فسلجة العضلات Physiology of Muscles

الحركة واحدة من اهم مميزات الاحياء التي تقترن في علم الحيوان بتقلص العضلات وبخاصة التي ترتبط باللواحق وتمكن الحيوان من الانتقال في الوسط الخارجي لاغراض مختلفة منها الحصول على الغذاء او الدفاع عن النفس او الابتعاد عن الخطر او لاغراض التكاثر اضافة الى حركة جميع الانشطة والفعاليات داخل الجسم (مثل ضربات القلب وحركة الدورة الدموية ، حركة الغذاء في الجهاز الهضمي وغيرها من النشاطات التي تسهم في ديمومة الفرد وبقاء النوع).

ولا تقتصر الحركة على الاحياء المتقدمة فقابلية التقلص Contractility خاصية من خواص البروتوبلازم (تحرك غشاء الخلية الى الداخل اثناء انقسامها وحركة الكروموسومات والاهداب والاسواط والزغابات اثناء قيام الخلايا او الاعضاء بوظائفها .

ان جميع انواع الحركات تستند اساسا الى مايسمى بالبروتينات التقلصية التي تكون مسؤولة عن عملية التقلص العضلي ثم حركة الكائنات الحية مثل البروتينات الليفية الشكل الموجودة في الكائنات وحيدة الخلية وبروتينات الكتين والمايوسين الموجودة في العضلات الهيكلية في الفقريات وعليه يمكن القول بان العضلات تمثل وسائل تحويل الطاقة الكيميائية الى طاقة ميكانيكية لذلك تلعب دورا مهما في استجابة الحيوان وتلائمه مع المحيط الخارجي .

انواع العضلات :

تتالف العضلات من عدد كبير من الخلايا او الالياف العضلية وهناك ثلاث انواع رئيسية تختلف عن بعضها في التركيب نسيجيا والموقع تشريحيا والوظيفة فسلجيا ونوع الالياف العصبية المتصلة بها .

1- العضلات الهيكلية Skeletal Muscles

أ- عضلات مخططة Striated وارادية Voluntary

ب- اكثر انواع العضلات تمايزا

ت- اليافها اسطوانية ذات نوى عديدة انبوبية او مسطحة طرفية الموقع .

ث- لها القدرة على التقلص القوي والسريع لكنها مقابل ذلك تتعب بسرعة

ج- تصاب بالشلل والضمور عند قطع الاعصاب عنها او تلفها بسبب المرض ويرجع ذلك لعدم تمتعها بخاصية التقلص الذاتي لكون تقلصها عصبي المنشا Neurogenic

ح- تتصل بالعظام وتقع سيطرة المراكز القشرية الدماغية لذلك يطلق عليها بالعضلات الارادية ، كما يمكنها التقلص لاراديا كما في المنعكسات الشوكية او تقلص العضلات التنفسية اثناء النوم .

2- العضلات القلبية Cardiac Muscles

تشابه العضلات الهيكلية من ناحية التركيب لكن تختلف عنها في الوظيفة :

أ- عضلاتها مخططة ، اليافها اسطوانية تمتاز بتفرعها وتشابكها ، مندمجة مع بعضها مكونة المدمج Syncytium لها نواة او نواتين مركزية الموقع .

ب- توجد في القلب عضلاتها لا ارادية وتقلصها عضلي المنشا Myogenic

خ- تتصف بخاصية النسقية Rhythmicity اي انها تتقلص وتنبسط بالتعاقب والتوصيل Conductivity (اي ان جهود الفعل تنتقل عبر اليافها انتقالا كهربائيا ليعم النشاط الكهربائي العضلة باكملها .

د- يستغرق تقلص العضلات القلبية وقتا اطول من تقلص العضلات الهيكلية حيث يستغرق في القلبية ثانية وفي الهيكلية عشر الثانية .

ذ- جهد الفعل الذي يسبق تقلص العضلة القلبية (يختلف عن جهد الفـعل في الليف العصبي او الليف العضلي الهيكلي) يستمر لفترة طويلة عند نزوله من الذروة الى نشوء جهد الراحــة (وتمكن هذه الفترة الطويلة العضلة من التقلص بكامل اليافها ليتقلص البطين قطعة واحدة) .

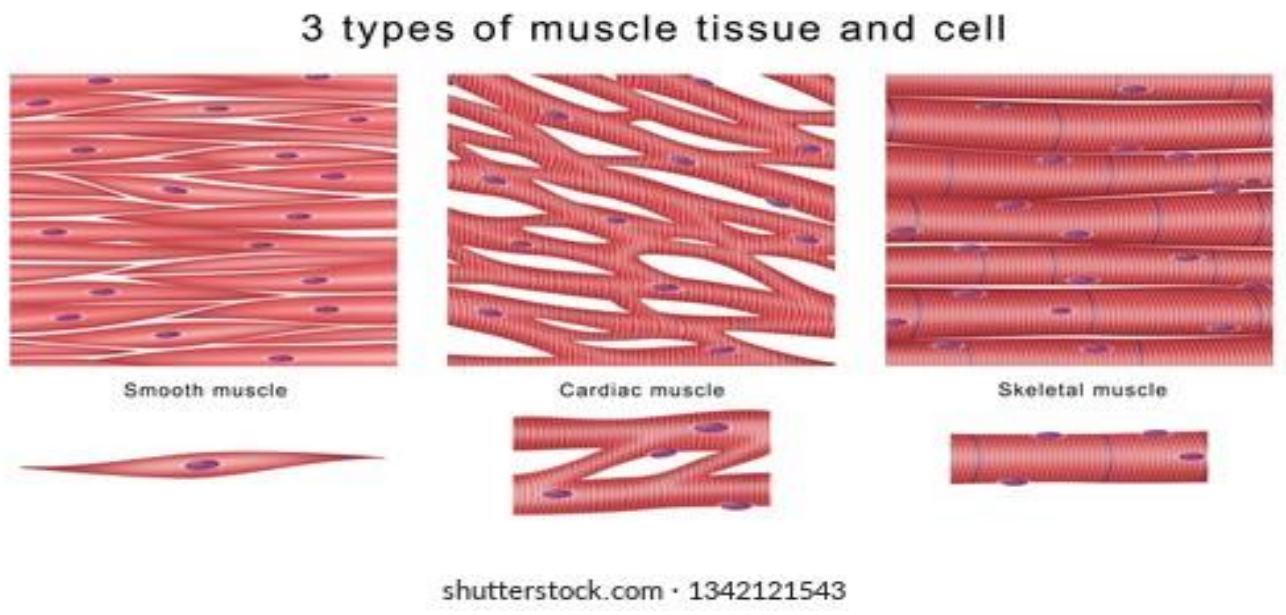
ر- يتبع كل جهد فعل للعضلة القلبية في البطين فترة عصيان Refractory Period طويلة نسبيا (عدة مئات من المــلي ثانية) تجعل البطين بعيدا عن الوقوع في حالة التقلص المستمر الذي يسمى التـــكزز Tetanus (تتيح له في هذه الفترة الفرصة ليمتلئ بالدم من جديد وتستريح عضلة جدرانه نتيجة هذا الارتخاء بينما تكون فترة العصيان في العضلات الهيكلية قصيرة نسبيا لاتتجاوز بضع ملي ثانية).

