الوحدة الأولى، 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 إذن من الظواهر المستهلكة للطاقة.

- **كيف يتم التقلص العضلي؟ وما هي البنيات المسئولة عنه؟**
- **كيف يتم تحويل الطاقة الكيميائية إلى طاقة ميكانيكية؟**
- **كيف يتم تجديد الـ ATP على مستوى العضلة؟**

I – الدراسة التجريبية للتقلص العضلي.

① تسجيل التقلص العضلي عند الضفدعة: أنظر الوثيقة 1.

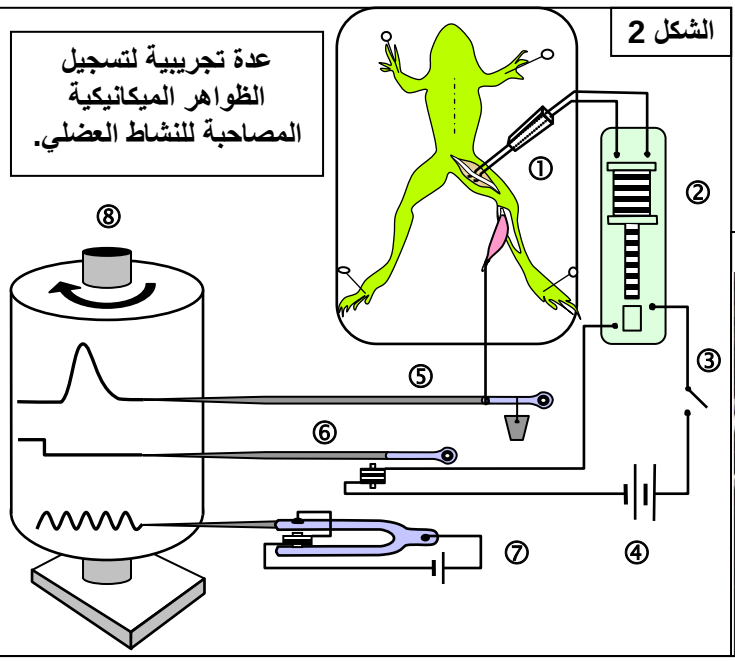
الوثيقة 1: تسجيل التقلص العضلي للطرف الخلفي لضفدعة.

لدراسة التقلص العضلي، نأخذ ضفدعة، نخرب دماغها ونخاعها الشوكي،لإزالة كل ردود الفعل الإرادية واللاإرادية. بعد تثبيتها على لوحة خشبية، نشرح الطرف الخلفي لإبراز العصب الوركي (الشكل 1)، نقطع وتر العقب لعضلة بطن الساق، ونوصله بجهاز تسجيل التقلص العضلي (الشكل 2). نهيج العضلة إما مباشرة، بوضع الالكترودين المهيجين على سطحها، أو بصفة غير مباشرة، بوضع الالكترودين على العصب الوركي.

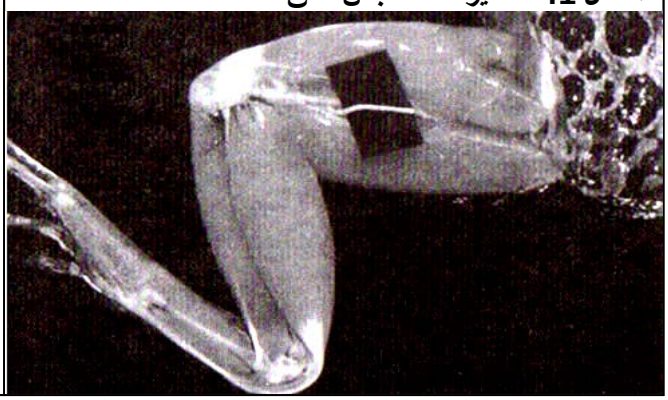
تهيج العضلة بواسطة مهيجات اصطناعية، تكون إما ميكانيكية، حرارية، كيميائية، أو كهربائية.

انطلاقا من تحليل معطيات الوثيقة، استخرج الشروط التجريبية لتسجيل التقلص العضلي.

الشكل 2



الشكل 1: تحضير عضلة بطن ساق ضفدعة



① = مساري التهييج، ② = مهيج، ③ = قاطع التيار الكهربائي، ④ = مصدر التيار الكهربائي، ⑤ = قلم مسجل، ⑥ = مسجل إشارة التنبيه، ⑦ = شوكة رنانة لتسجيل إشارة الزمن، ⑧ = أسطوانة مسجلة

لتسجيل التقلص العضلي:

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

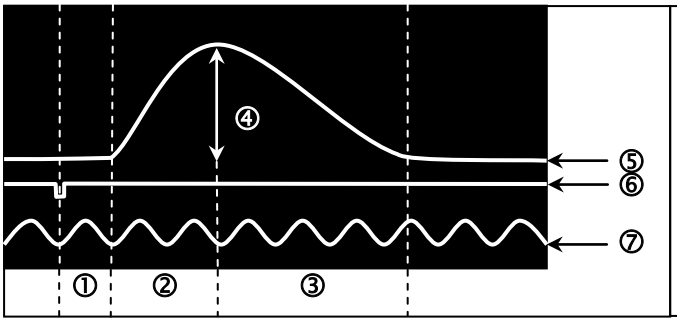
② استجابة العضلة للتهييج الكهربائي:

أ - استجابة العضلة لاهاجة منفردة: أنظر الوثيقة 2.

الوثيقة 2: استجابة العضلة لتهييج وحيد.

تعطي الوثيقة أمامه تسجيلا لرعشة عضلية معزولة ناتجة عن تسليط اهاجة كهربائية واحدة فعالة على العضلة.
حلل هذا التسجيل مع تحديد مختلف عناصره.

①= مرحلة الكمون ②= مرحلة التقلص
③= مرحلة الارتخاء ④= وسع ⑤= مخطط عضلي
⑥= إشارة التهييج ⑦= إشارة الزمن



★ عند تسليط اهاجة فعالة، تستجيب العضلة للاهاجة، فنقول أنها هيوجة (Excitable)، ولها خاصية الاهتياجية. كما تستجيب بالتقلص، فنقول أنها قلوصة Contractile، وتسمى هذه الخاصية بالقلوصية La contractilité.

