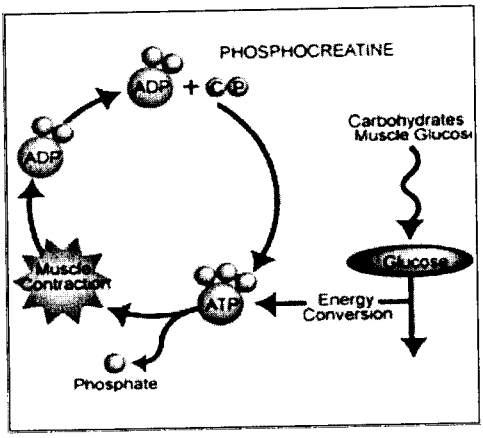
الفصل التاسع

أنظمة الطاقـــة

صورة (٨١)

تعتمد أسس الأيض بالنسبة للتمرينات الرياضية والتدريبات بشكل أساسي على فهم طبيعة الإنتاج واستخدام هذه الطاقة في الأنظمة الحيوية «البيولوجية»، فيمكننا من خلال التعرف على كيفية إنتاج هذه الطاقة أن نقوم بتصميم برامج تدريب فعالة ومنتجة، ويمكننا أيضًا أن نتعرف على كيفية إنتاج هذه الطاقة بالنسبة لأنواع محددة من التمارين وتعديلها باستخدام البرامج الخاصة بالتدريبات.

صورة (٨٢)



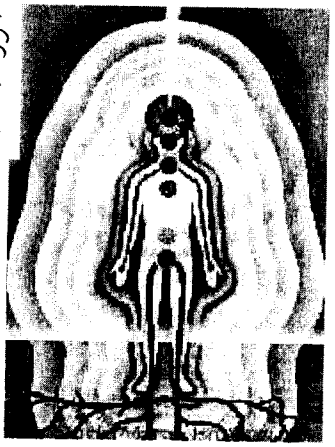
تعريف الطاقة:

يمكن أن يتم تعريفها كالآتي : **هي القدرة على أداء العمل**، وهناك أنواعٌ متعددة من الطاقة؛ فهناك **الطاقة الميكانيكية والطاقة الكيميائية والطاقة الكهرومغناطيسية والطاقة الذرية**... إلخ، ويمكن أن يتم تحويل أحد أنواع الطاقة إلى أخرى وهو عمل ضروري في كل نشاط يقوم به الفرد، ففي النظام الحيوي يكون التحويل من الطاقة الكيميائية إلى الطاقة الميكانيكية التي هي أحد العناصر الهامة لأداء العديد من الوظائف، أهمها **الحركة**.

وتعتمد عملية إنتاج وسريان الطاقة في النظام الحيوي أساسًا على تحويل الطعام بما يحتويه من جزء كبير من الكربوهيدات والبروتين والدهون والذي يحتوي بدوره على طاقة كيميائية إلى أنواع يمكن استخدامها من الطاقة.

فالطاقة الناتجة عن تكسير هذه العناصر الكيميائية تطلق كم من الطاقة يكون ضروريًّا لأداء العمل مثل تحريك العضلات وانقباضها.

صورة (٨٣)



ويطلق على مصطلح الطاقة الناتجة من تكسير الجزيئات الكيميائية إلى ذرات صغيرة «الأيض الهدمي»، أما عملية تجميع الذرات الصغيرة وتحويلها إلى جزيئات باستخدام الطاقة الناتجة عن التفاعلات الهدمية فيطلق عليها مصطلح «الأيض البنائي» وأحد الأمثلة على الأيض الهدمي هي تكسير البروتينات وتحويلها إلى أحماض أمينية، بينما تحويل الأحماض الأمينية إلى بروتينات فهي مثال عملية الأيض البنائي. ويتوقف إنتاج الطاقة على التفاعلات التي عادة ما تكون ناتجة عن عملية الأيض الهدمي.

وهناك بعض التفاعلات التي تتطلب طاقة وتدخل في عمليات الأيض البنائي. أما عملية الأيض «عملية البناء والهدم» فهي مجموع ما يحدث في كل هذه التفاعلات في النظام البيولوجي سواء كانت خارجية أو داخلية أم منتجه لطاقة أو مستهلكة لها. والمفهوم الأساسي لعملية الأيض البنائي المستهلك للطاقة يتم من خلال الجزئ الوسطي لمسمي أدينوسين ثلاثي الفوسفات «ATP» مما ينتج عنه نقل الطاقة من تفاعلات «كيميائية» إلى تفاعلات «حركية، ميكانيكية».

