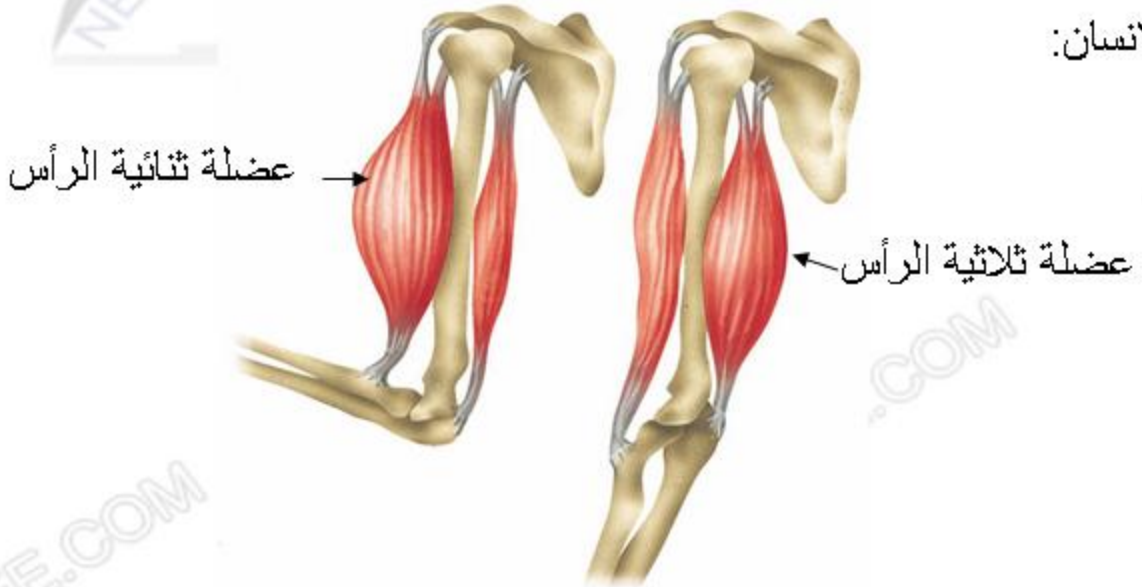
## II - دور العضلة الهيكلية المخططة في تحويل الطاقة :

### 1- بعض المعطيات :

يؤدي التهيج المباشر أو غير المباشر لعضلة إلى تقلصها .نقول أن العضلة قلوصة Contractile من خاصيتها القلوصية.

- مثال عند الانسان:




يؤدي ثني الساعد إلى تقلص العضلة ثنائية الرأس (biceps) (انتفاخها + تصلبها + قصر طولها.)

وارتخاء العضلة ثلاثية الرأس (Triceps).

. يؤدي بسط الساعد إلى عكس الملاحظة السابقة.

⇐ لذا فهما عضلتان متعارضتان muscles antagonistes

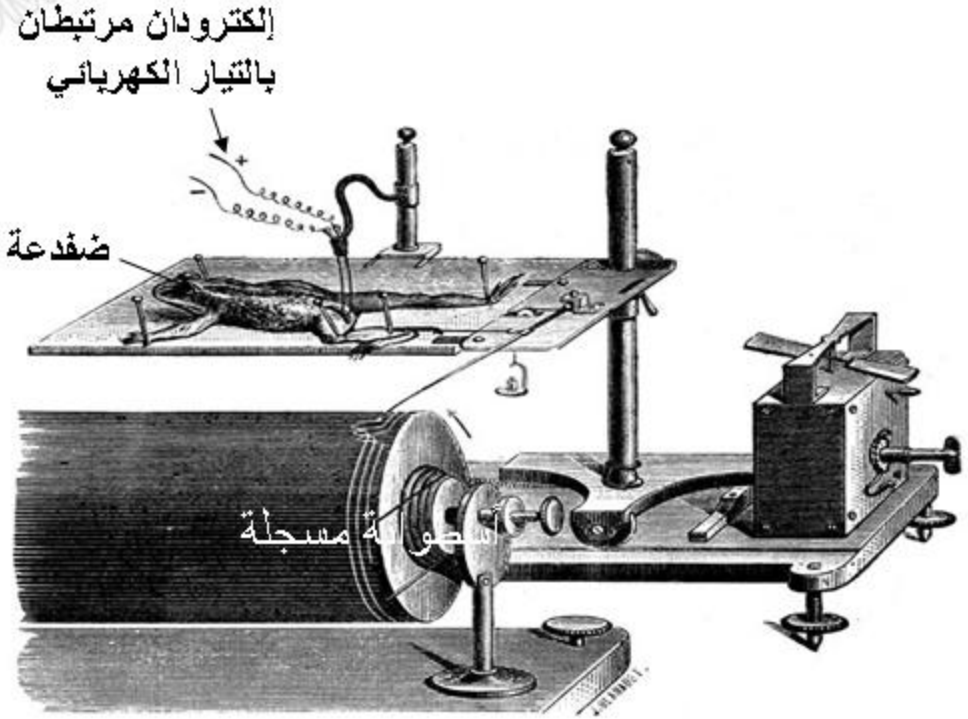
يمكن التمييز بين نوعين من التقلص : الجدول.

| التجربة | القوة المبذولة من طرف العضلة (التوتر) | طول العضلة | نوع التقلص |
|---|---|---|---|
| حمل ثقل | ثابتة | يتناقص | متساوي التوتر: isotonique |
| مسك سطل يمتلئ بالماء | تزايدية | ثابت | متساوي القياس isométrique |

## 2- تسجيل التقلصات العضلية :

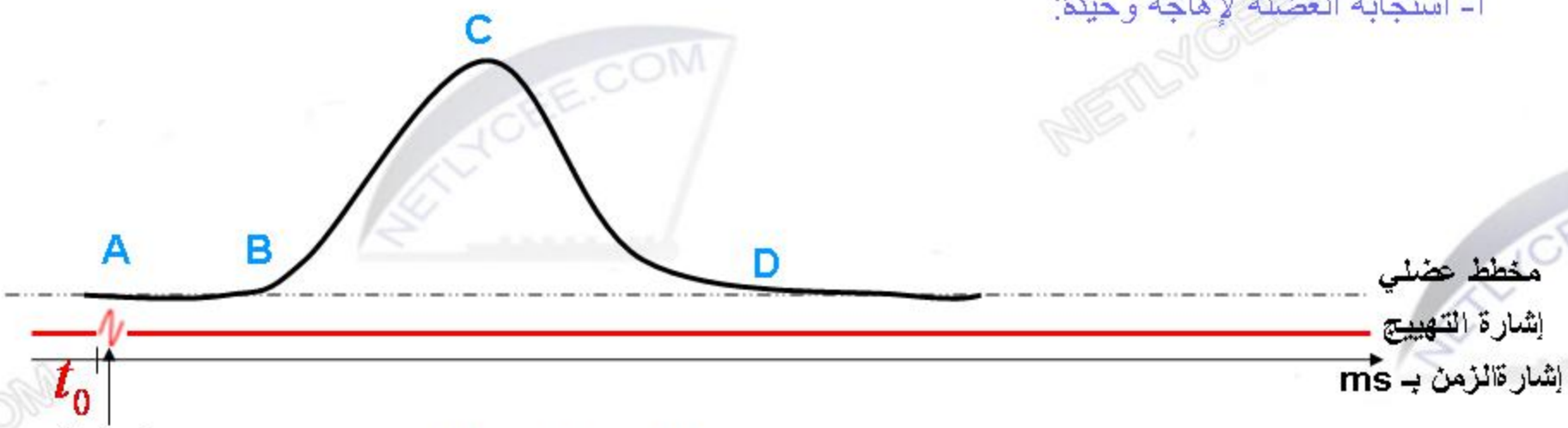
### 2-1 . العدة التجريبية للتسجيل العضلي :

تمثل الوثيقة التالية العدة التجريبية للتسجيل العضلي والتي تسمى راسمة عضلية وتسمى التسجيلات المحصل عليها مخططات عضلية.



