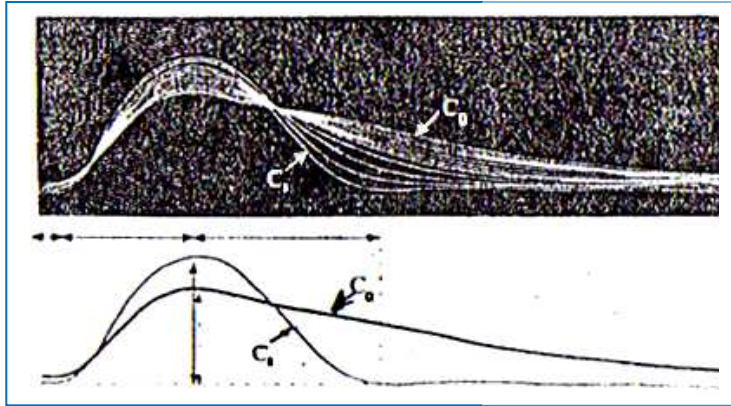
عند تطبيق سلسلة من الاهجات المتتالية، نلاحظ حالتين:

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

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

**ملاحظة:** استجابة العضلة المتعبة.

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



**II - الظواهر التي تصاحب التقلص العضلي.**

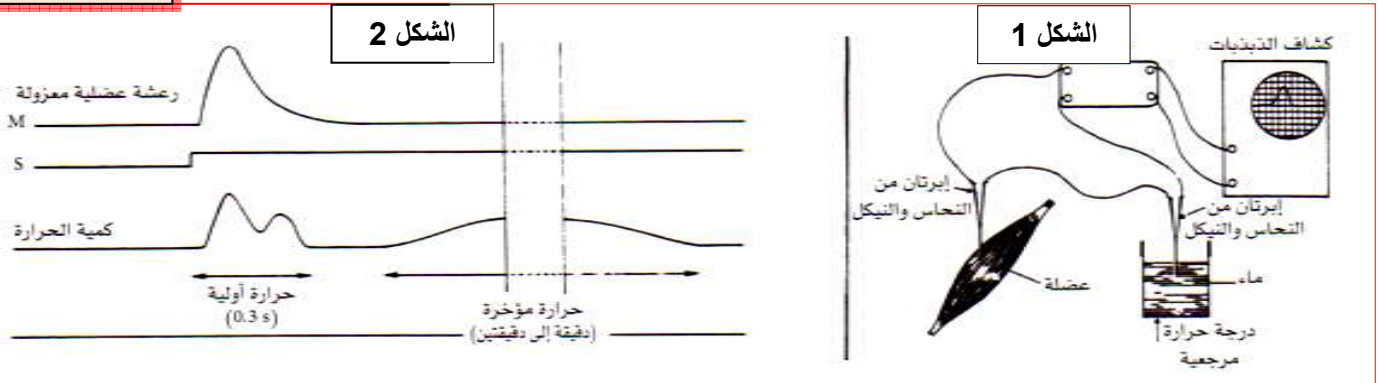
التقلص العضلي ظاهرة ميكانيكية ترافقها ظواهر حرارية، طاقة و كيميائية.

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 الشكل 1 الوثيقة 6 لوحة 6.

اللوحة 6



نستعمل في هذه الدراسة تقنية العمود الحراري Thermopile.

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

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

**ب - النتائج التجريبية:** أنظر أنظر الشكل 2 الوثيقة 6 لوحة 6. انطلاقاً 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 والطاقة :

