محاضرات طلبة الدكتوراه

كلية التربية البدنية
وعلوم الرياضة

المحاضرة الثالثة

فسيولوجيا الجهاز العضلي

الأسس البنيوية والوظيفية والتكيفات الناتجة عن التدريب الرياضي

الجزء الأول

أ.د .محمد توفيق عثمان أغوان

أستاذ فسلجة التدريب الرياضي

العام الدراسي2025–2026

مخرجات التعلم

بنهاية هذا الجزء، يُتوقع من طالب الدكتوراه أن يكون قادرًا على:

- تحليل العضلة الهيكلية بوصفها منظومة بنيوية ووظيفية وأيضية.
- تفسير التسلسل الهرمي للبنية العضلية وعلاقته بإنتاج القوة.
- شرح دور الساركومير والبروتينات المنظمة والهيكلية في الانقباض.
- تحليل مساهمة الاتصال العصبي العضلي وتجنيد الوحدات الحركية في تنظيم القوة.
- تفسير مراحل الاستثارة والانقباض والاسترخاء وفق نموذج الانزلاق الخيطي.

منظومة وظيفية متكاملة :العضلة الهيكلية

تُنفّذ العضلة الحركة، لكنها أيضًا تستجيب للأحمال وتتكيف معها وتشارك في تنظيم الاتزان الداخلي.

بنية

تنظيم عصبي

أيض وتكيف

تتفاعل المستويات البنيوية والعصبية والأيضية والتنظيمية لتحديد الأداء والاستشفاء.

التسلسل البنيوي للعضلة الهيكلية

العضلة	—	Muscle
الحزمة	—	Fascicle
الليفة	—	Muscle fiber
الليفة	—	Myofibril
الساركومير	—	Sarcomere

ينتقل تنظيم القوة من البنية الكلية إلى الوحدات المجهرية التي تولّدها.

الوحدة الوظيفية لإنتاج القوة :الساركومير

يتكرر الساركومير على امتداد الليفات العضلية .ويبلغ طوله في الراحة قرابة 2.2–2.0 ميكرومتر وفق الملف.

خيط الأكتين
رفيع

تداخل الخيوط
مواقع الجسور العرضية

خيط الميوسين
سميك

الشد مقدار التداخل الملائم لتوليد القوة–تحدد علاقة الطول.

المناطق الرئيسة في الساركومير

المنطقة	مكونها أو وظيفتها
Z-line	حد الساركومير وموقع تثبيت الأكتين
A-band	طول خيوط الميوسين مع مناطق التداخل
I-band	منطقة تحتوي الأكتين دون الميوسين
H-zone	منطقة وسطية تحتوي الميوسين دون الأكتين
M-line	مركز تثبيت خيوط الميوسين

البروتينات المنظمة للانقباض

- التروبوميوسين يحجب مواقع ارتباط الميوسين على الأكتين في حالة الراحة.
- Troponin C بالوحدة Ca^{2+} التروبونين يستشعر الكالسيوم، ويرتبط.
- ارتباط الكالسيوم يغير شكل المركب ويزيح التروبوميوسين.
- انكشاف مواقع الارتباط يسمح بتكوين الجسور العرضية وبدء الانقباض.

البروتينات الهيكلية ودلالتها التدريبية

Titin

يمتد بين Z وM العضلة، ويسهم في المرونة السلبية واستعادة طول.

Nebulin

يساعد في تثبيت طول خيوط الأكتين، ويعمل كمرجع بنيوي جزيئي.

يشير الملف إلى ارتباط التدريب اللامركزي بتغير خصائص التيتين والقوة وكلفة الانقباض.

البنية تفسر خصائص الأداء العضلي

- ترتبط مساحة المقطع العرضي للعضلة بقدرتها على إنتاج القوة.
- يسهم تركيب الميوسين في اختلاف سرعة الانقباض بين الألياف.
- تتحمل مكونات الساركومير توترًا مرتفعًا أثناء الانقباضات اللامركزية.
- قد تحسن التكيفات البنيوية انتظام القوة والاقتصاد الطاقي وتؤخر التعب.