## 2-2- تعبير وتحليل المخططات :

### أ- استجابة العضلة لإهاجة وحيدة:




يكون التقلص قصير الأمد و معزولا: يسمى رعشة عضلية بسيطة .

* الجزء AB : فترة الكمون Temps de latence: هو الوقت الذي يفصل بين لحظة الإهاجة ولحظة بداية الاستجابة.

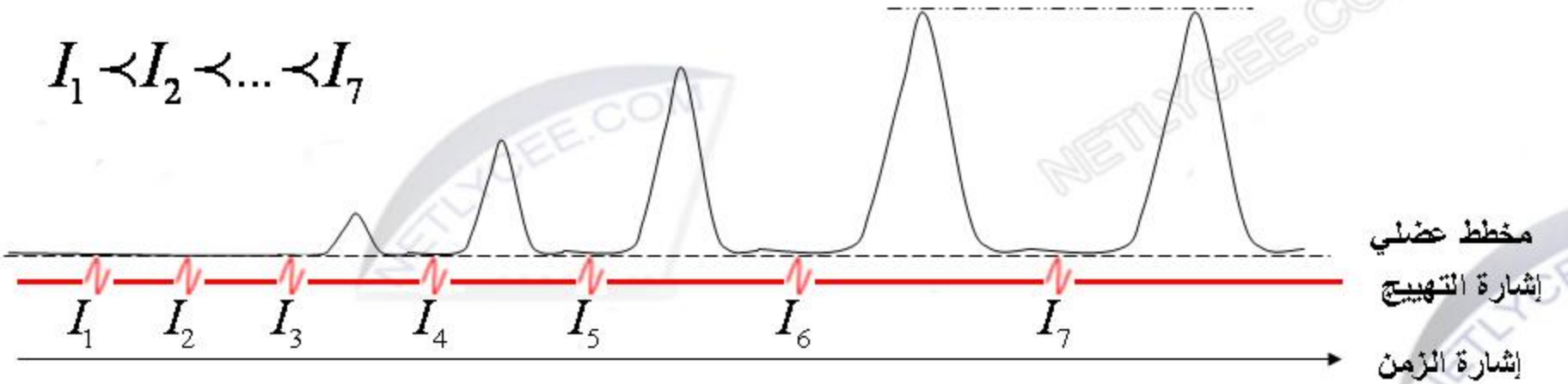
* الجزء BC : فترة التقلص( Période de contraction)

- يزداد خلالها توتر العضلة تدريجيا في حالة تقلص متساوي القياس

- يتناقص طول العضلة في حالة تقلص متساوي التوتر .

* الجزء CD: فترة الارتخاء (p. de relâchement) تأخذ خلالها العضلة الأبعاد العادية .

ب- استجابة العضلة لعدة إهاجات متباعدة وذات شدة متصاعدة :




نلاحظ :

* عدم استجابة العضلة لكل إهاجة شدتها متساوية أو اصغر من $I_2$ إذن تعتبر هذه الشدات تحت العتبة: infraliminaire

* $I_3$ : العتبة Seuil هي الشدة الدنوية التي نحصل من خلالها على أول استجابة عضلية.

* استجابة العضلة باستجابات ذات وسع متصاعد لإهاجات ذات الشدة المتصاعدة بين $I_3$ و $I_6$

* استجابة العضلة بإستجابات ذات وسع أقصى وثابت لإهاجات التي تفوق شدتها $I_6$

إذن الشدات بين $I_4$ و $I_7$ هي شدات فوق العتبة supraliminaires

ملحوظة :

إذا كان الأمر يتعلق بمهيج كهربائي فإن العتبة تسمى الريوباز Rhéobase

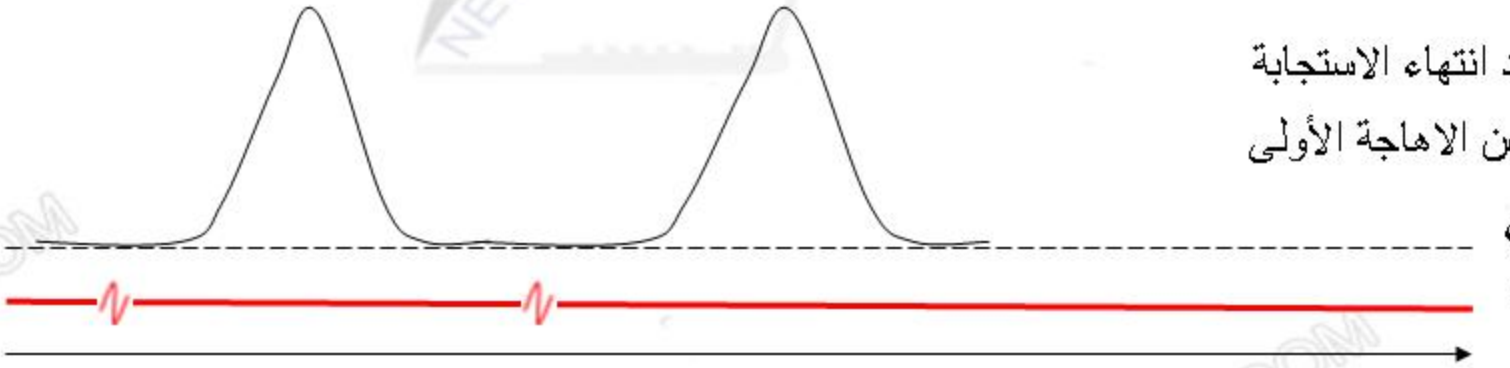
استنتاج : العضلة قابلة للتهيج شريطة أن تكون الإهاجة فعالة أي متساوية أو أكثر من العتبة.

**تفسير:** إن ازدياد وسع الإستجابات راجع إلى ازدياد عدد الألياف العضلة المهيجة للعضلة وهذا ما يعرف بظاهرة الإجمال أو التعبئة **(Le recrutement)** أما بقاء وسع الإستجابات أقصى فهو ناتج عن تعبئة جميع الألياف العضلية.

ج- استجابة العضلة لإهاجتين لهما نفس الشدة :

**الحالة الأولى :**

الإهاجة الثانية بعد انتهاء الاستجابة الأولى الناتجة عن الاهاجة الأولى




← الحصول على استجابة مستقلة عن الأولى ومماثلة لها.

**الحالة الثانية :**

الإهاجة الثانية خلال مرحلة ارتخاء الاستجابة الأولى

← الحصول على استجابة ثانية يفوق وسعها وسع الاستجابة الأولى نقول أن الالتحام غير تام ( fusion incomplète)

## الحالة الثالثة :

الإهاجة الثانية خلال مرحلة تقلص الاستجابة الأولى

← الحصول على استجابة ثانية تكون متطابقة وامتداد لاستجابة الأولى نقول إن التحام الرعشات التحام تام: ( fusion complète)

## الحالة الرابعة :

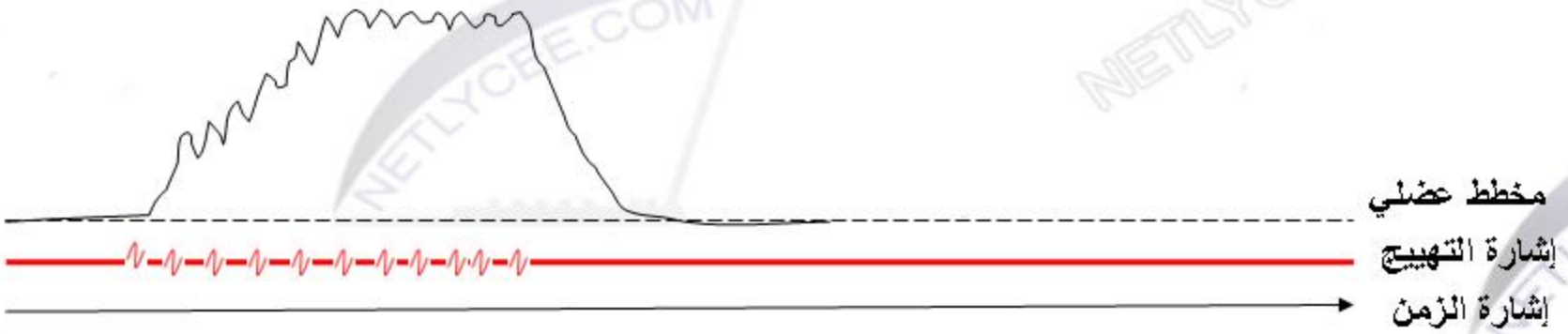
الإهاجة الثانية اثناء فترة كمون الاستجابة الأولى

← الحصول على استجابة واحدة ناتجة عن الاهاجة الأولى.

