

فلسجة العضلات

تعد العضلات نسيجاً متخصصاً للتقلص والحركة كما ان الحركة ميزة مهمة في الكائنات الحية اذ تقترن بتقلص العضلات وتعتمد الحركة على وجود البروتينات المتخصصة للقيام بالتقلص ومن اهم هذه البروتينات بروتين الاكتين والمايوسين لذا تعد العضلات اجهزة متخصصة لتحويل الطاقة الكيميائية الى طاقة ميكانيكية

انواع العضلات

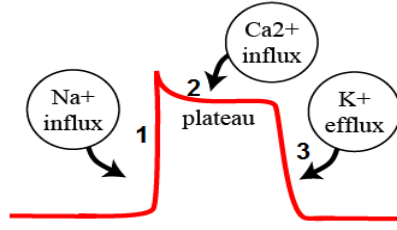
1- العضلات الهيكلية Skeletal Muscles : عضلات مخططة Striated تمتلك القدرة على التقلص القوي

والسريع ولكنها تتعب بسرعة. وهي عضلات ارادية اذ تقع عادة تحت سيطرة الدماغ (مع امكانية تقلصها لا اراديا كما يحدث في حالة الأفعال الانعكاسية الشوكية التي تتطلب سرعة كبيرة فضلا عن تقلص العضلات التنفسية كعضلة الحجاب الحاجز والعضلات بين الأضلاع بدون تدخل ارادي), وتحتاج هذه العضلات الى الأعصاب لتؤدي عملها لكونها لا تمتلك القدرة على التقلص ذاتيا. تكون قيمة جهد الغشاء عند الراحة حوالي (-90) ملي فولت ويستمر جهد الفعل الذي يسبق تقلص العضلة الهيكلية فترة قصيرة حوالي (10-8) ملي ثانية وهذه الفترة أقصر بكثير من الفترة التي يستغرقها جهد الفعل في العضلة القلبية .

2- العضلات القلبية Cardiac Muscles : وهي عضلات مخططة لا ارادية تمتلك القدرة على التقلص

الذاتي وتتميز بخاصيتين هما: 1- النسقية اذ انها تتقلص وتنسبط بالتعاقب 2- التوصيل اذ ان اليافها المتشابكة تسهل انتقال جهود الفعل فيما بينها انتقالا كهربائيا. ويتميز جهد الفعل الذي يسبق تقلص العضلات القلبية بالمرحلة الآتية:

- 1- زوال استقطاب سريع (بسبب الزيادة السريعة في نفاذية ايونات الصوديوم الى الداخل Na^+ influx) .
- 2- هضبة plateau (ناتجة عن زيادة بطيئة وطويلة في نفاذية ايونات الكالسيوم الى الداخل Ca^{++} influx) .
- 3- عودة استقطاب بطيئة (بسبب الزيادة المتأخرة في نفاذية ايونات البوتاسيوم الى الخارج K^+ influx) . وبذلك قد تصل فترة جهد الفعل الذي يسبق تقلص هذه العضلات الى حوالي (300) ملي ثانية وتكون قيمة جهد الغشاء عند الراحة حوالي (-80) ملي فولت.



شكل (1): مراحل جهد الفعل في العضلة القلبية

3- **العضلات الملساء Smooth Muscles** : وهي عضلات غير مخططة لا ارادية تقسم الى نوعين هما:

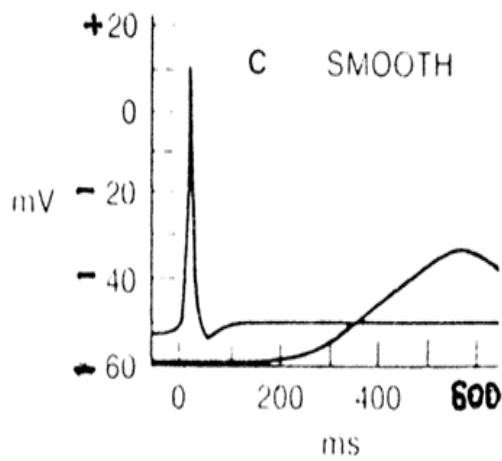
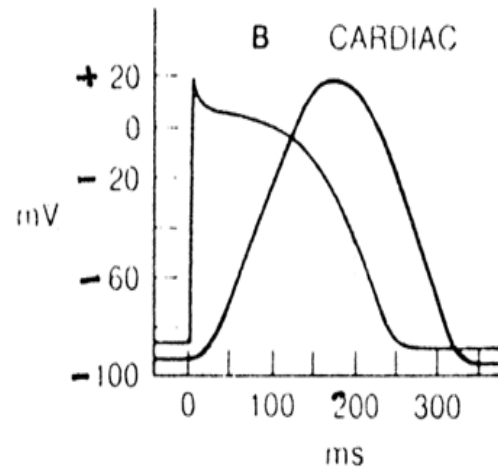
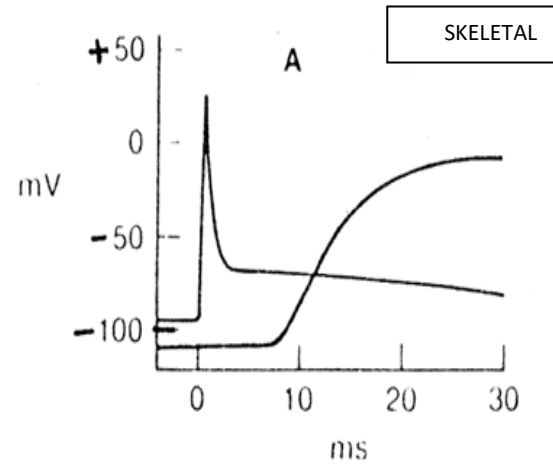
أ- **العضلات الملساء الوحيدة Unitary Smooth Muscles** : توجد بهيئة صفائح كبيرة تعمل كوحدة

