ثانوية عبد الله الشفشاوني

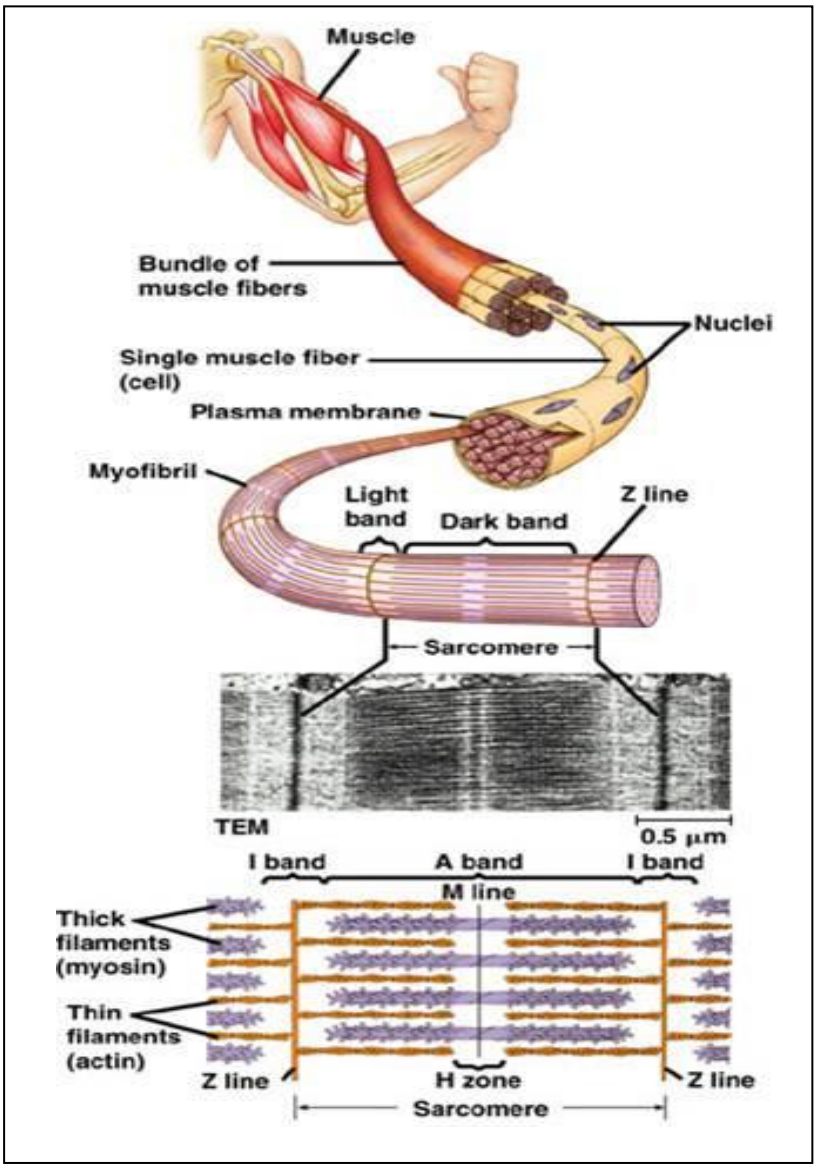
التأهيلية

أولاد تايمة - تارودانت

علوم الحياة و الأرض

الوحدة الأولى : استهلاك المادة العضوية وتدفق الطاقة

الفصل 2 : دور العضلة الهيكلية المخططة في تحويل الطاقة



السنة الدراسية 2011 \ 2012

الأستاذ: هشام محمدي

القسم: ثانية باك علوم الحياة والأرض والعلوم الفيزيائية

تقديم

تُسْتَهلك الطاقة الناتجة عن التنفس و التخمر في عدة وظائف من بينها عمل العضلات. تمثل العضلات Muscles: (du latin **mus** qui veux dire petites souris) بين 40 و 50% من كتلة أجسامنا، و بفضل تقلصاتها تقوم العضلات بأدوار عدة من أهمها تأمين الحركة و الحفاظ على وضعية الجسد . العضلة الهيكلية Muscle squelettique هي تلك المرتبطة بأجزاء الهيكل العظمي، و تمكن من حركة المفاصل.

ما هي بنية العضلات الهيكلية؟

ما هي آليات التقلص العضلي؟

كيف تحول العضلات الطاقة الكيميائية إلى طاقة ميكانيكية؟

فهرس

I- دراسة التقلصات العضلية

1- التسجيل العضلي Électromyogramme

2- استجابة العضلة لتهييج كهربائي

أ- حالة إهاجات كهربائية منعزلة ومتباعدة ومتزايدة الشدة

ب- حالة تهييجين متتاليين

ج- حالة سلسلة من التهييجات المتقاربة

د- التعب العضلي La fatigue musculaire

II- الظواهر المرافقة للتقلص العضلي

1- الظواهر الحرارية

2- الظواهر الكيميائية

3- إنتاج و تجديد الـ ATP

III- بنية العضلة الهيكلية

1- بنية العضلة الهيكلية المخططة

2- بنية الليف العضلي

3- بنية الليفيف العضلي

4- بنية الساركومير

IV- آلية التقلص العضلي

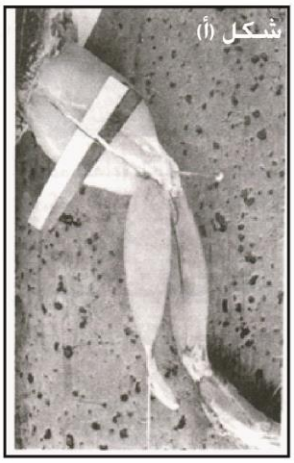
أ- التغيرات فوق البنيوية خلال التقلص العضلي

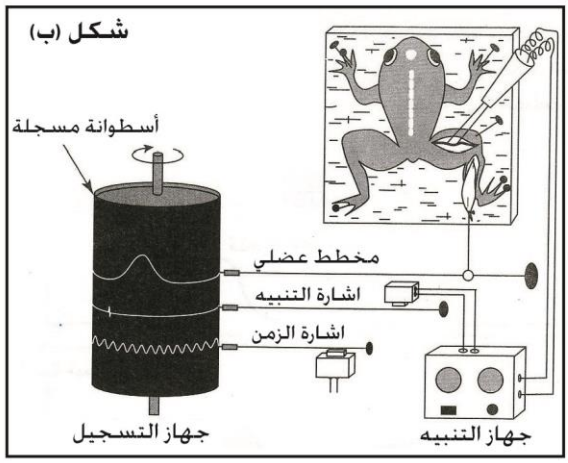
ب- آلية انزلاق الخيوط

I- دراسة التقلصات العضلية

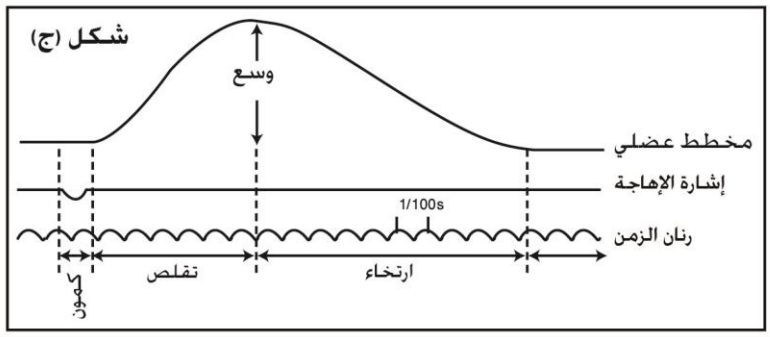
1- التسجيل العضلي Électromyogramme

وثيقة 1





مناولة:
- إلتقط ضفدعة من الحوض.
- خرب دماغها و نخاعها الشوكي بإدخال إبرة على مستوى فتحة الجمجمة (بين العينين) في إتجاه الخلف وحركها حتى تفقد الضفدعة حساسية أطرافها.
- ضعها فوق لُوَيْحَة و ثبت أحد طرفيها الخلفيين.
- بعد إزالة الجلد (بالملقط و المقص) أبرز العصب الوركي Nerf sciatique مع الحرص على عدم قطعه (كما هو مبين في الشكل (أ).
- إقطع وتر العَقَبْ و أوصله بجهاز تسجيل التقلص العضلي كما هو مبين في الشكل (ب).
- هيج العضلة بواسطة إلكترودين بربطهما بالعصب الوركي أو بوضعهما مباشرة على العضلة مع تغيير الشدة (6V و 12V).