هناك مصطلحين لابد التمييز بينهما وهما :

- فترة العصيان المطلقة Absolute Refractory Period وهي الفترة التي تمتنع العضلة خلالها من الاستجابة مهما كانت شدة المنبه .
- فترة العصيان النسبي Relative Refractory Period وهي الفترة التي يمكن ان تستجيب العضلة خلالها عندما يكون المنبه الثاني اقوى بكثير من الاول

ز- وجود خطوط عرضية غامقة تدعى الاقراص البينية Intercalated disc .

س- تتزود العضلات القلبية باعصاب ذاتية ودية ونظير ودية وهي للسيطرة على سرعة وقوة التقلص وليس لاحداث التقلص او النبض



3- العضلات الملساء Smooth Muscles

أ- يتواجد هذا النوع من العضلات في الاحشاء الداخلية مثل الاوعية الدموية و القناة الهضمية والحالبين والجهاز البولي والجهاز التناسلي .

ب- عضلات مغزلية الشكل تحتوي على نواة واحدة في الوسط ،غير مخططة

ت- لا ارادية تجهز بالاعصاب الذاتية (ودية ونظير ودية) والتي تعمل على تحوير نشاطها زيادة او نقصان النشاط العضلي

ث- لا يؤثر قطع الاعصاب على تركيب العضلات او قابليتها على التقلص خلافا لما يحدث في العضلات الهيكلية . (هذه الخاصية مشتركة بين العضلات الملساء والعضلات القلبية الامر الذي جعل استئصال القلوب وزرعها ممكناً)

ج- يعزى النشاط الذاتي لهذه العضلات الى وجود بعض الالياف ذات اغشية نفوذة للصوديوم Na^+ تعمل بمثابة منظم Pacemaker للعضلة .

ح- تمتاز بخاصية النسقية والتوصيل كما هو الحال في العضلات القلبية .

خ- تقلصها يستغرق وقت طويل نسبياً .

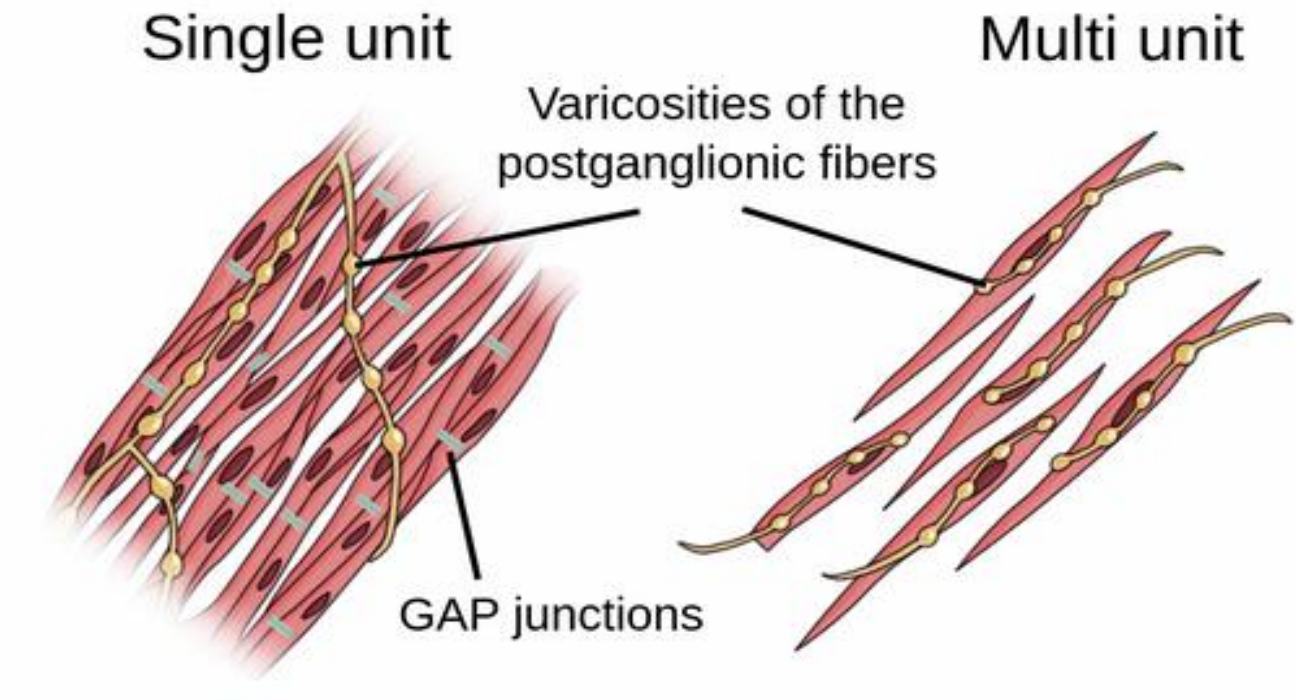
وتقسم العضلات الملساء الى نوعين :

1- العضلات الملساء الوحدوية او المفردة او الحشوية Unitary Smooth Muscles

- يتواجد هذا النوع من العضلات في جميع جدران الاعضاء الحشوية باستثناء القلب خصوصا الاعضاء المجوفة في الجسم مثل القناة الهضمية والحالبين والمثانة البولية والرحم
- تتكون من الياف عضلية متعددة على شكل صفائح sheets ترتبط فيما بينها بروابط ممرية Gap junction التي تسمح بانتقال التحفيز بين الخلايا العضلية ، مكونه مدمج Syncytium
- تنقبض هذه الالياف كوحدة واحدة single unit لذلك سميت بالعضلات الملساء المفردة
- عضلات لا ارادية تجهز بالاعصاب الذاتية (ودية ونظير ودية)
- تمتاز بالفعالية التلقائية Spontaneous activity وهذه الفعالية تنشا من احدى الخلايا وتنتشر الى الخلايا المجاورة وتسمى الخلية الاولى بمنظم الخطى Pacemaker

2- العضلات الملساء متعددة الوحدات Multiunit smooth muscles

- تتواجد في الانسجة حول الاوعية الدموية الكبيرة وقزحية العين والمجاري التنفسية .
- تتكون من الياف عضلية مستقلة عن بعضها البعض ولا يوجد بين اليافها العضلية روابط اتصال gap junction لذا فان النشاط الكهربائي لاينتقل من خلية الى اخرى بل يقتصر على الخلية التي تم تحفيزها
- تتقلص هذه العضلات نتيجة للتحفيز العصبي Neurogenic اي تقلصها عصبي المنشا