تفسير: تكون فترة الكمون تناسب الدور المقاوم للعضلة والذي خلاله تكون العضلة غير قابلة للاهتياج.

د- استجابة العضلة لسلسلة من الاهاجات المتماثلة :

**الحالة الأولى :** تردد متوسط (بين 10 إلى 15 اهاجة/ ثانية)

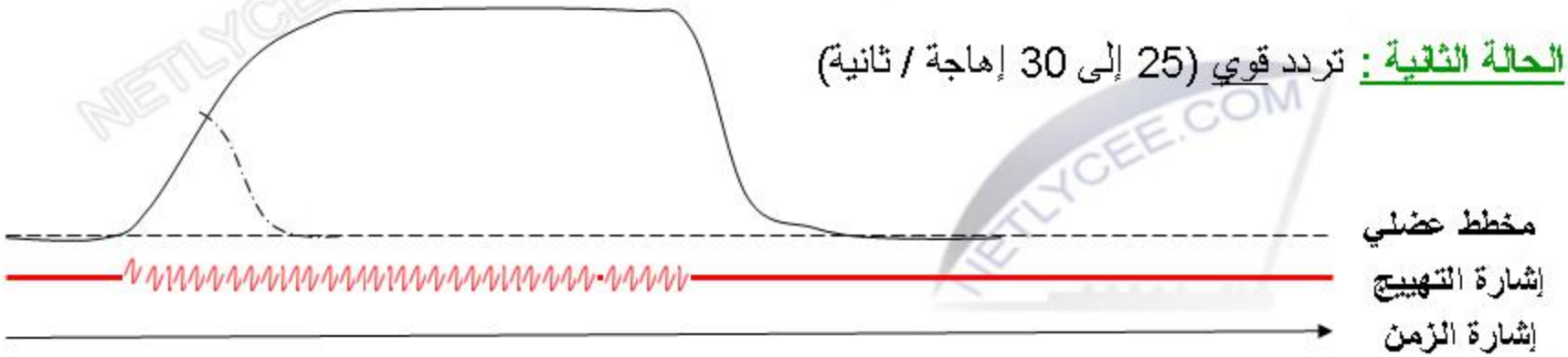



نحصل على مخطط عضلي مكون من .

- **جزئ صاعد متموج :** عبارة عن تذبذبات متتالية ذات وسع متزايد
- **جزئ أفقي على شكل منبسط متموج:** ناتج عن التحام غير تام للرعشات العضلية.

⇐ المخطط يسمى: كزاز ناقص tétanos imparfait

**الحالة الثانية :** تردد قوي (25 إلى 30 إهاجة / ثانية)

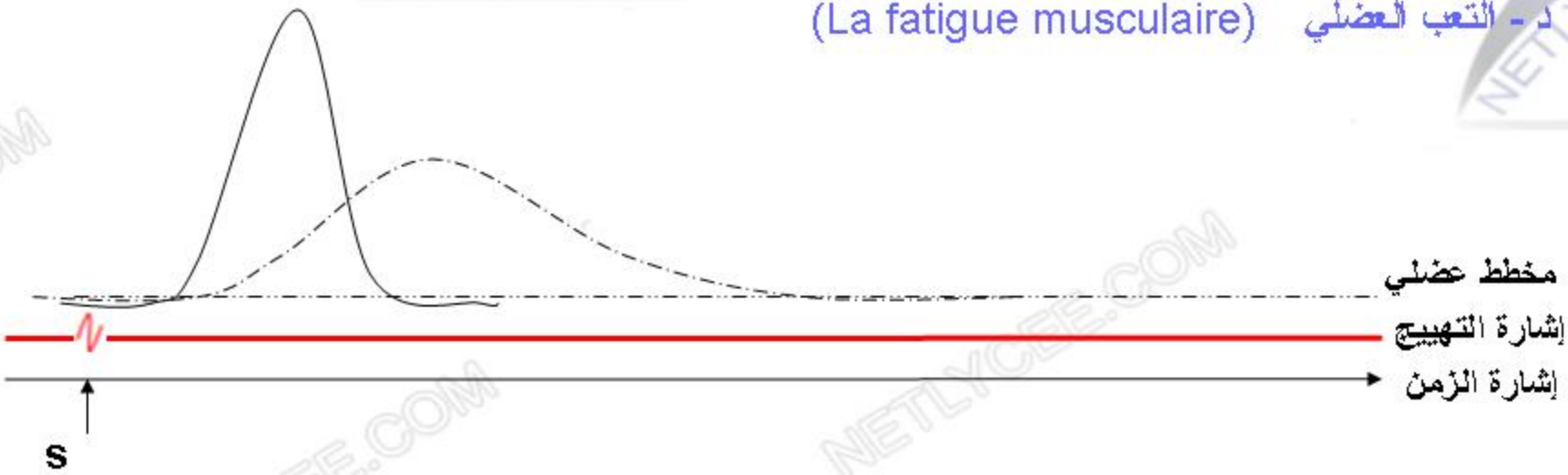


نحصل على مخطط عضلي مكون من

- جزئ صاعد غير متموج ناتج عن إجمال شدات الإهاجة.
- جزء منبسط أفقي ناتج عن التحام تام للرعشات العضلية

⇐ المخطط يسمى كزاز تام. tétanos parfait

## د - التعب العضلي (La fatigue musculaire)

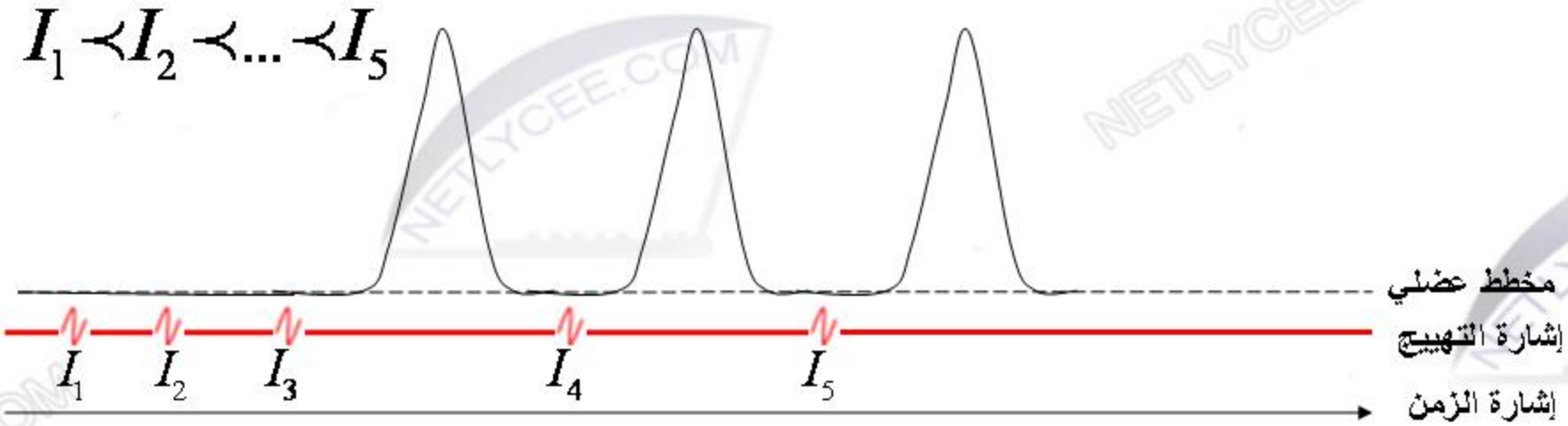



يتبين من تحليل المنحى أن التعب العضلي يكون مرفوقا بانخفاض وسع المخطط العضلي وارتفاع مدى التقلص العضلي.