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

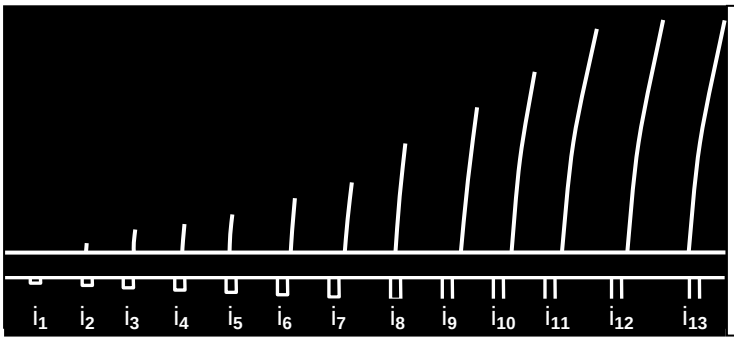
- فترة الكمون: هي الفترة الزمنية الفاصلة بين لحظة الاهاجة (حادث التنبيه) وبداية الاستجابة.
- مرحلة التقلص: خلالها يتم تقلص العضلة، حيث ينخفض طول العضلة ويرتفع توترها (زيادة الوسع).
- مرحلة الارتخاء: خلالها تسترجع العضلة أبعادها الأولية (انخفاض الوسع).

ملحوظة: يتغير شكل التخطيط العضلي حسب سرعة الأسطوانة المسجلة.

ب- استجابة العضلة لاهاجات متباعدة ذات شدة متصاعدة: أنظر الوثيقة 3.

الوثيقة 3: استجابة العضلة لاهاجات منفردة.

عندما نعرض العضلة لسلسلة تهييجات منعزلة ومتباعدة ومتزايدة الشدة ($i_1, i_2 ... i_{13}$)، نحصل على المخطط العضلي أمامه. (تدار الأسطوانة المسجلة يدويا بين التنبيهات).
انطلاقا من تحليل هذه المعطيات، اربط العلاقة بين شدة التهييج ووسع الاستجابة العضلية.



★ **التحليل:** بعد التهييج i_1، لا نحصل على أي استجابة عضلية، لكن ابتداء من التهييج i_2 نحصل على استجابات، تتمثل في رعشات عضلية، يزداد وُسعها تدريجيا مع زيادة شدة التهييج. لكن ابتداء من التهييج i_{12} يبقى وسع الاستجابة ثابتا رغم زيادة شدة التهييج.

★ **التفسير:**

- بعد التهييج i_1، ليس هناك تسجيل عضلي لكون هذه الشدة تعتبر غير فعالة (تحت بدئية). لكن الإهاجة i_2 تُحدث رعشة عضلية، فتسمى بذلك عتبة التهييج (Seuil d'excitation) أو الريوباز (Rhéobase)، وهي أقل شدة إهاجة تُسبب حدوث التقلص العضلي.
- بعد الإهاجة i_2، وكلما ازدادت شدة الإهاجة، يزداد وُسع الرعشات العضلية، مما يُفسَّر بكون العضلة تتكون من وحدات بنيوية قابلة للتقلص، حيث يزداد عدد الوحدات المتقلصة كلما ازدادت شدة الاهاجة، فيكون تقلص العضلة أقوى.
- ابتداء من الإهاجة i_{12} يبقى وُسع الرعشات تابتا، الشيء الذي يُفسَّر بكون كل الوحدات المُكونة للعضلة أصبحت مُتقلصة.

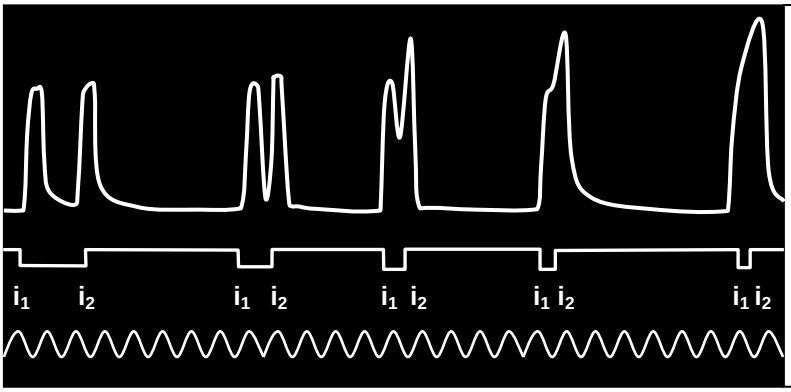
ت| -**استجابة العضلة لاهاجتين متتاليتين:** أنظر الوثيقة 4

الوثيقة 4: استجابة العضلة لاهاجتين متتاليتين.

نعرض العضلة لاهاجتين فعالتين متتاليتين من نفس الشدة، مع تغيير المدة الفاصلة بينهما (المدة الفاصلة من اليسار إلى اليمين: 90ms, 50ms, 40ms, 30ms, 20ms).

يعطي الشكل أمامه، المخططات العضلية المحصل عليها.

حلل التسجيل المحصل عليه، واربط العلاقة بين المدة الفاصلة بين الاهاجتين المتتاليتين ومظهر الرعشات العضلية.



★ **الحالة الأولى:** إذا وقع التهييج الثاني بعد انتهاء الاستجابة الأولى، نحصل على رعشتين عضليتين متماثلتين ومستقلتين لهما نفس الوسع.

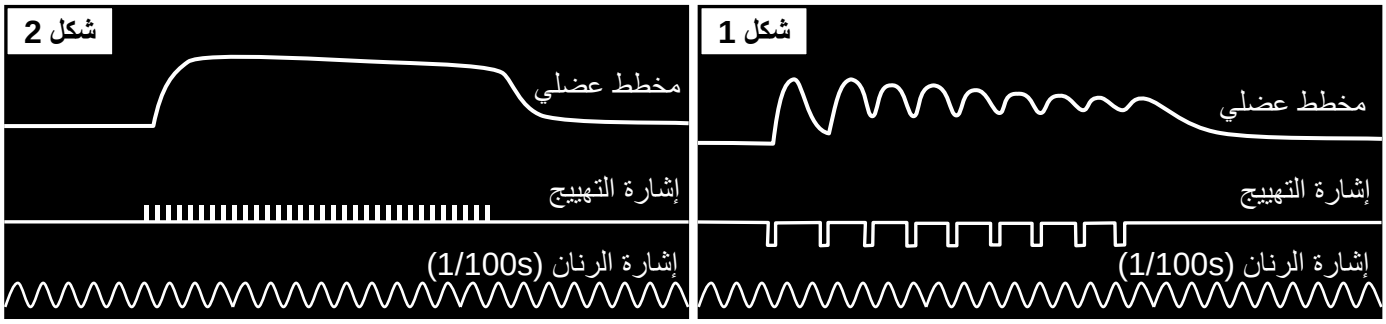
★ **الحالة الثانية:** إذا وقع التهييج الثاني خلال مرحلة ارتخاء الاستجابة الأولى، يكون وسع الاستجابة الثانية أكبر من وسع الاستجابة الأولى، كما يبقى المنحنيان منفصلان. نتكلم عن الالتحام غير التام.