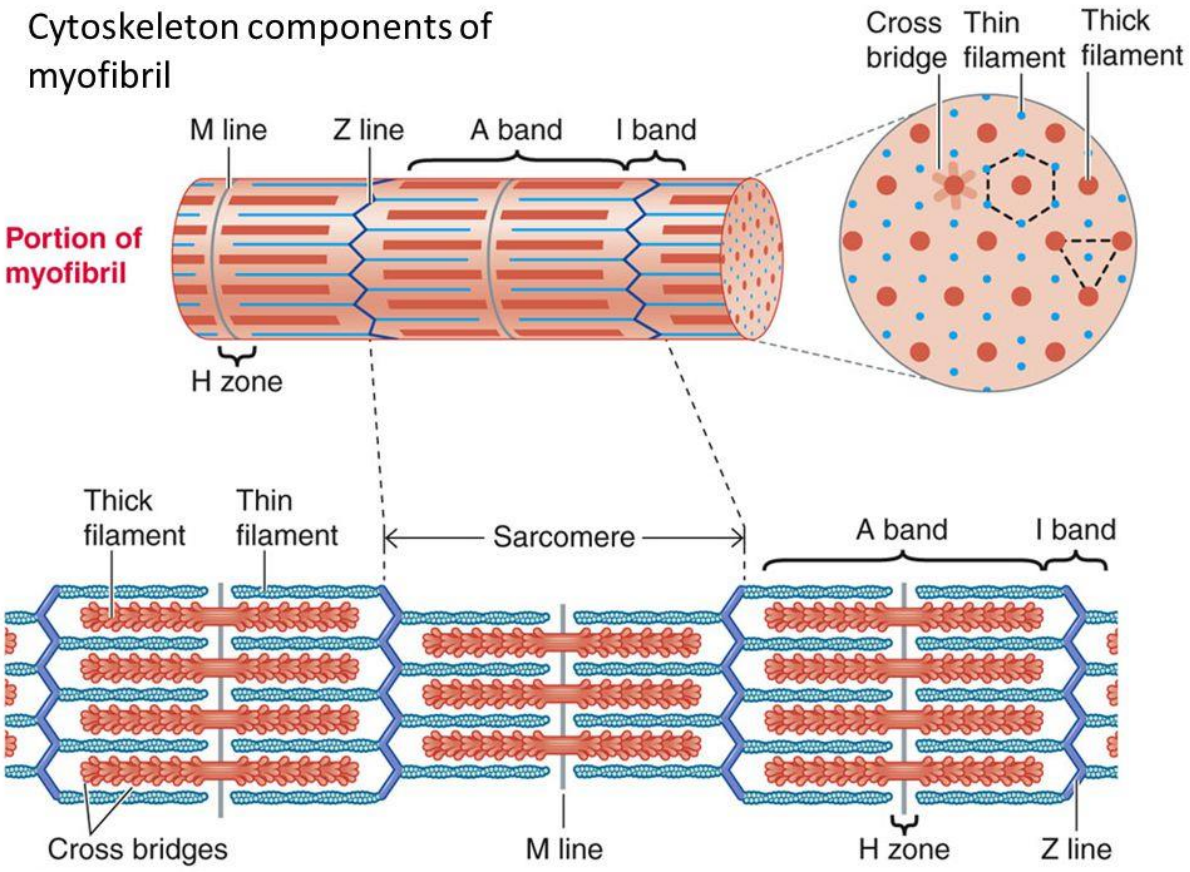


التركيب الدقيق للخلايا العضلية :

تتشابه الخلايا (الالياف) العضلية الهيكلية والقلبية من حيث التركيب الاساسي الى حد كبير وتنحصر اوجه الاختلاف بينها في النواحي الفسيولوجية .

تتالف العضلة الهيكلية من حزم وتضم كل حزمة كتلا خلوية متعددة الانوية تدعى الالياف العضلية Muscle fibers يحتوي سايتوبلازم الليف العضلي او الساركوبلازم Sarcoplasm على خيوط بروتينية تتوضع طوليا بموازاة محور الليف وتتجمع في حزم قطر الحزمة الواحدة يتراوح بين 1- 2 مايكرومتر تدعى الليفات العضلية Myofibrils .

عند فحص الالياف الهيكلية تحت المجهر الضوئي نجد ان كل لييف مكون من مناطق نيرة او فاتحة متبادلة مع مناطق معتمة و تبدو المناطق الفاتحة متجانسة ضوئيا Isotropic bands (I-band) في حين تبدو المناطق المعتمة غير متجانسة ضوئيا Anisotropic band (A-band) . ويقطع خط معتم وسط كل شريط فاتح ويدعى Z- line كما يلاحظ عندما تكو ن العضلة في حالة ارخاء وجود منطقة فاتحة نسبيا في منتصف الشريط المعتم ويطلق عليها منطقة H-Zone . وتمثل المنطقة المحصورة بين خطي Z متجاورين وحدة التركيب لليف العضلي ويطلق عليها بالقطعة العضلية Sarcomere هذا ويظهر الليف العضلي عند فحصه تحت المجهر الضوئي تخطيطا عرضيا Cross Striation يعزى الى تراصف الليفات داخله وتوضع الاشرطة المتناظرة فيها جنبا الى جنب فتشكل خطوطا عرضية معتمة متبادلة مع خطوط عرضية فاتحة .



تركيب الليف العضلي

لقد بينت الدراسات التي قام بها كل من هكسلي وهانسن Huxley & Hanson في الخمسينات باستخدام المجهر الالكتروني بان الليف العضلي مكون من خيوط عضلية تمتد بصورة مستقيمة ومتوازية وتبقى كذلك عند تقلص الليف العضلي غير ان هذه الخيوط تتداخل ويرافق تداخلها تغير نسبي في سعة الاشرطة يعتمد على درجة التقلص .

عند دراسة القطعة العضلية لوحظ وجود نوعين من الخيوط البروتينية هي :

1- الخيوط الغليضة Thick Filament : ويبلغ قطر الواحد منها 100 انكستروم وتمثل اركان مضلعات سداسية تفصل بين كل خيطين متجاورين مسافة 200 – 300 انكستروم .

2- الخيوط الدقيقة Thin Filament : يبلغ قطر الخيط الواحد منها 40 – 50 انكستروم وكل خيط دقيق محاط ب 3 خيوط غليظة بينما يحاط الخيط الغليظ بـ 6 خيوط دقيقة وعند دراسة مقاطع عرضية للقطعة العضلية نجد ان منطقة الشريط الفاتح I- band مؤلفة كليا من الخيوط الدقيقة بينما المنطقة الغامقة A-band فانها مكونه من النوعين من الخيوط (الدقيقة والغليظة) ، اما منطقة H- zone فتتالف من خيوط غليظة فقط

وفي دراسات اخرى استخدم فيها المجهر الالكتروني ومجهر حيود الاشعة السينية X-Ray Diffraction اثبت وجود نوع ثالث من الخيوط العضلية يمتد من الخيوط الغليضة باتجاه الخيوط النحيفة وبمسافات منتظمة سمي بالجسور العرضية Cross- bridge كما بينت الدراسات ان الساركوبلازم يحتوي على منظومة من النبيبات تمثل الشبكة البلازمية الداخلية العضلية Endoplasmic Reticulum وقد تحورت في الليف العضلي لتكون ما يسمى بالجهاز النبيبي العضلي Sarco – tubular system وهو عبارة عن نبيبات غشائية تقطع الخلية طولا وعرضا سمي الجهاز النبيبي العضلي الطولي بالشبكة الساركوبلازمية Sarcoplasmic reticulum وتشمل مجموعة من النبيبات تمتد بموازاة الليفات العضلية اما العنصر العرضي فيدعى T-System (Tubular – System) الذي ينشا من غشاء الليف العضلي وينتج منه ويبلغ قطر نبيباته 400 انكستروم ، وهناك اتصال قوي بين الجهازين الطولي والعرضي ولهذا الاتصال اهمية كبيرة في عملية التقلص العضلي والارتخاء اضافة الى نقل المواد داخل الخلية .

