الفصل الثالث

العضلات
Muscles

تقديم العضلة الهيكلية
Introducing Skeletal Muscle

العضلات هي التي تحرك الجهاز الهيكلي ، حيث تنقبض العضلات حينما تُنبه عن طريق الإمداد العصبي المتصل بها وتمارس قوة على المفاصل . والعضلات الهيكلية للحيوان تسبب أيضاً الحركة ، كذلك تُمكنه من أن يحافظ على وضعه Posture . يوجد حوالي ٧٠٠ عضلة هيكلية في الحصان وهي تشكل٤٠- ٥٠ ٪ من كتلة الجسم الكلية . في السلالات الأصيلة المحسنة ، يمكن أن تشكل العضلات أكثر من ٥٥٪ من كتلة الجسم ، معطية بذلك نسبة أكبر من القوة إلى كتلة الجسم بالمقارنة مع العديد من سلالات الخيول الأخرى . بالمقارنة ، تشكل العضلة الهيكلية فقط حوالي ٤٠ ٪ من كتلة الجسم في إنسان متوسط . العضلة هي شكل من النسيج القابل للإثارة ، سُميت بذلك ؛ لأنها تستطيع أن تنتقل فيها النبضات الكهربائية على طول أغشية الخلية بنفس الطريقة على الأغلب التي تنتقل فيها النبضات العصبية . تعمل العضلة الهيكلية تحت ما يعرف بالتحكم الإرادي أو الواعي . توجد عضلات داخل الجسم ولا

تتأثر بالتحكم الواعي ، مثل العضلة التي تبطن المنافذ الهوائية ، الأوعية الدموية أو القناة المعدية المعوية ، وتعرف هذه بالعضلات اللاإرادية . في الحقيقة يوجد ثلاث أنواع أساسية من العضلة داخل الجسم :

١- عضلة ملساء (أو لاإرادية) .

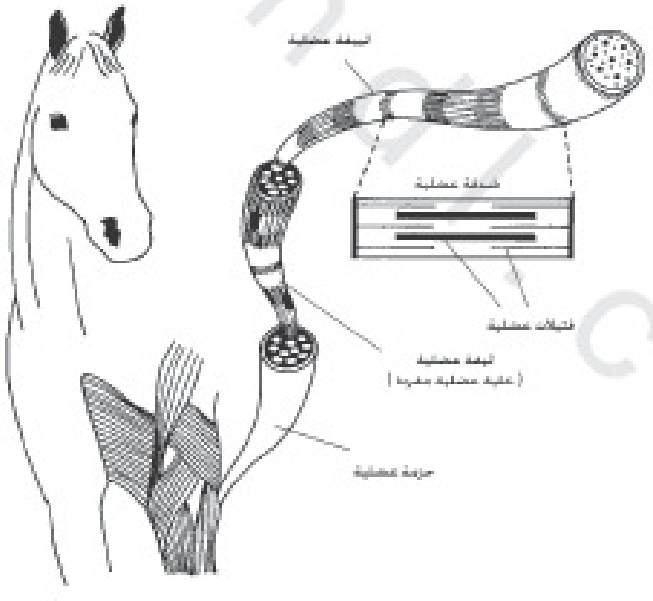
٢- عضلة قلبية (أو القلب) .

٣- عضلة هيكلية (مخططة أو إرادية) .

تتألف العضلة الهيكلية من حزم عضلية عديدة وتتركب كل حزمة عضلية من مئات الألياف العضلية الفردية (الشكل رقم ٣,١) . الليفة العضلية هي في الواقع خلية عضلية فردية مستطيلة ، يُزود الإمداد الدموي للألياف العضلية عن طريق شبكة شعرية منتشرة بين الألياف . يوجد في عضلة الحصان ، حوالي ٢٠٠ - ١٠٠٠ شعيرة لكل مم^{٢} . تنقبض العضلة الهيكلية تحت سيطرة الأعصاب الحركية . وتنتهي كل ليفة عصبية حركية فردية بنهايتها المتفرعة على عديد من الألياف العضلية . يطلق على الليفة العصبية إضافة إلى الألياف العضلية التي تغذيها بالوحدة الحركية Motor unit . يزود العصب الحركي في أي مكان بـ ١٠ - ٢٠٠٠ ليفة عضلية ، غالباً تكون موزعة على نحو واسع خلال منطقة من العضلة . حيثما تحتاج إلى الحركات الدقيقة الحساسة ، فإن عدد الألياف العضلية التي يخدمها ليف عصبي واحد يكون صغيراً ، يصل إلى بضع عشرة لكل عصب . توجد مثل هذه الوحدات الحركية داخل عضلات العين والشفاه والأذن . الحركات الأقل دقة لكن الأكثر قوة تسببها وحدات حركية حيث عدد الألياف العضلية التي تُخدم بواسطة ليفة عصبية واحدة يكون كبيراً لأكثر من حوالي ٢٠٠٠ ليفة عضلية لكل ليف عصبي . توجد مثل هذه الوحدات الحركية الكبيرة في العضلة التوأمية الساقية (عضلة بطن الساق) Gastroncnemius في الطرف الخلفي والعضلة العينية Longissimus dorsi على طول الظهر . تستقبل جميع العضلات الهيكلية كمية معنية من النبضات العصبية حتى عند عدم استعمال العضلات . قد

يصل هذا " الخط القاعدي " من التنبيه إلى بضع نبضات فقط لكل ثانية ويُعرف بـ التوتر Tone . يجهز التوتر العضلة للانقباض ويحافظ على الحالة (الوضع) . يمكن أن يؤدي الثبات (عدم الحركة) أو الضرر العصبي كنتيجة للأذى الذي يمنع هذا الخط القاعدي من النشاط الكهربي إلى ضمور العضلة Atrophy . يمكن أن يصحح الضمور عن طريق زيادة مستوى نشاط العضلة وتنشيط الإمداد الدموي لها ، مثل استعمال جهد بدني من نوع خاص والتدليك أو التنبيه المحكم للعضلة باستعمال تقنيات العلاج الكهربي .

يعتبر الإمداد الدموي الكافي أساسياً أيضاً لوظيفة العضلة الطبيعة ، فهذا يعني أنه يجب إحماء الحصان تماماً قبل القيام بأي نشاط شاق . ولا يوفر هذا فقط الوقت الكافي لزيادة الإمداد الدموي للعضلة لمواجهة الطلب على الأكسجين ، ولكن واقعياً يزيد أيضاً الحرارة داخل العضلات بحوالي ١ °م ، لتتوافق مع حرارة عملها الأمثل .



الشكل رقم (٣,١). تركيب العضلة الهيكلية

داخل الخلية العضلية
Inside the Muscle Cell

يمكن أن تحتوي العضلة المفردة حتى مليون من الألياف العضلية . كل ليفة عضلية فردية هي ببساطة خلية عضلية مفردة . كل ليفة عضلية تقريباً ٣٠ - ١٠٠ ميكرومتر في القطر ، ولكنها تختلف في الطول من بضع ملليمترات إلى عدة سنتيمترات. تتركب الليفة العضلية من :

- غشاء خارجي يسمى الصفيحة اللحمية Sarcolemma .
- أنويه (مضغوطة عند أطراف الخلية) .
- حبيبات جليكوجين .
- قطرات دهنية .
- صبغية العضلة الحمراء (ميوجلوبين Myoglobin) التي تخزن الأكسجين وتساعد على تحريكه عبر الخلية .
- ميتوكوندريا (متقدرات) (بيت الطاقة الهوائية للخلية) .
- مئات من الليفات العضلية Myofibrils المكونة من فتيلات عضلية Myofilaments مكونة من بروتينات انقباضية .

تسمى الوحدة المتكررة للتنظيم داخل الليفة العضلية بالقطع اللحمية Sarcomere (انظر الشكل رقم ٣,٢) . القطعة اللحمية هي أيضاً الوحدة الوظيفية للانقباض وتتركب بصفة كبيرة من بروتينات انقباضية خاصة . تُسبب هذه البروتينات الانقباضية الانقباض العضلي حيث تتحرك واحدة نحو الأخرى محدثة قوة تعمل على تقصير القطعة اللحمية عن طريق جذب خطوط Z قرباً في اتجاه المركز . يُمكننا فحص البروتينات المتقبضة عن قرب وترتيب تركيبها لفهم عملية الانقباض العضلي . ويمكن التعرف تحت المجهر على الأشرطة Bands داخل القطعة اللحمية كما يلي :

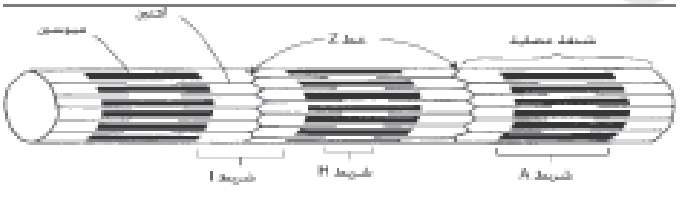
- شريط (حزمة آي) I Band يشكل هذا الشريط المنطقة داخل القطعة اللحمية المحتوية على فتيلات عضلية رفيعة فقط . تتكون الفتيلات الرفيعة من

بروتين يسمى الأكتين Actin . هذه الفتيلات تقريباً ٥ نانومتر في القطر وعشرة آلاف نانومتر في الطول . وهي ممتدة من خط Z في اتجاه مركز القطعة اللحمية . الأكتين عبارة عن بوليمر Polymer من G-actin علي هيئة حلزون ألفا Alpha helix . يقع في ميزاب حلزون ألفا بروتين آخر يسمى تروبوميوسين Tropomyosin (انظر الشكل رقم ٣,٣). يلتحم بالتروبوميوسين بروتين آخر هو تروبونين Troponin . يوجد ثلاث وحيدات Subunits من التروبونين هي T، C، I .