#### أ - ملاحظات:

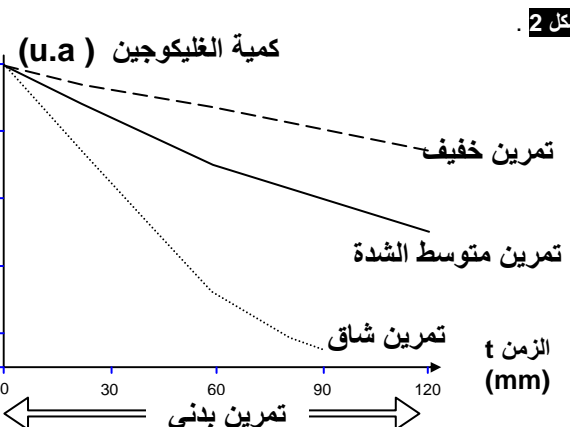
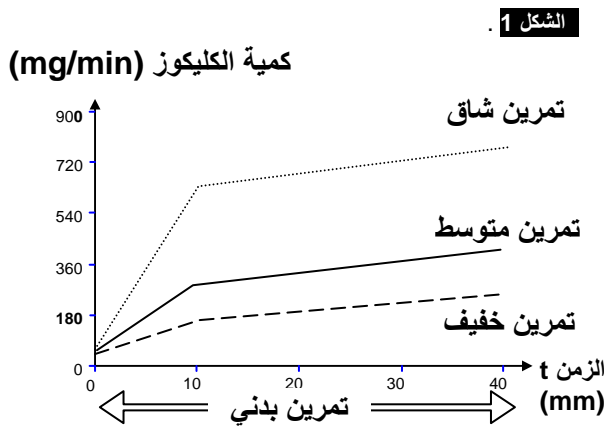
تبين الملاحظة المجهرية للنسيج العضلي، أنه غني بالشعيرات الدموية. يبرر التعرق الشديد للنسيج العضلي، بكون النشاط العضلي يرفع من حاجيات العضلة من القيت والأوكسجين، والتي تصل إلى العضلة عن طريق الدم.

#### ب - نتائج تجريبية:

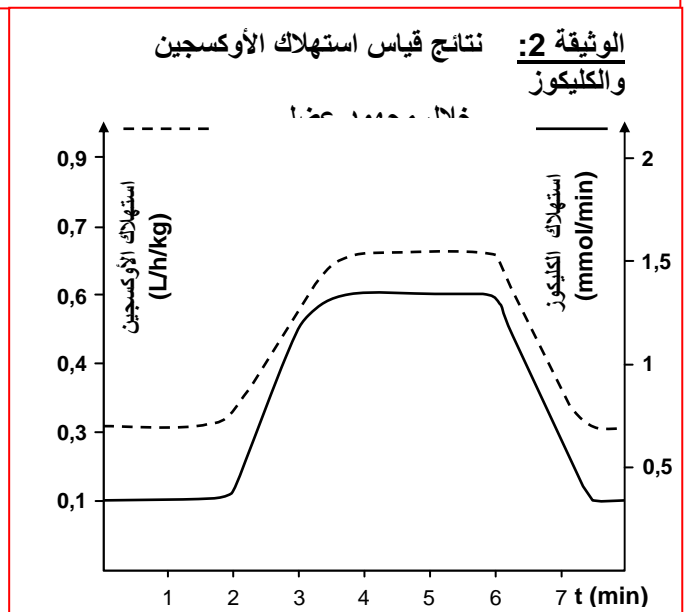
انطلاقاً من تحليل معطيات هذه الوثائق 1، 2، 3، لوحة 7، استنتج متطلبات العمل العضلي

#### اللوحة 7

**الوثيقة 1:** قياس كمية الكليكوز ( شكل 1 )، والجليكوجين ( 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.



| الوثيقة 3:                        |              | حجم الدم الذي يعبر العضلة<br>ب ( l )   |
|-----------------------------------|--------------|--|
| خلال ساعة بالنسبة ل 1Kg من العضلة | في حالة نشاط |  |
| 56.325                            | 12.220       | حجم الأكسجين المستهلك ب ( l )          |
| 5.207                             | 0.307        | حجم ثاني أكسيد الكربون المطروح ب ( l ) |
| 8.432                             | 2.042        | كمية الكليكوز المستهلكة ب ( g )        |
| 0                                 | 0            | البروتينات المستهلكة ب ( g )           |
| 0                                 | 0            | الدهون المستهلكة ب ( g )               |