الخصائص الكيمياوية للعضلة

يظهر التحليل الكيمياوي للعضلة المستريحة في الفقريات انها تحتوي على نسبة عالية من البروتينات بنسبة 15 - 20 % تقريبا من الوزن الطازج كما يشكل الماء ما يقارب 72-80 % من وزنها وما تبقى يشمل مواد صلبة كثيرة اهمها الاملاح اللاعضوية والاحماض الامينية والكرياتين والكلايكوجين ، ومن بين البروتينات تعد الليفية الاكثر اهمية في الية التقلص العضلي .

بروتينات الليفات العضلية :

لقد تم تشخيص اربعة انواع من البروتينات تسهم في عملية التقلص العضلي في القطعة العضلية وهي المايوسين Myosin والاكتين Actin والتربومايوسين Tropomyosin والتروبونين Troponin :

1- المايوسين Myosin

يؤلف بروتين المايوسين نصف مجموع البروتين الليفي وله وزن جزيئي يقارب 450 الف ويمكن استخلاصه بمحلول كلوريد البوتاسيوم بتركيز 0.3 مول سوف ينحل المايوسين اولا ويمكن فصله وتنقيته بالترسيب باستخدام كلوريد الامونيا NH4Cl ، واذا فحصت الليفات بعد عملية الاستخلاص تحت المجهر لوحظ اختفاء الخيوط الغليظة والجسور العرضية ويعد هذا دليلا قاطعا على انها مكونة من بروتين المايوسين .

تتالف جزيئة المايوسين من نهاية راسية مزدوجة وذيلا حلزوني وعند معاملة جزيئة المايوسين بانزيم هاضم للبروتينات مثل التربسين Trypsin سوف تنفصل الى جزئين جزء امامي يضم الراس وقليل من الذيل يسمى الميرومايوسين الثقيل Heavy meromyosin (HMM) وجزء يشمل باقي الجزيئة ويسمى الميرومايوسين الخفيف Light Meromyosin (LMM) . وقد وجـــد بان جميع ATP يرتبط في الليف العضلي

بالمايوسين الذي له القابلية على تحويل ATP الى ADP وهذا يعود الى جزء الميرومايوسين الثقيل حيث يعمل بمثابة انزيم ATP-ase كما في التفاعل الاتي :

$$\mathbf{ATP \xrightarrow[ATP-ase]{HMM} ADP + Pi + Energy}$$

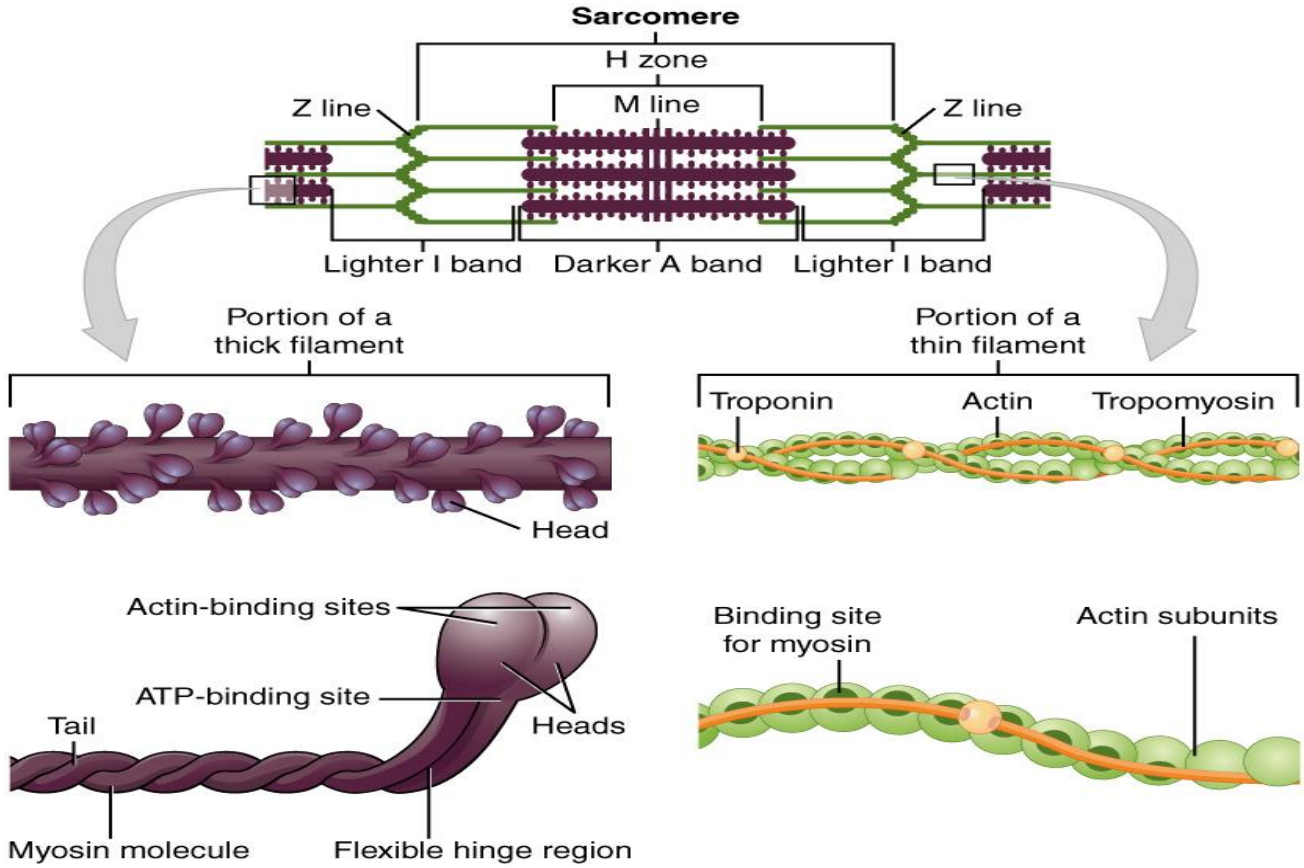
2- الاكتين Actin

وهو بروتين خيطي ياخذ شكل حلزون مزدوج Double Helix وينشأ من بلمرة الاكتين الكرويG- Actin والذي يصبح على شكل حبات على طول خيط الاكتين المزدوج. ويمكن استخلاص الاكتين الليفي F –Actin من الالياف العضلية عند معاملتها بمحلول كلوريد البوتاسيوم بتركيز 0.6 مول ويفصل بالترسيب. وعند فحص الخلية العضلية بعد هذه المعاملة سوف نلاحظ اختفاء الخيوط النحيفة من الليف العضلي وهذا يدل على انها مكونة من خيوط الاكتين . يتحول الاكتين بغياب الاملاح او نقصها الى الاكتين الكروي G- Actin ذي الوزن الجزيئي 42 الف ، اما عملية البلمرة او تحول الاكتين الكروي الى الاكتين الليفي فتتم بوجود Mg^{+2} و ATP