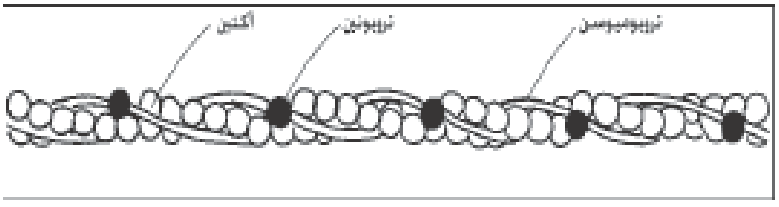
• شريط (حزمة إتش) H band وتتركب من فتيلات عضلية سميكة قطرها ١٢ نانومتر وطولها ١٦٠٠ نانومتر . تحاط كل فتيلة سميكة بتركيب سداسي الأضلاع Hexagonal array من الفتيلات الرفيعة ، وجسور عرضية مرتبة حلزونياً تمتد في اتجاه الفتيلات الرفيعة .

• شريط (حزمة أ) A band وتتضمن شريط إتش ومنطقة التداخل بين ألياف الميوسين Myosin والأكتين . وتساوي طول فتيلات الميوسين.

يحدث الانقباض العضلي عن طريق تقصير القطعة اللحمية الفردية في تتابع استجابة لنبضة عصبية تصل إلى منطقة خاصة من غلاف العضلة تُعرف بالصفيحة الحركية النهائية Motor end-plate . يتم خفض طول القطع اللحمية كنتيجة لتحرك البروتينات المنقبضة وميوسين وأكتين بداخلها وتعرف هذه العملية باقتران الإثارة والانقباض Excitation–contraction coupling .



الشكل رقم (٣,٢). قطاع لليفة عضلية موضحاً وحدات التكرر للتقسيم– الساركومير (الشدفه العضلية) .



الشكل رقم (٣,٣)، بوليمر الأكتين ، موضحا وضع تروبوميوسين وتروبونين .

كيف تسبب النبضة العصبية انقباض العضلة ؟

How does the Nerve Impulse Make the Muscle Contract?

يُغير وصول الإشارة الكهربية الشحنة الكهربية على أي من جانبي غلاف العضلة مسبباً "انسياب" شحنة كهربائية بسيطة على طول الغلاف . يُحمل انسياب الشحنة إلى العمق داخل الليفة العضلية على طول الأنيبيات العرضية والتي تمثل انبعاجات في غلاف الخلية العضلية .

تُكون الأنيبيات المستعرضة المتقاربة مناطق خاصة للشبكة الإندوبلازمية العضلية Sarcoplasmic reticulum (SR) . تقوم الشبكة الإندوبلازمية بحجز الكالسيوم الموجود داخل الخلية . يسبب وصول النبضة الكهربائية عند SR انفتاح قنوات أيون الكالسيوم الموجودة في غلافها بعد ذلك تستطيع أيونات الكالسيوم أن تتركها وتدخل إلى سيتوبلازم العضلة .

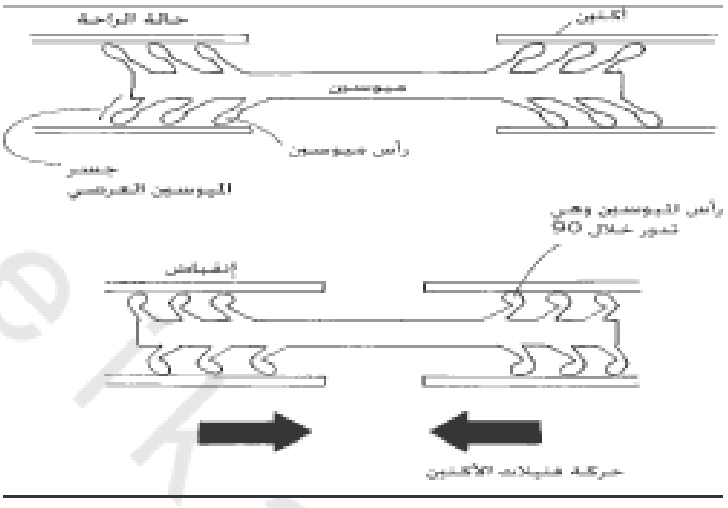
تتابع الأحداث في الانقباض العضلي

Sequence of Events in Muscular Contraction

يتسبب وصول النبضة الكهربائية في إطلاق أيونات الكالسيوم إلى سيتوبلازم الخلية العضلية ، ويرفع هذا تركيز أيونات الكالسيوم الحرة داخل سيتوبلازم الخلية العضلية حوالي ألف ضعف . ترتبط بعدها أيونات الكالسيوم بـ تروبونين – C المحتوي على أربعة مواقع لارتباط الكالسيوم . يُسبب ارتباط أيونات الكالسيوم بالتروبونين – C

تغير شكلي في تروبونين — I . يؤدي هذا التغير في تروبونين — I إلى اقتلاع التروبوميوسين من مواقع ارتباطه على الأكتين ويسمح بارتباط رأس الميوسين بالأكتين . يتم حماية موقع الارتباط على الأكتين فعلياً ، بواسطة التروبونين حتى يتم زيادة تركيز الكالسيوم . يحتوي رأس الميوسين على إنزيم أدينوسين ثلاثي الفوسفاتاز (ATPase) والذي يستطيع أن ينزع الفوسفات من ثلاثي فوسفات الأدينوسين وإنتاج طاقة لربط الميوسين بالأكتين . بمجرد الارتباط بالأكتين ، تتحرك رأس الميوسين محولة الاتجاه ٩٠ درجة جاذبة معها فتيل الأكتين نحو مركز القطعة اللحمية (انظر الشكل رقم ٣,٤) . يختفي شريط إتش الذي يتكون من فتيلات ميوسين عندما تنزلق الفتيلات فوق بعضها البعض . يستتبع عملية الارتباط والتحرر ، ارتباط وتحرر بعد ذلك بتحريك فتيلات الأكتين واحدة فوق الأخرى في نمط يشبه السُقاطة (اللسين) .

تحتاج كلتا عمليتي الانقباض والتحرر إلى ثلاثي فوسفات الأدينوسين ، وإذا لم يتوفر وبقيت تركيزات أيون الكالسيوم عالية في الخلية العضلية ، فلا تستطيع الخلية العضلية أن ترخي Relay . بعد موت الحيوان ، يُستهلك ثلاثي فوسفات الأدينوسين الموجود بالخلايا العضلية تدريجياً ، بسبب عدم وجود إمداد بالأكسجين ليحافظ على توظيف الميتوكندريا ، وفي النهاية تتوقف عملية التحلل السكري حيث ينخفض الرقم الهيدروجيني للخلية العضلية إلى حوالي ٥. في بعض الأحيان لا يحتاج ثلاثي فوسفات الأدينوسين للإمداد بالطاقة لفك ارتباط الأكتين والميوسين ، ولذا تكون العضلة غير قادرة على الاسترخاء ، ويكون الجسم في حالة التيبس الرمي *Rigor mortis* . يحدث الاسترخاء فقط عندما تُفرز بعد الموت إنزيمات التحلل البروتيني Proteases والتي تبدأ في تحلل البروتينات المكونة للجسور العرضية للعضلة .



الشكل رقم (٣,٤). دوران رأس الميوسن أثناء إنقباض العضلة.

يلزم بعد الانقباض إلى ثلاثي فوسفات الأدينوسين لضخ الكالسيوم رجوعاً إلى الشبكة الإندوبلازمية العضلية . وتصبح المقدرة ضعيفة على فعل ذلك عندما تنخفض مخازن ثلاثي فوسفات الأدينوسين بالعضلة ، كما هي الحالة غالباً نحو نهاية جزء من العمل السريع الشاق . أوضحت قياسات تركيز ثلاثي فوسفات الأدينوسين في عينات العضلة التي تحتوي على عدة آلاف من الألياف العضلية الفردية المأخوذة من العضلة بالخزعة العضلية وأنه بعد مثل هذا العمل ، ينخفض متوسط التركيز عند السكون من ٦ ملي مول/كجم عضلة طازجة إلى ٢-٣ ملي مول/كجم عضلة طازجة . ومع ذلك فقد أوضحت بعض الدراسات لمحتوى الألياف العضلية المفردة من ثلاثي فوسفات الأدينوسين أنه بدلاً من أن تُظهر جميع الألياف انخفاض متشابه في ثلاثي فوسفات الأدينوسين ، فإن بعضها فعلياً ليس لديه ثلاثي فوسفات الأدينوسين بينما يعزى البعض الآخر تركيز السكون تقريباً. لذا من المحتمل محتوى الليفة العضلية المفردة من ثلاثي فوسفات الأدينوسين بعد الجهد البدني أن يعكس إلى أي مدى تم استثمارها أثناء الجهد البدني السابق .