★ **الحالة الثالثة:** 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.

ث| -**استجابة العضلة لاهاجات متتالية:** أنظر الوثيقة 5.

الوثيقة 5: استجابة العضلة لاهاجات متتالية.

نعرض العضلة إلى سلسلة اهاجات فعالة من نفس الشدة، متباعدة زمنيا (الشكل 1)، أو متقاربة (الشكل 2).
صف التسجيلين المحصل عليهما، ثم استنتج مفهوم الكزاز التام والكزاز الناقص.



عندما نعرض العضلة لسلسلة من الاهاجات المتتالية، نلاحظ حالتين حسب تردد الاهاجات:

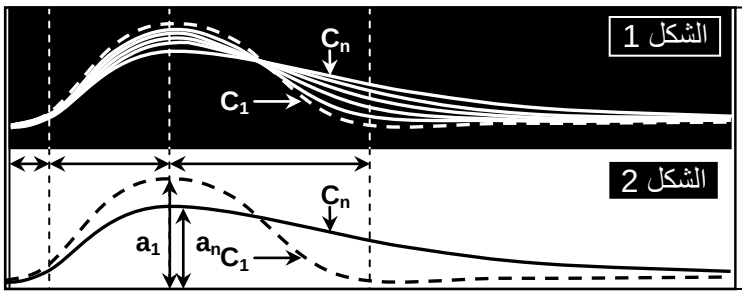
الشكل 1: عندما يكون تردد التهييجات ضعيفا، نحصل على تسجيل مكون من ذبذبات متتالية، نسمي هذا التقلص الكزاز الناقص (Tétanos imparfait)، والذي يفسر بالتحام غير تام للرعشات العضلية، لأن كل تهييج يحدث خلال فترة الارتخاء للاستجابة السابقة.

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. أنظر الوثيقة 6.

الوثيقة 6: استجابة العضلة المتعبة.

نخضع العضلة لسلسلة اهاجات من نفس الشدة، لمدة طويلة، فنسجل التخطيط العضلي الممثل على الشكل 1 (C_1 إلى C_n هي رعشات عضلية). أما الشكل 2 فيمثل رسما للرعشة الأولى C_1، والرعشة الأخيرة C_n.
حدد من خلال الشكلين فيم يتمثل العياء العضلي؟



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.

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 والنتائج المحصلة: أنظر الوثيقة 7

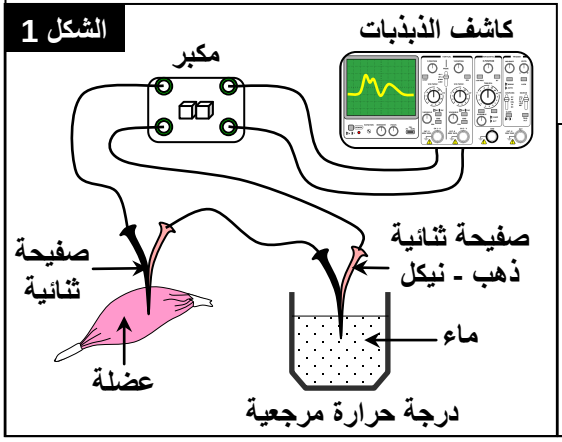
الوثيقة 7: الظواهر الحرارية المرافقة للتقلص العضلي.

نستعمل في هذه الدراسة تقنية العمود الحراري **Thermopile** (شكل1)، إذ يتكون العمود الحراري من إبرتين كهروحراريتين، تتكون كل إبرة من معدنين مختلفين (نحاس و نيكل أو ذهب ونيكل).تغرز إحدى الإبرتين في العضلة ويحافظ على الأخرى في درجة حرارة ثابتة (إبرة مرجعية). إن اختلاف الحرارة بين الإبرتين، يولد فرق جهد كهربائي تتناسب شدته مع درجة حرارة العضلة المتقلصة.

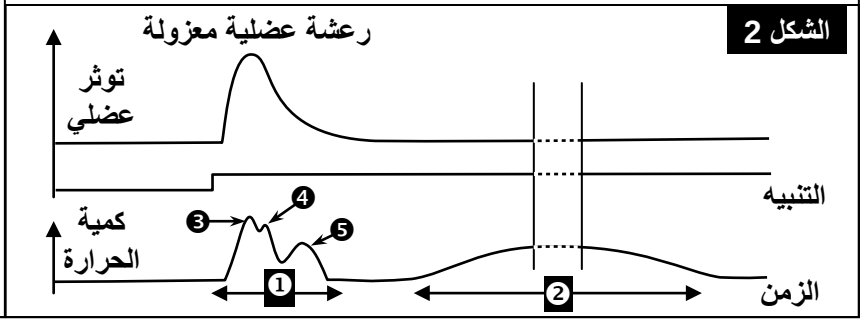
يبين الشكل 2 التسجيل المحصل عليه.

استخرج أنواع الحرارة المحررة من طرف العضلة في حالة نشاط.

الشكل 1



الشكل 2



ب- تحليل واستنتاج:

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

- الحرارة الأولية: هي الحرارة الابتدائية، كميتها كبيرة، لكنها لا تدوم مدة طويلة. 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.

ملاحظة: بغياب الأكسجين، نلاحظ طرح الحرارة الأولية فقط، مما يدل على أن الحرارة الأولية مرتبطة بتفاعلات حي لاهوائية (التخمر)، بينما الحرارة المؤخرة مرتبطة بتفاعلات حي هوائية (التنفس).

② الظواهر الكيميائية والطاقية:

أ - ملاحظات:

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

ب- نتائج تجريبية: أنظر الوثيقة 8 والوثيقة 9.

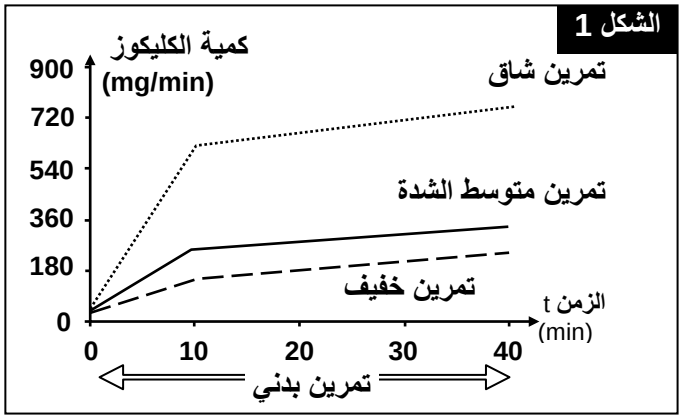
الوثيقة 8: الظواهر الطاقية المصاحبة للتقلص العضلي.