نتائج:
يمثل الشكل (ج) مخطط رعشة عضلية (تقلص عضلي مفاجئ و معزول يلاحظ في المختبر).

انطلاقا من تحليل النتائج :
- حدد خصائص العضلة.
- مراحل الرعشة العضلية.

▪ عند تسليط إهاجة فعالة على عضلة نلاحظ :
- استجابة العضلة لهذه الإهاجة، نقول أن العضلة تتميز بخاصية الإهتياجية Excitabilité.
- الاستجابة تكون بالتقلص، نقول أن العضلة تتميز بخاصية القلوصية Contractilité.

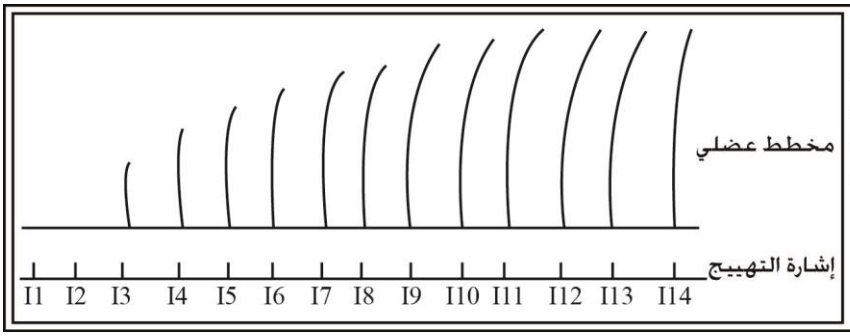
▪ تنقسم الرعشة العضلية البسيطة Secousse musculaire simple (تقلص عضلي مفاجئ و معزول يلاحظ في المختبر) إلى 3 مراحل :
- مرحلة الكمون Période de latence: هي المدة الزمنية الفاصلة بين لحظة الإهاجة و بداية الاستجابة، و تدوم حوالي 15ms.
- مرحلة التقلص Période de Contraction: و هي الفترة التي يحدث فيها تقصير لطول العضلة و تدوم حوالي 60ms.
- مرحلة الارتخاء Période de Relâchement: تمتد من ذروة التقلص حتى عودة العضلة إلى الوضع الأصلي (الارتخاء التام) و تدوم حوالي 100ms.

2- استجابة العضلة لتهييج كهربائي

أ- حالة إهاجات كهربائية منعزلة ومتباعدة ومتزايدة الشدة

وثيقة 2

نهيج كهربائيا العضلة على مستوى العصب الوركي ونحافظ على الأسطوانة ثابتة ثم نديرها يدويا لبعض الميلمترات ونعيد الإهاجة بشدة أكبر. ونستمر بنفس الكيفية في تسليط إهاجات متتالية ذات شدة تصاعدية. يمثل الشكل جانبه النتائج المحصل عليها.
1- حلل التسجيلات المحصل عليها.
2- إقترح فرضية تفسر بها هذه النتائج.



1- ▪ نلاحظ أن العضلة لا تستجيب للإهاجتين (I1 و I2) : نقول أن الإهاجتين غير فعالتين أو تحت بدئيتين.
▪ عند الشدة I3 تستجيب العضلة بتقلص (رعشة عضلية) : تنعت الشدة الدنيا (عتبة التوتر) التي تستجيب لها العضلة بالريوباز Rhéobase.

- عند رفع شدة التهييج (التوتر الكهربائي) من I3 إلى I11 يزداد وسع التقلص العضلي بازدياد شدة التهييج.
- من I11 إلى I14 يبقى وسع التقلص ثابتا رغم زيادة شدة الإهاجة.

2- يمكن تفسير العلاقة التي تربط بين شدة التهييج و وسع تقلص العضلة بافتراض أن العضلة مكونة من ألياف عضلية شأنها شأن الألياف العصبية و تخضع لقانون التجنيد Recrutement: كلما زادت شدة الإهاجة زاد عدد الألياف العضلية المجندة و بالتالي يزداد عدد الألياف العضلية المتقلصة الشيء الذي يؤدي إلى ارتفاع وسع التقلص، و عند تجنيد كل الألياف العضلية تصل العضلة للوسع القصوي للتقلص.

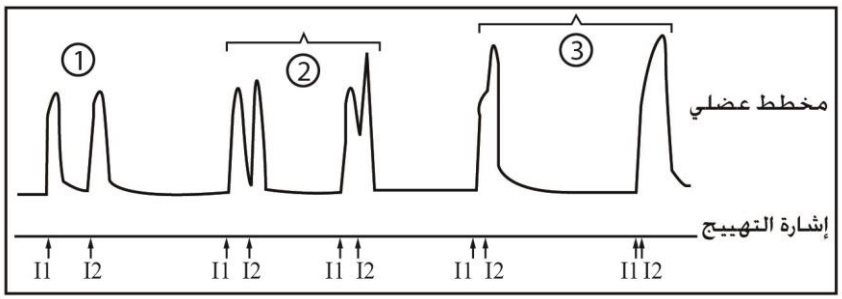
ب- حالة تهييجين متتاليين

وثيقة 3

نعرض عضلة لإهاجتين متتاليتين من نفس الشدة (شدة غير قصوية) مع تغيير المدة الفاصلة بينهما. فنحصل على التسجيل الممثل في الشكل جانبه.

1- حلل التسجيلات المحصل عليها و أربط بين المدة الفاصلة بين الإهاجتين المتتاليتين و مظهر الرعشة.

2- سم الظاهرة المسؤولة عن هذه النتائج.



1- عند تطبيق إهاجتين متتاليتين غير قصويتين فإن الاستجابة تختلف حسب اللحظة التي تسلط فيها الإهاجة الثانية:

- الحالة 1 : عند تطبيق الإهاجة الثانية بعد نهاية الرعشة الأولى (بعد الارتخاء) فإن العضلة تستجيب برعشة ثانية مماثلة للأولى : المخطط العضلي عبارة عن رعشتين معزولتين.

- الحالة 2 : عند تطبيق الإهاجة الثانية أثناء مرحلة ارتخاء العضلة يحدث إلتحام غير تام بين الاستجابتين و يكون وسع الرعشة الثانية أكبر من وسع الرعشة الأولى.

- الحالة 3 : عند تطبيق الإهاجة الثانية خلال مرحلة تقلص الرعشة الأولى يلاحظ تراكب المنحنيين أي إلتحام تام للرعشتين، حيث يكون وسع الرعشتين الملتحمتين أكبر من وسع الرعشة المعزولة.