## 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.

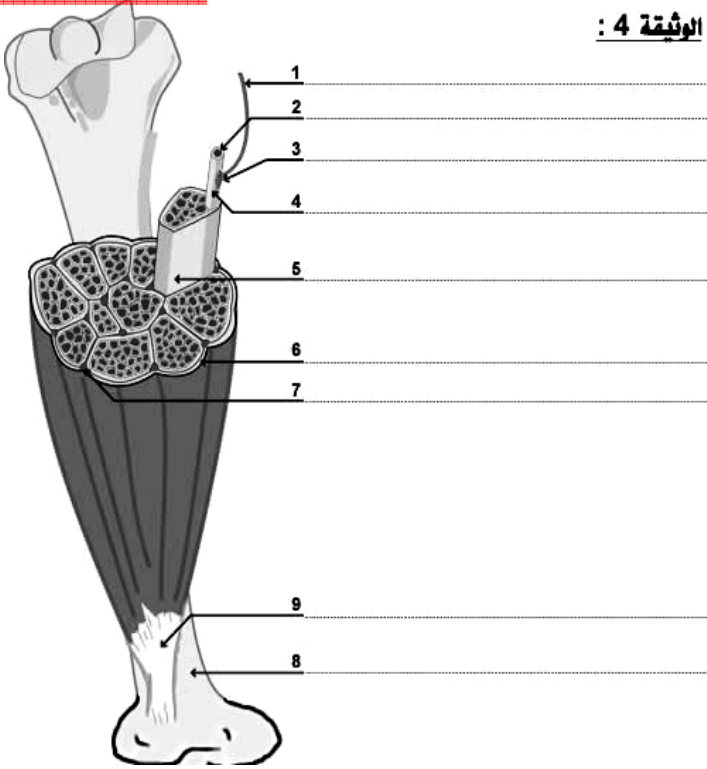
انطلاقاً من هذه المعطيات، نستنتج أن الطاقة اللازمة للنشاط العضلي، تأتي من تفاعل أكسدة الكليكوز، الناتج عن حلمأة الغليكوجين.

## III - بنية وفوق بنية النسيج العضلي.

### ① بنية العضلة الهيكلية المخططة:

أ - ملاحظات بالعين المجردة: أنظر الوثيقة 4، لوحة 7:

اللوحة 7



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.

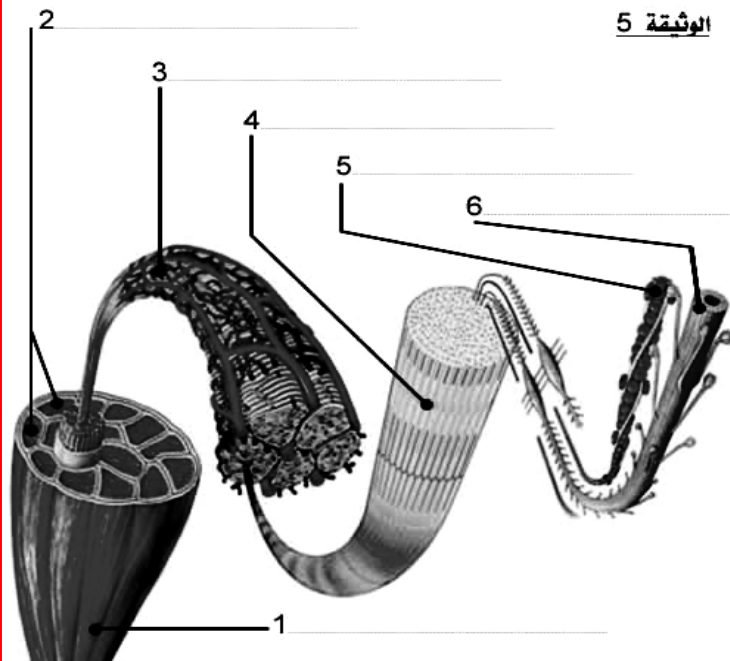
### ب - ملاحظات مجهرية:

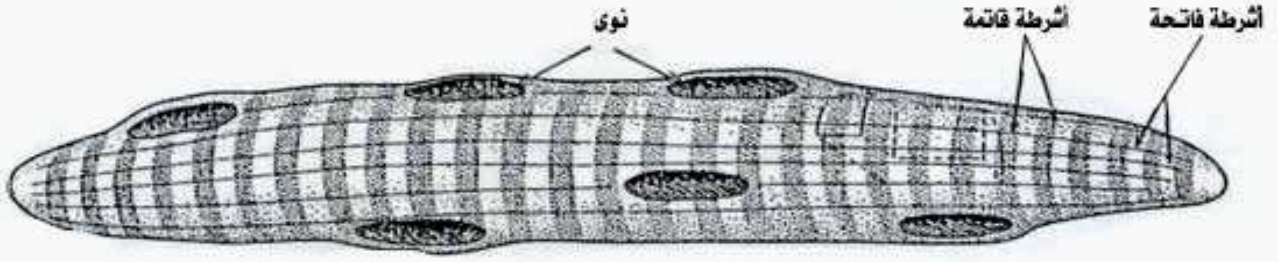
أنظر وثيقة 5، لوحة 7 ( أنظر الرسم أسفله )

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 محاطاً بغشاء سيتوبلازمي، يدعى ساركوليم، ويحتوي على سيتوبلازم يدعى ساركوبلازم.