ملحوظة (1): خلال كزاز طويل ينحدر منبسط نتيجة التعب الذي يلحق العضلة.

ملحوظة (2): بعد تعب كبير لا تستجيب العضلة بتاتا

## و- استجابة الليف العضلي لعدة إهاجات متصاعدة وذات شدات متصاعدة




يتبين من ملاحظة الوثيقة أن :

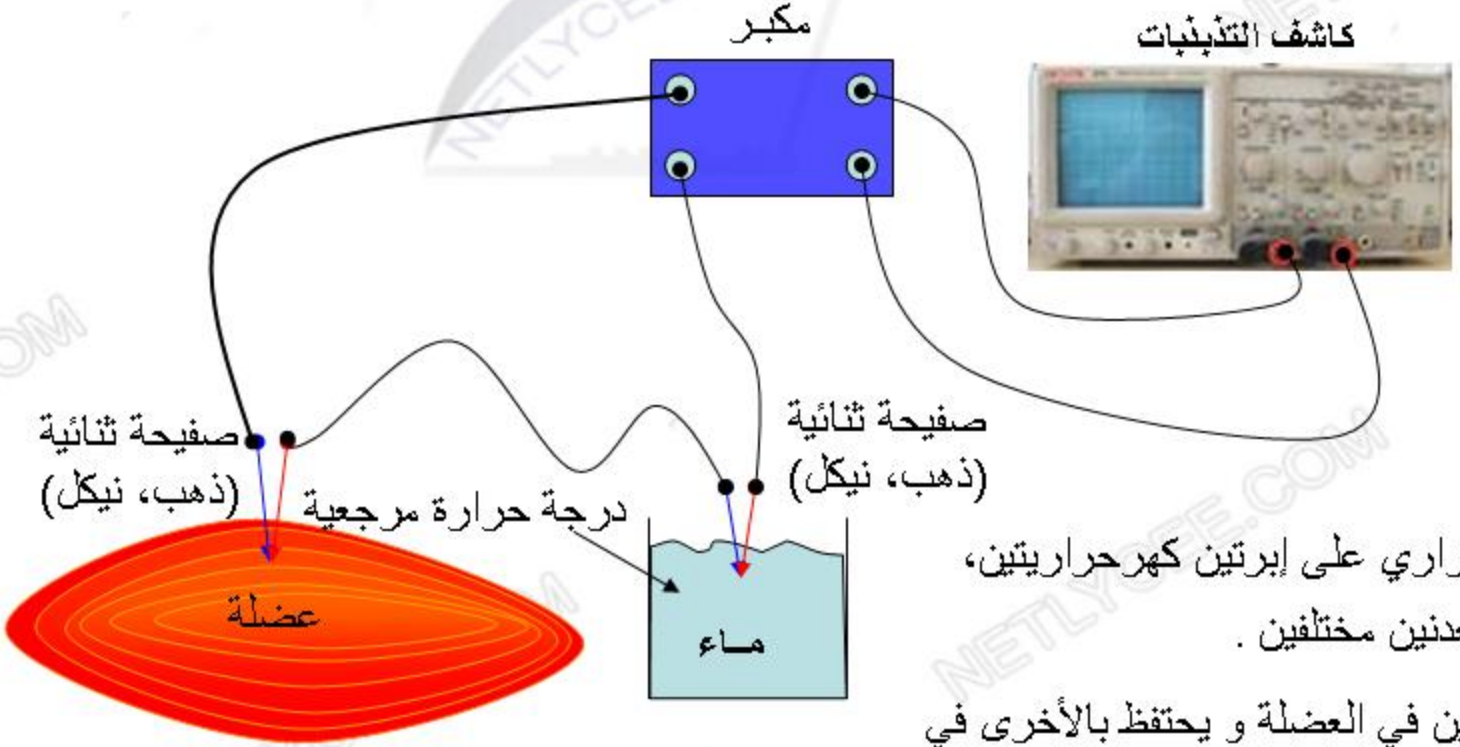
- بالنسبة لليف العضلي انطلاقا من العتبة تكون الاستجابة ذات وسع أقصى وثابت مهما ازدادت شدة الإهاجة

نقول أن الليف العضلي يستجيب لقانون الكل أو العدم (loi du tout ou rien).

## 2 ـ الظواهر المرافقة للتقلص العضلي :

### 2-1 ـ الظواهر الحرارية:

تمكن تقنية العمود الحراري من التقاط التغيرات الحرارية داخل العضلة، حيث نحصل على المنحنى الممثل في الوثيقة أسفله




رسم تخطيطي لعمود حراري

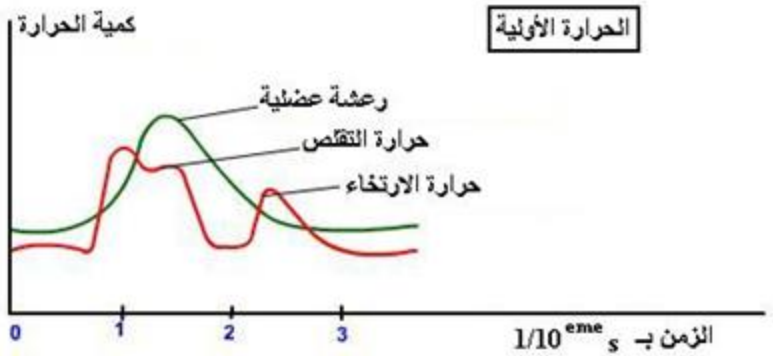
يحتوي العمود الحراري على إبرتين كهرحراريتين، تتكون كل إبرة من معدنين مختلفين .

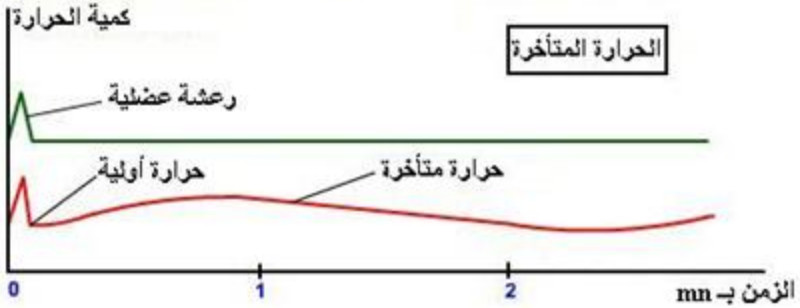
تغرز إحدى الإبرتين في العضلة و يحتفظ بالأخرى في درجة حرارة ثابتة(مرجعية). عندما تتقلص العضلة يظهر اختلاف في درجة الحرارة بين الإبرتين يتولد عنه تيار كهربائي تتناسب شدته و درجة حرارة العضلة المتقلصة

خلال نشاط العضلة يتم تحرير الحرارة خلال مرحلتين :

- الحرارة الأولية : تحرر في مرحلتين: خلال التقلص وخلال الارتخاء مدتها بضع اجزاء ثانية.