2- يبدو من خلال الحالتين 2 و 3 كأن مفعول التهييج الأول يضاف إلى مفعول التهييج الثاني فنتحدث عن ظاهرة الإجمال Phénomène de sommation.

ج- حالة سلسلة من التهييجات المتقاربة

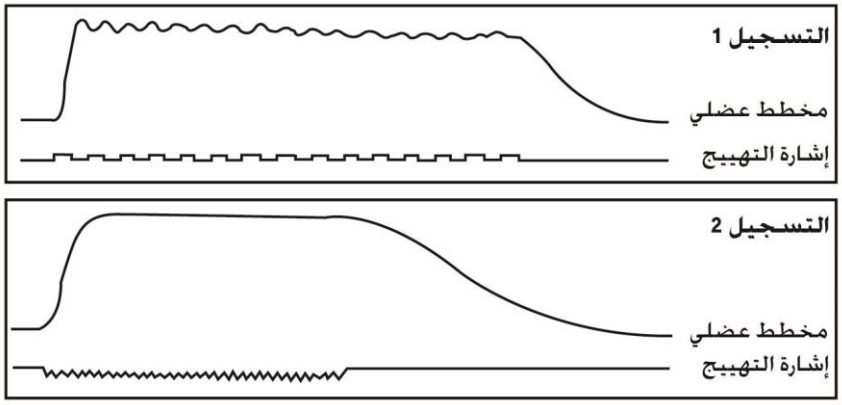
وثيقة 4

نعرض عضلة لسلسلة إهاجات من نفس الشدة القصوية وذات ترددات مختلفة حيث :

- تسلط إهاجات بتردد متوسط (من 10 إلى 15 إهاجة في الثانية)، فنحصل على التسجيل 1.
- تسلط إهاجات بتردد مرتفع (من 25 إلى 30 إهاجة في الثانية)، فنحصل على التسجيل 2.

1- قارن التسجيلين 1 و 2.

2- فسر هذه النتائج.



1- عند تطبيق سلسلة إهاجات ذات تردد متوسط نحصل على مخطط عضلي مُكّون من جزء أفقي على شكل مُنبسط متموج : إنه الكزاز الناقص أو الغير التام Tétanos incomplet.

- عند تطبيق سلسلة إهاجات ذات تردد مرتفع نحصل على مخطط عضلي مُكّون من جزء أفقي على شكل مُنبسط غير متموج: إنه الكزاز التام Tétanos complet .

ملحوظة : Tétanos من Tetanus بمعنى صلابة و شدة و هو تقلص مستمر يشكل جزء من نظام عمل العضلات الهيكلية، وينبغي عدم خلطه مع داء الكزاز الناتج عن سمين بكتيريا Clostridium tetani المسببة لتشنجات عضلية مزمنة والتي قد تسبب الموت خنقا.

2- ▪ في حالة الكزاز الناقص هناك إلتحام غير تام للرعشات العضلية : تحدث كل إهاجة خلال مرحلة ارتخاء الاستجابة التي تسبقها.

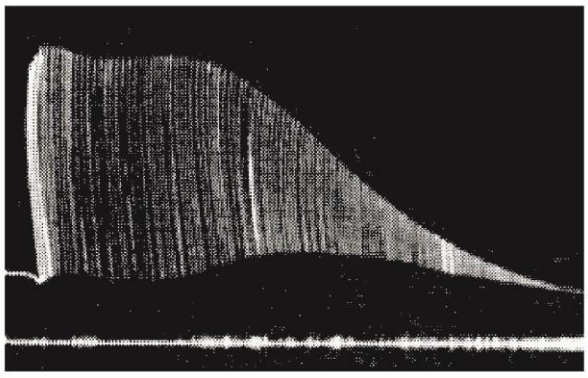
▪ في حالة الكزاز التام هناك إلتحام تام لهذه الرعشات : تحدث كل إهاجة خلال مرحلة تقلص الاستجابة التي تسبقها.

د- التعب العضلي La fatigue musculaire

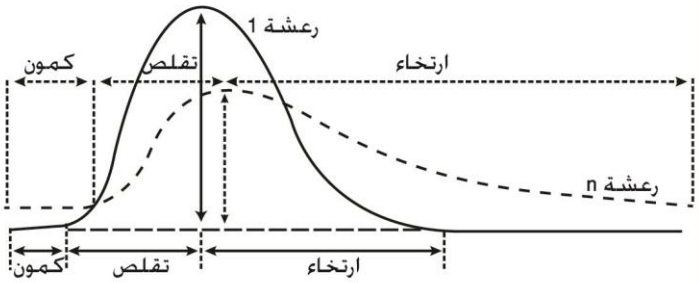
وثيقة 5 تم إخضاع عضلة لعدة إهاجات شدتها ثابتة لفترة طويلة. ويبين الشكل 1 النتائج المحصل عليها. لفهم هذه النتائج أعيدت التجربة و تم تمثيل الرعشة الأولى و رعشة من الرتبة n (شكل 2).

1- قارن الرعشتين في الشكل 2.

2- ماذا تستنتج بخصوص الظاهرة المبينة في الشكل1؟



شكل 1 ◀



شكل 2 ▶

1- نلاحظ اختلاف بين الاستجابتين(1و n) : للرعشة n فترة كمون و ارتخاء **أطول** بينما فترة تقلص أقصر مقارنة بالرعشة 1 . كما أن وسع الرعشة n أصبح أقل بكثير من وسع الرعشة الأولى.

2- بما أن مدة الاستجابة أصبحت طويلة وذات وسع صغير بعد تتابع عدة إهاجات، نستنتج أن العضلة قد أصيبت بالعياء، و تنعت هذه الظاهرة بـ**التعب العضلي** Fatigue musculaire.

II- الظواهر المرافقة للتقلص العضلي

خلال المشي بوتيرة عادية أو أثناء الجري ترتفع درجة حرارة الجسم من 37°C إلى 38,5°C و قد تصل إلى 39°C. ففي حالة الراحة تقدر كمية الحرارة المنبعثة من جسم الإنسان بـ 3 Kcal كل 30 دقيقة، أما خلال مشي سريع (8Km/h) فتتجاوز الحرارة المطروحة 40 Kcal. فقد ارتفعت كمية الحرارة المحررة خلال المجهود العضلي بـ 10 إلى 15 مرة.

- كيف يتم قياس الحرارة المرافقة للتقلص العضلي؟
- متى يتم تحرير هذه الحرارة؟ و ما مصدرها؟

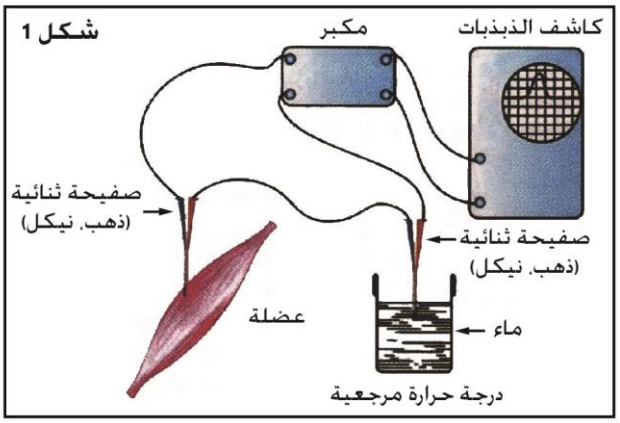
1- الظواهر الحرارية

وثيقة 6 يمكن قياس تغيرات درجة الحرارة المصاحبة للتقلص العضلي باستعمال تقنية العمود الحراري Thermmopile الذي يتكون من إبرتين كهروحراريتين من معدنين مختلفين (الذهب و النيكل أو النحاس و النيكل). يتم إدخال إحدى الإبرتين في عضلة معزولة و يحتفظ بالإبرة الأخرى في درجة حرارة ثابتة معروفة (حرارة مرجعية مثل الجليد في حالة انصهار) كما هو مبين في الشكل 1. عند تهييج العضلة يظهر اختلاف في درجة الحرارة يتولد عنه تيار كهربائي يتم الكشف عنه بواسطة كاشف الذبذبات. و يبين الشكل 2 النتائج المحصل عليها.