المصدر الأساسي للطاقة
الأدينوسين ثلاثي الفوسفات - ATP

يتكون هذا المركب من الأدينين والعنصر الأساسي به هو غاز النيتروجين، كما يحتوي على عنصر الرايبوز خماسي «سكر» والكربون وثلاث مجموعات من الفوسفات، وينتج عن التحلل المائي لأحد مجموعات الفوسفات مركب أدينوسين ثنائي الفوسفات «ADP»، أما التحلل المائي للمركب ثنائي الفوسفات فينتج عنه مركب ادينوسين أحادي الفوسفات «AMP»

يقوم مركب «ATP» «الأدينوسين ثلاثي الفوسفات» بتوفير طاقة للمجهود العضلي والتي ينشأ عنها الحركة العضلية للفرد. لذا فقد تم تصنيف هذا المركب كجزئ عالي الطاقة وذلك لأنه يقوم بتخزين كمية كبيرة من الطاقة في الروابط الكيميائية الموجودة بمجموعات جزئ الفوسفات. وينتج عن تكسير هذه الروابط كمية من الطاقة تستخدم للقيام بتفاعلات متعددة بداخل الجسم،ونظرا لتخزين خلايا العضلات لمركب «ATP» لكمية محدودة، ونظرًا لأن المجهود العضلي يتطلب تزويد سريع من هذا المركب لتوفير الطاقة اللازمة للجهد العضلي، لذلك يجب أن تكون عمليات إنتاج مركب «ATP» موجودة بداخل الخلية.

* مخطط عام لعملية الأيض

البنية الكيميائية لمركبات «ATP» و«ADP» و«AMP».

* أنظمة الطاقة الكيميائية

تحتوي الخلايا العضلية لجسم الإنسان على ثلاثة أنظمة من الطاقة اللازمة لإنتاج مركب «ATP» وهي:

- **نظام رابطة الفوسفات**: «هي عملية أيض بنائي، على سبيل المثال، ظهور أحد هذه الروابط عند غياب أحد جزيئات الأكسجين»
- **النظام الجلوكوزي «السكر»**: والذي يحتوي على نوعين من سكر الجلوكوز، وهما: سكر سريع الذوبان، وسكر بطئ الذوبان.
- **النظام الأكسجيني**: وهو يعتمد على الأكسجين بشكل أساسي وهو يتطلب جزيئات أكسجين لكي يصبح فعالًا.

ومن خلال العناصر الثلاثة للغذاء «الكربوهيدرات والدهون والبروتين» يمكن الاعتماد على الكربوهيدرات فقط كأحد عناصر الأيض التي تنتج طاقة بدون وجود عنصر الأكسجين؛ لذا فأهمية الكربوهيدرات في عملية الأيض البنائي لا يمكن أن تكون ذات قدر بخس. فكل عناصر أنظمة الطاقة فعالة في وقت من الأوقات لذا يعتمد استخدام كل نظام بشكل أساسي على مدى حدة النشاط وكثافته ثم على زمن هذا النشاط.

نظام رابطة الفوسفات:

يوفر هذا النظام مركب «ATP» اللازم بالنسبة للأنشطة قصيرة المدة «على سبيل المثال، تمرينات الوزن والعدو» ويكون فعالًا أيضًا في بداية كافة التمارين بغض النظر عن حدتها أو كثافتها. ويعتمد هذا النظام على التفاعلات الكيميائية لمركب «ATP» وكرياتين الفوسفات «الفوسفات الثنائي» بجانب أنزيمات بلازما العضلات وكرياتين كيناس. وتساعد أنزيمات بلازما العضلات على تحليل مركب «ATP» مائيًا لتكوين مركب «ADP» وفوسفات عضوى «PI» وطاقة. أما إنزيم كرياتين كيناس فيساعد على تجميع مركب(ATP» من كرياتين الفوسفات و(ADP» والذي يوفر جزئ ثالث لمجموعة الفوسفات الثنائية التي تتفاعل مع مركب «ADP» لتكوين مركب «ATP».