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 ممثلة على الشكلين1 و2.

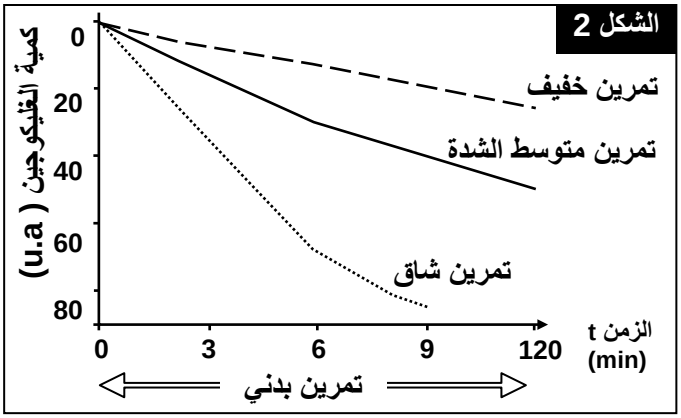
الشكل 1: كمية الكليكوز المستعملة من طرف عضلات الطرفين السفليين عند شخص خلال مجهود عضلي متزايد الشدة. الشكل 2: كمية استهلاك الغليكوجين بعضلات الطرفين السفليين عند شخص خلال مجهود عضلي متزايد الشدة.

حلل الرسوم البيانية، واستنتج متطلبات العمل العضلي.

الشكل 1



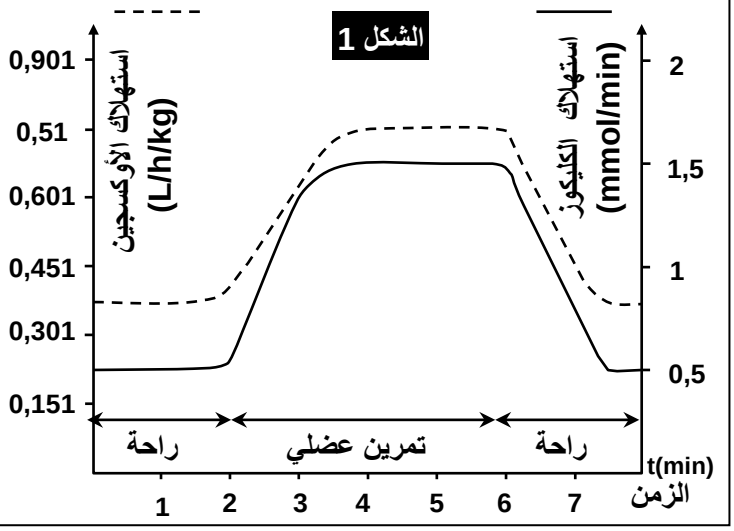
الشكل 2



الوثيقة 9: تغيرات بعض المكونات الكيميائية للعضلة قبل وبعد التقلص العضلي.

يعطي الشكل 1 من الوثيقة تطور استهلاك ثنائي الأوكسجين والكليكوز. والشكل 2، تغيرات بعض المكونات الكيميائية للعضلة، خلال الراحة وخلال المجهود العضلي. حلل واستنتج.

الشكل 1



الشكل 2

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

تا -تحليل واستنتاج:

نلاحظ خلال المجهود العضلي، ارتفاع استهلاك الكليكوز، ويلاحظ في نفس الوقت، انخفاض مدخرات العضلة من الغليكوجين. نلاحظ كذلك عند المجهود العضلي، ارتفاع استهلاك الأكسجين، 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.

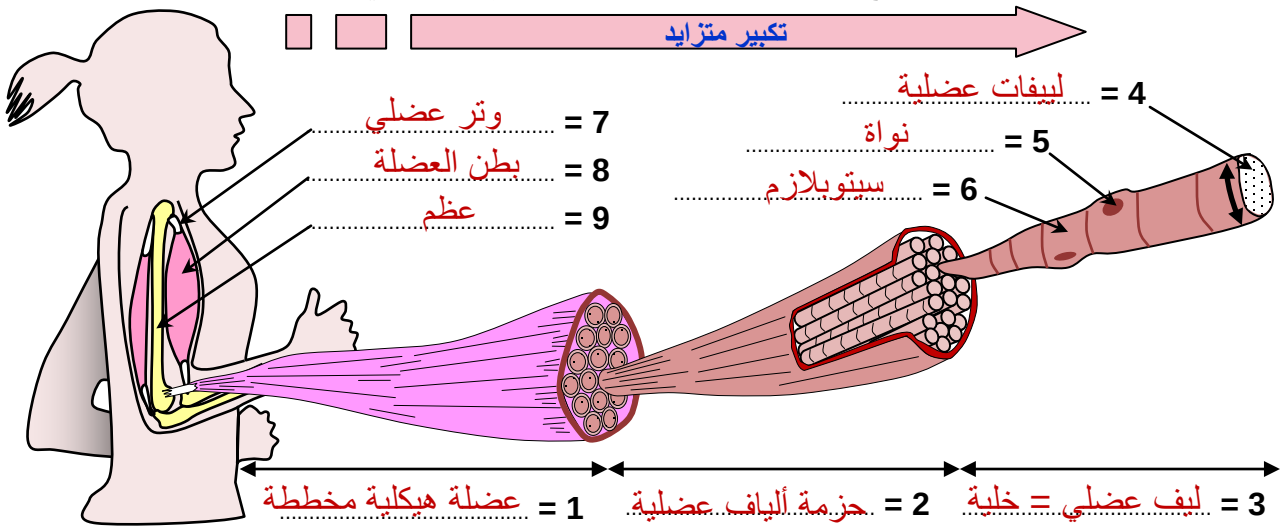
III – بنية وفوق بنية النسيج العضلي.

① بنية العضلة الهيكلية المخططة:

أ - ملاحظات بالعين المجردة: أنظر الوثيقة 10.

الوثيقة 10: بنية العضلة المخططة الهيكلية.