خصائص النشاط العضلي
Properties of Muscular Activity

بينما لا تتغير خصائص النبضة العصبية ، بمعنى آخر ، النبضة العصبية هي حدث " الكل أو لاشيء " – فالعصب إما يشعل أو لا يشعل ، يجب أن تختلف خصائص العضلة المرتبطة إلى حد بعيد بواسطة تنشيط وحدة حركية اختيارية لكي تستطيع أن تنتج سلسلة غير محددة تقريباً من الاستجابات متدرجة تبعاً لقوة فعل العضلة المطلوبة . تحتاج أن تكون قادرين على إنتاج أفعال العضلة المحكومة بدقة من حيث قوة الاستجابة وسرعة الانقباض . وينشأ كثير من التحكم الحركي الإرادي في جزء من المخ يسمى العقد العصبية القاعدية . جاءت معرفة تضمين العقد العصبية القاعدية في الوظيفة الحركية أساساً من ملاحظات حول الوظيفة الحركية الشاذة والتي تحدث كنتيجة للضرر أو الاختلال في هذه المناطق ، على سبيل المثال ، كما في حال مرض باركنسون Parkinson's disease (منتجاً رعشة أو ارتجاف) والكوريا (داء الرقص) (منتجاً حركات لاإرادية اهتزازية سريعة) . تعتمد قوة الاستجابة الحركية على عدد الوحدات الحركية التي نشطت في أي وقت محدد . تمتلك الأعصاب ذات القطر الدقيق عتبة تنبيه منخفضة وتمد بصفة عامة الوحدات الحركية ذات الألياف العضلية القليلة ، بينما تغذي الأعصاب ذات القطر الكبير (والتي تحتاج إلى منبه أكبر للبدء بعملها) الوحدات الحركية ذات العدد الأكبر من الألياف العضلية . الأعصاب ذات القطر الدقيق لها ما يعرف بـ جهد العتبة المنخفض Low threshold potential ، بمعنى آخر ، أنها تستجيب لمستويات منخفضة جداً من المنبهات الحسية . وكلما كبر مقدار المنبهات الواردة ، كلما كانت الألياف العصبية أكثر وبالتالي سوف تُطوع ألياف عضلية أكثر ، بمعنى آخر ، سوف تنقبض ، تدرك أقصى قوة للعضلة عندما تُنبه جميع الألياف العصبية حتى تلك ذات العتبة الأعلى . من غير الممكن أن تطوع جميع

الألياف العضلية التحكم الإرادي . ويمكن تحقيقه باستعمال التنبيه الكهربي اللاإرادي . يطلق على الزيادة في عدد الألياف العضلية التي تُنبهت بزيادة قوة المنبه التعزيز (التطويع) Recruitment . وهذه واحدة من الطرق الأساسية التي تسبب درجات مختلفة من الاستجابة العضلية . صحيح أنه يتم تعزيز أعداد وأنواع مختلفة من الألياف العضلية عند مراحل مختلفة من الجهد البدني ، لذا فإنها تتعب عند مراحل مختلفة . وهذا يفسر لماذا يمكنك غالباً تأخير الإعياء عن طريق التبادل بين أنواع الجهد البدني ، مثلما يحدث في دائرة التدريب Circuit training أو تدريب " فارتلك " "Fartlek training" . تدريب Fartlek هو نوع من نظام الجهد البدني والذي يتضمن جهد عنيف مفاجئ لمدة قصيرة لعمل عالي الكثافة مركب على خلفية لجهد بدني مستمر ذي كثافة منخفضة. عندما يستعمل العمل البطيء والسريع أعداداً وأنواعاً مختلفة بدرجة أقل من الألياف العضلية وتنتقل عضلة الحصان بين استعمال مجاميع مختلفة من الألياف العضلية خلال فترة الجهد البدني ، فإنه يمكن تأخير الإعياء .

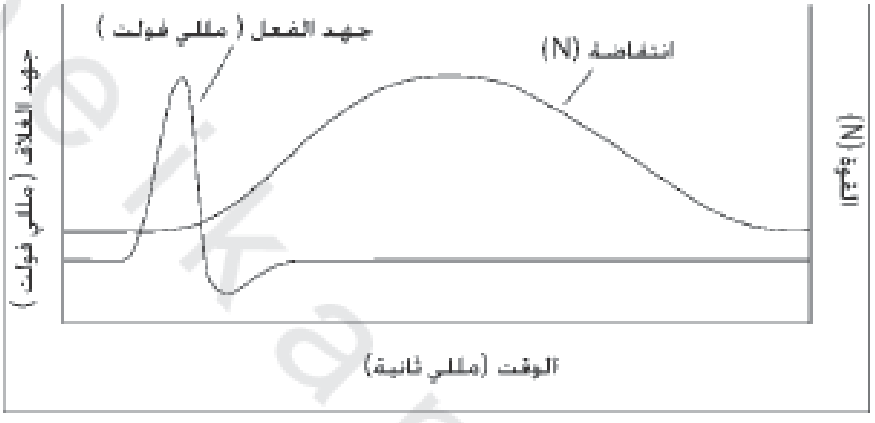
يعتمد نوع الاستجابة المحدثة من العضلة ليس فقط على عدد الألياف العصبية التي تُنبهت ولكن أيضاً على تكرار وصول النبضات العصبية إلى الصفيحة النهائية الحركية . يؤدي التطبيق العملي من نبضة عصبية واحدة إلى ليفة عضلية إلى انقباض وانبساط واحد داخل الليفة العضلية يُعرف بانتفاضة مفردة للعضلة Single Twitch (انظر الشكل رقم ٣,٥) . وهذه هي الاستجابة الميكانيكية إلى منبه كهربائي .

في انتفاضة مفردة للعضلة ، يستديم الحدث الميكانيكي (الانقباض) بفترة أطول عن الحدث الكهربائي (النبضة العصبية). يوجد تأخير بحوالي ٣ ملي من الثانية بين بداية جهد الفعل Action potential وبداية الانقباض العضلي . يمثل هذا التأخير الوقت الذي تستغرقه الشحنة الكهربية لتنتشر خلال نظام الأنبيبة T-tubule system ولأجل تتابع إفراز الكالسيوم من الشبكة الإندوبلازمية العضلية

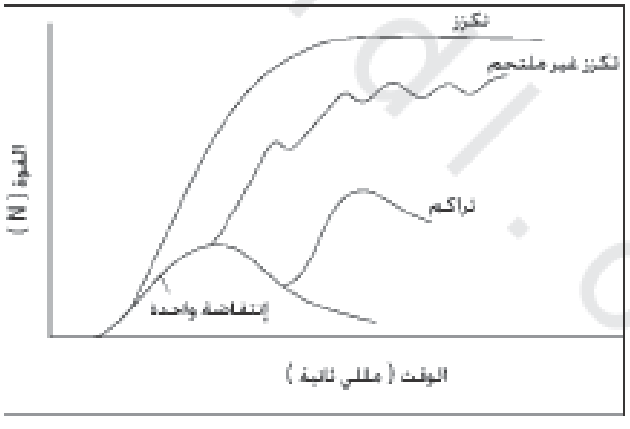
كنتيجة لنبضة عصبية واحدة ، يُفرز كمية معينة من الكالسيوم تنتشر خلال السيتوبلازم والتي تضخ رجوعاً إليها بعد انتهاء النبضة العصبية . إذا وصلت نبضة عصبية أخرى قبل أن يُضخ الكالسيوم عودة إلى الشبكة الإندوبلازمية العضلية ، تُفرز أيونات كالسيوم إضافية تضاف إلى كمية الكالسيوم داخل السيتوبلازم . كلما كان تركيز الكالسيوم أكبر داخل السيتوبلازم ، كلما كانت مواقع الارتباط المعرضة أكثر لتسمح بتداخل أكتين — ميوسين . في هذا الموقف ، تحدث انتفاضة عضلية ثانية قبل أن تنتهي السابقة كلية ، وكنتيجة لذلك ، تصل الانتفاضة الثانية إلى قمة التوتر Peak tension أكبر من سابقتها . تُعرف هذه الظاهرة بالتراكم Summation . لذا يحدث انقباض ثان أقوى لو تبعت النبضة العصبية الثانية بسرعة في أعقاب الأولى .