تظهر الخلية العضلية ( الليف العضلي ) مخططة طويلاً، لوجود لبيفات عضلية داخل الساركوبلازم. وتظهر هذه الخلية مخططة عرضياً، لكون اللبيفات العضلية تتكون من تناوب أشرطة قاتمة وأشرطة فاتحة.





خلية عضلية = ليف عضلي

## ① فوق بنية الليف العضلي:

أ - الملاحظات بالمجهر الالكتروني:

☒ انطلاقاً من معطيات الوثيقة 1، 2، 3، 4، لوحة 8، صف بنية المقاطع المستعرضة للييفات العضلية، ثم بين أن الساركومير يعتبر الوحدة البنوية للليف العضلي.

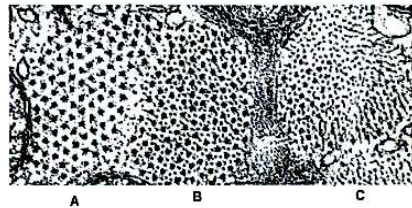
### اللوحة 8

مقطع طولي  
للييفات عضلية  
X15000



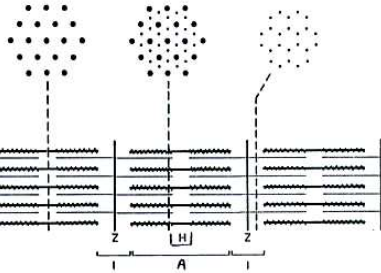
مقاطع على مستوى : A B C

مقطع عرض  
للييفات عضلية  
X100000



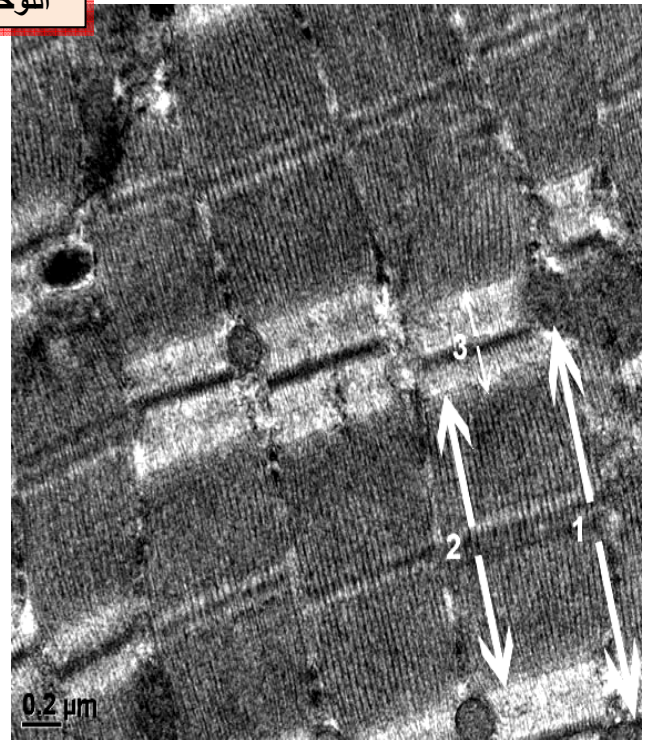
A B C

تفسير المقاطع  
العرضية



تفسير بنية الساركومير  
انطلاقاً من مقطع طولي

**الوثيقة 2:** نقوم بمقاطع مستعرضة للييف عضلي على مستويات مختلفة : A , B , C.



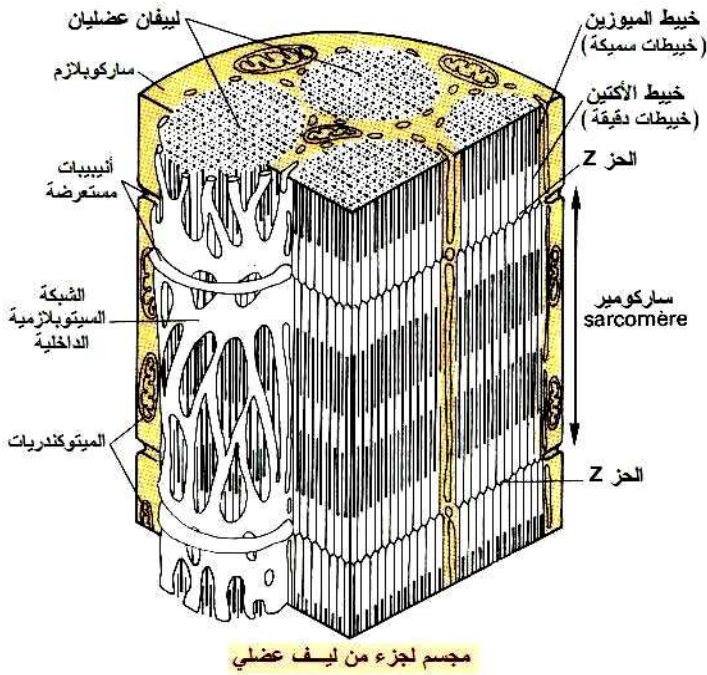
**الوثيقة 1:** ملاحظة بالمجهر الالكتروني لنسيج عضلي.