يتطلب النشاط العضلي تقلص عدة عضلات وفق آلية محددة. لفهم هذه الآلية، ينبغي أولا معرفة بنية و فوق بنية هذه العضلات ثم التعرف على أبرز مكوناتها. تعطي الوثيقة أسفله رسما تفسيريا لبنية العضلة الهيكلية المخططة.
تعرف بنية العضلة الهيكلية المخططة، مع إعطاء الأسماء المناسبة للأرقام الممثلة في الوثيقة.



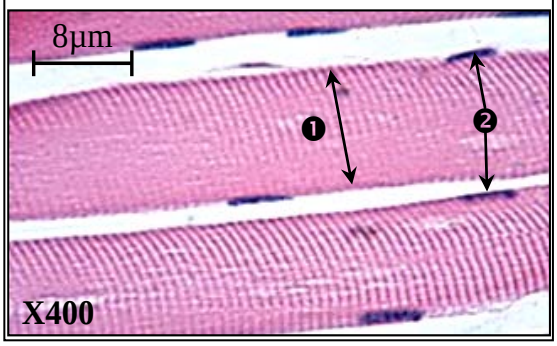
تكون العضلات مثبتة على العظام، وتظهر جزأين: جزء أحمر مرن، يسمى بطن العضلة، وهو أحمر بوجود بروتين خاص يسمى الخضاب العضلي (Myoglobine)، وجزء أبيض لؤلئي (nacré)، يوجد في نهايتي العضلة، ويسمى وتر عضلي (Tendon).
تبين ملاحظة المقطع العرضي للعضلة أنها تتكون من كتل مفصولة عن بعضها بواسطة نسيج ضام، هي الحزم العضلية (Faisceau musculaire). كما أن تأريب العضلة (Délacération) يبين أنها ذات بنية ليفية.
تتشكل إذن العضلة الهيكلية المخططة من عدة ألياف عضلية متجمعة على شكل حزم، هذه الألياف عبارة عن خلايا عملاقة متعددة النوى ومُكونة بدورها من لُييفات عضلية.

ب| -ملاحظات مجهرية: أنظر وثيقة 11.

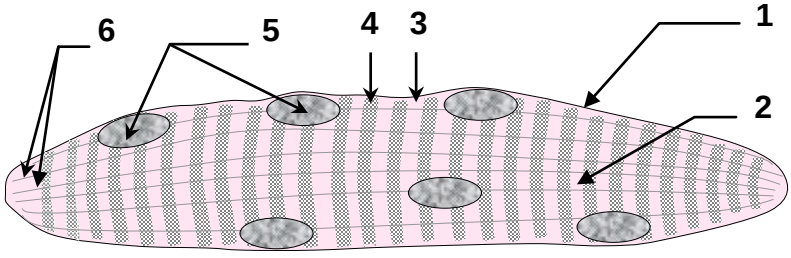
الوثيقة 11: ملاحظات مجهرية للنسيج العضلي.

يعطي الشكل 1 من الوثيقة، ملاحظة بالمجهر الضوئي لمقطع طولي لعضلة هيكلية مخططة. و الشكل 2، رسما تفسيريا لبنية ليف عضلي. بعد ملاحظة معطيات هذه الوثيقة، أعط الأسماء المناسبة لأرقام الوثيقة، ثم صف البنية المجهرية لليف العضلي، وبرر تسمية العضلة الهيكلية بالمخططة.

الشكل 1: ❶= ليف عضلي ❷ = نوى



الشكل 2:



الطول يصل إلى 35 cm، والقطر يصل إلى 10 à 120 µm

1= غشاء سيتوبلازمي = ساركوليم، 2 = سيتوبلازم = ساركوبلازم، 3 = شريط فاتح،
4 = شريط قاتم، 5 = نوى، 6 = لييفات عضلية.

تتكون العضلة الهيكلية 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 محاطا بغشاء سيتوبلازمي (ساركوليم)، ويحتوي على سيتوبلازم (ساركوبلازم).

تظهر الخلية العضلية (الليف العضلي) مخططة طوليا، لوجود ليفات عضلية داخل الساركوبلازم. وتظهر هذه الخلية مخططة عرضيا، لكون الليفات العضلية تتكون من تناوب أشرطة قاتمة وأشرطة فاتحة.

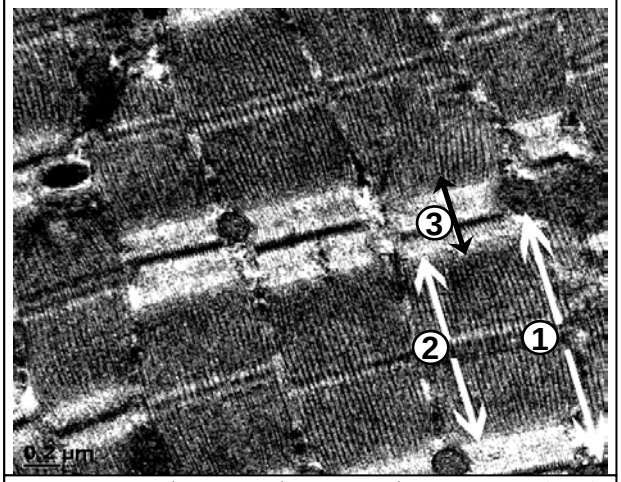
② فوق بنية العضلة الهيكلية المخططة:

أ - ملاحظات بالمجهر الالكتروني: أنظر الوثيقة 12.

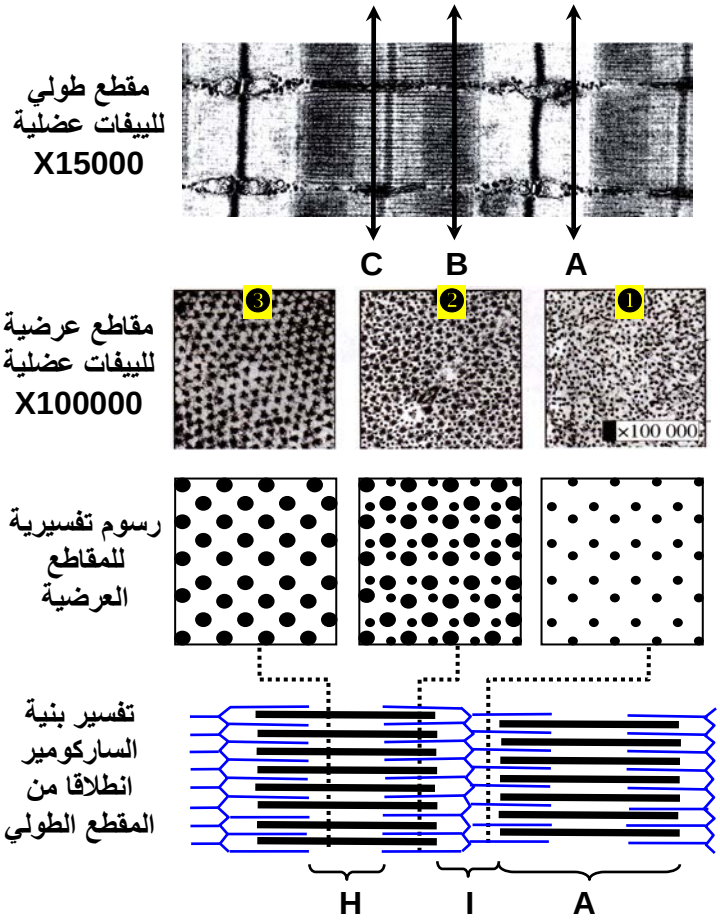
الوثيقة 12: فوق بنية النسيج العضلي.