إذا استُقبلت سلسلة كاملة من النبضات العصبية بواسطة غلاف العضلة بشكل سريع متتالي ، فيكون التوتر الناشئ أكبر ، مع بعض الارتخاء فقط بين التنبيهات المتتالية . يُعرف هذا بالكزاز غير المندمج (تقلص عضلي مستمر غير مندمج Unfused tetanus) (انظر الشكل رقم ٣,٦) . يحدث الكزاز المندمج عندما لا يكون هناك وقت لكي ترتخي العضلة على الإطلاق ، فتندمج الاستجابات الفردية في انقباض واحد . ويمكن أن يكون التوتر الناشئ أربع أضعاف أكبر منه في الانتفاضة العضلية الفردية . يعتمد تكرر التنبيه الذي يحدث عنده التراكم على الوقت الذي تستغرقه انتفاضة الليفة العضلية . لو أن أمد انتفاضة ليفة عضلية ١٠ مللي ثانية وتنبه عند تكرار أقل من واحد كل ١٠ مللي ثانية (مكافئ لأقل ١٠٠ مرة لكل ثانية أو ١٠٠ هرتز Hz) ، فسوف تحدث انقباضات عضلية غير مترابطة . عند تكرار أكبر من ١٠٠ هرتز ، سوف يحدث التراكم . إذا ما حدثت جميع الانقباضات العضلية بواسطة انقباضات عضلية فردية منفصلة ، فإن الحركات العضلية الناتجة تكون اهتزازية عنيفة ومفاجئة . يستعمل التراكم ليسبب انقباضات عضلية هينة كنتيجة لتراكم الاستجابات من وحدات حركية

مختلفة داخل العضلة . ويكون انقباض الوحدات الحركية المختلفة غير متزامن (لا تنقبض جميعها تماماً في نفس الوقت) ، فبينما تنبسط ألياف معينة ينقبض البعض الآخر ، وتكون النتيجة النهائية هي حركة عضلية هينة (هادئة) .



الشكل رقم (٣,٥). العلاقة بين الأحداث الكهربائية والميكانيكية في انتفاضة واحدة.

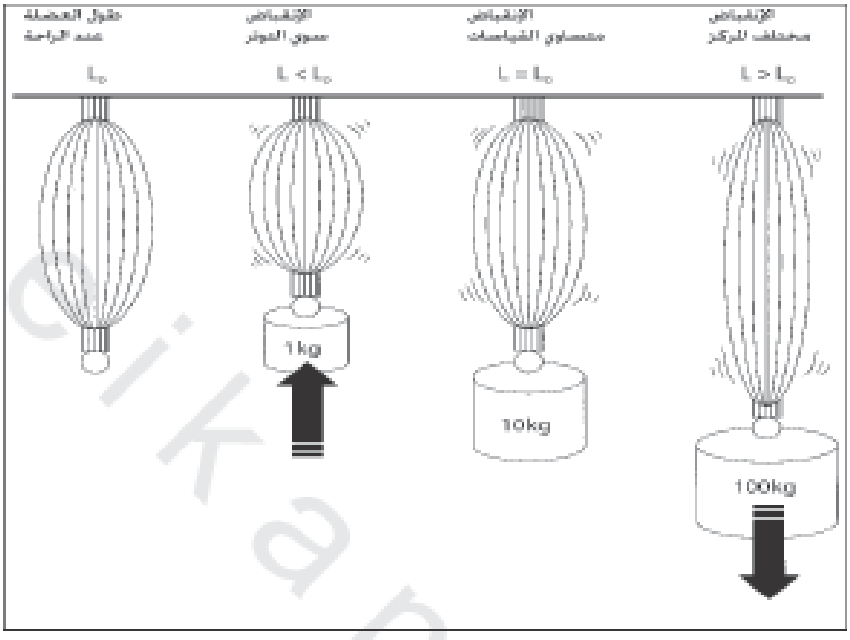


الشكل رقم (٣,٦). التراكم والتكزز (الطلق العضلي المستمر).

النشاط متعادل التوتر ومتساوي القياسات Isotonic and Isometric Activity

عندما تنقبض العضلات ، فإنها تبذل قوة على ما ترتبط به ، وإذا كانت القوة الناشئة عن طريق الليفة العضلية أكبر من القوة المضادة التي تعمل عليها ، سوف يحدث تقصير للعضلة . في مواقف معينة كأن تحاول أن تلتقط شيئاً ثقيلاً للغاية ، فالقوة الناشئة داخل العضلة قد تكون غير كافية فعلاً لكي تحرك هذا الشيء . تنقبض العضلة في هذا الموقف ، ولكنها غير قادرة فعلاً على تقليل طولها . حينما نأخذ في الاعتبار أنواع الانقباضات العضلية ، يوجد هناك متغيرين يمكن قياسهما : الطول والتوتر (حيث التوتر هو القوة الناشئة داخل العضلة) .

في الانقباض متساوي التوتر (بمعنى ذات نفس التوتر) ، يكون التوتر ثابتاً ، بينما يتغير طول العضلة . يقل طول العضلة ايجابياً ، مسببة حركة مرئية للمفصل . يمكن أن يطلق على هذا أيضاً الانقباض المتمركز Concentric contraction . نوع آخر من الانقباض متساوي التوتر هو حيثما تنقبض العضلة ايجابياً ضد قوة الشد الخارجية السلبية . يحدث هذا الانقباض عندما تعمل العضلة في نمط متضاد Antagonistic fashion بالنسبة لشريكتها في الجانب المعاكس من المفصل لتنظيم حركة المفصل ، وتعرف هكذا بالانقباض مختلف المركز Eccentric contraction بدلاً من المتمركز (ذي المركز العام) . في الانقباض متساوي القياسات (نفس الطول) يكون الطول ثابتاً بينما يتغير التوتر . لا يوجد نقص مرئي في الطول ، مع وجود زيادة في التوتر حيث تتشكل الجسور العرضية بين الميوسين والأكتين كما يعاد دورانها ولكن القوة الخارجية ضخمة للغاية لكي تتحرك فتيلات الأكتين (الشكل رقم ٣,٧) .



الشكل رقم (٣,٧). الانقباضات العضلية سوية التوتر ، متساوية القياسات ومختلفة المركز .

التوتر السلبي (غير النشط) Passive Tension

تتحمل كل عضلة كمية معينة من القوة التي تفرض عليها قبل أن تستطيل بالفعل استجابة لشد سلبي . ترجع هذه الخاصية إلى وجود ما يعرف بمكونات السلسلة المطاطة Series elastic components . تتركب هذه من الأوتار Tendons ، الغلاف العضلي (الغلاف المحيط بكل ليفة عضلية فردية) وألياف النسيج الضام ، والمفصّلات Hinges عند رؤوس الميوسين ، تقاوم جميعها الشد Stretching . في الانقباض متساوي القياسات Isometric تقصير الآليات القابلة للانقباض ، لكن الأجزاء السلبية ، بمعنى أن مكونات السلسلة المطاطة يحدث لها شد ولذلك ليس هناك حركة نهائية (تامة) . تُشد مكونات السلسلة المطاطة قليلاً أثناء الانقباضات متساوية التوتر . تكون مكونات السلسلة المطاطة قليلاً عند بداية الانقباض ، أثناء الانقباضات

متساوية التوتر . عند بداية الانقباض ، وتكون مكونات السلسلة المطاطية قليلة(بطيئة) النشاط : عندما تقصر الآليات القابلة للانقباض ، يُرفع الركود Slack ، حتى تستطيع مكونات السلسلة المطاطية أن تدعم العبء الذي يهدف تحريكه .

تستعمل غالباً تمارين الجهد البدني الخاصة ذات الشد السلبي كشكل علاجي أو " للعناية الروتينية الرتيبة " للعضلات . ويمكن أيضاً أن تُنفذ عن طريق مالكي الخيول بمجرد تعليمهم التقنيات البسيطة ويمكن أن تُدمج في العمل الرتيب اليومي للحصان .

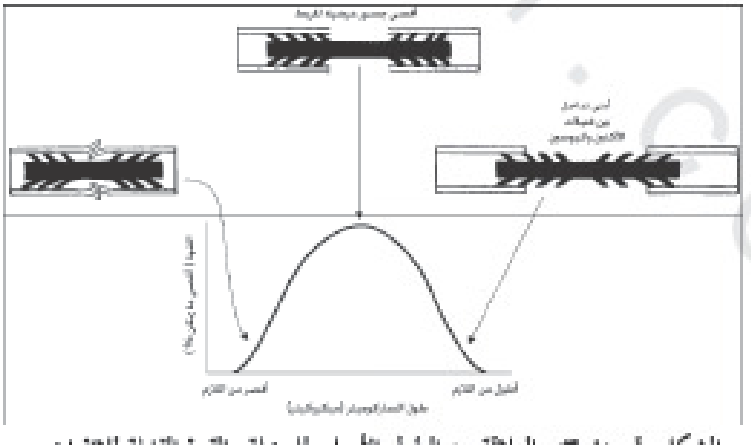
العلاقة بين التوتر والطول Length–tension Relationship

تقع جميع العضلات الإرادية في الجسم تحت توتر طفيف . لو قطع وتر أو آخر مرتبط بالعضلة عند النهايات العكسية ، فيقصر طول العضلة . الطول المنبسط Relaxed length هو طول العضلة قبل الانقباض مع وقوع مكونات السلسلة المطاطية تحت توتر طفيف . يؤدي تمدد العضلة (كما في الشد السلبي) إلى جذب العضلة إلى ما وراء الطول الأول Initial length ويبدأ التوتر في الزيادة بسبب تمدد مكونات السلسلة المطاطية . إذا نبهت عضلة بطريقة متساوية القياسات بادئة بأطوال مختلفة معروفة ، فيحدث أقصى نشاط توتري عندما نبدأ بالطول الطبيعي أو عند الراحة (والارتخاء) . التوتر الكلي الناشئ بواسطة العضلة هو مجموع التوتر النشط والشد السلبي ، ويختلف كليهما مع طول الليفة . يعني ذلك أن العضلة تحت توتر طفيف ومهيئة Primed ومستعدة للاستجابة حينما يصل التنبيه الكهربائي .