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

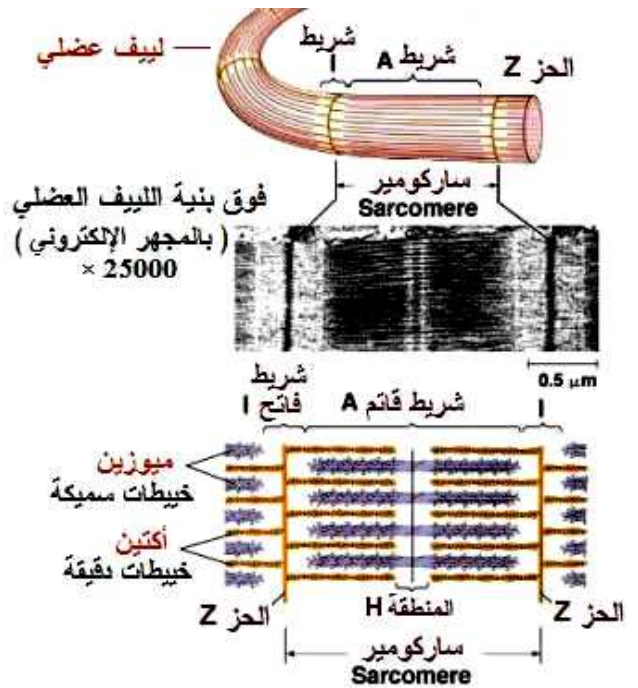
- أشرطة فاتحة (Isotropique=I) تتكون من خييطات دقيقة من بروتين يسمى الأكتين (Actine) ، ويتوسطها الحز Z. (Strie Z). (de l'allemand *zwischen*, signifiant "entre")
- أشرطة قاتمة (Anisotropique=A)، تتكون من خييطات الأكتين، وخييطات سميكة من بروتين يسمى الميوزين (Myosine)، وتتوسطها المنطقة H (de l'allemand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