واحدة و تدخل في بناء جدران الأعضاء المجوفة في الأحشاء كالقناة الهضمية والمثانة والحالبين والرحم لذلك تدعى ايضا بالعضلات الملساء الحشوية Visceral Smooth Muscles. تمتلك هذه العضلات القدرة على التقلص الذاتي وهي مجهزة بأعصاب من الجهاز العصبي الذاتي تعمل على تنظيم تقلصها.

ب- **العضلات الملساء متعددة الوحدات Multiunit Smooth Muscles** : تترتب بهيئة وحدات حركية

لا تتقلص ذاتيا بل تتقلص بتنبيه عصبي وهي بذلك تشبه العضلات الهيكلية وتوجد في جدران الأوعية وفي قرنية العين .

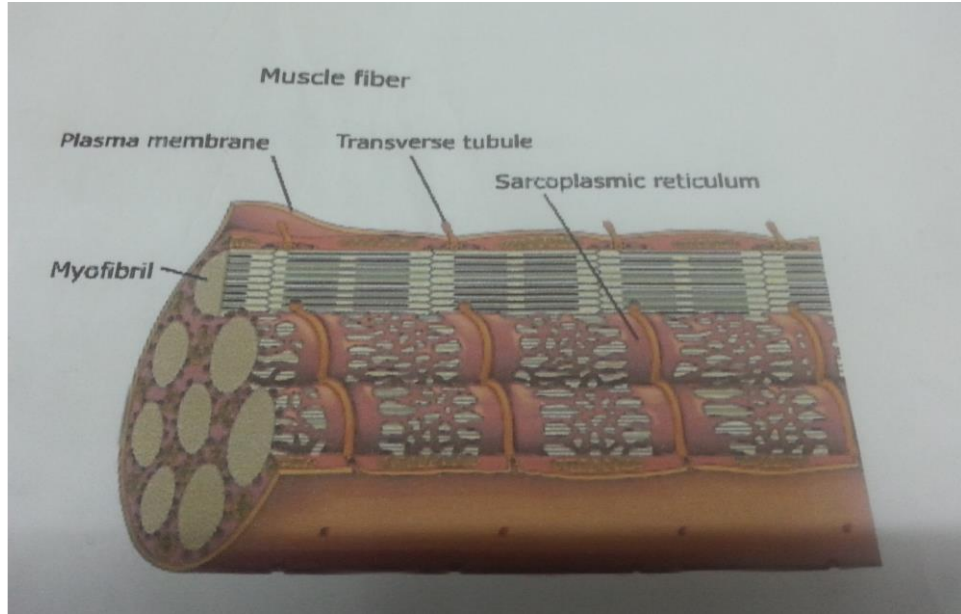
يستغرق تقلص العضلات الملساء وقتا طويلا وتتميز ايضا بالنسقية والتوصيل. وقد تصل قيمة جهد الغشاء عند الراحة في هذه العضلات الى (-50) ملي فولت.



شكل (2): جهود الفعل وتقلص أنواع العضلات المختلفة

العضلات الهيكلية Skeletal Muscles

تتألف العضلة الهيكلية من حزم من الألياف العضلية Muscle Fibers تمتد بطول العضلة وكل ليف عضلي يمثل خلية متعددة الأنوية تحوي لبيفات عضلية Myofibrils والليفات تحوي خيوط Filaments والتي تتألف من بروتينات تقلصية .



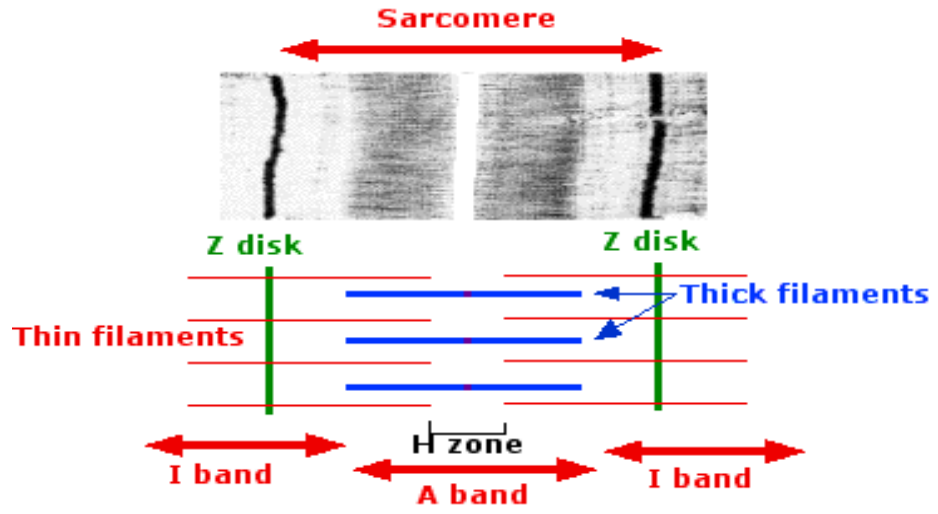
شكل (3): تركيب الليف العضلي Muscle Fiber