المعادلة :

$$ATP \xrightarrow{Atpsre\ Myosin} Pi + AOP + Energy$$

وتوفر هذه التفاعلات طاقة من المعدل المرتفع. ونظرًا لتخزين مركبي «ATP» وكرياتين الفوسفات بمقدار ضئيل في العضلات، فلا يوفر نظام رابطة الفوسفات الطاقة اللازمة للأنشطة المستمرة لمدة طويلة.

ويحتوي النوع الثاني «الانقباض السريع للعضلات» لألياف العضلات على تركيزات أعلى من مركبات الفوسفات أكثر من النوع الأول لألياف «الانقباض البطئ للعضلات» أحد التفاعلات الهامة الأخرى في هذا النظام هي تفاعل أنزيم ميوبكيناس:

$$ADP + AMP \xrightarrow{Miobkinase} ATP$$

$$2ADP \xrightarrow{Miobkinase} ATP + AMP$$

ويوفر هذا التفاعل مصدر متوسط من «ATP»، وهو هامٌ أيضًا؛ لأن مركب «AMP» مطلوب لسكر الجلوكوز.

التحكم بنظام رابطة الفوسفات

ينظم نشاط كرياتين كيناس عملية كسر مركب كرياتين فوسفات. ويولد زيادة تركيز الأنزيم البروتيني في البلازما الخاص بمركب «ATP» نشاط كرياتين كيناس أما تركيز مركب «ADP» فيحول دون ذلك في بداية التمرين، ويتم تحليل مركب «ATP» مائيًا إلى مركب «ADP» مما ينتج عنه طاقة للمجهود العضلي، وتؤدي هذه الزيادة في تركيز مركب «ADP» إلى تنشيط كرياتين كيناس ليساعد على تكوين مركب «ATP» من كسر كرياتين فوسفات. ويبقي نشاط كرياتين كيناس محسن في حالة استمرار التمرين بكثافة مرتفعة. أما إذا انقطع التمرين أو استمر بكثافة ضئيلة كافية للسماح لنظام الجلوكوز أو النظام الأكسيجني بتوفير نسبة ملائمة من مركب «ATP» اللازم لاحتياجات الخلايات العضلية، فإن نسبة تركيز الأنزيم البروتيني تزداد في البلازما الخاص بمركب «ATP» وينتج عن هذه الزيادة في مركب «ATP» نقصًا في نشاط كرياتين كيناس.

تحلل «السكر»

وينتج هذا السكر من تحلل الكربوهيدرات ويتم استخدام الجليكوجين المخزن في العضلات أو السكر الموجود في الدم لإنتاج مركب حمض البيروفيك.

وتحتوي عملية التحويل السكري على تسعة تفاعلات أنزيمية مساعدة، توجد هذه الأنزيمات في برتوبلازما الخلايا «في خلايا العضلات التي يشار إليها بالأنزيم البروتيني في البلازما»، ويقوم هذا النظام بتوريد مصدر الطاقة من نظام رابطة الفوسفات للنشاط العضلي مرتفع الكثافة.

وتسلك عملية تحلل السكر أحد الطريقين: إما التحلل السكري السريع أو البطئ.

ففي أثناء التحليل السريع للسكر يتم تحويل مركب بيروفيك إلى حمض اللاكتيك، مما ينتج عنه طاقة «ATP» في المعدلات السريعة مقارنة بالتحلل البطئ والذي يتم فيه نقل البروفيك إلى الانقسام الخلوي في النظام الأكسجيني «يتم تسمية التحلل البطئ والسريع للسكر بأسم التحلل السكري المعتمد على الأكسجين»

تحلل السكر ← glycolysis جلوكوز بيروفيك

ونظرًا لعدم اعتماد الجلوكوز على الأكسجين؛ فإن هذه المصطلحات تعتبر غير مناسبة لهذه العملية،ويتم التحكم بمصير المنتجات النهائية عن طريق متطلبات الطاقة بداخل

الخلية. وعلى سبيل المثال ففي حالة الحاجة إلى مصدر طاقة أثناء تمارين المقاومة يتم استخدام التحلل السريع. أما إذا لم تكن هذه المتطلبات مرتفعة في حالة وجود أكسجين بكمية كافية في الخلية، يتم تنشيط التحلل البطئ.