## اللوحة 8

## الوثيقة 4 :



## الوثيقة 3 :

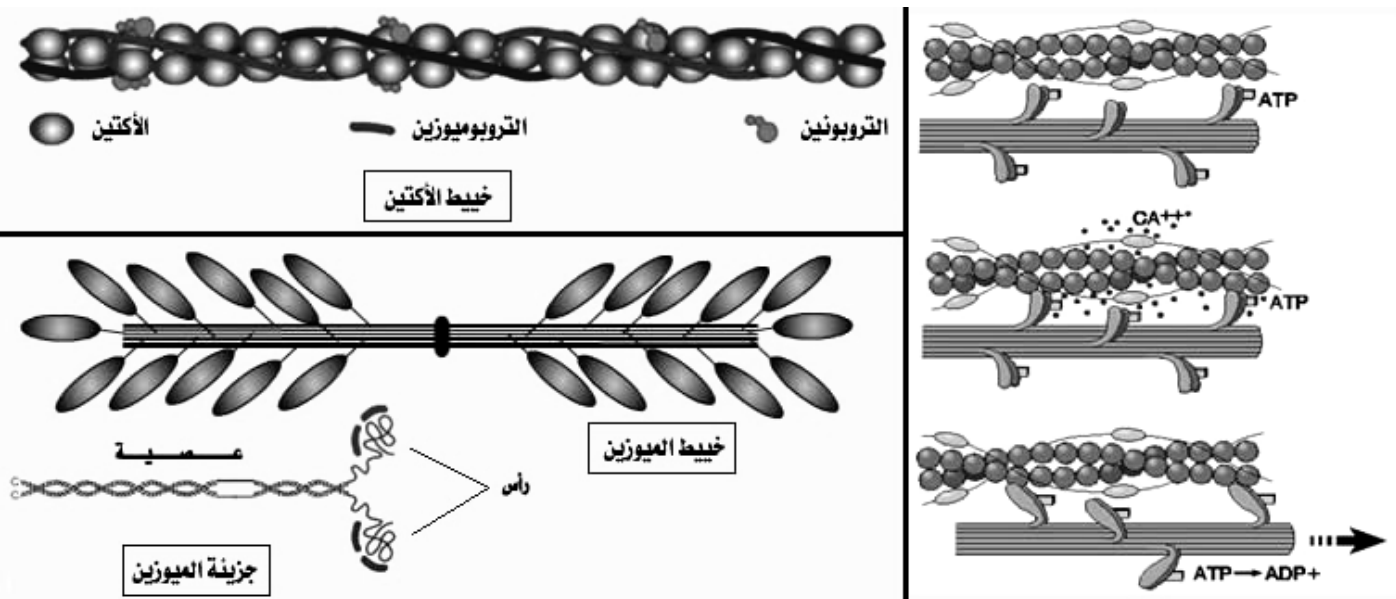


يتكون كل ليف عضلي من وحدات متتالية تسمى الساركوميرات (Sarcomère)، توجد بين حزي Z. ويعتبر الساركومير الوحدة البنوية للليف العضلي. يحتوي الساركومير على عدد كبير من الميتوكوندريات، وكمية هامة من الغليكوجين، كما يحتوي على شبكة ساركوبلازمية وافرة، تحتوي على كمية كبيرة من الكالسيوم.

ب - البنية الجزيئية للخييطات العضلية: أنظر الوثيقة 1 لوحة 9.

## اللوحة 9

## الوثيقة 1 :



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

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

#### IV – آلية التقلص العضلي.

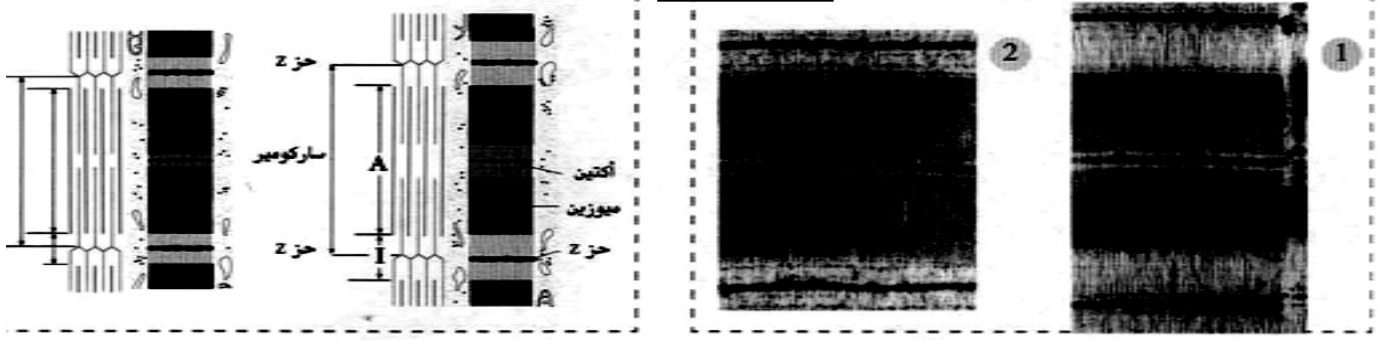
① ماذا يحدث أثناء التقلص العضلي؟

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 8، نتيجة هذه الملاحظة.

#### اللوحة 8

#### الوثيقة 5 :



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

☑ نلاحظ أن تقلص العضلة يصاحبه :

- تقصير على مستوى الساركوميرات ( تقارب حزبي 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 الخييطات العضلية، بل عن انزلاق هذه الخييطات بعضها بالنسبة لبعض، في اتجاه مركز الساركومير ( انزلاق الأكتين على الميوزين )، فينتج عن ذلك اقتراب حزبي Z واختزال المنطقة H. نتكلم عن آلية انزلاق الخييطات. Glissement des filaments.