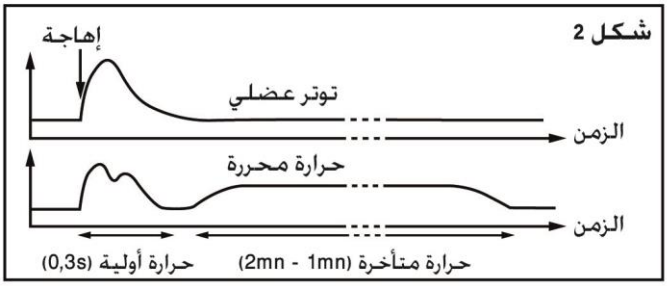
1- صف تطور درجة حرارة العضلة خلال التقلص العضلي.

2- إقترح فرضية لتفسير الظواهر الحرارية المرافقة للتقلص العضلي.

شكل 1



شكل 2



1- يُصاحَبُ التقلص العضلي **بطرح حراري**. يتم تحرير **هذه الحرارة** خلال مرحلتين أساسيتين :

- **الحرارة الأولية أو الإبتدائية Chaleur initiale**: تُحَرَّرُ أثناء الرعشة العضلية في جزئين : جزء خلال التقلص (حرارة التقلص) و جزء آخر خلال الارتخاء (حرارة الارتخاء) و تدوم بعض أجزاء الثانية.

- **الحرارة المتأخرة Chaleur retardée**: تحرر بعد نهاية التقلص العضلي و تدوم من دقيقة إلى دقيقتين.

2- يمكن تفسير الظواهر الحرارية بافتراض وجود **ظواهر كيميائية** محررة للطاقة تكون مرافقة للتقلص العضلي. ويمكن افتراض أن هناك صنفين من التفاعلات :

- تفاعلات سريعة مرتبطة بالحرارة الأولية.

- تفاعلات بطيئة مرتبطة بالحرارة المتأخرة.

2- الظواهر الكيميائية والطاقية

أ- مصادر الطاقة الضرورية للتقلص العضلي

وثيقة 7

قام العالمان Cheveau و Kaufman بتحليل الدم الذي يدخل إلى العضلة الرافعة للشفة العليا للحصان و الدم الذي يخرج منها. و ذلك في حالة راحة العضلة و خلال تقلصها. و يبين الجدول جانبه النتائج المحصل عليها.

1- حلل هذه النتائج.

2- اعتمادا على هذه المعطيات ومعلوماتك. ما هي التفاعلات المفترض أن تحرر الطاقة اللازمة للتقلص؟

3- إذا علمت أنه بوضع عضلة في وسط ينعدم به O_2 (باستعمال الآزوت) فإن العضلة تتقلص لمدة 3 دقائق فقط مع طرح الحرارة البدئية و غياب الحرارة المتأخرة. ماذا تستنتج بخصوص الفرضية السابقة حول مصدر طاقة التقلص العضلي؟

في ساعة واحدة لكل Kg من العضلة	عضلة في راحة	عضلة في نشاط
حجم الدم المخترق للعضلة	12,22 ℓ	56,32 ℓ
O_2 المستعمل	00,30 ℓ	05,20 ℓ
CO_2 مطروح	00,22 ℓ	05,95 ℓ
الكليكوز المستعمل	02,04 g	08,43 g
البروتيدات المستعملة	0 g	0 g
الدهون المستعملة	0 g	0 g

1- عند القيام بنشاط عضلي نلاحظ ارتفاع الصبيب الدموي، ارتفاع استهلاك الكليكوز و O_2، ارتفاع طرح CO_2، بينما البروتيدات و الدهون فلا تُسْتَعمل.

2- بما أن العضلة تستهلك الكليكوز و O_2 و تطرح CO_2، فيمكن افتراض أن الطاقة المستعملة في التقلص العضلي (ATP) تأتي من أكسدة الكليكوز بفضل ظاهرة التنفس حسب التفاعل التالي :

$$C_6H_{12}O_6 + 6\ O_2 \text{ ----------> } 6\ CO_2 + 6\ H_2O + 2840\ KJ\ (38ATP + \text{حرارة})$$

3- يتبين أن أكسدة الكليكوز مسؤولة عن الحرارة المتأخرة أما التقلص العضلي و الحرارة الأولية فسيكونان مرتبطان بمصدر آخر للطاقة وهو مصدر لا هوائي ؟

ب- آليات تجديد ATP أثناء التقلص العضلي

وثيقة 8

تحتاج العضلة أثناء تقلصها للطاقة التي تستمدها مباشرة من جزيئة ATP. إلا أن كمية ATP الموجودة في العضلة محدودة. وبالتالي من أجل الاستمرار في النشاط العضلي تعمل العضلة على تجديد مخزونها من ATP بفضل ظاهرة التنفس و طرق أخرى تكشف عنها التجارب التالية (أنظر الجدول).

1- حلل هذه النتائج.

2- كيف تفسر ثبات ATP في التجربتين 1 و 2 رغم تقلص العضلة.

3- استخلص مصادر الطاقة اللاهوائية (طرق تجديد الطاقة) على مستوى الخلية العضلية مبرزا تفاعلاتها الكيميائية.

نشير إلى أن الخلية العضلية تتوفر على أنزيم يدعى مُيُوكِينَاز Myokinase يُحول جزيئة الـ ADP إلى ATP حسب التفاعل التالي : ADP + ADP ------> ATP + AMP

التجارب	الملاحظات	المواد المعايرة	نتائج المعايرة بـ mg/g من كتلة العضلة	
			قبل التقلص	بعد التقلص
1- إهاجة العضلة كهربائيا في غياب O_2	تتقلص العضلة طيلة مدة التجربة	كليكوجين	1,62	1,21
		حمض لبني	1,5	1,95
		ATP	2	2
		فوسفوكرياتين	1,5	1,5
2- إهاجة العضلة كهربائيا بوجود مادة توقف انحلال الكليكوز	تتقلص العضلة طيلة مدة التجربة	كليكوجين	1,62	1,62
		حمض لبني	1,5	1,5
		ATP	2	2
		فوسفوكرياتين	1,5	0,4
3- إهاجة العضلة بوجود مادة توقف انحلال الكليكوز و مادة مانعة لانحلال الفوسفوكرياتين	العضلة تتقلص بصفة عادية ثم تتوقف	كليكوجين	1,62	1,62
		حمض لبني	1,5	1,5
		ATP	2	0
		فوسفوكرياتين	1,5	1,5

1- نلاحظ أن العضلة تبقى قادرة على التقلص في غياب O_2 و يكون هذا التقلص مصاحباً باستهلاك الكليكوجين و بإنتاج الحمض اللبني، بينما تبقى كمية كل من الـ ATP و الفوسفوكرياتين ثابتة.