$$\mathbf{G-ATP-Actin \xrightarrow{Mg^{+2}} F-ADP-Actin + HPO_4^{-2}}$$

3- التروبومايوسين Tropomyosin

هو بروتين ليفي يبلغ وزنه الجزيئي 60 الف ويتمركز في ثنايا حلزون الاكتين ، اذ يعمل على حجب او تغطية المواقع الفعالة في خيط الاكتين لمنع ارتباط رؤس الميوسين بها اثناء عملية الارتخاء العضلي . ويمكن استخلاصه بالطرق المشابهة لاستخلاص الاكتين والمايوسين بوساطة محلول كلوريد البوتاسيوم بتركيز عال 1 مول ويؤلف التروبومايوسين 2.5 % تقريبا من البروتين الليفي للعضلة .



4- التروبونين Troponin (TN)

التروبونين عبارة عن معقد من 3 جزيئات بروتينية كروية هي TNI و TNT و TNC تقع في اخاديد حلزون الاكتين وتوجد جزيئات TNI في وضع يمنع الجسور العرضية للمايوسين من الاتصال من الاتصال بخيط الاكتين في الالياف المستريحة ، فهب تثبط فعل الميرومايوسين الثقيل . اما TNC فيختص بالاتحاد مع Ca^{+2} الذي يشارك في عملية التقلص العضلي وتقوم جزيئة TNT بربط التروبومايوسين والتروبونين على خيط الاكتين .

هذا وتوجد في الساركوبلازم بروتينات اخرى غير متقلصة تصم انزيمات مختلفة تدخل تفاعلات ايض الخلية لتوليد الطاقة منالكلايكوجين .

نظرية الانزلاق الخيطي Sliding – Filament Theory

تعتبر هذه النظرية الاكثر قبولا في الوقت الحاضر لتفسير الية التقلص العضلي . ويعزى التقلص فيها الى انزلاق الخيوط الغليظة فوق الخيوط الدقيقة . وينتج عن تداخل الخيوط قصر طول القطعة العضلة فالليف العضلي ثم قصر طول العضلة اما عملية الارتخاء العضلي Relaxation فتقضي النظرية بعودة العضلة الى طولها قبل التقلص وتعزى حركة الخيوط وفق هذه النظرية الى اتصال الجسور العرضية للمايوسين بخيط الاكتين وقد اضيفت بعض التعديلات حديثا على هذا التفسير توجز بما ياتي :

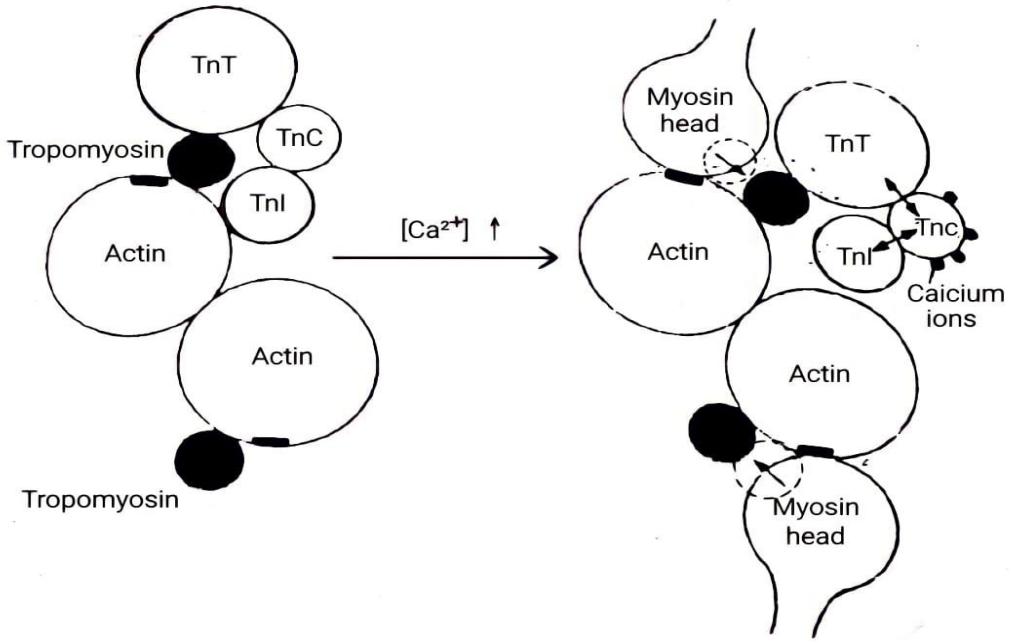
1- تكون خيوط الاكتين والمايوسين متوازية وتمتد الجسور العرضية للمايوسين باتجاه خيوط الاكتين ولكنها تمنع من الاتصال بالمواقع الفعالة من خيوط الاكتين لكونها مغطاة بخيط التروبومايوسين .
2- عند تنبيه العضلة الهيكلية يسري جهد الفعل في غشاء الليف العضلي الى الداخل عبر طريق جهاز T وعند وصوله الى نبيبات الشبكة الساركوبلازمية يتحرر Ca^{+2} من داخلها ويتحد بتروبونين C الذي يعاني من تغير في شكله يجعله يقوم بازاحة تروبونين I من موقعه وسحب خيط التروبومايوسين فتنكشف المواقع النشطة على الاكتين ويحدث ارتباط رؤوس الجسور العرضية بخيط الاكتين
3- يتمتع راس الجسر العرضي بمواقع عديدة قادرة على الاتحاد بالاكتين اضافة الى مواقع اخرى تمتلك النشاط الانزيمي لتحرير الطاقة من ATP .

بعد الاتصال بخيط الاكتين يقوم راس الجسر العرضي بالانتقال من موقع الى اخر متقدم على طول خيط الاكتين وفي الوقت نفسه يدور حول نفسه فيولد شدا في الجسر ، ينتقل الشد المتولد الى الخيط الغليظ فينسحب خيط الاكتين لينزلق فوق الخيط الغليظ او المايوسين

4- يتحلل ATP ليوفر طاقة لفك ارتباط راس الجسر العرضي مع خيط الاكتين في كل مرة يتم الاتصال بينهما ليصبح الراس حرا من جديد
5- ولحين ورود جهد فعل اخر ، تعود ايونات الكالسيوم Ca^{+2} الى داخل نبيبات الشبكة الساركوبلازمية تاركة تروبونين C لياخذ شكله الطبيعي فيرجع كل من تروبونين I والتروبومايوسين الى موقعهما قبل التقلص ويمنعا اتصال راس الجسر العرضي بخيط الاكتين .
6- يحدث الارخاء بعودة الخيوط الدقيقة والخيوط الغليضة الى موقعهما في حالة الراحة ، غير ان هذه العملية تتطلب توفر الشرطين الاتيين :

أ- تحرير الطاقة من ATP لفك الارتباط بين الجسور العرضية وخيط الاكتين

ب- انخفاض تركيز ايونات الكالسيوم Ca^{+2} الى مستوى واطئ يكفي لمنع عودة الاتصال بين راس الجسر العرضي وخيط الاكتين .