- الحرارة المتأخرة : تحرر بعد نهاية الرعشة العضلية مدتها تتراوح بين min1 إلى min2 و هي ذات شدة أضعف و تستغرق مدة أطول




## 2- 2 ـ الظواهر البيوكيميائية و الطاقية

### أ- التركيب الكيميائي للعضلة :

- 75 % ماء
- 20 % بروتينات
- 5 % كليكوجين+دهنيات+أملاح معدنية $\left(Mg^{+}Ca^{+}k^{+}Na^{+}\right)+ATP+....$

ب- معطيات تجريبية :

| | خلال ساعة بالنسبة ل من العضلة | |
|---|---|---|
| | في حالة راحة | في حالة نشاط |
| حجم الدم الذي يعبر العضلة ب $(\ell)$ | 12.220 | 56.325 |
| حجم الأكسجين المستهلك ب$(\ell)$ | 0.307 | 5.207 |
| حجم ثاني أكسيد الكربون المطروح ب$(\ell)$ | 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 |

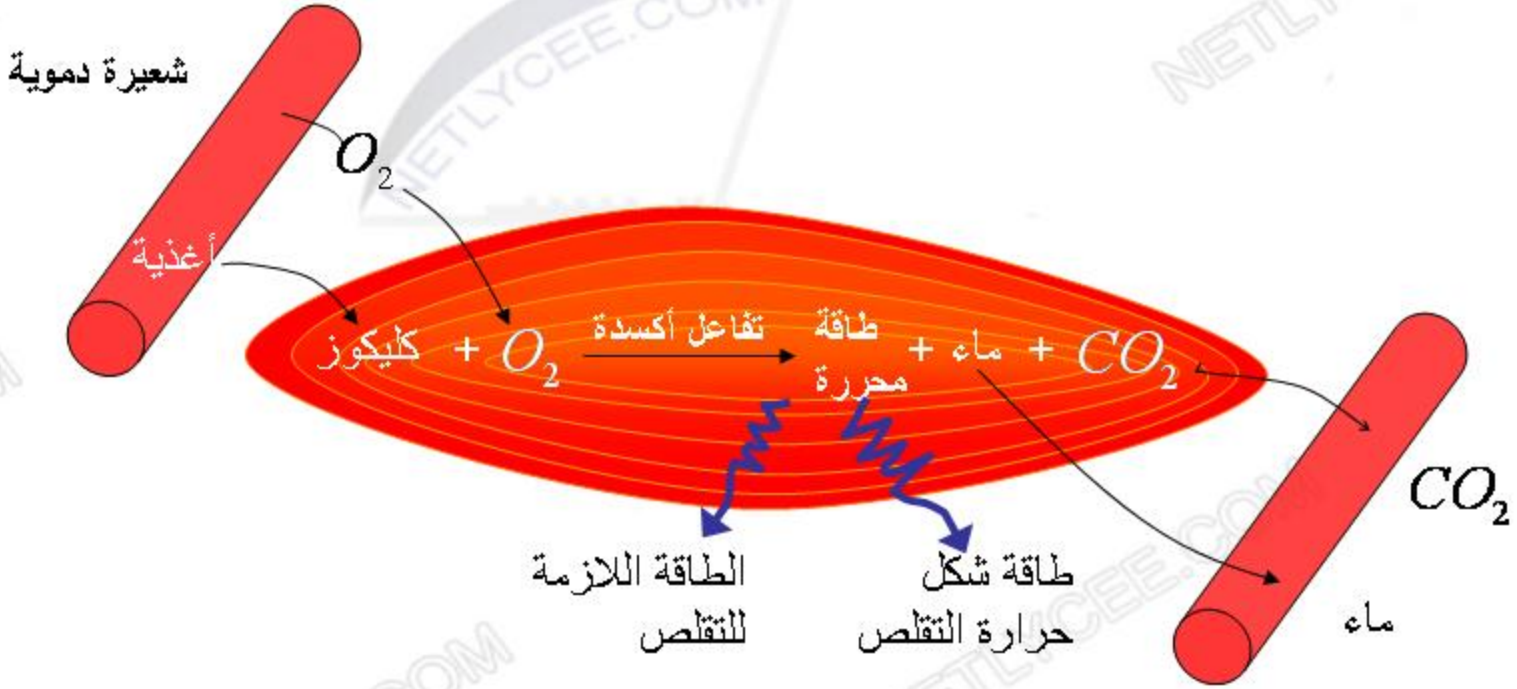
يتبين من خلال المعطيات الجدول أن العضلة خلال فترة النشاط :

- تستهلك كمية أكبر من $O_2$ بالمقارنة نع فترة الراحة.
- نطرح كمية أكبر من $CO_2$ بالمقارنة مع فترة الراحة.
- تستهلك كمية أكبر من الكليكوز تفوق الكمية المستعملة خلال فترة الراحة.
- لا تستهلك البروتينات ولا الدهنيات.

NETLYCEE.COM

← يمكن افتراض أن أكسدة الكليكوز توفر كمية من الطاقة الضرورية للتقلص حسب التفاعل التالي:

$$C_6H_{12}O_6 + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O + 38ATP + \text{طاقة حرارية}$$




رأينا أن إنتاج الحرارة يتم على دفعتين (حرارة أولية + حرارة مؤخرة ) اذن هناك وجود سلسلتين من التفاعلات .

تجربة : بين Fletcher و Hopkins سنة 1907 أن العضلة (بطن ساق ضفدعة) قادرة على تقلص في وسط لا هوائي (لا يحتوي على $O_2$) إلا أنها تتعب بسرعة مع تراكم الحمض اللبني.هذا الأخير يختفي إذا وضعت العضلة في وسط هوائي يحتوي على $O_2$.

استنتاج : هناك وجود نوعين من التفاعلات: تفاعلات لا هوائية و أخرى هوائية.

**تجربة :** بين Engel Hardt سنة 1939 أن الميوزين (myosine) (بروتين عضلي) قادرة على حلمأة ATP مما ينتج عن تحرر كمية من الطاقة.

**استنتاج :** تحرر ATP الطاقة بعد حلمأتها تحت تأثير الميوزين

أنزيم الميوزين

$$ATP + H_2O \rightarrow ADP + Pi + E$$

## 3- أهمية استهلاك الطاقة الضرورية للتقلص العضلي وضرورة تجديد ATP

### 3- 1- التفاعل الأساسي للتقلص العضلي

يبدأ التقلص العضلي بتفاعلات لاهوائية :حلمأة ATP التي تحرر الطاقة الضرورية للتقلص العضلي حسب التفاعل التالي :

انزيم المركب اكتينوميوزين

$$ATP + H_2O \xrightarrow[Ca^{++};Mg^{++}]{} ADP + Pi + \text{طاقة}(=E_1)$$

جزء من الطاقة $E_1$ يحرر على شكل حرارة التقلص والجزء الثاني يمكن تقلص العضلة (عمل ميكانيكي)

لكن مدخرات العضلة من ATP ضئيلة $\left(\frac{4}{5} mmol.kg^{-1}\right)$ لذا وجب تجديد جزيئات ATP

## 3- 2- طرق تجديد ATP

أ- طرق سريعة لا هوائية: و هي مصدر الحرارة الأولية خصوصا حرارة الارتخاء .