- تبقى العضلة قادرة على التقلص رغم إضافة مادة توقف انحلال الكليكوز وتبقى كمية كل من الـ ATP و الكليكوجين و الحمض اللبني ثابتة بينما تنخفض كمية الفوسفوكرياتين (PC).

- رغم إضافة مواد توقف انحلال الكليكوز و الفوسفوكرياتين (PC)، تتقلص العضلة لمدة معينة ثم تتوقف. ويلاحظ ثبات في كمية كل من الكليكوجين و الفوسفوكرياتين (PC) و الحمض اللبني، بينما تُستَهلك الـ ATP.

2- التقلص العضلي يتطلب استهلاك ATP، وبما أن كمية ATP تبقى ثابتة في التجربتين رغم تقلص العضلة فهذا يعني أن ATP المستهلكة يتم تجديدها باستمرار.

3- الخلية العضلية تجدد الـ ATP بثلاث طرق لا هوائية:

- عن طريق التخمر اللبني :

$$C_6H_{12}O_6 \text{ ----------> } 2\ CH_3\text{-}CHOH\text{-}COOH + 2ATP\ (61\ KJ) + \text{حرارة}$$

- استهلاك الفوسفوكرياتين (PC) بفضل أنزيم الفوسفوكرياتين كيناز (créatine phosphokinase (CPK

$$CP + ADP \xrightarrow{\text{----------}} C + ATP + \text{حرارة}$$

- فسفرة ADP بفضل أنزيم الميوكيناز (Myokinase (mK

$$ADP + ADP \xrightarrow{\text{Myokinase}} ATP + AMP$$

ج- حصيلة

مدخرات العضلات من الـ ATP ليست كبيرة (تكفي لتقلص يدوم على الأكثر 4 أو 6 ثوان)، لهذا تحتاج الخلية العضلية لتجديد الـ ATP، حيث تَستَعمل عدة طرق تختلف من حيث السرعة و الوسائط الإستقلابية و ضرورة O_2.

- **طرق هوائية بطيئة :**

- خلال النشاط العضلي الخفيف و الطويل يساهم التنفس الخلوي بـ 95% من الـ ATP المستهلكة من طرف العضلات.

- يُنْتِجُ التنفس الخلوي الـ ATP بشكل بطيء (لكونه مركب من عدد كبير من التفاعلات و حاجته لـ O_2 الذي ينقل عبر الدم). و هو المسؤول عن تحرير الحرارة المتأخرة المصاحبة للتقلص العضلي.

- **طرق لا هوائية متوسطة السرعة : التخمر اللبني**

عندما تتقلص العضلات بقوة وتصل إلى 70% من المجهود القصوي (نشاط عضلي قوي و سريع)، تنتفخ فتضغط العروق الدموية مما يعيق وصول O_2 إلى الخلايا العضلية. في هذه الحالة تستعين الخلايا بمسلك التخمر اللبني لتغطية حاجياتها الطاقية حسب التفاعل التالي :

$$C_6H_{12}O_6 \text{ ----------> } 2\ CH_3\text{-}CHOH\text{-}COOH + 2ATP\ (61\ KJ) + (\text{حرارة})$$

- تراكم الحمض اللبني يُخَفِض pH الخلايا العضلية، و يصبح مفعول الأنزيمات ضعيفا في الوسط الحمضي مما يساهم في ظهور التعب العضلي.

- **طرق لا هوائية سريعة :**

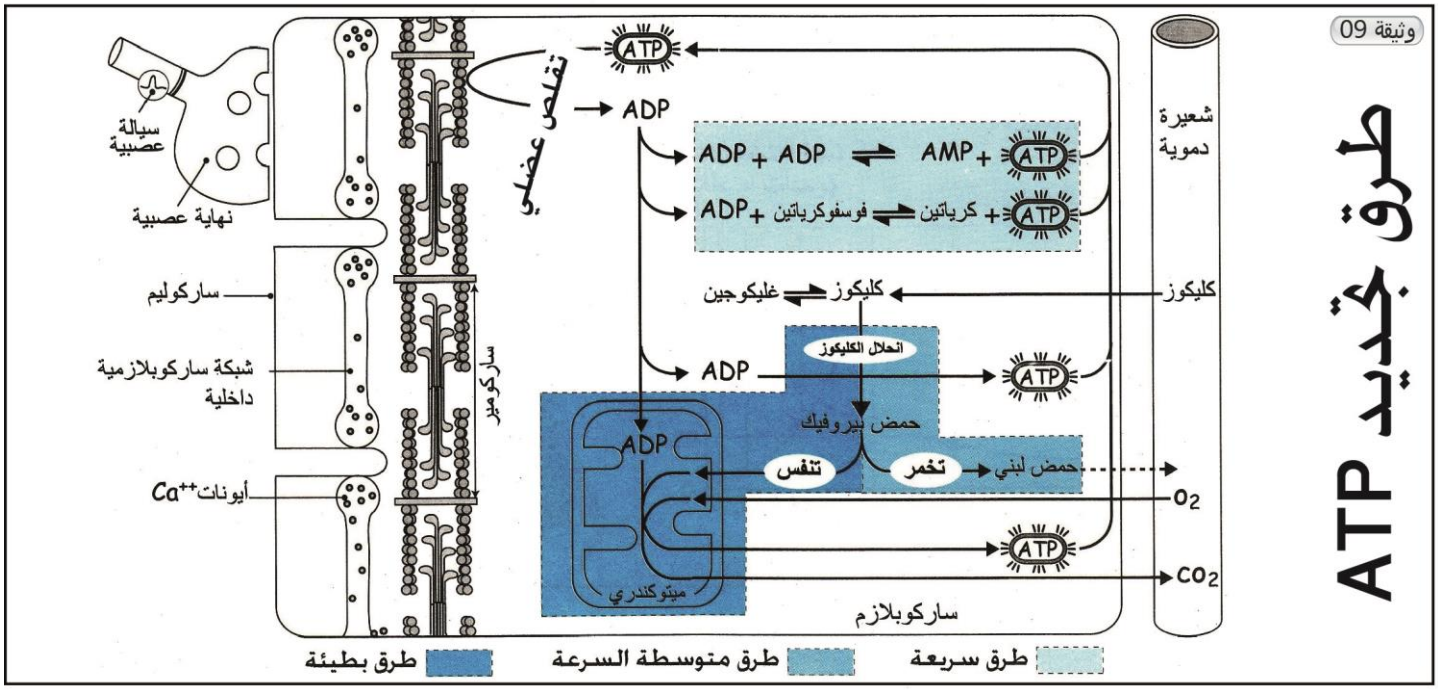
يمكن تجديد الـ ATP بواسطة طرق سريعة لا تحتاج إلى O_2 في أقل من 30s، و تكون مصحوبة بتحرير الحرارة الأولية، و نميز صنفين من هذه التفاعلات :