*- باستخدام المجهر الضوئي تلاحظ:

- مناطق غامقة تتبادل مع مناطق فاتحة على امتداد الليف العضلي وتدعى المناطق الداكنة بالأشرطة غير المتجانسة ضوئيا Anisotropic Bands (A-bands) أما المناطق الفاتحة فتدعى بالأشرطة المتجانسة ضوئيا Isotropic Bands (I-bands).
- يقسم شريط I في وسطه بغشاء يدعى خط-Z (Z-line) و يدعى أيضا قرص-Z (Z-disk) والمنطقة المحصورة بين خطي Z متجاورين تدعى بالقطعة العضلية Sarcomere. (الحرف Z مشتق من كلمة المانية تعني بين الأقراص (Zwischenschieben)
- هناك منطقة فاتحة نسبيا تقع وسط شريط A تدعى (H-Zone) Hensen Zone.

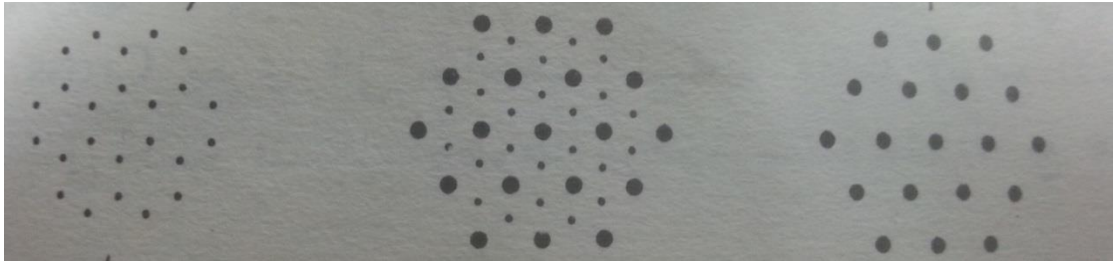
عند فحص اللييف العضلي باستخدام المجهر الإلكتروني تلاحظ:

- كل قطعة عضلية تحوي خيوط نحيفة Thin Filaments تمتد من كل خط Z باتجاه منتصف القطعة وخيوط غليظة Thick Filaments بين الخيوط النحيفة وهذه لا تتصل بخطوط Z.
- ان الشريط A يحوي كلا النوعين من الخيوط (النحيفة والسميكة) والشريط I يحوي النحيفة فقط بينما تحوي المنطقة H الخيوط السميكة فقط.



شكل (4): القطعة العضلية Sarcomere

- كل خيط سميك في اللييف العضلي يكون محاط بـ 6 خيوط نحيفة وكل خيط نحيف محاط بـ 3 خيوط سميكة كما في الشكل الآتي.



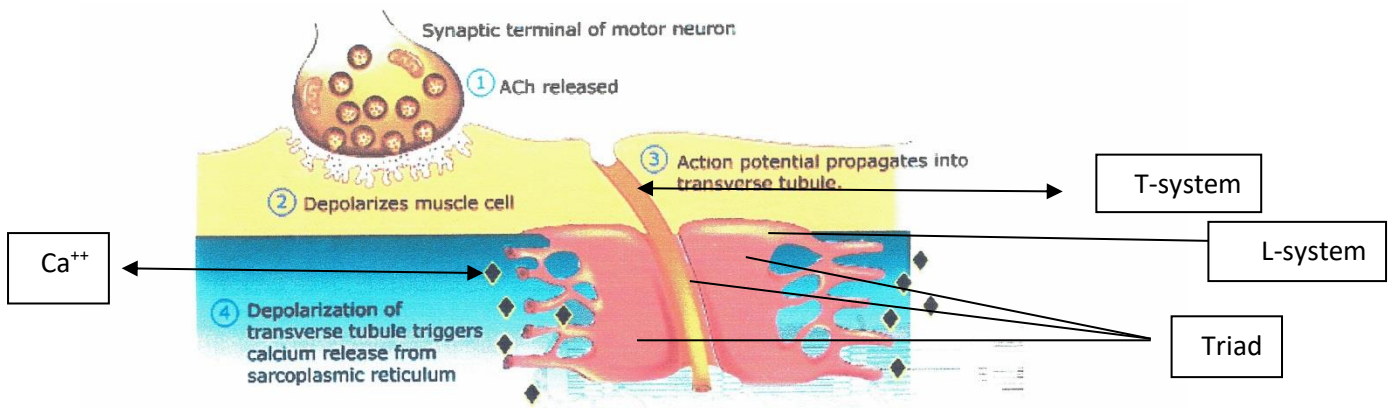
شكل (5): ترتيب الخيوط السميكة والخيوط النحيفة في اللييف العضلي

- تمتد من الخيوط الغليظة باتجاه الخيوط النحيفة امتدادات تدعى بالجسور العرضية Cross Bridges .