عند الطول الأمثل للعضلة ، تكون الألياف العضلية وكذا القطع اللحمية Sarcomeres عند طول يمكن من أقصى تداخل بين فتيلات الأكتين والميوسين . إذا جُذبت العضلة بعيداً أكثر من اللازم ، تتمدد الألياف إلى ما وراء طولها الأمثل .

وهذا يعني أن هناك تداخل أقل بين فتيلات الأكتين والميوسين . فتتكون جسور عرضية أقل وبالتالي ينشأ توتر أقل (انظر الشكل رقم ٣,٨) .

إذا كانت الألياف العضلية أقل من طولها الأمثل حينما يبدأ الانقباض ، تبدأ فتيلات الأكتين تتداخل مع بعضها البعض وعندما تقصر العضلة أثناء الانقباض . وهذا يعني أيضاً تكّون جسور عرضية أقل ، ومرة أخرى ينشأ توتر أقل . وعليك بتفكر ذلك عند رافعي الأثقال Weightlifters حيث همهم الأول هو اكتساب الوزن وجعل أذرعهم في وضع لا تتمدد العضلات كالمعتاد عن طريق الوزن المعلق أسفل ركبهم . وعندما تكون فقط أذرعهم في انثناء يستطيعون استخدام أقصى قوة . الأساس في ذلك أن درجة الانثناء أو التمدد لمفصل تعتمد على القوة التي يمكن أن تنشأ بواسطة انقباض معين . لكي نتوقع أقصى قوة من العضلة فنحتاج لأن تكون العضلة في وضع الاستجابة . تضع كثير من التوافقات الماهرة للمشي بخطى واسعة والتي تؤدى بواسطة فارس ذي علاقة ماهرة بالخيول Dressage rider أو قافز العرض جسم الحصان في طريقة ما تستطيع عندها العضلات أن تستجيب لأفضل تأثير.



الشكل رقم (٣,٨). العلاقة بين الطول الأصلي للعضلة والقوة القابلة للإنقباض .

أنواع وتوزيع الألياف العضلية
Muscle Fiber Types and Distribution

تصنيف أنواع الألياف العضلية Classification of Muscle Fiber Types

تتكون العضلات من أنواع مختلفة من الألياف . اللحم (العضلة) من حيوانات مختلفة ، أو حتى قطعيات اللحم من نفس الحيوان ، تبدو غالباً مختلفة في اللون . فكر في لون صدور الدجاج المطبوخة وأرجل الدجاج المطبوخة : يعكس المظهر المرئي الفروق في أنواع الألياف داخل هذه العضلات .

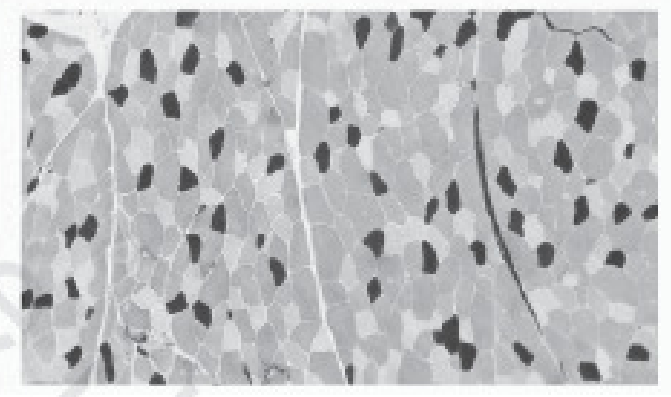
لقد تعلمنا الكثير عن أنواع ألياف العضلة ووظيفة العضلة على مدى ٢٥ عاماً الأخيرة كنتيجة لإدخال وتطبيق تقنية إبرة عينة الخزعة العضلية . تؤخذ عادة الخزع العضلية من العضلات المتحركة الكبيرة مثل العضلة الكفاليه الوسطى للأرباع الخلفية Middle gluteal muscle of the hindquarters للحصان ؛ لأنها واحدة من العضلات المرجعة الرئيسة للطرف الخلفي ، ومسؤولة عن توفير الكثير من القوة الدافعة للحركة الأمامية . وهي عبارة عن مجموعة عضلية كبيرة ، من السهل نسبياً اختيار موقعاً لجمع العينة بشكل واضح على أساس الملاحظة بالنظر والمقاس الخارجي . إحدى الطرق لمحاولة معايرة أين تُجمع العينات هي أن تؤخذ العينة عند نقطة ثلث المسافة على طول الخط الذي يجري من نقطة الحرقفة (الدرنة الوركيه Tuber coxae) حتى منبت الذيل . بمجرد اختيار منطقة أخذ العينة ، يتم حلاقة الجلد المغطي للعضلة ، وتُطهر ويُحقن مخدر موضعي تحت الجلد باستعمال إبرة دقيقة . تستعمل إبرة عينة الخزعة العضلية (عادة ذات قطر حوالي ٦ ملي) لأخذ عينة صغيرة للغاية من العضلة (حتى حوالي ٢٠٠ مجم) . إبرة الخزعة العضلية لها فتحة صغيرة عند قاعها وتحيط باسطوانة قطع داخلية . عندما تكون الإبرة عند العمق الذي تم اختياره داخل العضلة (عادة عند عمق

ما بين ٢ ، ٨ سم) فيتم رفع اسطوانة القطع لتعريض الفتحة ثم تُدفع لأسفل مرة أخرى لقطع قطعة من العضلة . يستعمل التخدير الموضعي فقط لتخدير الجلد ؛ لعدم احتواء العضلة على الأعصاب التي تستجيب " للألم " . الإحساس بالخزعة العضلية طبقاً لأولئك الناس الذين اعتادوا على فعل ذلك يكون من خلال نوع من الضغط . على العضلة أن تلتئم عن طريق توليد نسيج عضلي مع أقل ندب بالنسيج Scar tissue ، ويجب ألا يؤثر أخذ العينة على العضلة على المدى الطويل .

تصنف الألياف العضلية طبقاً لخصائص قابليتها للانقباض ، مثل سرعة قدرتها على الانقباض والاسترخاء ، والتي تعتمد على نوع الميوسين وإنزيم أدينوسين ثلاثي الفوسفاتاز الميوسين الموجودة ، وكذلك طبقاً لمقدرتها التأكسدية (القدرة على استعمال الأكسجين) . كلما انقبضت الليفه أسرع ، كلما كانت أكثر اعتماداً على المسارات اللاهوائية وأقل اعتماداً على المقدرة التأكسدية . باستخدام تقنيات كيمياء الأنسجة ، لقطاعات عرضية (بجميع الألياف تقريباً في وضع رأسي) من العضلة بسمك حوالي ١٠ ميكرومتر يتم تحضيرها وصبغها لبيان نشاط أدينوسين – ثلاثي – الفوسفاتاز الموجود في الألياف المختلفة . يعكس الصبغ الداكن نشاطاً غالباً لإنزيم ATPase – الميوسين ويعكس الصبغ الخفيف أو عدم الصبغ نشاط منخفض لإنزيم ATPase– الميوسين .

عندما يتم الصبغ عند الرقم الهيدروجيني – ١٠,٣ (ظروف قلوية) ، يظهر نوعان مختلفان من الألياف . تصنف الألياف الخفيفة الصبغ كنوع I ولها نشاط منخفض لإنزيم ATPase — الميوسين عند هذا الرقم الهيدروجيني ، يطلق على هذه الألياف أيضاً الألياف بطيئة الانقباض . تصنف الألياف داكنة الصبغ كنوع II ولديها نشاط مرتفع لإنزيم ATPase – الميوسين عند الرقم الهيدروجيني = ١٠,٣ ، ويطلق على هذه الألياف أيضاً الألياف سريعة الانقباض . يمكن أن تصنف الألياف من نوع II