- بفضل الميوكيناز (Myokinase (mK:

$$ADP + ADP \xrightarrow{\text{Myokinase}} ATP + AMP$$

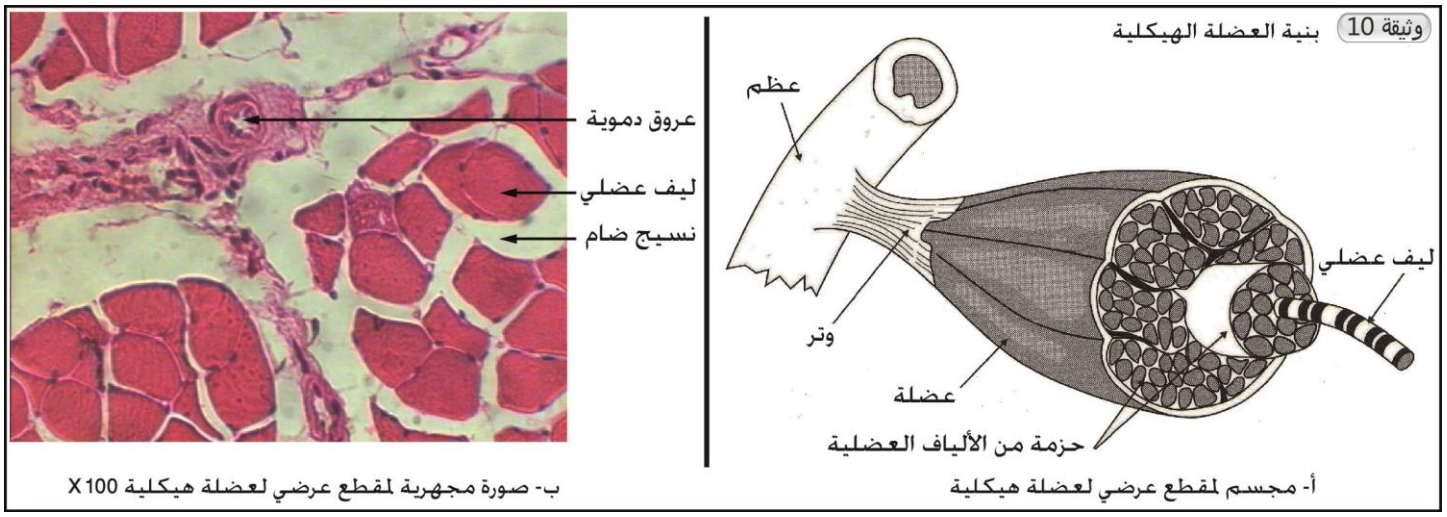
- بفضل الفوسفوكرياتين كيناز (créatine phosphokinase (CPK:

$$CP + ADP \xrightarrow{\text{CPK}} C + ATP + 13\ Kj/mol$$



III- بنية العضلة الهيكلية

1- بنية العضلة الهيكلية المخططة



يتبين أن العضلة الهيكلية مكونة من جزئين :

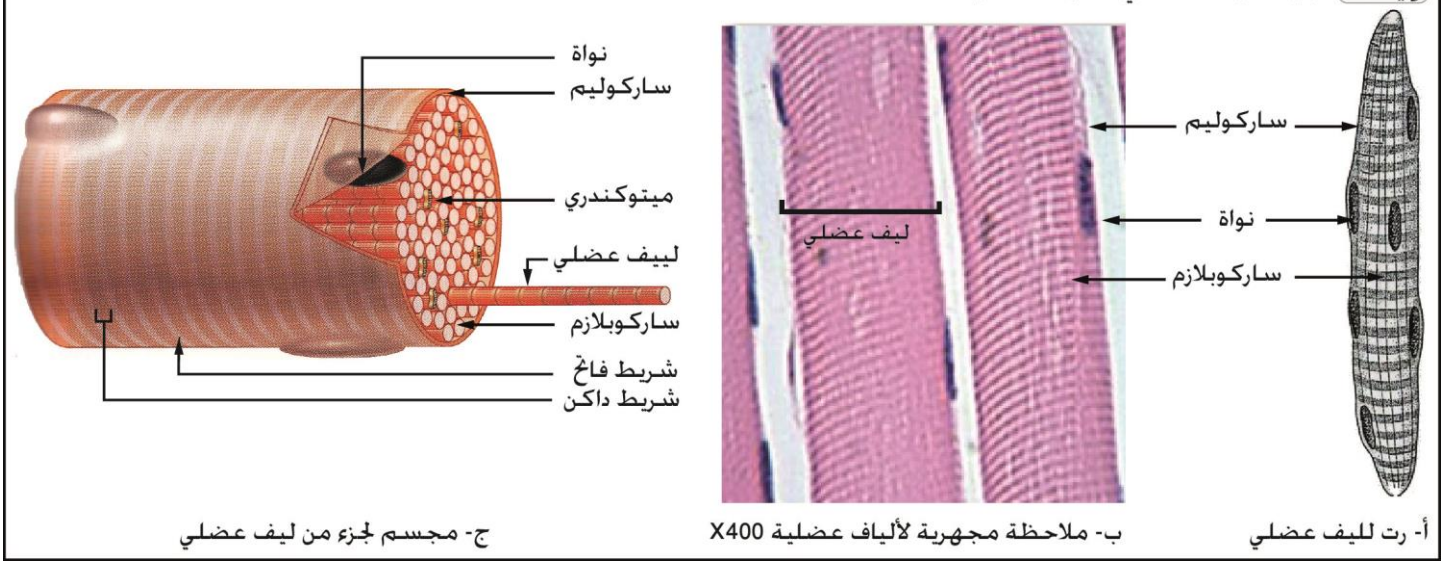
- أوتار العضلة: و توجد في **طرفي** العضلة و هي **بيضاء** اللون.
- بطن العضلة : و الذي يشغل منطقتها **الوسطى** و يتميز باللون **الأحمر** نظرا لوجود الخضاب العضلي Myoglobine (بروتين يخزن O2 في العضلة).

❖ ملاحظة بالمجهر الضوئي

تتكون العضلة الهيكلية من مجموعة من **الحزمات** يفصل بينها **نسيج ضام** Tissu conjonctif به **عروق** و **أعصاب**. كل **حزمة** عبارة عن مجموعة من **الألياف العضلية** Fibres musculaires.

2- بنية الليف العضلي

وثيقة 11 بنية الليف العضلي (الخلية العضلية)

