محاضرات طلبة الدكتوراه

كلية التربية البدنية
وعلوم الرياضة

الطاقة الحيوية في فسيولوجيا الجهد البدني

نظم إنتاج الطاقة، تنظيمها، وتكيفاتها التدريبية

الجزء الثاني

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 الطاقة الحيوية بوصفها منظومة تتكامل فيها الأجهزة والأنسجة.
- تفسير التداخل بين نظم إنتاج الطاقة في ظروف الجهد المختلفة.
- شرح التنظيم الفسيولوجي لإنتاج ATP على المستويات الجزيئية والخلوية والجهازية.
- تحليل الاستجابة الأكسجينية والتمثيل الغذائي أثناء الجهد والاستشفاء.
- مقارنة التكيفات الهوائية واللاهوائية وتفسير التعب العضلي بمنظور متكامل.

الطاقة الحيوية منظومة متعددة الأجهزة

.إنتاج الطاقة يتطلب تنسيقًا بين أنظمة الدعم والتنظيم والتنفيذ، ولا تفسره العضلة وحدها

الجهاز العصبي
التحكم والتجنيد

القلب والرئتان
النقل والإمداد

الجهاز الهرموني
توافر الركائز

العضلة والميتوكوندريا
إنتاج ATP واستخدامه

.تتوافق استجابة كل جزء مع الطلب الطاقي المتغير أثناء الأداء

تكامل نظم إنتاج الطاقة

.تعمل النظم الثلاثة منذ بداية الجهد، وتتغير مساهمتها النسبية وفق الشدة والمدة والحالة التدريبية

الفوسفاتي
إمداد فوري

التحلل السكري
إمداد سريع

الأكسدة الهوائية
إمداد مستمر

تداخل زمني مستمر مع سيادة نسبية تتبدل حسب متطلبات الأداء

ATPسرعة إعادة تخليق :النظام الفوسفاتي

$$PCr + ADP \rightleftharpoons ATP + Cr$$

- يحفز إنزيم كرياتين كيناز نقل الفوسفات من PCr إلى ADP.
- يوفر ATP بسرعة عالية في الثواني الأولى من الجهد القصوي.
- لا يحتاج التفاعل مباشرة إلى الأكسجين، وتبقى سعة النظام محدودة بمخزون PCr.
- تؤثر سرعة إعادة تكوين PCr في القدرة على تكرار الانطلاقات والجهود القصوى.

مسار سريع ومرن :التحلل السكري

- يسهم التحلل السكري في إعادة تخليق ATP بسرعة عندما يرتفع الطلب.
- يتسارع المسار عند الشدة العالية، ويعمل بوتيرة أكثر توازنًا في الشدات دون القصوى.
- تدخل نواتجه الوسيطة في المسارات الهوائية عند توافر الظروف المناسبة.
- تتأثر مساهمته بقدرة الخلية على تدوير NAD+ والمحافظة على البيئة الأيضية.

ناقل طاقة وليس مرادفًا للتعب :اللاكتات

إنتاج اللاكتات
في السيتوسول

نقل بين الخلايا
أو داخلها

أكسدة أو استخدام
في أنسجة أخرى

NADHيساعد تحويل البيروفات إلى لاكتات على إعادة أكسدة NAD+إلى ، ما يدعم استمرار التحلل السكري.

تركيز اللاكتات قد يدل على سرعة التحلل السكري، لكنه لا يحدد وحده سبب التعب.

في استمرار التدفق الأيضي NAD+دور

$$NAD^+ \rightleftharpoons NADH$$

- ينقلNAD الإلكترونات بين التفاعلات والمسارات الأيضية.
- يستمر التحلل السكري NAD+إلى NADH يجب إعادة أكسدة كي.
- في الظروف الهوائية، تسهم سلسلة نقل الإلكترونات في إعادة توليد NAD+.
- يدعم استمرارية التدفق الأيضي وإنتاج NADH/NAD توازنATP.

التنظيم الفسيولوجي متعدد المستويات

جزيئي	ATPينشطان إنزيمات إنتاج AMPو ADP
خلوي	تنسيق الركائز والميتوكوندريا والكالسيوم
جهازي	الجهاز العصبي والهرموني والقلب التنفسي

الإشارات العصبية والهرمونية

- التحكم العصبي يحدد التجنيد العضلي وشدة الاستثارة وتوقيت الاستجابة.
- الإبينفرين يعزز تعبئة الغليكوجين والدهون مع ارتفاع متطلبات الجهد.
- يتراجع تأثير الإنسولين نسبيًا أثناء الجهد، ويسهم الغلوكاغون في دعم إمداد الغلوكوز.
- تتكامل الإشارات الاستباقية مع التغذية الراجعة من مؤشرات حالة الطاقة داخل الخلية.