دور التروبونين وايونات الكالسيوم في عملية التقلص

***السيطرة على التقلص (الازدواج التهيجي – التقلصي) :**

يتم تقلص العضلات الهيكلية بعد تنبيهها عن طريق الاعصاب المتصلة بها وتستجيب العضلة بزوال الاستقطاب وتوليد جهد فعل والذي ينقل من سطح الليف العضلي الى داخله عن طريق جهاز T (T – System) ومن ثم الى نبيبات الشبكة الساركوبلازمية ، وعند تلاشي النشاط الكهربائي يعاد الكالسيوم الى الشبكة الساركوبلازمية بعملية النقل الفعال فينخفض تركيزه في السايتوبلازم (الساركوبلازم) بشكل واطئ جدا وهذا كافي لازالة الكالسيوم المرتبط بتروبونين C (TNC) ومنع التقلص .

وقد وجد من الملاحظات بانه عند قطع اجهزة T من العضلة فأن التقلص يتوقف في القطعة العضلية . كما وجد ان هناك علاقة وثيقة بين سرعة التقلص والارتخاء ومدى تطور الشبكة الساركوبلازمية .

***مصادر الطاقة للتقلص العضلي**

1- **المصدر المباشر للطاقة في عملية التقلص هو ATP ويتحلل هذا المركب الغني بالطاقة انزيميا بفعل الميروميوسين الثقيل HMM والذي يعمل على شكل انزيم ATPase كما ياتي :**

$$\mathbf{ATP} \xrightarrow[\mathbf{ATP-ase}]{\mathbf{HMM}} \mathbf{ADP + Pi + Energy}$$

ونظرا لقلة تركيز ATP في العضلة الهيكلية والذي لايتجاوز 2-4 ملي مول فانه سوف ينفذ نتيجة التقلص المستمر وعليه فان هناك مصدر ثاني

2- **المصدر الثاني الغني بالطاقة هو فوسفات الكرياتين الذي يوجد في عضلات الفقريات واللافقريات بنسبة 0.5 % والذي لايمنح طاقته مباشرة في عملية التقلص وانما يمنحها الى جزيئات ADP محولا اياها الى جزيئات ATP اما الانزيم المعجل لهذا التفاعل فهو Creatine phosphokinase وفق التفاعل الاتي**

$$ADP + CP(\text{ Creatin phosphate }) \xrightarrow{\text{Creatine phosphokinase}} ATP + \text{كرياتين}$$

وبهذا تتمكن العضلات من مواصلة التقلص عند القيام بتمارين رياضية او عمل مجهد .

3- هناك اليات اخرى لتوليد ATP من جزيئتين من ADP بتدخل انزيم Myokinase كما في التفاعل ادناه

$$2ADP \xrightarrow{\text{Myokinase}} AMP + ATP$$

ونظرا لكون التفاعل رجعي فلا يمكن الاستفادة من ATP المنتج لانه سرعان ما يتحول الى ADP ، لكن بتدخل انزيم اخر هو Amp- Aminohydrolase يتم تحويل AMP بازالة الامين الى IMP ، كما في التفاعل الاتي :

$$AMP \xrightarrow{\text{AMP Aminohydrase}} IMP + NH3$$

وعندئذ يمكن اعادة نصف كمية ATP التي استهلكت في نشاط العضلة ثانية .ان هذه العملية مكلفة بالنسبة للعضلة لا تستخدم الا في الحالات الطارئة وتستخدمها العضلات المجهدة .

4- يعد الكلايكوجين الذي تبلغ نسبته في العضلات الهيكلية 1 % من اهم مصادر الطاقة للتقلص العضلي والكلايكوجين لا يستخدم مباشرة انما يحول الى كلوكوز تدخل جزيئة الكلوكوز سلسلة تفاعلات لتعطي في النهاية 38 جزيئة ATP مجهزا بذلك العضلة بالطاقة اللازمة

5- تلجأ العضلة الى الطاقة المخزونة في البروتينات والدهون لغرض استمرار عملية التقلص ففي حالة العمل الشاق المرهق للانسان لوحظ زيادة ملموسة في المواد النتروجينية المطروحة مما يدل على ان جزء من الوقود المستهلك كان من البروتينات (20%) كذلك لوحظ نقصان الدهون من العضلة من 12 – 31%.

العلاقة بين المنبه والاستجابة

1- النفضة العضلية البسيطة Simple Muscle twitch

تستجيب العضلة بتقلصها وارتخاءها عند تحفيزها بحافز منفرد و ملائم (بحدود العتبة او اكثر) وتدعى هذه الاستجابة بالنفضة العضلية البسيطة وتستغرق ما يقارب 0.1 ثانية في عضلات الضفدع ، تمر هذه الاستجابة بثلاث مراحل رئيسية:

أ- فترة الكمون Latent period

وهي الفترة الواقعة بين اعطاء المنبه وحدوث التقلص وتستغرق 0.01 ثانية ، وتعزى فترة الكمون للاسباب الاتية

* تمثل الزمن المستغرق لانتقال التنبيه عبر الملتقى العصبي – العضلي (او الوقت اللازم لانتقال النبضة العصبية على طول العصب من منطقة التحفيز الى العضلة)

*الوقت اللازم لحدوث التغيرات الكيمياوية في العضلة وانتشار جهد الفعل وتحرير ايونات الكالسيوم وفق الية الازدواج التهيجي التقلصي .

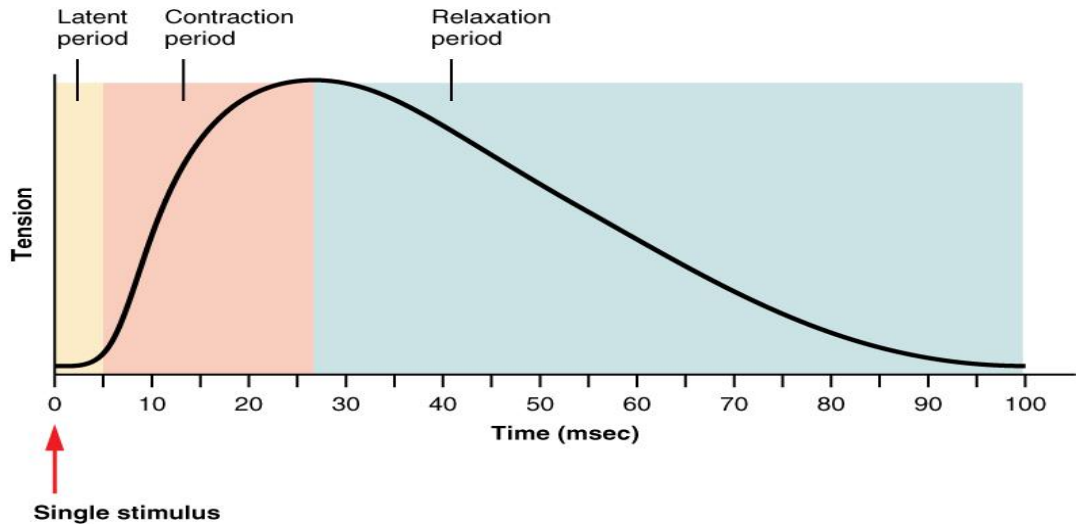
ب- طور التقلص Contraction phase

ويحدث في هذه المرحلة انكماش او زيادة توتر العضلة وفق الاليات التي تم شرحها في نظرية الانزلاق الخيطي ، يستغرق هذا الطور 0.04 ثانية .