#### ② آلية انزلاق الخييطات ؟

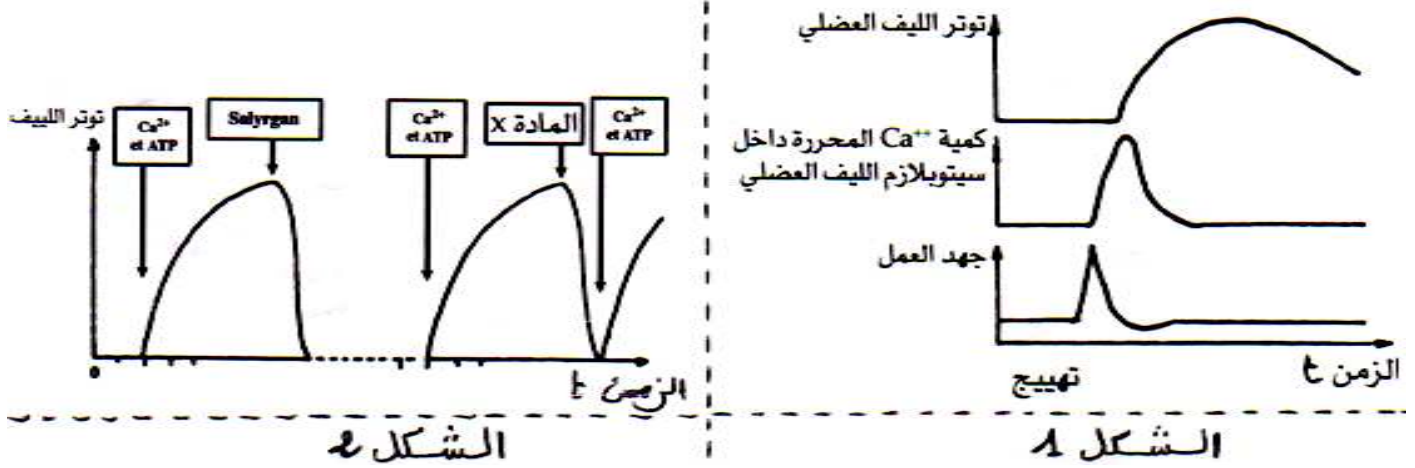
أ – معطيات تجريبية:

انطلاقا من معطيات الوثيقة 2، لوحة 9، 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 9 ). بالاعتماد على المعطيات السابقة ومعطيات الوثيقة 1، 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 تهيجها. 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 لحمأة ATP.