مؤشرات واستجابات :الطاقة أثناء الجهد

المؤشر	ما الذي يوضحه؟
VO_2	معدل استخدام الأكسجين والقدرة الهوائية الفعلية
METs	استهلاك الأكسجين نسبةً إلى كتلة الجسم للمقارنة
RQ / RER	مؤشر تقريبي لنمط الركائز الأيضية المستخدمة

تُفسّر المؤشرات مع مراعاة شدة الجهد ونمط التنفس والسياق الفسيولوجي.

من عجز الأكسجين إلى الاستشفاء

بعد الجهد	جهد ثابت دون الأقصى	بداية الجهد
EPOCارتفاع استهلاك الأكسجين	اقتراب من الحالة المستقرة	عجز أكسجيني مؤقت

EPOCالمكوّن السريع من PCrيرتبط بإعادة .وتشبع الأكسجين .والمكوّن البطيء يعكس استعادة الاتزان الأيضي والحراري والهرموني

التكيفات الناتجة عن التدريب الهوائي

- زيادة الكثافة الميتوكوندرية والسعة التأكسدية للعضلة.
- ارتفاع نشاط الإنزيمات المؤكسدة وتحسن تدفق الركائز عبر المسارات التأكسدية.
- تحسن أكسدة الدهون عند الشدات دون القصوى مع المحافظة على مخزون الغليكوجين.
- تحسن الاقتصاد الطاقي والقدرة على الاستمرار عند الشدة نفسها أو أداء شدة أعلى.

التكيفات الناتجة عن التدريب اللاهوائي

- ارتفاع نشاط الإنزيمات التحللية وتحسن سرعة إعادة تخليق ATP.
- زيادة القدرة التنظيمية داخل العضلة للتعامل مع تغيرات الحموضة.
- تسارع إعادة تخليق PCr، خصوصًا بين الجهود القصوى المتكررة.
- تحسن القدرة على المحافظة على القوة والسرعة مع دمج التدريب اللاهوائي بالهوائي.

الفروق الطاقية بين الرياضيين والفعاليات

المقارنة	ملامح وظيفية بارزة
رياضي وغير رياضي	تنظيم أدق وتكيف أكبر لدى الرياضي، مع اختلاف الاستجابة والاستشفاء
سرعة وتحمل	وتحمل الاضطراب مقابل إنتاج هوائي ATPسرعة إعادة مستقر واقتصاد أعلى
ذكور وإناث	تُفسر الفروق ضمن السياق التدريبي والهرموني ونوع الجهد دون تعميم

مركزي وطرفي :التعب العضلي

التعب المركزي

تراجع القدرة العصبية على تنشيط الوحدات الحركية بالمستوى المطلوب

التعب الطرفي

اضطراب الانقباض أو الاقتران بين الاستثارة والانقباض والبيئة الخلوية

يتفاعل المستويان، ويعكسان اختلالًا مؤقتًا بين الطلب والقدرة على التنظيم.

محددات التعب الطرفي

- تراكم الفوسفات غير العضوي قد يخفض القوة ويؤثر في حساسية الخيوط للكالسيوم.
- قد يغير نشاط الإنزيمات وديناميكية الكالسيوم وخصائص البروتينات القابضة H+ارتفاع.
- اضطراب إطلاق الكالسيوم وإعادة ضخه يضعف الاقتران بين الاستثارة والانقباض.
- ، ولا تختزل في نفاد الوقودATPتتفاعل هذه العوامل مع استمرار إنتاج.

التعب استجابة تنظيمية وقائية

يمكن فهم التعب كاستجابة تحد من شدة الأداء عندما تتجاوز المتطلبات القدرة الآنية على التنظيم.

طلب طاقي مرتفع

فجوة تنظيمية

تراجع مؤقت في الأداء

التدريب يرفع القدرة التنظيمية ويؤخر ظهور التعب، لكنه لا يلغي التعب.

خلاصة الجزء الثاني

- إنتاج الطاقة ينتج عن منظومة متكاملة تشمل الأعصاب والنقل القلبي التنفسي والهرمونات والعضلة.
- تعمل نظم الطاقة بالتزامن، مع تغير المساهمة النسبية بحسب طبيعة الجهد.
- بين استجابة الجسم وكلفة الأداء والاستشفاء RERو METsو VO_2تربط مؤشرات.
- تختلف التكيفات الهوائية واللاهوائية، ويكمل كل منها الآخر في إعداد الرياضي.
- التعب متعدد العوامل، وينشأ من تفاعل مركزي وطرفي وخلوي.

أسئلة للمناقشة العلمية

- كيف تسهم الإشارات العصبية والهرمونية في مواءمة إنتاج ATP مع متطلبات الجهد؟
- ما دور اللاكتات في نقل الطاقة واستمرار التحلل السكري؟
- كيف يميز VO_2 بين عجز الأكسجين والحالة المستقرة ومرحلة الاستشفاء؟
- ما التكيفات التي تفسر تحسن تكرار الجهود القصوى بعد التدريب؟
- لماذا لا يصح تفسير التعب العضلي بنفاد ATP أو تراكم اللاكتات وحدهما؟