*- يحتوي الساركوبلازم Sarcoplasm (أي سايتوبلازم الليف العضلي) على جهاز نبيبي عضلي Sarco-tubular System وهو عبارة عن مجموعة من النبيبات الغشائية التي تقسم الى مجموعتين:

1- الجهاز المستعرض (T-System) Transverse System : الذي يتألف من مجموعة من النبيبات الناشئة عن انبعاجات في غشاء الليف العضلي وتكون هذه النبيبات عمودية على المحور الطولي لليف العضلي. ويقوم هذا الجهاز بنقل جهد الفعل من غشاء الليف العضلي الى كافة اللييفات الموجودة داخل الليف العضلي.

2- الجهاز الطولي (L-System) Longitudinal System : ويعرف ايضا بالشبكة الساركوبلازمية Sarcoplasmic Reticulum ويشمل مجموعة من النبيبات الغشائية تمتد بين النبيبات المستعرضة . وتندمج نبيبات الجهاز الطولي مع بعضها بالقرب من الجهاز المستعرض لتكوين اكياس كبيرة بحيث يقع كل كيس على احد جانبي النبيب المستعرض ليكون الثلاثة معا مايعرف بالنظام الثلاثي أو الثلاث Triad . وتتميز الشبكة الساركوبلازمية بقابليتها على تجميع ايونات الكالسيوم Ca^{++} .



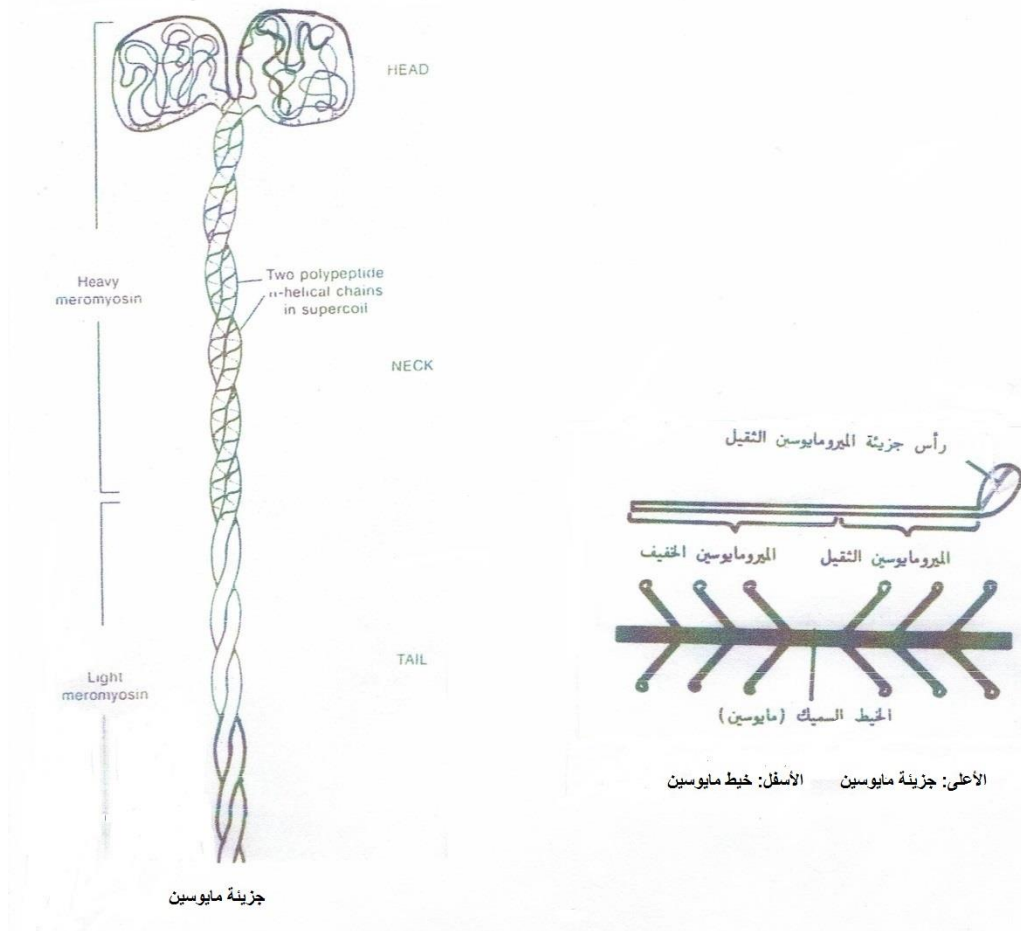
شكل (6): الجهاز النبيبي العضلي Sarco-tubular System

الخصائص الكيميائية للعضلة

هناك اربعة انواع من البروتينات في القطعة العضلية تشارك في عملية التقلص العضلي وهي:

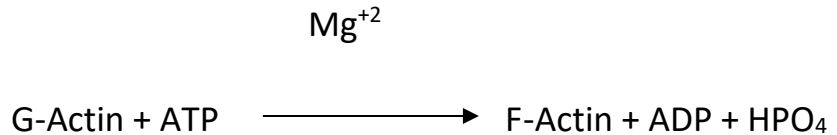
1- **المايوسين Myosin**: وهو الذي يشكل مادة الخيوط الغليظة وتتألف جزيئة المايوسين من سلاسل ببتيدية تلتف بشكل حلزون ذو رأس مزدوج وذنب وبأستخدام انزيم التربسين تتجزأ الجزيئة الى جزئين احدهما يحوي الرأس وجزء من الذنب ويدعى بالميرومايوسين الثقيل (HMM) Heavy Meromyosin والآخر يحوي ماتبقى من الذنب ويدعى بالميرومايوسين الخفيف (LMM) Light Meromyosin.