التحلل السريع

يظهر هذا النوع من التحلل أثناء فترات نقص الأكسجين المتاح في خلايا العضلات، وينتج عنه التحويل إلى حمض اللاكتيك. ويؤدي التركيز المرتفع لحمض اللاكتيك في العضلات إلى ضعف في العضلات أثناء التمرين. ويحدث أيضًا نتيجة لذلك ارتفاع في تركيز الهيدروجين والمعروف بمنعه لتفاعلات سكر إلجلوكوز، ويتفاعل مباشرة من ازدواج تحرك التركيز بالنسبة له، وذلك عن طريق منع رابط الكالسيوم للانتحار أو عن طريق التفاعل مع تكوين موصل عبر هذه الروابط، ويؤدي أيضًا لإنقاص في «PH» النشاط الأنزيمي لأنظمة الطاقة في الخلية. والتأثير المتراكم لذلك هو إنقاص في الطاقة المتاحة وحدوث إجهاد أثناء التمرين.

ويتم تحويل حمض اللاكتيك إلى أملاح اللاكتات عن طريق أنظمة التخزين في العضلات والدم، ويختلف تركيز حمض اللاكتيك في العضلات، مؤدية إلى حدوث التقلصات العضلية، وبدلًا من ذلك يتم استهلاك هذه الأملاح كطاقة خاضعة لفعل عمل ما، خاصة في النوع الأول وألياف العضلات القلبية. ويستخدم أيضًا في تكوين السكر «عملية تكوين الجلوكوز من أملاح اللاكتيك والمصادر غير الكربوهيدراتية أثناء التمرين الممتد وعملية الاستشفاء.

وفي العادة يوجد تركيز منخفض من أملاح اللاكتيك في الدم والعضلات، وكما يوضح التقرير العادى لمستوى تركيز أملاك اللاكتيك في الدم هو «. .٥ إلى ٢٠٢ مليمول / لتر» وأيضًا «. .٥ إلى ٢٠٢ مليمول» في العضلات لكل كيلو جرام من رطوبة العضلات. يزيد إنتاج حمض اللاكتيك بالتمرين وعدم الاعتماد على نوع الألياف العضلية، وقرر الباحثون أن أعلى معدل من إنتاج حامض اللاكتيك بالنسبة لألياف العضلات هو «..٥ مليمول G^{-1}, s^{-1}» وبالنسبة للنوع الأول تكون العضلة «.. ٢٥مليمول G^{-1}, s^{-1}» من تركيز حمض اللاكتيك.

إنتاج حمض اللاكتيك

قد يعكس المعدل العالي لإنتاج حمض اللاكتيك عن طريق النوع الثاني من ألياف

العضلات التركيز العالي أو نشاط أنزيمات الجلوكوز مقارنة بالنوع الأول لألياف العضلات. وبالرغم من عدم معرفة أعلى تركيز محتمل لتراكم أملاح اللاكتيك فقد يظهر خلل تام في تركيزات الدم من ٢٠ إلى ٢٥ مليمول لكل لتر. وأثبتت إحدى الدراسات أن تركيزات أملاح اللاكتيك في الدم أعلى من ٣٠ مليمول/ لتر تتبع نوبات التمرين، وأنواع ألياف العضلات بفترة التمرين وحالة التدريب ومستويات الجلوكوز الأولية، وتعكس تركيزات أملاح اللاكتيك في الدم مدى إمكانية عودة إلى الاتزان البدني، ومن ثم قدرة الشخص على الشفاء.