المشبك العصبي العضلي

جهد فعل عصبي

إفراز أستيل كولين

جهد فعل عضلي

وصول الإشارة إلى نهاية العصب يفتح قنوات الكالسيوم، فيحفز إفراز الناقل العصبي وبدء الاستجابة في غشاء الليف.

الوحدة الحركية وتنظيم القوة

جميع الألياف التي يعصبها +عصبون حركي واحد

- الوحدات الصغيرة تدعم التحكم الدقيق في الحركات.
- الوحدات الأكبر تضم أليافًا أكثر وتلائم إنتاج قوى كبيرة.
- حجم الوحدة الحركية يسهم في الفروق بين الدقة والقوة والأداء الانفجاري.

تجنيد تدريجي للوحدات الحركية :مبدأ الحجم

قوة عالية	قوة متوسطة	قوة منخفضة
دخول وحدات أكبر وألياف سريعة Type II	تجنيد وحدات إضافية مع ازدياد متطلبات القوة	وحدات صغيرة منخفضة العتبة، وألياف بطيئة غالبًا

زيادة القوة تتطلب زيادة التجنيد وفق ترتيب تصاعدي للعتبة.

ترميز التردد العصبي

- القوة تتأثر بعدد الوحدات المجندة وبمعدل تكرار الإشارات العصبية.
- زيادة التردد تؤدي إلى تراكب الانقباضات وارتفاع القوة.
- عند التنبيه المتكرر قد يتطور الانقباض إلى تتاني كامل.
- تسهم التكيفات العصبية المبكرة في تحسن القوة قبل ظهور تضخم عضلي واضح.

التزامن والتحكم المركزي

القشرة الحركية
تحدد نمط التفعيل

تجنيد وتردد
الوحدات الحركية

قوة عضلية
موجهة

يزيد التزامن القوة اللحظية في الجهود القصوى والانفجارية، بينما تتطلب المهارات الدقيقة تدرجًا وتحكمًا أنعم.

التعب المركزي قد يحد من التنشيط قبل ظهور التعب الطرفي.

التسلسل العام :الاستثارة والانقباض



.تربط هذه السلسلة بين التنبيه العصبي وبداية إنتاج القوة داخل الساركومير

الكالسيوم يفتح مواقع الارتباط

Ca^{2+}

Troponin C

إزاحةTropomyosin

تنكشف مواقع ارتباط الميوسين على الأكتين

.ينطلق الكالسيوم من الشبكة الساركوبلازمية بعد انتقال جهد الفعل عبر الأنابيب المستعرضة

دورة الجسر العرضي

تهيئة	يرفع طاقة رأس الميوسين ATPتحلل
ارتباط	رأس الميوسين يرتبط بالأكتين
سحب	Power Strokeويحدث Piتحرر
انفصال	جديد يفصل الميوسين ATPارتباط
إعادة تهيئة	يعيد الرأس لوضع الاستعداد ATPتحلل

الانقباض ثم الاسترخاء

الانقباض

تكرار الجسور العرضية يزحزح الأكتين نحو مركز الساركومير ويقصّر الوحدة.

الاسترخاء

إلى الشبكة الساركوبلازمية بواسطة Ca^{2+} توقف جهد الفعل وضخ مضخاتSERCA.

انخفاض الكالسيوم يعيد حجب مواقع الارتباط، فتتوقف الجسور وتسترخي العضلة.

من الإشارة العصبية إلى القوة ثم الارتخاء

تنبيه عصبي

Ca^{2+}تحرر

انكشاف المواقع

دورة الجسور

تقصير الساركومير

Ca^{2+}إعادة ضخ

ATP.تتطلب العملية تكاملًا بين الجهاز العصبي والكالسيوم والبروتينات الانقباضية و

أسئلة للمناقشة العلمية

- كيف تفسر البنية الهرمية انتقال القوة من الساركومير إلى الحركة؟
- كيف يتغير تجنيد الوحدات الحركية مع ارتفاع متطلبات القوة؟
- ما الدور التنظيمي للكالسيوم والتروبونين والتروبوميوسين؟
- لماذا يحتاج رأس الميوسين إلى ارتباط ATP كي ينفصل عن الأكتين؟
- كيف يختلف التكيف العصبي المبكر عن التكيف البنيوي للعضلة؟