- التفاعل الأول :

بفضل أنزيم الميوكيناز يتم تركيب جزيئة ATP انطلاقا من جزئين ADP

$$ADP + ADP \xrightarrow{Mk} ATP + AMP + \text{حرارة الارتخاء}$$

- التفاعل الثاني :

تحتوي الألياف العضلية على مركب غني بالطاقة هو الكرياتين فوسفاط الذي يسلم مجموعة فوسفاطية لـ ADP ويتحول إلى كرياتين .

$$ADP + CP \longrightarrow ATP + C + \text{حرارة الارتخاء}$$

ب- طريق متوسط لا هوائي :

اذا اصبحت كمية $O_2$ غير كافية أثناء مجهود عضلي قوي فإن حمض البيروفيك يحول إلى حمض لبني بواسطة التخمر اللبني.

$$C_6H_{12}O_6 + 2ADP + 2P_i \rightarrow 2(CH3\text{-}CHOH\text{-}COOH) + 2ATP$$

في حالة عودة العضلة إلى الراحة فإن الحمض اللبني ينتقل إلى الكبد والقلب حيث يؤكسد ويحول إلى حمض بيروفيك ثم إلى كليكوجين

ملحوظة : يؤدي تراكم الحمض اللبني داخل العضلة إلى تعب هذه الأخيرة.

### ج- طريق بطيئة:

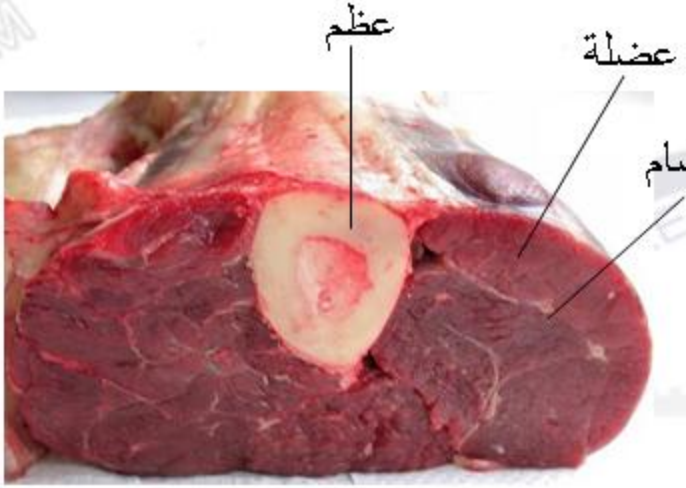
يحتوي الليف العضلي على ذخيرة مهمة من الكليكوجين الذي يُجزّئ ويُحوّل إلى كليكوز فوسفاط ، ثم إلى حمض البيروفيك بوجود $O_2$ لإعطاء $CO_2$ , $H_2O$ وطاقة:

$$C_6H_{12}O_6 + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O + 38\text{ATP} + E$$

تسمح $E$ بإعادة تكوين ATP والفوسفوكرياتين وجزء يحرر على شكل حرارة مؤخرة.

NETLYCEE.COM

## 4- بنية العضلة الهيكلية المخططة



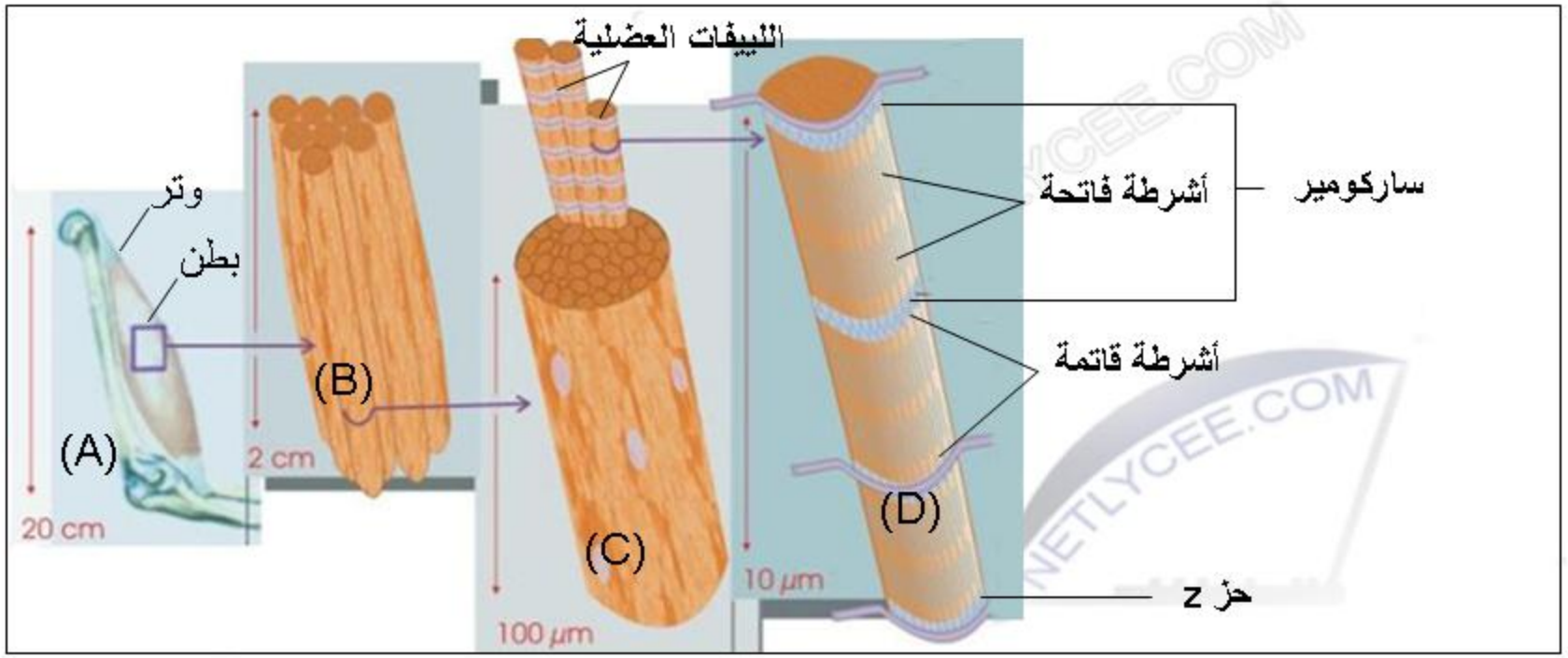

*الشكل الخارجي : تتكون العضلة من بطن العضلة وأوتار(A)

*مقطع طولي للعضلة: تحتوي العضلة على كتل (B) توجد بداخلها عناصرممددة تسمى ألياف عضلية وهي خلايا عملاقة عديدة النوى تظهرعلى شكل أسطوانات طويلة (C)، فهي خلايا.