قصد التمكن من تحديد العناصر المتدخلة خلال التقلص العضلي، نقترح استثمار معطيات الوثائق أسفله.
انطلاقا من هذه المعطيات، صف البنية المجهرية لليف العضلي مع تحديد الخيوط المتواجدة في كل منطقة.

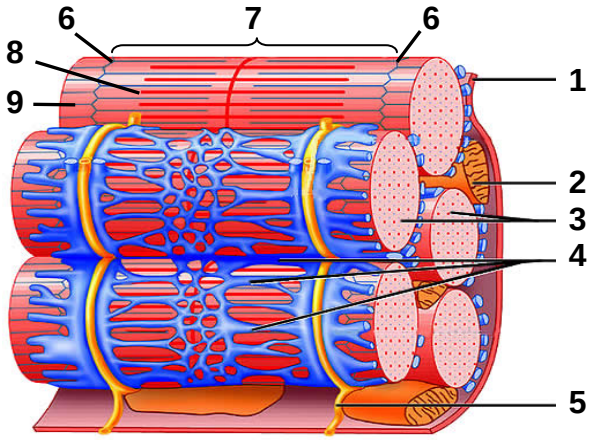
الشكل 1: ملاحظة الكترونغرافية لنسيج عضلي.



الشكل 2: نقوم بمقاطع مستعرضة لليف عضلي على المستويات: A , B , C. فنحصل بالتتالي على الملاحظات ❶، ❷، و❸.



الشكل 3: مجسم لجزء من ليف عضلي.



- أسماء عناصر الشكل 3 من الوثيقة:

1= ساركوليم، 2= ميتوكندري، 3= ليفان عضليان، 4= شبكة سيتوبلازمية داخلية،
5= أنيبيبات مستعرضة، 6= حز Z، 7= ساركومير، 8= ميوزين، 9= أكتين

- يتبين من معطيات الوثيقة أن الليفات العضلية تتكون من تناوب نوعين من الأشرطة:

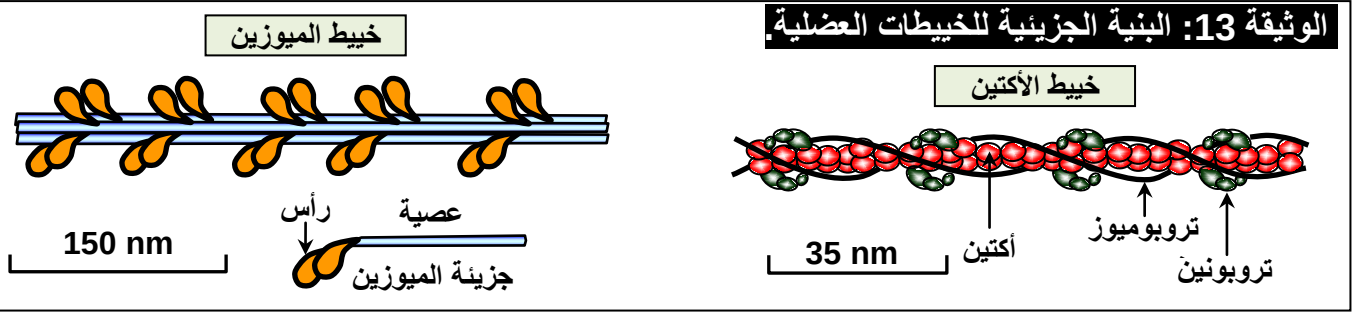
✓ أشرطة فاتحة (Isotropique=I) تتكون من خيوطات دقيقة من بروتين يسمى الأكتين (Actine)، ويتوسطها الحز Z. (Strie Z) (de l'allemand zwischen, signifiant "entre")

✓ أشرطة قاتمة (Anisotropique=A)، تتكون من خيوطات الأكتين، وخيوطات سميكة من بروتين يسمى الميوزين (Myosine)، وتتوسطها المنطقة H (de l'allemand heller, plus pâle) . التي تحتوي على خيوطات الميوزين فقط.

- 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، وعلى شبكة ساركوبلازمية وافرة، وقد بينت دراسات أخرى أن الساركوبلازم يتوفر على كمية هامة من الغليكوجين، كما أن الشبكة الساركوبلازمية تحتوي على كمية كبيرة من الكالسيوم.

ب- البنية الجزيئية للخيطات العضلية: أنظر الوثيقة 13.

الوثيقة 13: البنية الجزيئية للخيطات العضلية.



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.

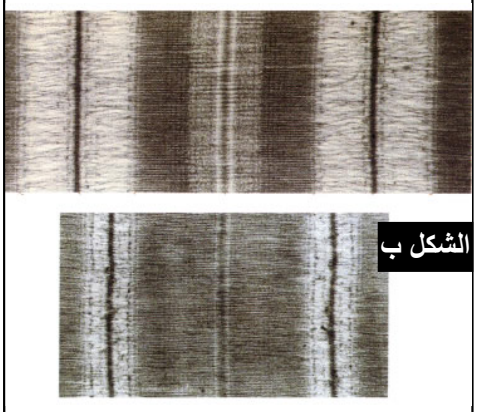
① ماذا يحدث أثناء التقلص العضلي؟

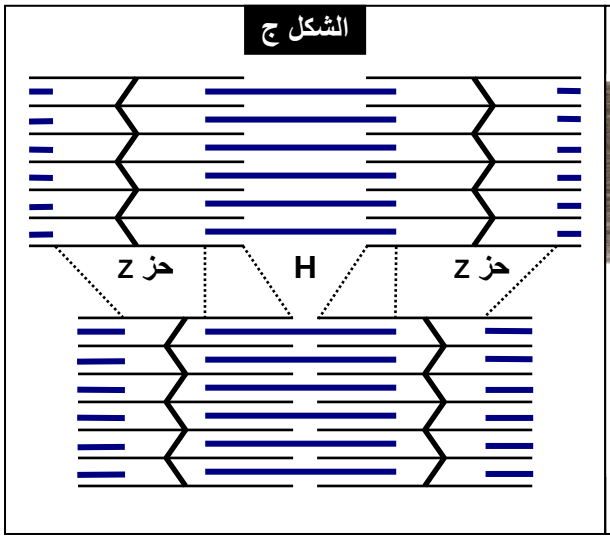
أ - ملاحظات مجهرية:

تم تجميد عضلة في حالة راحة، وعضلة متقلصة. بعد ذلك تم انجاز مقاطع على مستوى العضلتين، لتتم ملاحظتهما بالمجهر الالكتروني. تمثل الوثيقة 14، نتيجة هذه الملاحظة.