*- يعمل الميرومايوسين الثقيل بمثابة ATPase حيث يحلل الـ ATP لتحرير الطاقة , كما يأتي:



شكل (7): جزيئة وخيوط المايوسين

2- الأكتين Actin: ويشكل مادة الخيوط النحيفة وهو بروتين خيطي ملتف بشكل حلزون مزدوج Double Helix يتألف من وحدات بروتينية كروية , حيث انه ينشأ عن بلمرة الأكتين الكروي (G-Actin) Globular Actin الى اكتين ليفي (F-Actin) Fibrous Actin وتدعى هذه العملية بالتحول الكروي – الليفي وتتم بوجود ايونات المغنسيوم (Mg^{+2}) وجزيئات ATP كما في المعادلة الآتية :



- يحوي خيط الأكتين مواقع مهيئة للارتباط مع رؤوس الجسور العرضية الممتدة من خيط المايوسين.

3- التروبومايوسين Tropomyosin

وهو بروتين ليفي يمتد في ثنايا حلزون الأكتين وفي وضع الراحة يعمل هذا البروتين على تغطية المواقع الموجودة على خيط الأكتين والمهيئة للارتباط برؤوس الجسور العرضية للمايوسين.

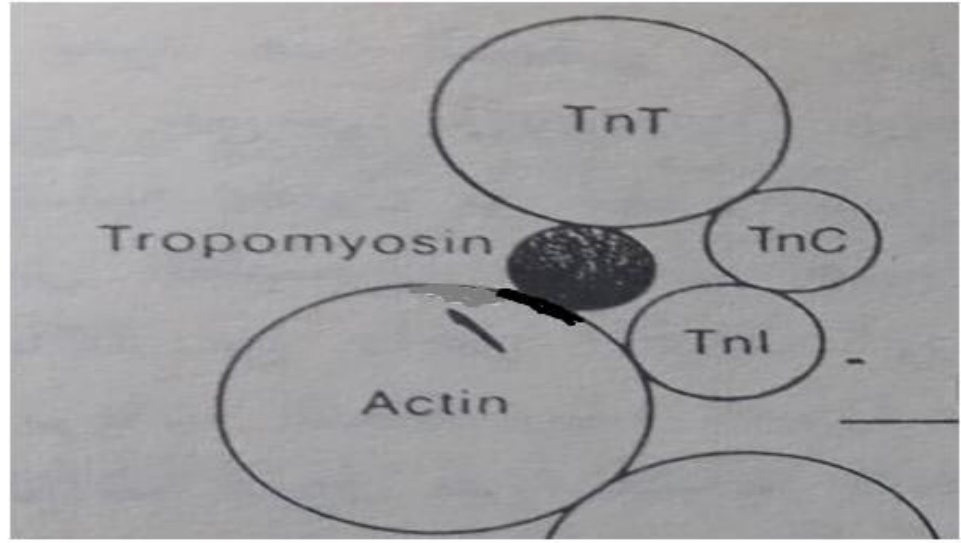
4- التروبونين Troponin

ويتألف هذا البروتين من ثلاث وحدات كروية ثانوية تقع في احاد حلزون الأكتين وهي :

- Troponin-T ويرتبط بالتروبومايوسين لذلك يدعى T .

- Troponin-I ويقوم بتنشيط فعالية الـ ATPase لذلك يدعى I نسبة الى كلمة Inhibitor لكونه (في الألياف المستريحة) يوجد بوضع يمنع الجسور العرضية للمايوسين من الاتصال بالمواقع الخاصة الموجودة على خيط الأكتين , وهو مثبت لفعل الميرومايوسين الثقيل

- Troponin-C ويحوي مواقع للارتباط بأيونات الكالسيوم Ca^{++} لذلك يدعى C .



شكل (8) : مواقع التروبومايوسين و الوحدات الثانوية للتروبونين على خيط الأكتين

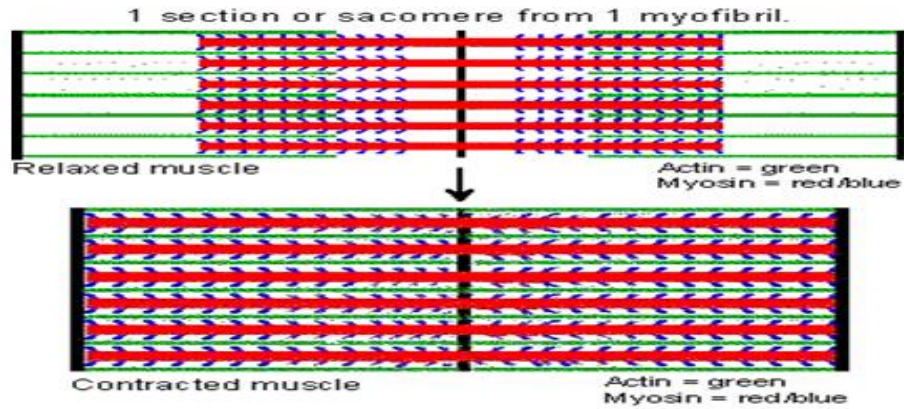
ملخص خطوات عملية التقلص العضلي ونظرية الأنزلاق الخيطي Filament Sliding Theory