ج- طور الارخاء Relaxation phase

يدوم هذا الطور حوالي 0.05 ثانية تعود خلالها العضلة الى طولها او توترها الطبيعي وهي مستريحة . ويرجع سبب الارخاء الى عاملين اساسين هما وجود ATP و Mg^{+2} الذي يفك ارتباط الجسور العرضية بخيط الاكتين وانخفاض تركيزايونات الكالسيوم Ca^{+2} الى مستو يمنع عودة الجسور العرضية للارتباط بخيط الاكتين . ويعتمد الوقت المستغرق في النفضة العضلية على نوع العضلة ودرجة الحرارة .

ملاحظة / يخضع الليف العضلي والعصبي لقانون الكل او اللاشئ Non or all law (ادنى حد من قوة الحافز تؤدي الى حدوث جهد فعل واستجابة وان توليد جهد الفعل لايعتمد على قوة الحافز .



(شكل يوضح النفضة العضلية البسيطة)

2- التقلص متساوي التوتر Isotonic contraction والتقلص متساوي الطول Isometric contraction

في التقلص متساوي التوتر يحدث انكماش للعضلة دون ان يطرأ اي تغير على توترها وهذا النوع من التقلص يكون مصحوبا بانجاز شغل كما في عضلة الساق (في حالة المشي والجري)

اما في التقلص متساوي الطول حيث يحصل زيادة في توتر العضلة مع بقاء الطول ثابت نتيجة لثبوت طرفي العضلة لمنعها من الانكماش او التقلص ، وهذا النوع من العضلات وظيفتها المحافظة على انتصاب الجسم كما في عضلات الرقبة والظهر وعضلات الاطراف السفلى .

3- تدرج التقلص العضلي

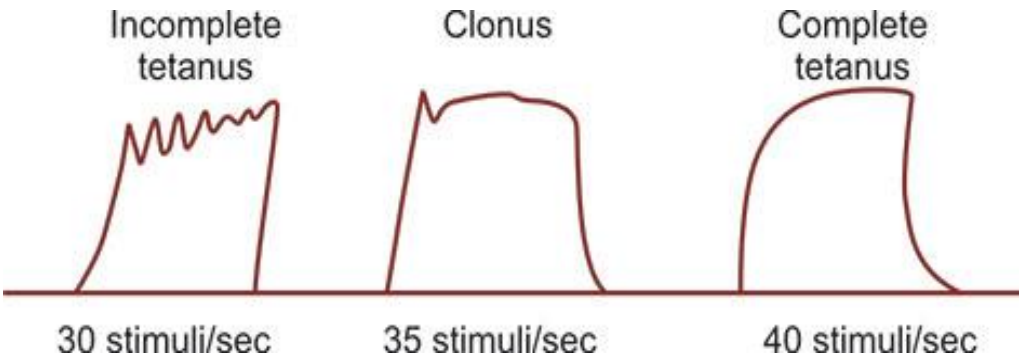
تجهز العضلة الهيكلية بالاعصاب ويتالف العصب الذي يجهز العضلة من الياف عصبية محركة والياف حسية باعداد متساوية تقريباً ، وتقع اجسام الخلايا العصبية المحركة في القرن الامامي من المادة السنجابية في الحبل الشوكي . وبما ان العضلة تتكون من عدد كبير جدا من الالياف العضلية تفوق عدد الالياف العصبية المحركة المزودة لها لذلك فان العصبة المحركة الواحدة تتصل عن طريق تفرعاتها بعدد من الالياف العضلية تقدر بـ 200 ليف عضلي لكل ليف عصبي في حالة كون العضلة كبيرة ، اما في العضلة الصغيرة فان كل ليف عصبي يتصل بـ 5 ليف عضلي وتدعى مجموعة الالياف العضلية المتصلة المجهزة بليف عصبي حركي واحد بالوحدة الحركية Motor unit وهي الوحدة الوظيفية للعضلة وفي النشاطات الاعتيادية تتناوب الوحدات الحركية في عملها وبذلك تؤدي عملا دون اعياء وكلما كان العمل اكثر اجهادا زيد عدد الوحدات العاملة .

يحدد الطرح العصبي (عدد مرات التنبيه العصبي او الحوافز المتكررة) للعصبات المحركة قوة تقلص العضلة وقوة الحركة الارادية ، فعندما يكون الطرح العصبي او عدد الحوافز للعصبات المحركة بطيئا بحدود 1-5 نبضة في الثانية نحصل على نفضات بسيطة مفردة وبنفس التردد وعند تحفيز العضلة بسلسلة من الحوافز (10 -30) نبضة فان ذلك سوف يؤدي الى حالة التكزز الناقص Incomplete tetanus عندها تكون هناك فترات زمنية معينة بين هذه الحوافز بحيث تؤدي الى ارتخاء غير تام في العضلة بين حافز واخر. وباستمرار التحفيز الى 35 نبضة في الثانية نحصل على التحام غير كامل بين النفضات نتيجة للجمع العضلي يرافقه ارتفاع في التوتر ويظهر التقلص على هيئة رعشة مركبة تدعى الرمع Clonus . وعند زيادة عدد الحوافز (40 فاكثر) نبضة في الثانية تستجيب العضلة بتقلص مستمر اقوى من الرمع العضلي يعرف بالتكزز الكامل complete tetanus وهي عبارة عن تقلصات مستمرة ناتجة عن اتحاد نفضات عضلية متتالية لا توجد بينها فترات ارتخاء .

يؤدي استمرار التحفيز الى اصابة العضلة بالاعياء Fatigue وهو عدم القدرة على ابقاء حالة التقلص وتحدث في التجارب العملية في العضلات المقطوعة عن الجسم نتيجة التحفيز المستمر ويعتقد ان سبب الاعياء العضلي هو نتيجة لتغيرات عديدة :

1- استنزاف او فقدان الاوكسجين
2- استنزاف المركبات الفوسفاتية ذات الطاقة العالية (ATP و CP)
3- تراكم بعض الفضلات مثل حامض اللبنيك و CO_2
4- تغيرات في الحالة الكيمياوية للعضلة كنقصان ايونات الكالسيوم .