الوثيقة 14: آلية التقلص.

تعطي الوثيقة أمامه ملاحظة مجهرية لساركومير مرتخ (شكل أ) وآخر متقلص (شكل ب)، مصحوبة برسم تفسيري (شكل ج).
قارن الشكلين أ وب واستخرج مختلف التغيرات التي تطرأ على الليف خلال التقلص العضلي، 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:

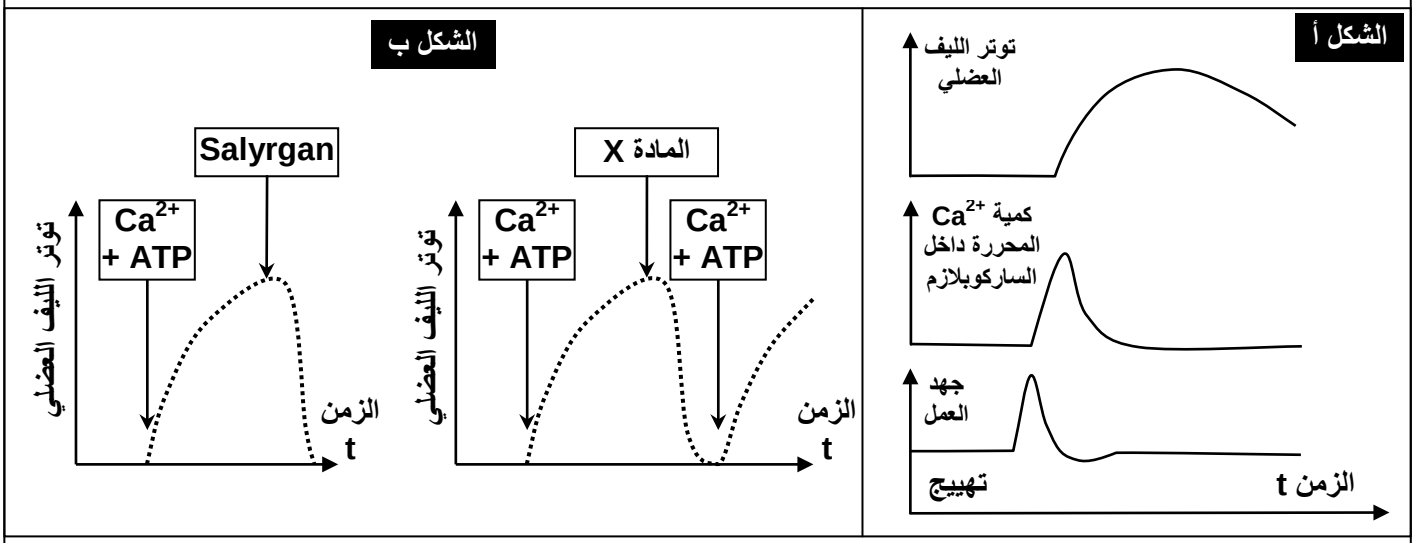
بما أن طول الأشرطة القاتمة يبقى ثابت، نستنتج أن التقصير الملاحظ في الساركومير ليس ناتجا عن تقصير في الخيوط العضلية، بل عن انزلاق الخيوط بعضها بالنسبة لبعض، في اتجاه مركز الساركومير (انزلاق الأكتين على الميوزين)، فينتج عن ذلك اقتراب حزي Z، واختزال المنطقة H. نتكلم عن آلية انزلاق الخيوط. **Glissement des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

② آلية انزلاق الخيوط

أ - معطيات تجريبية: أنظر الوثيقة 15.

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

★ يعطي مبيان الشكل أ، نتائج قياس كل من كمية Ca^{2+} داخل ساركوبلازم الخلية العضلية وتوترها بعد تهييجها.
يعطي مبيان الشكل ب، 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).
حلل هذه المنحنيات، واستنتج دور ATP وايونات الكالسيوم في حدوث التقلص العضلي.



★ لقد بينت الدراسات وجود تالف بين رؤوس الميوزين والأكتين. وبوجود ايونات 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 ايونات الكالسيوم ونشوء القناطر المستعرضة.

ب- تحليل واستنتاج:

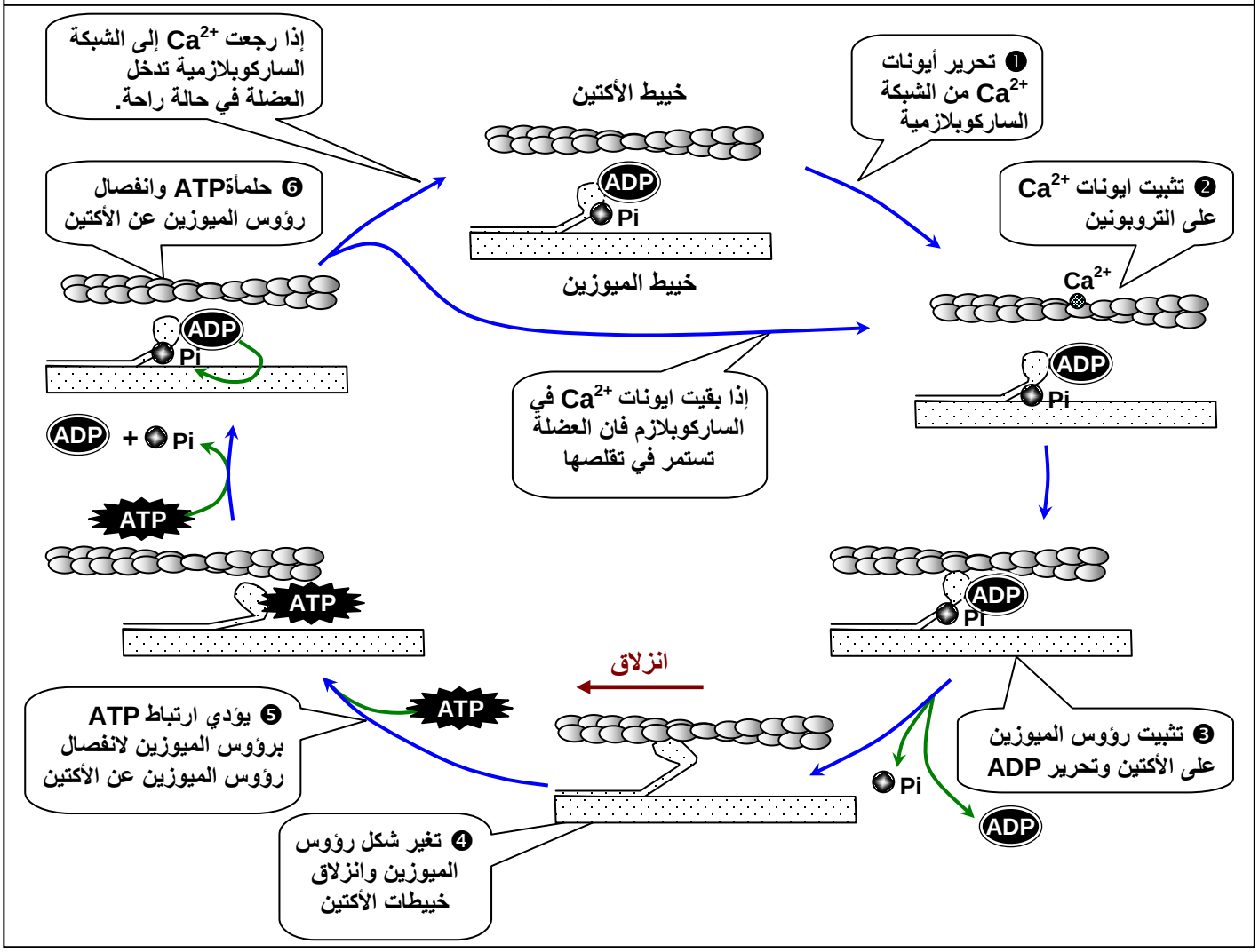
- الشكل أ : بعد تهييج العضلة مباشرة، نلاحظ ارتفاع تركيز الكالسيوم داخل سيتوبلازم الخلية العضلية، متبوعا بارتفاع توتر الليف العضلي.
- الشكل ب : نلاحظ أن الليفات العضلية تتقلص بسرعة عند وجود ATP، وايونات الكالسيوم. وعندما نمنع حلمأة ATP بفعل Salyrgan، يختفي توتر الليف.
أما عندما نمنع فعل Ca^{++} ، يختفي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

ت- خلاصة: آلية التقلص العضلي.

يعتمد التقلص العضلي على تحويل الطاقة الكيميائية الكامنة على مستوى الـ ATP إلى طاقة ميكانيكية، تتجلى في انزلاق خيوط الأكتين على خيوط الميوزين وِفق آلية التقلص العضلي. تمر هذه الآلية عبر مراحل تلخصها الوثيقة16.

الوثيقة 16: خطاطة تبين التفاعل بين خيطات الميوزين والأكتين خلال التقلص العضلي.

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



يتطلب التقلص العضلي وجود ATP، وايونات الكالسيوم، ويتم كما حسب المراحل التالية:

- ترتبط جزيئات الـ ATP برؤوس الميوزين، فيتشكل مركب الميوزين-ATP. وبوصول السيالة العصبية يتم تنبيه الليف العضلي، فتحرر الشبكة الساركوبلازمية ايونات الكالسيوم Ca^{2+}.
- بحضور Ca^{2+}، 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 إلى ADP + Pi + طاقة. و بذلك يتشكل مركب أكتين-ميوزين-ADP+Pi.
- بتحرير Pi وadp يتم تحرير طاقة، تؤدي إلى دوران رؤوس الميوزين في اتجاه مركز الساركومير، وهذا ما يؤدي إلى تقلصه.
- ترتبط جزيئة ATP من جديد برؤوس الميوزين مسببة انفصالها عن الأكتين، ثم تتم حلمأتها. وفي حالة استمرار وجود الكالسيوم بتركيز ملائم (استمرار التنبيه)، ترتبط من جديد خيطات الميوزين بخيطات الأكتين وتدور رؤوس الميوزين، فيستمر انزلاق الخيطات، ويحدث بالتالي تقلص الليف العضلي، ومعه تقلص العضلة.
- عند انتهاء التنبيه، يضخ Ca^{2+} داخل الشبكة الساركوبلازمية، وبارتباط جزيئة أخرى لـ ATP برؤوس الميوزين، ينفصل الأكتين عن الميوزين، وتحجب مواقع ارتباط رؤوس الميوزين على الأكتين، فيحدث الارتخاء.

V – كيف يتم تجديد الطاقة اللازمة للتقلص العضلي ؟

① **معطيات تجريبية:** أنظر الوثيقة 17

الوثيقة 17: تغيرات بعض المكونات الكيميائية للعضلة قبل وبعد التقلص.

تعطي الجدول أسفله، تغيرات بعض المكونات الكيميائية للعضلة، قبل وبعد التقلص.
قارن معطيات هذا الجدول، واقترح تفسيرا للتغيرات الملاحظة قبل التقلص وبعده. ثم استنتج طرق تجديد ATP.

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

② تحليل وتفسير:

- **التجربة ①**: 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 الغليكوجين إلى كليكوز، يخضع هذا الأخير للتخمر ليعطي حمض لبني + ATP.

- **التجربة ②**: 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:

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

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

③ استنتاج: طرق تجديد ATP:

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

أ - 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:

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

يكون هذا التفاعل مصحوبا بتحرير حرارة، هي الحرارة الأولية.

ب- 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.

$$(C_6H_{11}O_5)_n \text{ غليكوجين} + n\,H_2O \xrightarrow[\text{حلمأة الغليكوجين}]{} n\,(C_6H_{12}O_6) \text{ كليكوز}$$

$$C_6H_{12}O_6 + 2ADP \xrightarrow[\text{التخمر اللبني}]{} 2CH_3 - CHOH - COOH + 2ATP$$

كليكوز — حمض لبني + طاقة

ت- الطرق الهوائية البطيئة:

تتمثل في التنفس الخلوي، حيث تتم حلمأة الغليكوجين 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.