1- يصل الألياف العصبية الى نهايات الليف العصبي مما يؤدي الى افراز الناقل الكيميائي (الأسستل كولين) من الحويصلات التشابكية الموجودة في منطقة الأزرار (الأقدام) النهائية ثم تنتقل جزيئات هذا الناقل الى سطح الليف العضلي في منطقة الصفيحة النهائية الحركية وعند ارتباطها بمستقبلاتها تؤدي الى حدوث زوال استقطاب في غشاء الليف العضلي ناتج عن تغير في نضوحية الغشاء لأيونات ويتولد نتيجة ذلك ما يسمى بجهد الصفيحة النهائية End Plate Potential (EPP) .

2- ينتقل جهد الفعل من غشاء الليف العضلي الى اعماق الليف بواسطة T-System ثم يصل الى الشبكة الساركوبلازمية فتتحرر منها ايونات الكالسيوم.

3- ترتبط ايونات الكالسيوم مع التروبونين C مما يؤدي الى تغير شكله ويقوم بأزاحة التروبونين I أي يحدث تغير في مواقع التروبونين وكذلك التروبومايوسين (المرتبط بالتروبونين-T) فتتكشف المواقع التي كانت مغطاة بالتروبومايوسين على خيط الأكتين والتي هي مواقع لأرتباط رؤوس الجسور العرضية الممتدة من خيط المايوسين.

4- ترتبط رؤوس الجسور العرضية للمايوسين بالمواقع الخاصة على خيط الأكتين ثم تنتقل هذه الرؤوس من موقع الى آخر على خيط الأكتين مما يولد شد في هذه الجسور وفي خيط المايوسين وبالنتيجة ينزلق خيط الأكتين على خيط المايوسين باتجاه منطقة H في القطعة العضلية Sarcomere مما يؤدي الى قصر القطعة وهكذا الحال مع باقي القطع العضلية ضمن العضلة فيقصر طول العضلة ككل ويحدث التقلص.