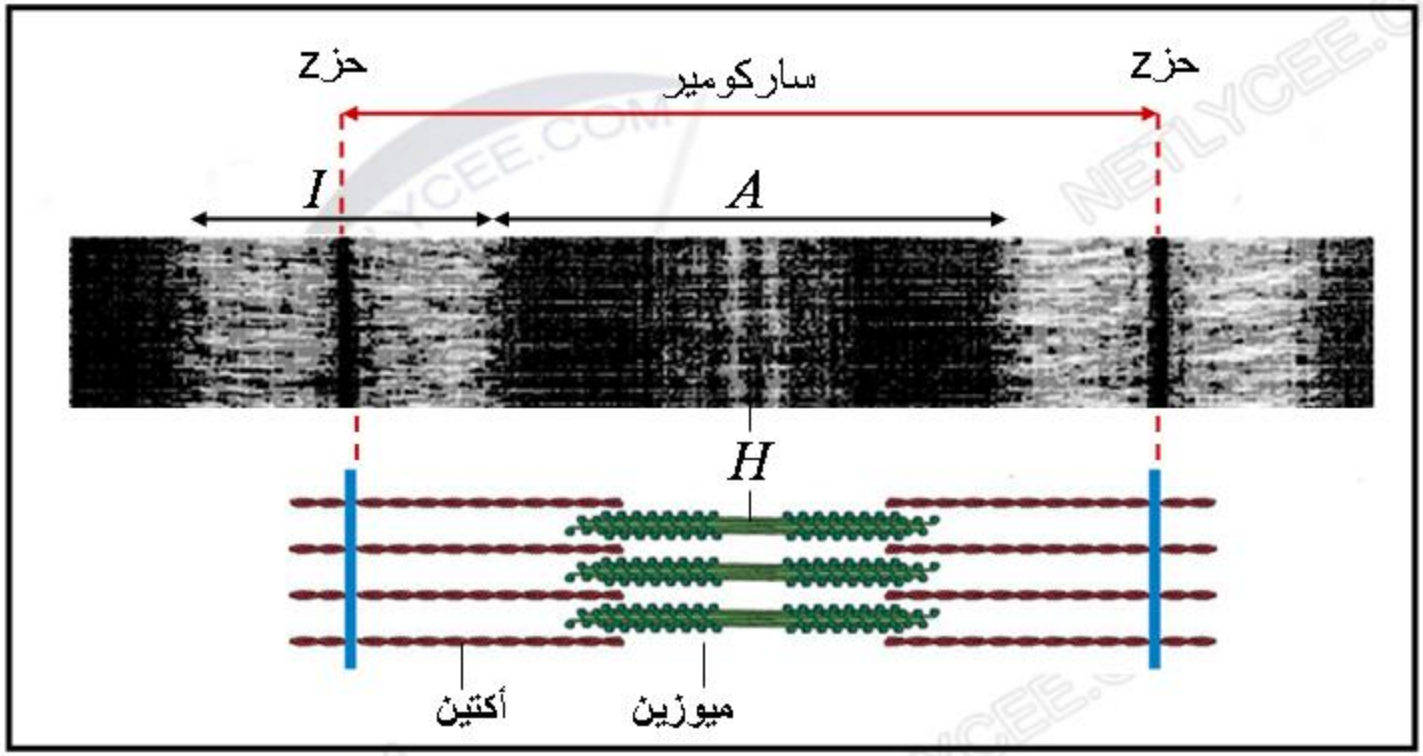
وتبدو الخلايا العضلية مخططة طوليا وعرضيا (D).

يظهر السيتوبلام (المسمى الساركوبلازم) مشغولا بعناصر تسمى الليفات العضلية myofibrilles متوازية فيما بينها.

ويتشكل كل ليف من تناوب أشرطة فاتحة وأشرطة تحدد مايسمى بالساركومير المحدود في نهايته بالحز Z .



## 5 - فوق بنية العضلة الهيكلية :



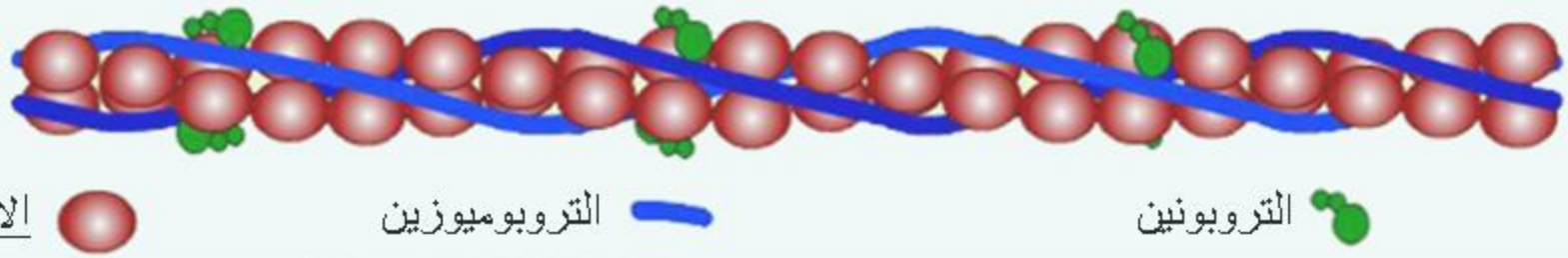

الساركومير هي المنطقة المحصورة بين حزيين Z ويتكون من شريط قاتم ومنطقة H وشريط فاتح .

- الشريط الفاتح (المنطقة $I$) تتكون من خيبطات دقيقة مكونة من بروتين الأكتين على شكل لولب مضاعف.

وتكون محاطة بنوعين من البروتينات : التروبونين و التروبوميوزين

- المنطقة H تتكون من خيبطات سميكة مكونة من بروتين الميوزين على شكل عصيات ذات رؤوس كروية .

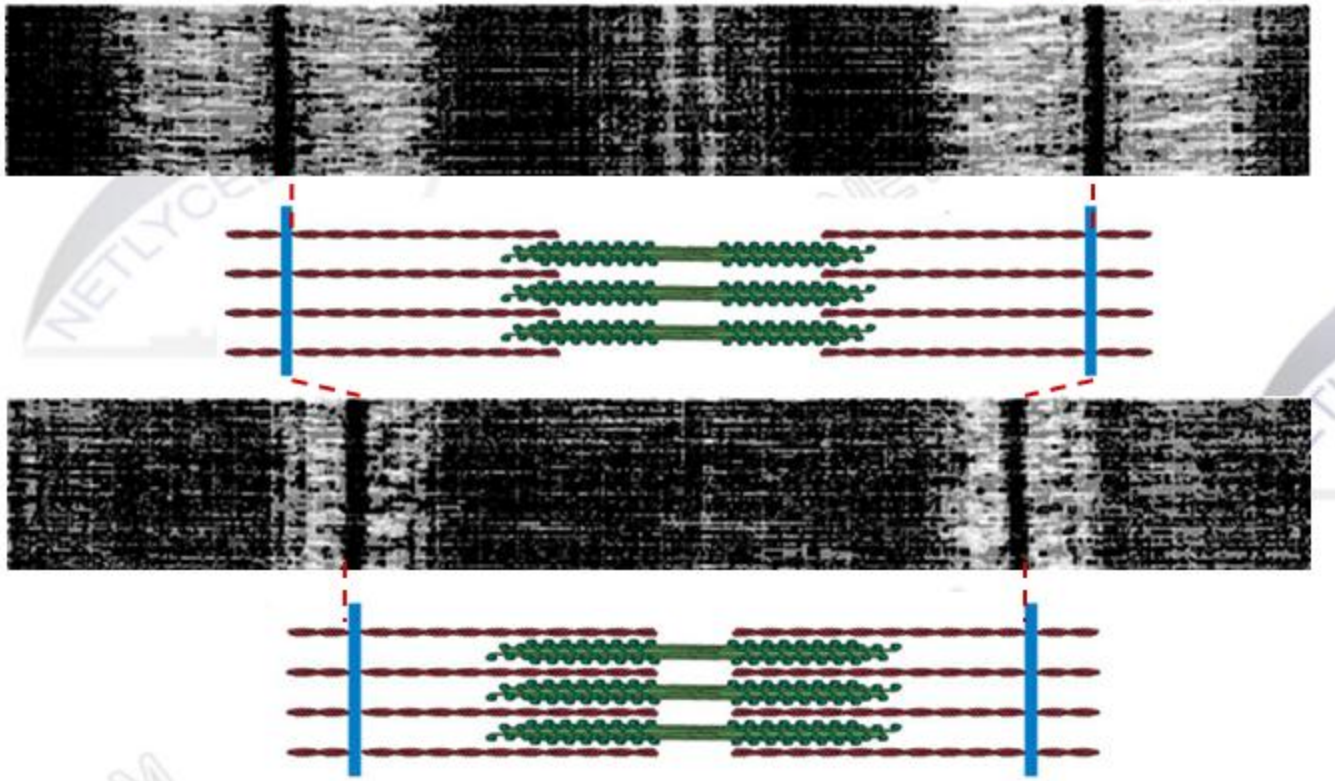
- الشريط القاتم (المنطقة A ) تتكون من الأكتين والميوزين.