أيضاً إلى نوعين إذا تم حضن القطاعات العضلية في محلول حامضي عند الرقم الهيدروجيني = ٤,٤–٤,٦ قبل أن تصبغ من أجل نشاط ATPase عند درجة الرقم الهيدروجيني = ١٠,٣ . بطريقة الصبغ هذه فإن ألياف النوع I والتي صبغت خفيفاً سابقاً عند الرقم الهيدروجيني = ١٠,٣ بدون حضن حمضي مسبق فإنها الآن تأخذ صبغاً داكناً . تصبغ ألياف النوع II الآن بشكل خفيف للغاية وتصنف كنوع II A بينما الألياف التي تصبغ بشكل متوسط اللون بين النوع I والنوع II A فإنها تصنف كنوع II B (انظر الشكل رقم ٣,٩) . كلاً من الألياف II A و II B ألياف سريعة الانقباض ، وتستطيع الألياف من نوع II B أن تنقبض أسرع من الألياف II A . وفي معظم الحالات تقريباً فإن جميع الألياف في قطاع الخزعة العضلية تصبغ وتظهر بوضوح كأنواع I و II A و II B باستخدام هذه التقنية . تبدو في بعض الأحيان الألياف واقعة بين II A ، II B يطلق على هذه الألياف كنوع II A B . من الممكن أن تكون هذه الألياف هي الخط الفاصل في نشاط ATPase بين الأنواع II A و II B والتي " تم إحداثها " أثناء التغير، ربما كنتيجة للتدريب أو التقدم في العمر. يوجد نوع آخر من الألياف هو ، II C غالباً في العضلة المتجددة ويحتوي كلا من الميوسين سريع الانقباض وبطيء الانقباض . طريقة التعرف على ألياف II C هي قطاعات متسلسلة (واحد مباشرة فوق الآخر) من الخزعة العضلية وحضنها عند الرقم الهيدروجيني ٤,٤–٤,٦ ما قبل الحضن الحمضي والآخر عند الرقم الهيدروجيني = ١٠,٣ (ما قبل التحضين القلوي) وقبل الصبغ لأجل تنشيط ATPase ـ الميوسين عند الرقم الهيدروجيني = ١٠,٣ . ولأنه تم تحضير قطاعات متسلسلة واحداً بعد الآخر من نفس عينة العضلة والألياف بصفة عامة أطول من ٢٠ ميكرومتر ، فسوف تمثل القطاعات المصبوغة نفس الألياف . حينما تنظر لكلا القطاعين معاً فيمكن التعرف على نفس الليفة ، حيث ألياف الأنواع I ، II الصبغ داكن/خفيف في ما قبل الحضن الحمضي/القلوي ، فإن ألياف II C لا تظهر ذلك .



الشكل رقم (٣,٩). صبغ الألياف العضلية وفقا لنشاط ATPase – الميوسين عند الرقم الهيدروجيني = ١٠,٣ بعد ما قبل الحضن الحمضي عند الرقم الهيدروجيني = ٤,٤–٤,٦ . الأسود = النوع I ، الأبيض = النوع II A ، والرمادي = النوع II B .

هناك اتجاه أكثر حداثة ودقة لتصنيف الألياف العضلية تبعاً لوظيفتها الانقباضية وهو استعمال أجسام مضادة لبروتين الميوسين ثقيل السلسلة Myosin heavy chain (MHC) protein . تتكون الجسور العرضية للميوسين من أشكال مختلفة (متشابهات Isomers) من بروتين الميوسين ثقيل السلسلة ، وهو شكل من بروتين الميوسين ثقيل السلسلة الذي يمنح نشاط ATPase – الميوسين لليفة . تمت هذه الدراسات بداية في الجرذان ، ولذلك يتبع تصنيف MHC للحصان نظام تصنيف الجرذ . ألياف نوعي I و II A للحصان كليهما نفس نوع I MHC ونوع II A MHC اللذين تم التعرف عليهما في الجرذان . ولو أن ليفة II B للحصان تماثل ليفة II X MHC للجرذ وليس ليفة II B MHC للجرذ . يبدو أن لهذه الطريقة مزية كبيرة لفهم الموضوع حيث تصنيف أنواع الألياف أكثر تحديداً وبدون تداخل ويمكن أن يرى في اتجاه ATPase– الميوسين ، ولو أنه حالياً باهظ الثمن . تلك المعامل التي تعمل مع الخيول وتستعمل أسلوب صبغ ATPase – الميوسين من المحتمل أن تستمر في استعمال التسمية I ، II A ،

II B ، II AB ، II C ، بينما تلك التي تستعمل الأجسام المضادة للميوسين ثقيل السلسلة سوف تستعمل التصنيف I ، II A ، II X .

ألياف النوع I
Type I Fibers

(عضلة التحمل الحمراء) (Red Endurance Muscle)

تتميز هذه الألياف بأن لديها نشاط عال لإنزيم أدينوسين ثلاثي الفوسفات ATPase ومن الميوسين قبل وبعد الحضن الحمضي وهي ألياف بطيئة الانقباض والارتخاء ، وهي عادة أضيق قطر من جميع الألياف . ولأن قطر الليفه يتناسب مع القوة الناشئة فإنها غير قادرة على توليد طاقة أكثر مثل ألياف II A و II B . ومع ذلك تستطيع هذه العضلة أن تعمل لفترات طويلة هوائياً بدون إرهاق ولذا فهي مثالية في العضلات التي تستعمل في المحافظة على الوضع Posture .

لهذه الألياف أعلى قدرة تأكسدية (هوائية) بين جميع أنواع الألياف العضلية لسبب احتوائها على عدد كبير للغاية من الميتوكندريا (الأجسام السبحية) . يمكن إظهارها بتقنيات مشابهة لتلك المستعملة في التعرف على أنواع الألياف : صبغ قطاعات عضلية رقيقة للغاية (٥–١٠ميكرومتر) من أجل نشاط إنزيم نازع هيدروجين السكسينات Succinate dehydrogenase (SDH) . وهو أحد إنزيمات دورة الحموض ثلاثية الكربوكسيل TCA cycle . يستخدم قياس نشاط هذا الإنزيم عموماً كتقدير للقدرة الهوائية للعضلة . تمتلك ألياف النوع I أيضاً أقل مقدرة لاهوائية (تحلل سكري) . يكون الإمداد العصبي لألياف النوع I من خلال الأعصاب صغيرة القطر والتي لها جهد عتبة منخفض Low threshold potential ، وهذا يعني أنها تستجيب لمنبهات منخفضة المستوى نسبياً . إن نسبة الليفة العضلية إلى العصب الحركي منخفضة ، قد تكون ٢٠–٣٠ ليفة عضلية لكل عصب ، وهذا يعني ، أن الوحدة الحركية Motor unit صغيرة . تميل

الوحدات الحركية الأصغر إلى إنتاج انقباضات أكثر دقة ، ولكنها أقل قوة . والمحتوى الدهني داخل هذه الألياف مرتفع والمحتوى من الجليكوجين أقل من مثليه لألياف النوع II A و II B ، ما يعكس دور هذه الألياف في الوضع والتدريب البدني المطول تحت الحد الأقصى ، معتمداً أساساً على مسارات الطاقة الهوائية .

ألياف النوع II
Type II Fibers

(العضلة البيضاء للعدو بأقصى سرعة) (White Sprint Muscle)

هذه هي ألياف " العدو بأقصى سرعة " أو القفز ، وهي أكثر قوة من ألياف I ولكنها أقل مقاومة بكثير للإعياء . يوجد نوعان من ألياف النوع II : II A و II B . النوع II A عبارة عن ألياف " وسط الطريق " من حيث خصائصها الهوائية / اللاهوائية فهي لا تظهر الحد الأقصى لنوع I أو II B . النوع II B هي ألياف العدو بأقصى سرعة حقيقية وبقدرة هوائية منخفضة ومقدرة تحلل سكري عالية . تتميز هذه الألياف بنشاط إنزيم ATPase– الميوسين من منخفض – متوسط بعد الحمض الحمضي المُسَبق .

تنقبض ألياف النوع II A أربع مرات أسرع وألياف النوع II B عشر مرات أسرع من ألياف النوع I . سرعة انقباض ألياف النوع I هي ٠,٣٣ مم / ثانية. ألياف النوع II لها قطر أكبر من ألياف النوع I ولذلك ينشأ عنها طاقة أكثر .

قطر ألياف النوع II B والنوع II A في الإنسان بصفة عامة متشابهه وبالتالي قوتهما ، بينما في الخيول تعتبر ألياف النوع II B على الأغلب أعرض من النوع II A لذا يوجد فارق قوة أكبر . تظهر هذه الحالة عادة في الحصان غير المدرب أو في الخيول المدربة للعدو بأقصى سرعة لمسافة قصيرة Sprinting ، ومع ذلك تميل بعد التدريب

الهوائي الأولي ، تميل كلا ألياف النوعين II A و II B إلى النقص ليصبحا ذي حجم متماثل .

تزود ألياف النوع II بأعصاب عريضة القطر وذات جهد عتبة مرتفع وتنشط استجابة للمنبهات الكبيرة . لألياف النوع II B إمداد ضئيل نسبياً من الشعيرات بسبب اعتمادها على إمداد أكسجين جيد ولديها كثافة قليلة من الميتوكندريا وتنتج ثلاثي فوسفات الأدينوسين أثناء الجهد البدني عن طرق التحلل السكري اللاهوائي أساساً . تنعكس أيضاً مقدرتها العالية لعملية التحلل السكري في طبيعة مخازن الوقود بداخلها ، حيث محتواها الدهني قليل ولكن محتوى الجليكوجين مرتفع . نسبة الليفة العضلية إلى العصب الحركي عالية للغاية (تصل حتى ٢٠٠ ليفة للعصب الواحد) ولذا فإنها تظهر انقباضات قوية للغاية عندما تُنبه . تمتلك ألياف النوع II أيضاً شبكة اندوبلازمية عضلية متميزة عن ألياف النوع I ، ما يعكس احتياجها للتحول السريع Fast turnover لأيون الكالسيوم المرتبط بالانقباض والارتخاء السريع .