قام جولنيك أيتال بإعداد تقرير عن أن تركيزات أملاح اللاكتيك في الدم يرجع إلى قيم ما قبل أداء التمارين وخلال ساعة بعد النشاط. وقد تم إظهار النشاط الخفيف أثناء فترة ما قبل التمرين على أنه زيادة في معدلات نقاء أملاح اللاكتيك أسرع مقارنة بالأشخاص الذين لا يمارسون هذه التدريبات. يظهر أعلى تركيز لأملاح اللاكتيك في الدم بعد خمس دقائق بعد أداء التمرين، ويتم تحديد التأخير بالنسبة للوقف المطلوب لتخزين ونقل حمض اللاكتيك من النسيج للدم. يتبع تراكم أملاح اللاكتيك فى الدم تمرين منقطع مكثف «مثل تمرينات الوزن والعدد» بصورة أكبر من تتبع تمرين منقطع مكثف متصل. قام جاكوب «أيوب» بإعداد تقرير أعلى تركيزات لأملاح في الدم بعد أقصى تمرينات رياضية لتمرين لاهوائية، أما ستون إيتل فقد اكتشف أن المجموعات المتعددة من تمرينات المقاومة «الاندفاع في الماء» بزيادة في مقاومة الفشل الناتج في تركيزات أملاح اللاكتيك في الدم في الأشخاص المدربين وأن وقت الفشل وإجمالي العمل الذي تم تأديته كان أكبر في الأشخاص الخاضعين للتدريب مقارنة بهولاء غير الخاضعين للتدريب. ومن ثم، في حالة الأشخاص المدربين تركيزات أملاح اللاكتيك منخفضة مقارنة بالأشخاص غير المتدربين عند التدريب على حمل العمل الواحد. يشير ذلك إلى أن نتائج تدريب المقاومة في البدائل في استجابة أملاح اللاكتيك للتمرين قد تتشابه مع الموجودة في التدريب اللاهوائي. تتضمن هذه البدائل تركيز لأملاح اللاكتيك بالدم في حمل العمل المعطي في الأشخاص المدربين منخفض وتركيزات عالية من أملاح اللاكتيك في الأشخاص المتدربين أثناء التمرينات القصوى.

يمكن أن يتم تلخيص الناتج الصافي لهذا التفاعل بالنسبة للتحلل السريع للسكر كالتالي:

٢ Lactate + ٢ ATP + H٢٠ Glucose+ ٢pi+ ٢ ADP

جلوكوز + ٢ pi + ٢ADP أملاح اللاكتيك +٢ATP + ماء

أما التحلل البطئ للسكر «الجلوكوز» في حالة وجود الأكسجين بكمية كافية في نسيج العضلات «جزء من الأنسجة يتم به تفاعلات الأيض الهوائية»، لا يتم تحويل المنتج النهائي للسكر إلى حمض لاكتيك ولكن يتم نقله إلى العضلات، هناك أيضًا نوعان من الأيض من «NADH» نيكوتين أسيد – أدينين داينو كليوتيد المخفض الناتج من تفاعلات سكر الجلوكوز «تشير كلمة المخفض إلى الهيدروجين المضاف إلى نيكوتين أدينين داي نيوكليوتيد أو NAD، عند دخول الهيدروجين في الغضروف، يتم تحويلها إلى خلات COA الأنزيم الساعد A عن طريق غير المهدرج المركب. يمكن أن تدخل هذه الخلات في دائرة كربس «Krebs» لإنتاج مزيد من مركب «ATP» تذهب عمليات أيض NADH في نظام نقل الإلكترونات والتي يمكنها استخدامه لإنتاج «ATP».

التفاعل الناتج من التحلل البطئ كالتالي :

سكر جلوكوز Glucose + ٢pi + ٢pi + ٢ Adp + ٢ NAD

H_2O «ماء» + ٢ + ٢ATP + NADH٢

الطاقة الكامنة فى سكر الجلوكوز

يقوم جزى سكر الجلوكوز بإنتاج ٢جزئ من «ATP» لذا فى حالة استخدام الجليكوجين «أحد نماذج تخزين سكر الجلوكوز»، سيكون الناتج النهائي ثلاث جزيئات من «ATP» وذلك نتيجة لتفاعل الجلوكوز مع الفوسفات والذي يتطلب جزئ «ATP».

ويؤدي التحكم في سكر الجلوكوز بالأمونيا والفوسفات و«ADP» إلى تخفيض بسيط في «PH» ويتم تحفيزه بشدة بواسطة «AMP» الذي يؤدي إلى تخفيض نسبة «PH» وزيادة مستويات «ATP» وكرياتين الفوسفات والنترات والأحماض الدهنية الحرة، وتتحكم عملية إضافة فوسفات لسكر الجلوكوز بواسطة الكيناس السداسي في سكر الجلوكوز حيث يتم كسر نسبة الجليكوجين إلى جلوكوز والذي يتم تحفيزه بواسطة إضافة الفوسفات إليه.