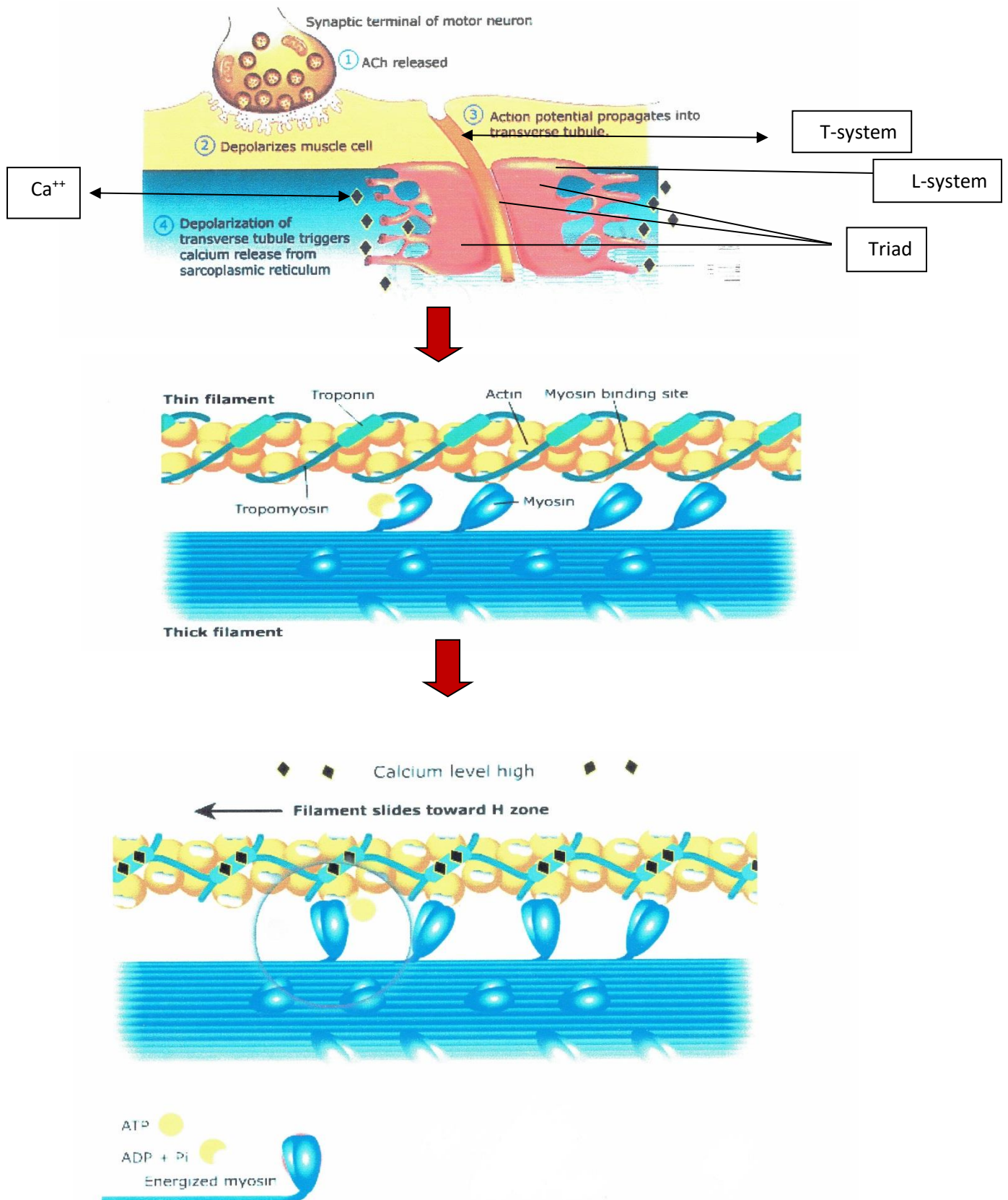


شكل (9): قصر القطعة العضلية نتيجة انزلاق خيوط الأكتين على خيوط المايوسين

5- لحدوث الارتخاء يتحلل الـ ATP لتوفير طاقة لفك ارتباط رؤوس الجسور العرضية بخيط الأكتين وتعود ايونات الكالسيوم الى داخل الشبكة الساركوبلازمية تاركة التروبونين C ليأخذ وضعه السابق وبهذا يعود كل من التروبونين والتروبومايوسين الى موقعهما السابق فيعود التروبومايوسين ليغطي مواقع الأكتين الخاصة بارتباط رؤوس الجسور العرضية للمايوسين.

اي ان عملية الأرخاء في العضلة تتطلب شرطين هما :

- 1- توفر الطاقة المتحررة من جزيئات الـ ATP لغرض فك الارتباط بين رؤوس الجسور العرضية وخيط الأكتين .
- 2- انخفاض تركيز ايونات الكالسيوم Ca^{+2} الى مستوى واطيء يمنع عودة الارتباط بين رؤوس الجسور العرضية مع خيط الأكتين , حيث ينخفض تركيزه في الساركوبلازم (سايتوبلازم الليف العضلي) الى دون 10^{-7} مول بعد أن كان تركيزه حوالي 10^{-6} مول .



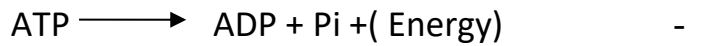
شكل (10): خطوات نظرية الانزلاق الخيطي

مصادر الطاقة للتقلص العضلي:

- ان أهم مصدر للـ ATP هو الكلايوجين Glycogen (الذي تبلغ نسبته في العضلات الهيكلية حوالي 1%) حيث يتحلل بسلسلة من الخطوات الى حامض البايروفك بعملية التحلل السكري لأنتاج جزيئات ATP الذي يعد المصدر المباشر للطاقة في عملية التقلص العضلي.

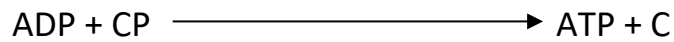
- بفعل الميرومايوسين الثقيل يتم تحليل الـ ATP الى ADP و Pi وتحرير طاقة

HMM



- ان استمرار عملية التقلص والأرتخاء يؤدي الى نفاذ الـ ATP فتصاب العضلة بحالة تدعى الصمل Rigor حيث تصبح في حالة توتر دائم وتفقد مرونتها وقدرتها على التقلص والأرتخاء بسبب ارتباط رؤوس الجسور العرضية للمايوسين بخيوط الأكتين وتوقف عملية الأنزلاق وهنا لابد من انتاجه بفسفرة الـ ADP بواسطة مركب يدعى فوسفات الكرياتين Creatin Phosphate ويرمز له CP .

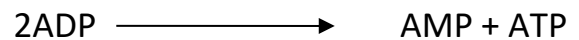
creatine phosphokinase



وبهذا تتمكن العضلات من التواصل عند القيام بمجهود كبير.

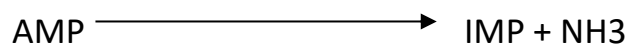
واحيانا يتم انتاج الـ ATP بأستخدام جزيئتين من ADP

myokinase



ولكن من الممكن ان يتحول الناتج مرة اخرى الى ADP وللحيلولة دون ذلك يتحول مركب الـ AMP الى مركب انوسين احادي الفوسفات IMP عن طريق ازالة مجموعة امين

AMP-Aminohydrolase



علما بأنه لايمكن تحويل الـ IMP مرة اخرى الى AMP

العجز (الدين) الأوكسجيني Oxygen Debt

عند القيام بمجهود كبير لا يمكن للدم ان يجهز العضلات بكميات كافية من الأوكسجين لغرض حرق الكلايكوجين الى CO_2 وماء فيختزل حامض البايروفك الى حامض اللبنيك Lactic Acid مما يؤدي الى تجمع كميات كبيرة من هذا الحامض في العضلات وتدعى هذه الظاهرة بالدين أو العجز الأوكسجيني حيث يحتاج حامض اللبنيك الى كميات كبيرة من الأوكسجين لأكسده الى ماء و CO_2 أو لتحويله الى كلايكوجين. ولأزالة هذا العجز تزداد فعاليات التنفس والدوران (بحركات تنفسية سريعة وعميقة مع نبض سريع) وبذلك يتوفر الأوكسجين اللازم لتمثيل قسم من حامض اللبنيك في دورة كريبس والسلسلة التنفسية الى ماء و CO_2 والطاقة المتحررة تستخدم في تحويل باقي حامض اللبنيك الى كلايكوجين.