إمداد العضلة بالشعيرات
Muscle Capillary Supply

يوجد عدد من الطرق المختلفة لوصف الإمداد بالشعيرات في الخزعة العضلية . بينما تقدم الكثافة العامة بالشعيرات من حيث عددها لكل مم^2 بعض المعلومات ، فهي لا تخبرنا عن العلاقة بين الشعيرات والألياف . إذا قمنا بعملية عد كل من الشعيرات والألياف نستطيع أن نعبر عن متوسط عدد الشعيرات لكل ليفة عضلية. وفي دراسة في الأنواع القياسية Standardbreds من قبل Karlstrom *et al.* (1991) وجد أن متوسط عدد الشعيرات المتصلة بكل نوع من الليفة هو ٥,٠ (نوع I) و ٥,٦ (نوع II A) ، و٥,٩ (نوع II B) . ويبدو خلافاً لما تعلمناه عن ألياف النوع II B فإن

لديها مقدرة تأكسدية أقل ، بمعنى ، بضع من الميتوكوندريا . وفي كل الأحوال فإن وصف عدد الشعيرات المتصلة بكل نوع ليفة لا يأخذ في الحسبان الفروق في حجم الليفه وبناءً عليه مسافة الانتشار للأكسجين. تذكر أن الأكسجين يجب أن يصل إلى جميع أجزاء الليفه العضلية وليس مجرد الحافة ، لذا يجب أن يدخل حجم الليفة أيضاً إلى المعادلة ؛ لأن الأكسجين سوف ينتشر إلى مسافة أبعد من الشعيرة داخل الألياف الأوسع . بمفهوم عام فإن ألياف النوع II B هي عادة الأوسع في مساحة القطاعات العرضية ، يليها النوع II A ثم بعد ذلك النوع I . وفي دراسة Karlstrom *et al.* حيث أخذت مساحة الليفة في الحسبان بالتعبير عن عدد الشعيرات المتصلة لكل وحدة من مساحة الليفة ، وكانت القيم ٢,٦ شعيرات متصلة لكل ميكرومتر مربع من مساحة ليفة النوع I ، ٢,٣ للنوع II A و ١,٥ للنوع II B . يكون هذا معقولاً بعلاقة ما نعرفه كيف تعمل كل أنواع الليفة وظيفياً من الناحية الأيضية .

تطويع (تجنيد) الألياف العضلية
Muscle Fiber Recruitment

بشكل عام ، تطوع الألياف العضلية حسب الترتيب الآتي : نوع I ، نوع II A ، نوع II B . للمحافظة على الوضع وعند السرعات المنخفضة ، تطوع أساساً ألياف النوع I والنوع II A، ولأجل التسارع أو للقفز، تطوع أعداداً كبيرة من ألياف النوع II B . يمكن باعتبار ألياف النوع II A كألياف ينطبق عليها مقولة حمار كل المهن "Jack of all trades" حيث إنها تُمكن الحصان من امتلاك أفضل ما في الوجود من كلتا السرعة والقدرة على الاحتمال معاً .

مع أنه بداية تُستعمل ألياف الأنواع I ، II A في الأعمال التي تتطلب الجَلَدَ والاحتمال ، وفي المراحل المتأخرة تبدأ هذه في النفاد من الجليكوجين وتصبح متعبة

ولذا سوف تطوع بعد ذلك ألياف من النوع II B . إذا تمعنت بنفسك عند الجري بسرعة سير أو العدو بسرعة متوسطة Medium pace ، سوف تلاحظ مع أنك تكون متعباً ، فتستطيع عادة بشكل دائم أن تستخدم عدو قصير بأقصى سرعة Short sprint ، حتى لـ ١٥ متر أو ما شابه قبل أن تهوي ! هذا لأنك تستعمل ألياف عضلية مختلفة للعدو بأقصى سرعة عن تلك التي استعملتها سابقاً لتحافظ على سرعة عدو ثابتة وبطيئة بالمثل . وعندما تعدو بأقصى سرعة ، تصل إلى نقطة عندما لا تستطيع أن تستمر مطلقاً على قمة السرعة ، بل تكون مرتاحاً تماماً عند سرعة أقل لميلين آخرين . وفي هذه الحالة فإنك تستعمل عند السرعة الأبطأ ألياف لم تستعملها أثناء الجري الخفيض .

توزيع أنواع الألياف العضلية

Distribution of Muscle Fiber Types

عدد ونوع الألياف العضلية الموجودة في فرد ما محدد وراثياً . يبدو من المحتمل أن الأفراد الذين لديهم نسبة عالية من الألياف سريعة الانقباض سيكونون طبيعياً عدائين جيدين وأولئك الذين لديهم نسبة كبيرة من الألياف بطيئة الانقباض لديهم قدرة أكثر على القوة أو الاحتمال . يوجد في الإنسان ، ما عدا الصفوة من الرياضيين ، تقريباً عدد متساوٍ من الألياف بطيئة وسريعة الانقباض في العضلات المتحركة العامة . ومع ذلك ، وحتى في الحصان المتوسط ، فإن العضلات الكفلية Gluteal muscles تحتوي على ألياف من النوع II أكثر من ألياف النوع I إلى حد بعيد . وهذا يعني بالأساس أن الخيول مولودة بأهلية طبيعية بشكل أكبر للعدو بأقصى سرعة Sprinting عن الاحتمال Endurance ويجب أن تزداد مقدرتها على الاحتمال عن طريق التدريب خلال حياتها . إن معرفتنا عن توزيع أنواع الألياف داخل فرد ما ، وكذلك بين الأفراد ، مازالت في ازدياد . ونعرف الآن عن وجود الاختلافات الآتية .

الاختلافات بين السلالات Variations Between Breeds

تؤثر نوع سلالة الحصان على نسب أنواع الألياف العضلية المختلفة الموجودة . نسب الليفة بطيئة الانقباض (نوع I) (المتبقي سريعة الانقباض) الموجودة داخل العضلة الوسطى للكفل مبينة في (الجدول رقم ٣,١) كما سجلها Snow and Guy (1981) . وكما أوضحت دراسات إضافية أخرى الاختلاف الواسع تماماً في نوع الليفه داخل الأنواع .

يحدد نوع السلالة إلى مدى معين ، لأي نوع من التدريبات تكون الخيول مناسبة . يقترن بالشكل النموذجي للنوع ، خصائص نوع الليفه التي تحدد تناسب الأنواع لنظام أو تدريب معين . بينما تستطيع الخيول العربية أن تتسابق على مسافات قصيرة نسبياً وتظهر الخيول الإنجليزية المحسنة المقدرة على الاحتمال ، فإن الخيول العربية أفضل في الاحتمال والخيول الأصيلة المحسنة أكثر سرعة . من الواضح أن هذا ليس فقط راجعاً إلى خصائص أليافها العضلية ، ومع ذلك ، تساهم الخصائص العضلية الموروثة في الأداء الخاص .

الجدول رقم (٣,١). تركيب الليفة في عضلة الكفل الوسطى لأنواع مختلفة من الخيول.

(معدل بتصرف من Snow & Guy 1981)

السلالة	النوع I (٪)
الفرس الربعي (سريع العدو) Quarter horse	٩
الحصان الأصيل المحسن Thoroughbred	١١
الحصان العربي	١٤
الحصان القياسي Standardbred	١٨
الفرس شتلاند القزم Shetland pony	٢١
الخيول الصغيرة Pony	٢٣
الحصان من سلالة الحمار	٢٤
الحصان الصياد (المطارد) الثقيل Heavy hunter	٣١

الاختلافات بين العضلات الفردية Variations Between Individual Muscles

عضلات الحصان مختلفة ولها تركيب ليفي مختلف يعكس دورها. وتمتلك عضلات الربع الخلفي، عموماً، نسبة أعلى من ألياف النوع II ، ما يعكس الحقيقة أنها المسؤولة أساساً عن توليد القوة الحركية. يوجد بعضلات الطرف الأمامي نسبة أعلى من القوة الحركية . تمتلك عضلات الأطراف الأمامية نسبة أعلى من ألياف النوع I مقارنة مع الأطراف الخلفية مما يعكس مقدرتها على تدعيم وزن الحصان خلال الحركة .

الاختلافات داخل العضلات الفردية Variations Within Individual Muscles

في عضلة معينة ، فإن توزيع أنواع الليفه ليس موحداً . يوجد ألياف النوع II أكثر في سطح عضلة البطن من داخلها (انظر الجدول رقم ٣.٢) . بوجود ألياف النوع II مركزة على سطح العضلة ، فإنها تقصر أكثر نسبياً عندما تنقبض ألياف النوع II عما لو كانت عميقة داخل عضلة البطن . يساهم هذا في توليد قوة أكبر لأنه يحدد تأثير العضلة عن طريق كمية فعل الرافعة (القوة) التي تستطيع إحداثها . بوجود الألياف العضلية الأكثر قوة على السطح ، فإن المسافة التي يمكن خلالها إحداث قوتها تكون بأقصاها .

الجدول رقم (٣,٢). توزيع أنواع الليفة في الخيول الأصيلة الخمسة عمر سنتان في عينات العضلة المأخوذة عند عمقين مختلفين عند نهاية موسم تدريبها الأول .