لا تصل العضلات داخل جسم الحيوان الى مرحلة الاعياء وذلك لان الاتصال العضلي – العصبي اكثر حساسية للاعياء في العضلة ، وبالتالي فانه اول من يعمل على ايقاف انتقال النبضات العصبية كما ان جهاز الدوران يعمل على ازالة المواد السامة وتزويد العضلة بما تحتاجه من مواد غذائية .



تاثير الحوافز المتكررة على تقلص العضلة الهيكلية

العجز الاوكسجيني Oxygen Debt

تحدث هذه الحالة عند قيام العضلة بجهد كبير، فعندما لاتحصل العضلات النشطة على كمية كافية من الاوكسجين الضروري لصنع ATP في دورة كربس والسلسلة التنفسية فان حامض البايروفيك يختزل الى الحامض اللبني Lactic acid وفي حالة الاستمرار على هذه الصورة من نقص الاوكسجين يتراكم الحامض اللبني ويزداد تركيزه في العضلات وتدعى ظاهرة اللجوء الى الايض اللاهوائي وتراكم الحامض اللبني بالعجز الاوكسجيني لان هذا الحامض يحتاج الى كميات وفيرة من الاوكسجين لاكمال اكسدته الى ماء و CO_2 او لتحويله الى كلايكوجين فعند توقف العضلات عن نشاطها العنيف يستمر

التنفس العميق والدوران السريع لبعض الوقت لتوفير الكميات المطلوبة من الاوكسجين وتغطية العجز ، وتحول الطاقة المخزونة في الحامض اللبني الى الحامض البايروفي عند توفر الاوكسجين كخطوة اولى لتحويلها من خلال عمليات الايض الهوائية الى ATP كما في التفاعل الاتي :

$$\text{Lactic acid} \xrightarrow[\text{NAD}\sim\text{NADH2}]{\text{Lactic dehydrogenase}} \text{Pyruvic acid}$$

ومن الوسائل المساعدة في تزويد العضلات بالاوكسجين احتوائها على المايوكلوبين Myoglobin وهو بروتين يحتوي على الحديد ويشبه الهيموكلوبين ويكسبها لونها الوردي ، للمايوكلوبين القابلية على توفير احتياطي من الاوكسجين في الحيوانات البرية والمائية مثل الحيتان خاصة عند انقطاع الدوران عن العضلات لفترة من الوقت عندها يقوم المايوكلوبين الموجود بغزارة في عضلاتها بمد ما تحتاجه تلك العضلات من الاوكسجين .

انتاج الحرارة في العضلة : Heat production of Muscles

يصاحب عملية التقلص العضلي انبعاث حرارة وقد تم قياس الحرارة المنبعثة من قبل العالم Hill عام 1930 باستخدام مزدوجات حرارية مركبة Compound Thermal Couples ، حيث تمكن من الحصول على مخططات بيانية عن كمية الحرارة المنبعثة وسرعة انبعاثها في مختلف اطوار تقلص العضلة الهيكلية . وتقسم الحرارة المنبعثة من العضلة الى الانواع الاتية :

1- الحرارة البدائية Initial heat

وهي الحرارة المنبعثة خلال فترة تقلص وارخاء العضلة ولا تتاثر اطلاقا عند وضع العضلة المتقلصة في ظروف لاهوائية وتشمل الحرارة البدائية ايضا حرارة التنشيط Activation heat التي تسبق عملية التقلص وتنبعث نتيجة التغيرات التي تصاحب الشروع بالاستجابة .

وتقسم الحرارة البدائية الى نوعين :

أ- حرارة الانكماش shortening heat

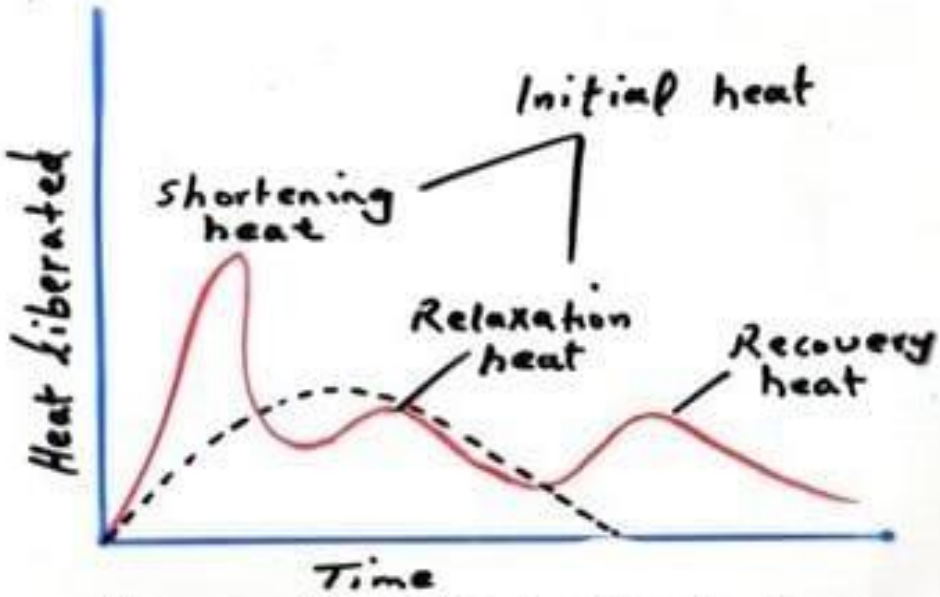
تنبعث حرارة الانكماش بشكل انفجاري ولفترة قصيرة من الزمن ومصدرها تحول ATP الى ADP لذلك فهي لاتتاثر من حيث الكم سواء حدث التقلص العضلي في ظروف هوائية او غير هوائية ويتناسب مقدارها مع درجة انكماش العضلة وهذا ينسجم مع نظرية الانزلاق – الخيطي ، فكلما ازداد الانكماش كثر عدد الجسور العرضية النشطة التي تحرر الطاقة من ATP .

ب- حرارة الارخاء Relaxing heat

وهذه الحرارة تكون كميتها اقل من النوع الاول ولكنها تدوم لفترة زمنية طويلة ويعزى سببها الى عوامل الية صرفة مثل احتكاك الياف العضلة ببعضها

2- الحرارة المتاخرة او حرارة الترميم Delay or Recovery heat

تنبعث الحرارة المتاخرة بعد انتهاء حرارة الارخاء حيث تستمر العضلة المتقلصة على انتاج الحرارة لدقائق ويمتاز انبعاث حرارة الارخاء بكونه هادئا بالموازنة مع الانبعاث السريع للحرارة البدائية .ان مقدار هذه الحرارة يعتمد على الاوكسجين لذلك يختزل كثيرا في الضروف اللاهوائية لذا فقد اقترنت بعملية الاكسدة التي تجري في دورة كربس لانتاج ATP وقد يطول زمن انبعاث الحرارة المتاخرة ليصبح اضعاف زمن انبعاث الحرارة البدئية فمثلا عند تعرض عضلة الى تكزز يستمر عدة ثوان يدوم انبعاث الحرارة المتاخرة فيها 20 دقيقة .



Stages of heat Production during a Contraction Cycle