- تحوي العضلات على بروتين المايوكلوبين Myoglobin الذي يتألف من سلسلة ببتيدية واحدة ومجموعة هيم واحدة اي يحوي ذرة حديد واحدة ووظيفته مماثلة لوظيفة الهيموغلوبين حيث يعمل كمستودع للأوكسجين فيساعد في تزويد العضلات به وخصوصا في حالة انقطاع الدوران عن العضلات كالذي يحدث في الحيتان.

أنواع التقلص العضلي

- 1- التقلص متساوي التوتر Isotonic Contraction وفي هذه الحالة عند تحفيز العضلة (بعد تثبيت احدى نهايتها وتعليق ثقل في النهاية الأخرى) يقصر طولها أي تتكمش دون ان يتغير توترها , علما بأن فعاليات المشي والجري تحدث عن طريق تقلصات متساوية التوتر.
- 2- التقلص متساوي الطول (ويدعى ايضا متساوي القياس) Isometric: وفي هذا النوع يتم تثبيت طرفا العضلة لمنع انكماشها (اي منع قصرها) وعند تحفيزها تحصل زيادة في التوتر دون ان يتغير طولها علما بأن هذا النوع من التقلصات يحافظ على انتصاب الجسم ومقاومة الجاذبية عن طريق منعكسات تدعى بالمنعكسات الوضعية تشارك فيها العضلات الخلفية للرقبة وعضلات الظهر والأطراف السفلى.

انتاج الحرارة في العضلة

تتحرر اثناء التقلص العضلي حرارة يمكن قياس كميتها باستخدام المزدوج الحراري Thermocouple , وتقسم الحرارة المنبعثة نتيجة التقلص العضلي الى:

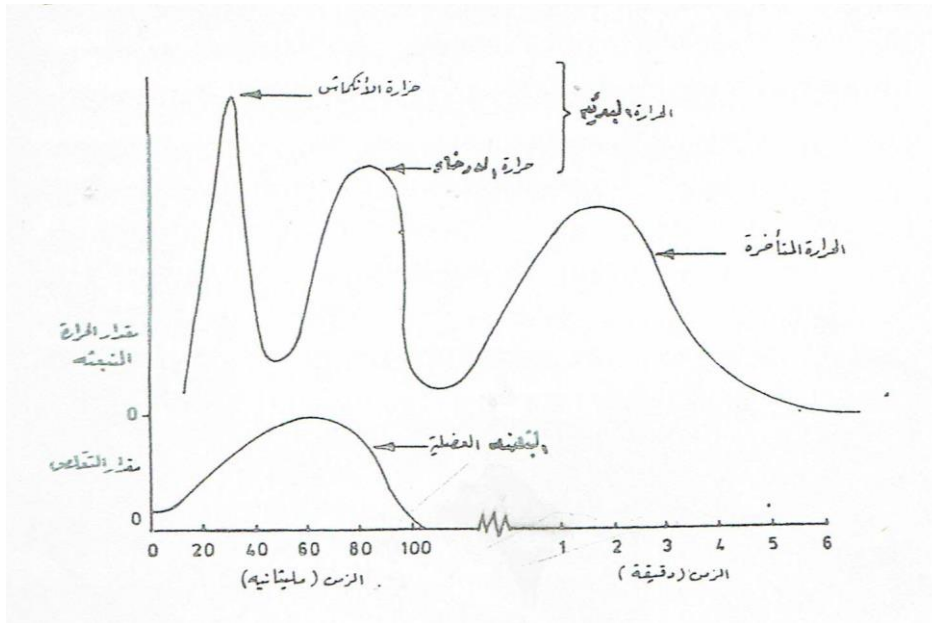
1- الحرارة البدئية Initial Heat : وهي الحرارة المنبعثة خلال تقلص وارتخاء العضلة وتشمل:

أ- حرارة الأنكماش (التقصير) Shortening Heat: وهي الحرارة التي ترافق قصر طول العضلة وتنبعث بكمية كبيرة ولفترة قصيرة ولا تتأثر من حيث مقدارها سواء كان التقلص العضلي في ظروف هوائية أو لاهوائية فهي تعزى الى تحول الـ ATP الى ADP و Pi وتعتمد على مقدار انكماش العضلة.

ب- حرارة الارتخاء Relaxation Heat: وهي اقل من حرارة الأنكماش ولكنها تبقى لفترة اطول وهي ناتجة عن تحول الطاقة الكامنة في العضلة الى طاقة حرارية عند الارتخاء اي انها ناتجة عن عوامل ميكانيكية كأحتكاك الألياف العضلية عند الارتخاء.

2- الحرارة المتأخرة (Delay Heat) :

وتدعى ايضا بحرارة الترميم Recovery Heat وهي الحرارة المنبعثة بعد انتهاء عملية الارتخاء وتستمر لدقائق وتعزى الى عملية تمثيل الكلوكوز أو الكلايوجين لإعادة انتاج الـ ATP والـ CP وبما ان معظم الطاقة تتحرر في المرحلة الهوائية من التنفس لذلك فأن مقدار هذه الحرارة يعتمد الى حد كبير على توفر الأوكسجين ولذلك تختزل في الظروف اللا هوائية.



شكل (11): انواع الحرارة المنبعثة اثناء التقلص العضلي وبعده