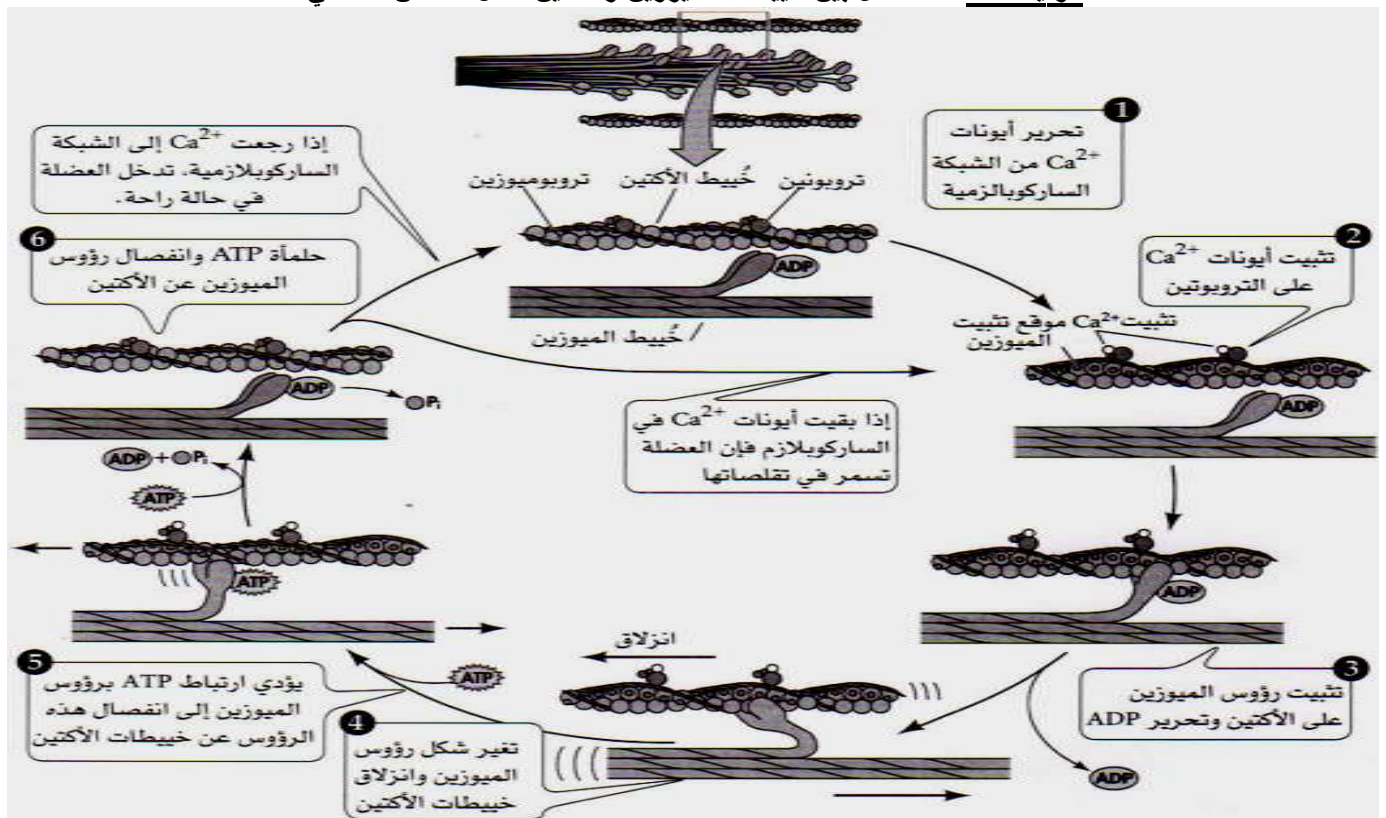
### اللوحة 9

### ب - تحليل واستنتاج:

- الشكل 1 : بعد تهيج العضلة مباشرة، نلاحظ ارتفاع تركيز الكالسيوم داخل سيتوبلازم الخلية العضلية، متبوعا بارتفاع توتر الليف العضلي.
- الشكل 2 : نلاحظ أن الليفيات العضلية تتقلص بسرعة عند وجود ATP، وايونات الكالسيوم. وعندما نمنع لحمأة ATP بفعل Salyrgan، يختفي توتر الليف. أما عندما نمنع فعل  $Ca^{2+}$  ، يختفي توتر الليف، رغم وجود ATP. نستنتج من هذه المعطيات أن توتر الليف العضلي يستلزم وجود ATP و  $Ca^{2+}$ . هذا الأخير يعمل على تحرير مواقع الارتباط بين الميوزين والأكتين، لتتكون قناطر مستعرضة.

### ج - خلاصة : آلية التقلص العضلي. أنظر الوثيقة 1، لوحة 9، الوثيقة 1، لوحة 10.

#### الوثيقة 1 : التفاعل بين خييطات 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، وحدث الارتخاء.

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

### أ - معطيات تجريبية:

تعطي الوثيقة 2، لوحة 10، تغيرات بعض المكونات الكيميائية للعضلة، قبل وبعد التقلص. قارن معطيات جدول الوثيقة، واقترح تفسيراً لقيم ATP، قبل التقلص وبعده.

### اللوحة 10

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

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

### 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:



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

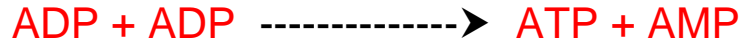
### ب - طرق تجديد ATP:

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

#### a - الطرق اللاهوائية السريعة:

في أقل من 30 ثانية ينطلق تفاعل لتجديد ATP:

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

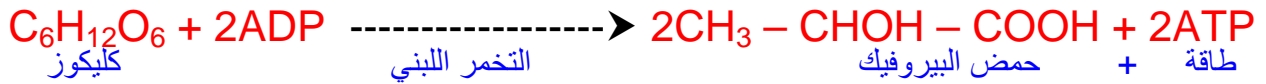
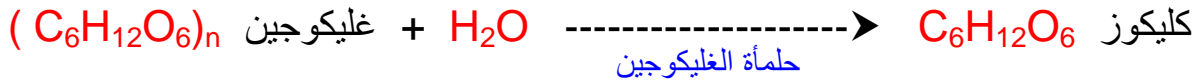


- بواسطة الفوسفوكرياتين :  $ADP + CP \longrightarrow ATP + C$

ويكون 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 - الطرق الهوائية البطيئة:

تتمثل في التنفس الخلوي، حيث تتم حلمأة الكليكوجين العضلي إلى كليكوز، يتم هدمه بشكل تام بوجود الأوكسجين، ليتحول إلى  $CO_2$  وماء، مع تحرير كمية كبيرة من الطاقة (ATP)، مع تحرير طاقة على شكل حرارة، هي الحرارة المؤخرة.