	سطحي (بعمق ٤ سم)		عميق (بعمق ٩ سم)	
النوع	المتوسط (٪)	المدى (٪)	المتوسط (٪)	المدى (٪)
I	١١	صفر — ٢٠	٢٤	صفر — ٣٥
II A	٤٠	٣٢ -٦١	٤٧	٣٢ -٦١
II B	٤٩	٣٣ -٧٩	٣٠	١٠ -٥٥

يتصرف من : Sewell *et al.* (1994)

الاختلافات بين الخيول من أجناس مختلفة Variations Between Horses of Different Sexes

أوضحت بعض الدراسات وجود فروق في نسب أنواع الألياف العضلية والمرتبطة بالفروق بين الجنسين ، فمثلاً ، تميل الأحصنة Stallions أن يكون لديها ألياف النوع II A أكثر من الأفراس Mares ما يقترح أنها أكثر قوة وقدرة على الاحتمال . يرى البعض أنه قد تعكس الفروق في نوع الليفة أسلوب حياة الحصان . وأوضحت دراسة واحدة لعدد كبير من الأحصنة والأفراس الأصيلة من الولادة حتى عمر ٦ سنوات وجود الفرق من الولادة (Roneus *et al.*, 1991) . وجد مع التقدم في العمر زيادة تدريجية في نسبة ألياف النوع II A سائدة على حساب ألياف النوع II B وزيادة صغيرة في ألياف النوع I . وبكل الأحوال فإن نسبة ألياف النوع II A دائماً أعلى بحوالي ٥ ٪ في الحصان عند كل الأعمار . وكما لم تجد دراسات أخرى أي فروق معنوية بين الجنسين .

الاختلافات بين أفراد الخيول من نفس السلالة

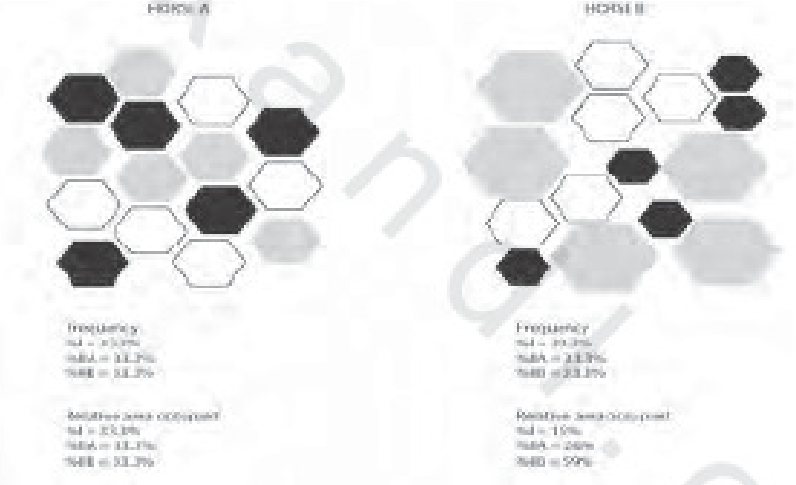
Variations Between Individual Horses of the Same Breed

تُظهر أفراد النوع الواحد من الخيول فروقاً في تركيب عضلاتها . بمعرفة هذا ، فلقد أجريت محاولات لتوقع لأي مسافة يمكن أن تتلاءم بأفضلية معها أفراد الخيول الأصيلة ، حتى يمكن تدريبها وفقاً لذلك . فلم يثبت نجاح ذلك من الناحية العملية لأنه يوجد العديد من العوامل الأخرى التي تشارك في جعل الخيول مناسبة لمسافات محددة وأيضاً مشاكل استعمال عينة واحدة للعضلة لتعكس بدقة النسبة الكلية للألياف العضلية داخل جميع العضلات الرئيسة المتحركة للحصان .

الاختلافات بين عينات الخزع العضلية Variations Between Muscle Biopsy Samples

يختلف توزيع نوع الليفة العضلية كما وصف من قبل ، تبعاً للعمق داخل العضلة حيث توجد ألياف النوع II أكثر سطحياً ، وكذلك أيضاً تبعاً لموقع أخذ العينة بالضبط . لذلك ليست بالضرورة أن تمثل كل العضلة عينة واحدة فردية . وإذا ما

أخذنا نسب الألياف العضلية بالاعتبار ، علينا أن نجد نسبة مساحة القطاع العرضي الكلية للعضلة ، وليس ببساطة النسب الرقمية . كمثال (الشكل رقم ٣,١٠) لو أن لدينا حصان (أ) وحصان (ب) كليهما بنفس نسبة الألياف من النوع II B ، لكن في الحصان (ب) ألياف النوع II B أعرض ، ينتج عن ذلك مساحة قطاع عرضي أكبر لألياف النوع II B . لذا مع أن نسبة أنواع الألياف العضلية المختلفة هي نفسها ، فيستطيع الحصان (ب) إظهار قوة أكبر؛ لأن المساحة النسبية التي تشغلها ألياف النوع II B هي تقريباً ضعف ما للحصان أ .



الشكل رقم (٣,١٠). عندما تأخذ في الاعتبار نسب أنواع الليفة فمن المهم أن تعتبر المساحة النسبية التي يشغلها كل نوع من الألياف . النوع I = أسود ، النوع II A = أبيض ، النوع II B = رمادي .

إذا ما حاولنا أن نستخدم النتائج من عينات العضلة لتوضح الأداء فإننا نحتاج أن نتأكد من أخذ العينات من نفس المساحة النسبية في العضلة لجميع الخيول وأن جميع

الخيول عند نفس المرحلة من التدريب ، لأننا نعرف أن التدريب يستطيع أن يحور نسب أنواع الألياف إلى مدى معين .

نقاط مفتاحيه **KEY POINTS**

- تمتلك الخيول حوالي ٧٠٠ عضلة فردية تشكل حوالي ٤٠—٥٠ ٪ من كتلة الجسم الكلية .
- الأنواع الثلاثة الرئيسية للعضلات هي : الملساء (لا إرادية) ، المخططة (هيكلية أو إرادية) والقلبية (القلب) .
- تصنف العضلات إلى حزم عضلية ، وهي تتكون بدورها من ألياف عضلية ، كل ليفة عضلية هي خلية عضلية مفردة .
- تنتظم الخلايا العضلية في وحدات حركية. تتكون الوحدة الحركية من العصب الحركي والألياف العصبية التي ينشطها (يغذيها عصبياً Innervate) والتي تكون دائماً من نفس نوع الليفة .
- ربما يوجد للحركات الدقيقة عشرة ألياف عضلية فقط لكل عصب حركي ، لكن قد يتوفر للقوة Power حتى ٢٠٠٠ ليفه عضلية لكل عصب حركي .
- تستقبل جميع العضلات مستوى خط قاعدي من التنبيه يعرف بالتوتر Tone . إذا قطع العصب وغاب التوتر تضمر العضلة .
- تحتوي الخلايا العضلية على أنوية ، حبيبات جليكوجين ، قطيرات دهنية ، ميوجلوبين ، ميتوكوندريا وبروتينات قابلة للانقباض (أكتين وميوسين) . الوحدة الوظيفية للانقباض هي الساركومير (القطعة العضلية Sarcomere) .
- تنتقل النبضات العصبية إلى وخلال العضلة عبر الغلاف العضلي Sarcolemma والأنيبيبات العرضية ، مؤدياً إلى تدفق أيونات الكالسيوم من الشبكة الإندوبلازمية العضلية إلى سيتوبلازم الخلية العضلية .

تابع نقاط مفتاحية

- أدينوسين ثلاثي الفوسفات مطلوب لكل من الانقباض والانبساط .
- تتناسب قوة الانقباض مع عدد الوحدات الحركية المنشطة (التي يتم تطويعها) .
- للأعصاب ضيقة القطر عتبة منخفضة وتُنبه (تُطوع) قبل الأعصاب عريضة القطر .
- ليس بالإمكان أن تُطوع جميع الوحدات الحركية تحت التحكم الإرادي .
- الانقباض متعادل التوتر Isotonic contraction = انقباض نفس التوتر . التوتر ثابت ويتغير (يقصر) طول العضلة. يطلق عليه أيضاً الانقباض ذو المركز العام Concentric contraction .
- الانقباض متساوي القياسات Isometric contraction = انقباض نفس الطول . طول العضلة ثابت لكن يتغير (يزداد) التوتر .
- الطول والتوتر= جميع العضلات الإرادية تكون دائماً تحت توتر طفيف ولديها طول أمثل والذي عنده تصبح قادرة على إظهار معظم التوتر .
- تتركب العضلة من نوعين أساسين من الألياف I (عضلة تتحمل الحمراء) و II (لعضلة البيضاء للعدو السريع) ، ويمكن أن تنقسم ألياف النوع II إضافياً إلى ألياف II A و II B .
- تطوع الألياف عادة في ترتيب حجم أعصابها الحركية بمعنى I ← II A ← II B وسرعة انقباضهم .
- تتركب معظم العضلات من نسب مختلفة من ألياف الأنواع I وII A وII B ، تتأثر تلك النسب بعوامل مثل موقع ووظيفية وعمق العضلة وسلالة وجنس وعمر الأفراد .