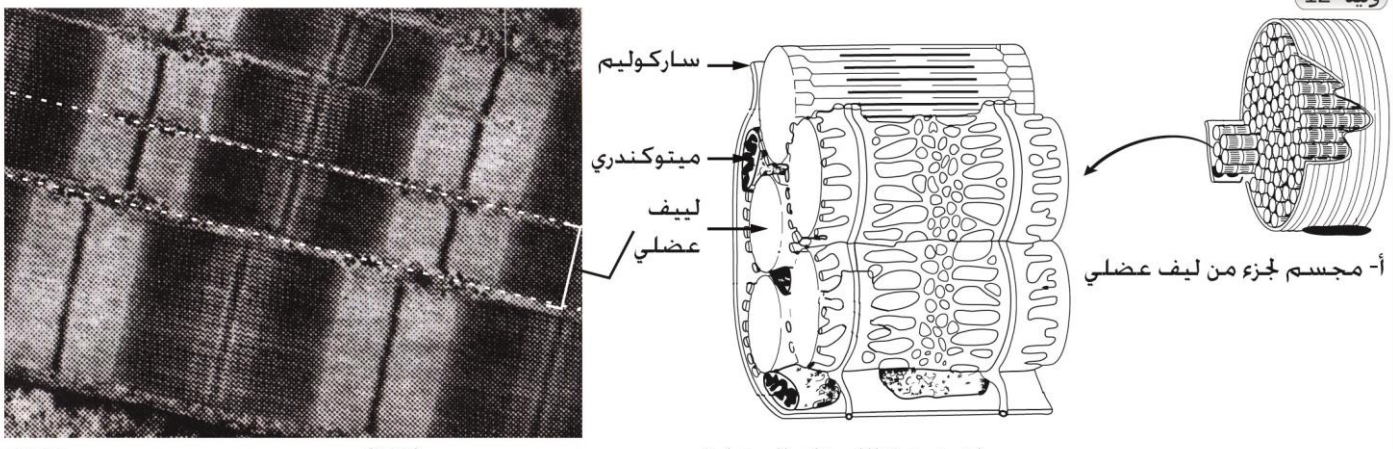


أ- رت لليف عضلي ب- ملاحظة مجهرية لألياف عضلية X400 ج- مجسم لجزء من ليف عضلي

الليف العضلي هو **خلية** عملاقة **متعددة** النوى، تتكون من **غشاء سيتوبلازمي** ينعت بالساركوليم Sarcolemme يحيط **بسيتوبلازم** عضلي يسمى الساركوبلازم Sarcoplasme الذي يضم العديد من **الليفات** العضلية Myofibrilles والميتوكندريات.

3- بنية الليف العضلي

وثيقة 12



أ- مجسم لجزء من ليف عضلي ب- مجسم لفوق بنية الليفات العضلية ج- ملاحظة مجهرية (ME) لفوق بنية الليفات العضلية X36000

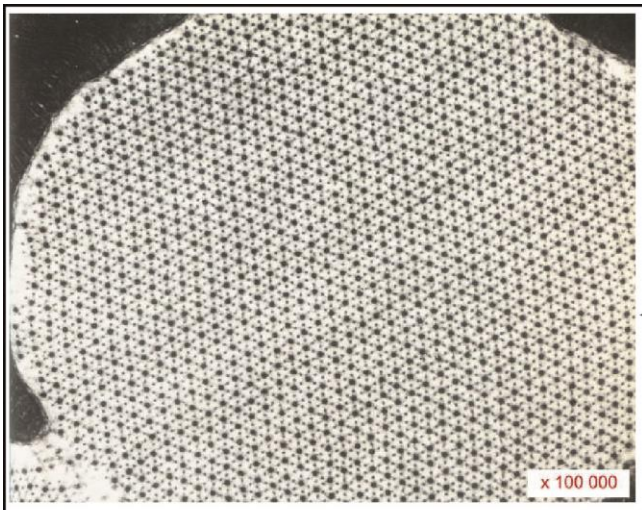
❖ ملاحظة بالمجهر الإلكتروني لفوق بنية الليف العضلي

تظهر الليفات العضلية **متوازية** فيما بينها و مع محور استطالة الخلية. يتكون كل ليف من تناوب **أشرطة فاتحة و أشرطة داكنة**، و يؤدي تجاور **الأشرطة** من نفس اللون من ليف إلى آخر للتخطط العرضي لليف(هذا أصل تسمية العضلة بالمخططة).

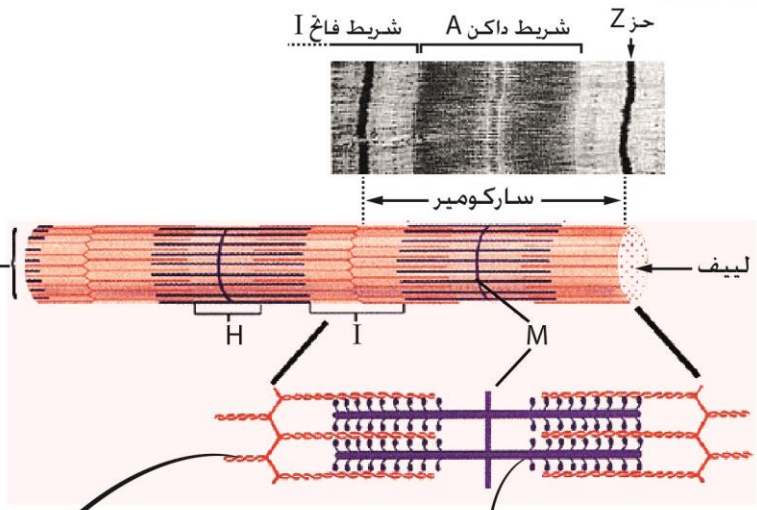
كما توجد بين الليفات العضلية عدة مكونات: ميتوكندريات، شبكة سيتوبلازمية داخلية،...

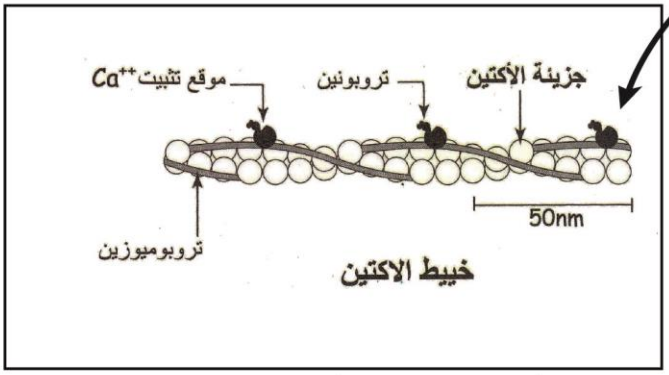
4- بنية الساركومير

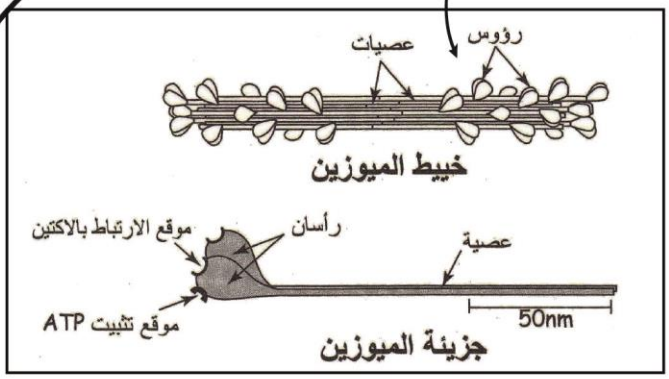
وثيقة 13



ملاحظة مجهرية (ME) لفوق بنية ليف عضلي







1- صف فوق بنية الليف العضلي انطلاقا من تحليلك لهذه الوثيقة. 2- حدد مكونات : الأشرطة الداكنة A، و الأشرطة الفاتحة I، والمنطقة H.
3- صف البنية الجزيئية لخيبطات الأكتين والميوزين

1- نلاحظ أن الليف العضلي مكون من تعاقب أشرطة (أقراص) داكنة و أشرطة فاتحة:
- وسط كل قرص داكن (Anisotrope) A نجد منطقة فاتحة H (de hélio = semblable au soleil)
- وسط كل قرص فاتح (Isotrope) انجد حز Z.
- المنطقة الفاصلة بين حزين Z متتابعين تسمى ساركومير.

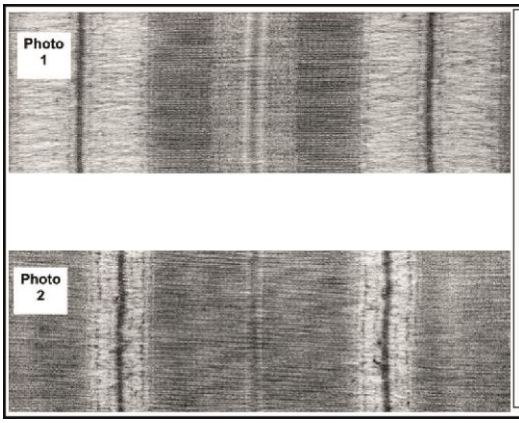
2- الأقراص الداكنة تحتوي على بروتينات سميكة (ميوزين myosine) و بروتينات دقيقة (أكتين Actine).
- الأقراص الفاتحة تتكون من خيوط الأكتين فقط.
- المنطقة H تحتوي على خيوط ميوزين فقط.