بنية خيط الأكتين

بنية خيط الميوزين

## 6 - آلية التقلص العضلي :




تبين الملاحظة المجهرية لألياف عضلة مجمدة في حالة راحة و أخرى في حالة تقلص أن هناك :

+ تقصير الساركوميرات (اقتراب الحزات Z فيما بينها.)

+ اختزال طول الأشرطة الفاتحة:

+ استقرار طول الأشرطة القاتمة :

بما أن طول الأشرطة القاتمة يبقى ثابتا فليس هناك تقصير للخيوطات بل انزلاق بعضها البعض.

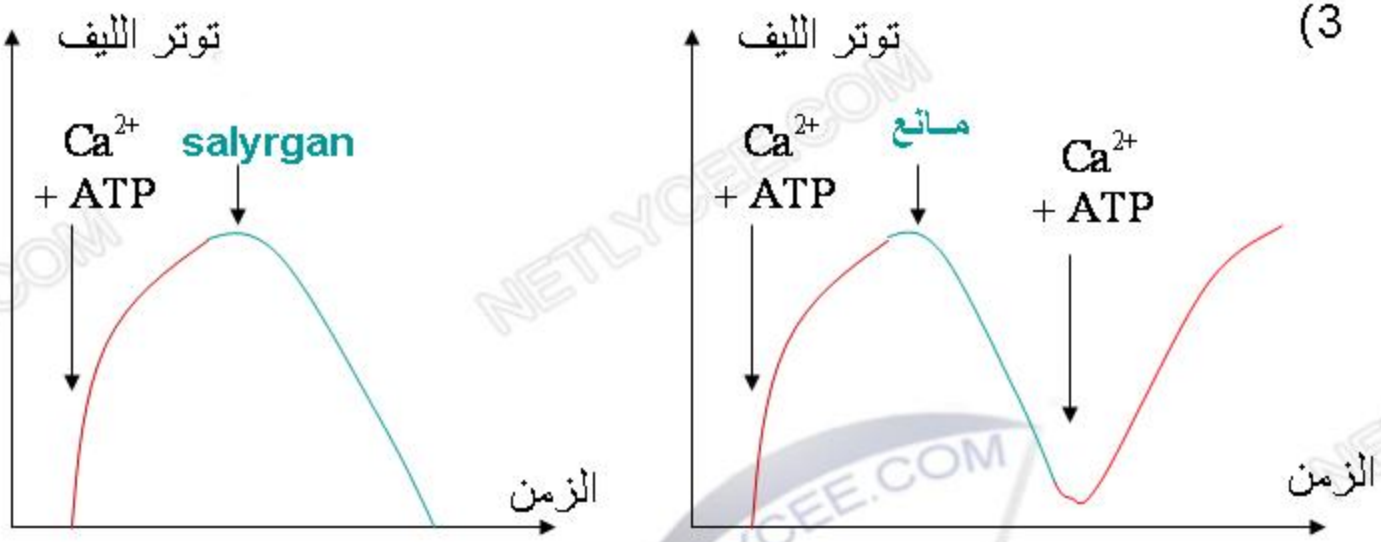
## أ – الحاجيات الإستقلابية للتقلص العضلي

**تجارب:**

1) توضع مستخلصات نقية من جزيئات الميوزين بحضور ATP في وسط ملائم فيلاحظ حلمأة بسرعة. عندما تضاف للوسط خيبطات الأكتين ترتفع سرعة حلمأة ATP

2) البابايين (papaïne) بروتياز يمكن من عزل رأس جزيئه الميوزين عن العضلة عند إعادة التجربة السابقة باستعمال احد هذين الجزئين فقط (الرؤوس أو العصيات )، يلاحظ أن الرؤوس هي التي تحافظ على قدرة تحفيز حلمأة ATP وكذلك على قدرة الارتباط بخيبطات الأكتين حيث يمثل المركب أكتنوميوزين أنزيما مسؤولا عن حلمأة ATP.

3)



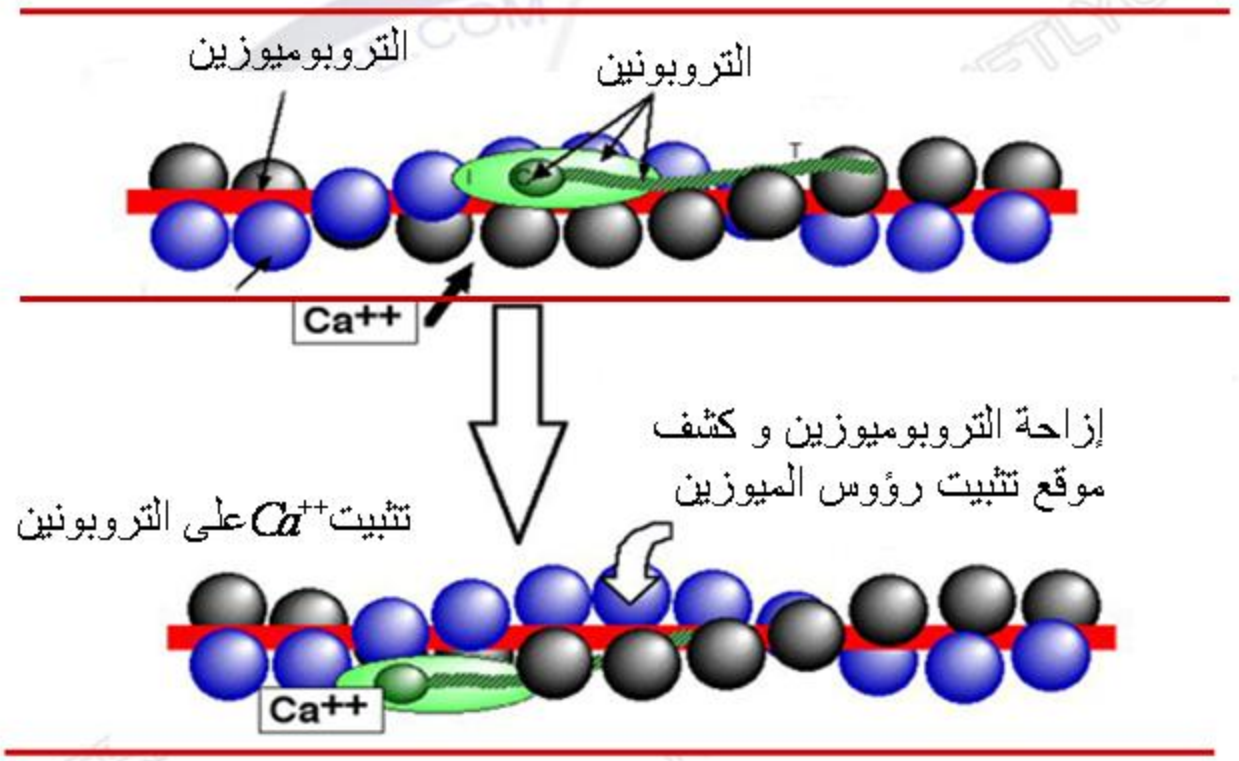

سالیركان: هو سُم يوقف حلمأة على مستوى الليفات

مـانع: مادة ترتبط بالكالسيوم و تمنع فعله.

نستنتج أن كلا من ATP و$Ca^{2+}$ ضروريان للتقلص العضلي :

ب- تلخيص لآليات التقلص العضلي:

* دور أيونات الكالسيوم




في غياب $Ca^{++}$: تحجب بروتينات التروبونين و التروبوميوزين مواقع تثبيت الميوزين الشئ الذي يؤدي إلى منع التحام رؤوس الميوزين وخييطات الأكتين .

بعد تحرير $Ca^{++}$: يثبت هذا الأخير على التروبونين الذي يحدث تغير في بنية التروبونين و التروبوميوزين محررا بذلك مواقع التثبيت مما يؤدي إلى ارتباط رؤوس الميوزين بالأكتين وبذلك يتكون مركب الأكتوميوزين.

* مراحل التقلص العضلي