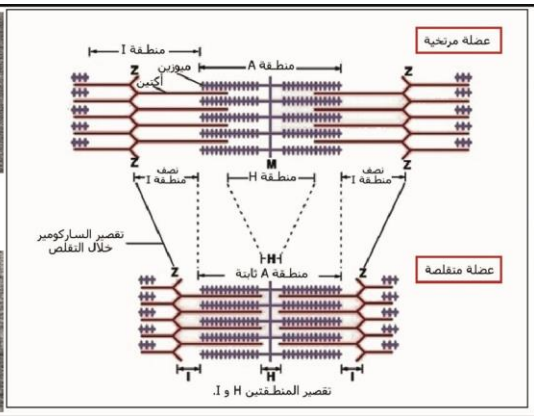
3-
- الخيبطات الدقيقة (الأكتين): تتكون من 3 أنواع من البروتينات أهمها الأكتين G و هو بروتين كروي يتجمع على شكل سلسلتين ملتويتين بشكل لولبي إلى جانب التروبونين Troponine و التروبوميوزين Tropomyosine.
- الخيبطات السميكة (الميوزين): هي عبارة عن حزمة من جزيئات الميوزين و تتألف كل جزيئة ميوزين من عصية و رأسين كرويين.

3- آلية التقلص العضلي

أ- التغيرات فوق البنيوية خلال التقلص العضلي

وثيقة 14





تبين الصورتان جزء من ليف عضلي في حالة راحة (صورة 1) وأثناء التقلص (صورة 2).

1- قارن بنية السركومير في الصورتين؟
2- علما أن طول خيبطات الأكتين و الميوزين لا يتغير أثناء التقلص، أنجز رسما تفسيريا توضح فيه التغيرات الملاحظة.
3- استنتج الوحدة الوظيفية و البنيوية للعضلة.

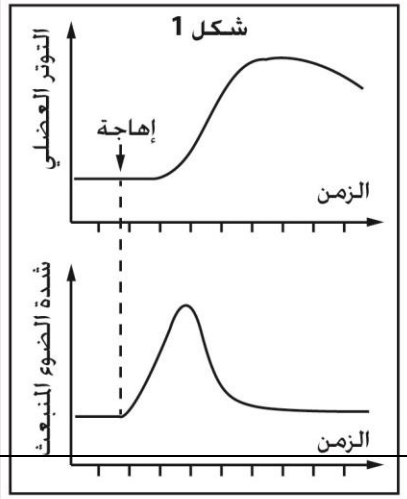
1- خلال التقلص العضلي تحدث التغيرات التالية:
- تقصير طول السركومير حيث تتقارب الحزات Z فيما بينها.
- نقصان طول الأشرطة الفاتحة.
- يحتفظ الشريط القاتم بأبعاده بينما يتم تقصير المنطقة H.

2- يبقى طول الأشرطة القاتمة ثابتا أثناء التقلص العضلي فنستنتج أنه ليس هناك تقصير للخيبطات العضلية بل انزلاق خيبطات الأكتين (نحو مركز السركومير) فوق خيبطات الميوزين التي تبقى ثابتة.

3- يؤدي انزلاق خيبطات الأكتين والميوزين إلى تقارب الحزين Z أي تقصير السركوميرات ← تقصير الليبفات العضلية ← تقصير الألياف العضلية ← تقلص العضلة. ولهذا يعتبر السركومير الوحدة الوظيفية والبنيوية للعضلة.

ب- آلية انزلاق الخيبطات

وثيقة 15



لمعرفة آلية التقلص العضلي نقترح التجارب التالية :

تجربة 1 : نحقن داخل ليف عضلي لإحدى الرخويات البحرية (La balane) مادة الإيكورين (Equorine) التي تعطي بوجود Ca^{2+} أشعة ضوئية يمكن ملاحظتها. ثم نهيج الليف العضلي فنلاحظ بعد ذلك مباشرة أن ساركوبلازم هذا الليف يصبح مضيئا ثم يتقلص الليف. وبواسطة عدة تجريبية نسجل كلا من شدة الضوء المنبعث من الليف و شدة التوتر الميكانيكي كما تبين النتائج المحصل عليها في الشكل 1.

1- فسر عدم انبعاث الضوء من الليف العضلي قبل التهييج رغم وجود الإيكورين.

2- أوجد العلاقة بين التهييج و الإضاءة المنبعثة من الليف خلال هذه التجربة.

يمثل التقلص النشاط الميكانيكي أما الضوء المنبعث من الليف فيكشف عن حصيلة نشاطه الكيميائي.

3- اعتمادا على معطيات الشكل 1. أعط ترتيب النشاطين المذكورين حسب تسلسلهما الزمني. ثم بين أيهما يكون سببا للآخر.

تجربة 2 : تم حقن ليف عضلي في ظروف فيزيولوجية بمادة الإيكورين ومادة Batrachotoxine (مادة تكبح رجوع ca^{2+} إلى الشبكة الساركوبلازمية) ثم تهييجه تهييجا فعالا.

نتيجة : يستمر الضوء في الساركوبلازم ولا يرتخي الليف.

4- ماذا تستنتج من هذه النتيجة؟

1- يفسر عدم انبعاث الضوء بغياب Ca^{2+} في الساركوبلازم قبل التهييج.

2- بعد التهييج نلاحظ إضاءة الساركوبلازم مما يدل على أن التهييج تسبب في ظهورCa^{2+} في الساركوبلازم الذي يتفاعل مع الإيكورين مولدا إضاءة

3- نلاحظ ظهور الضوء قبل التوتر العضلي : هذا يعني أن تحرير Ca^{2+} (نشاط كيميائي) يسبق التقلص العضلي (نشاط ميكانيكي). إذن وجود Ca^{2+} في الساركوبلازم يؤدي إلى تقلص الليف العضلي، ويؤدي إنخفاض كمية هذه الأيونات إلى ارتخائه.

4- نستنتج أن الشبكة الساركوبلازمية هي التي تنظم عملية التقلص العضلي وذلك بضخها لـ Ca^{2+} إلى جوفها مما يسبب الارتخاء العضلي، أما التقلص العضلي فهو ناتج عن تحريرها لـ Ca^{2+} في الساركوبلازم بعد تهييج فعال.

5- نستنتج أن حلمأة الATP شرط ضروري للتقلص العضلي.

6- بعد تهييج فعال ← تحرير Ca^{2+} من طرف الشبكة الساركزبلازمية ← حلمأة ATP ← تقلص عضلي ← ضخ Ca^{2+} إلى داخل الشبكة الساركوبلازمية ← إرتخاء الليف العضلي.

7- مفتاح شكل 2

1- ساركومير، 2- حز Z، 3- خييط الأكتين، 4- خييط الميوزين، 5- رأس ميوزين، 6- تروبونين، 7- تروبوميوزين، 8- أكتين، 9- مواقع تثبيت رؤوس الميوزين.

8- أنظر شكل 3 وثيقة 15.

وثيقة 16