أحد الاعتبارات الأخرى الهامة في عملية تنظيم أي سلسلة من التفاعلات هي تحديد النسب، وهي أكثر المراحل أهمية لضمان كفاءة التفاعلات. إن خطوة تحديد النسبة في

تفاعل سكر الجلوكوز هي تحويل سكر الفركتوز سداسي الفوسفات إلى سكر الفركتوز الذي يحتوي على ٦ جزيئات إلى سكر الفركتوز ثنائي الفوسفات ويتم تحفيز هذا التفاعل بواسطة أنزيم فوسفوفراكتوكيناس «PFK» وتكمن أهمية هذا الأنزيم في تنظيم معدل تنشيط سكر الجلوكوز في نظام طاقة رابطة الفوسفات وإنتاج «AMP» من خلال تفاعل مايوكيناس الذي يحفز الجلوكوز للمساعدة على إنتاج الطاقة في التمرينات عالية الكثافة. ويتم إنتاج الأمونيا في التدريبات العالية الكثافة كنتيجة لنزع الحمض الأميني أو «AMP» الذي يتم تحفيزهم بواسطة انزيم «PFK» مما قد يعادل هذا التأثير نتائج «PH» المنخفض الذي تمت تجربته أثناء التمرين عالي الكثافة والذي يمنع بدوره كل من نشاط أنزيمي فسفو فركتوكينيز و PFK.

بدء تكوين أملاح اللاكتيك وانتهاء تكوين أملاح اللاكتيك بالدم:

توضح أحدث الدلائل أن هناك نقاطًا معينةً في منحنى تراكم أملاح اللاكتيك عند تزايد كثافة التمرين، حيث يبدأ التمرين الشاق والذي يبدأ عنده زيادة مفاجئة فوق خط التركيز الأساسي الذي يسمى خط بداية أملاك اللاكتيك «LT» ويمثل المحور «LT» زيادة الاعتماد على العمليات التي لا تعتمد على الأكسجين، يبدأ «LT» عند ٥٠٪ إلى ٦٠٪ لأقصى نسبة أكسجين مستهلكة للعناصر غير المتدربة و ٧٠٪ إلى ٨٠٪ في الأشخاص المتدربة، وقد تمت ملاحظة زيادة نسبة تراكم أملاح اللاكتيك في التمرينات الشاقة المتشابهة. وتسمى هذه النقطة نقطة نهاية تراكم أملاك اللاكتيك بالدم «OBLA» وتظهر عندما يصل تركيز أملاح اللاكتيك في الدم إلى ٤ مليمول/ لتر، وقد تتصل نقاط منحنى تراكم أملاح اللاكتيك مع نقاط وحدات الحركة الكبيرة والمتوسطة أثناء تكثيف التمرينات وتتشابه خلايا العضلات المرتبطة بوحدات الحركة الكبيرة من ألياف النوع الثاني الذي يتناسب مع الأيض اللاهوائي وإنتاج حمض اللاكتيك.

وتقترح بعض الدراسات أن التمرين المكثف أقرب أو أعلى من نقاط «OBLA» و «LT» يدفع نقاط «LT» و «OBLA» إلى اليمين «يظهر تراكم أملاح اللاكتيك بعد التمرين الشاق» ويظهر هذا التحول كنتيجة للتغيرات في إنتاج الهرمونات، وخاصة إنتاج هرمون كاتلو أثناء التدريبات الشاقة. ويتيح هذا التحول للأنسجة أداء نسبة أعلى من استهلاك الأكسجين بدون تراكم أملاح اللاكتيك في الدم (بدء أملاح اللاكتيك «LT» ونهاية تراكم أملاح اللاكتيك في الدم «OBLA»).

ويختلف معدل استهلاك الأكسجين بين الأفراد خاصة عند أداء تمرينات التحمل، حيث إن معدل الاستهلاك الأكسجين يرتبط بإنتاج أملاح اللاكتيك أو إزالة استهلاك الجليكوجين إلى قدر أكبر من استهلاك الأكسجين العالي.

وقد عرف أن تمرينات الأثقال المرتفعة تزيد من وقت عمل المجهود الشاق بدون زيادة أقصى استهلاك للأكسجين، ينتج عن ذلك أن بعض أنواع تدريبات الأثقال تقوم بتعديل «LT» و «OBLA» مما ينتج نسبة تحمل أكبر، وأثبت العالم ماركينيك تال أن مقاومة التدريب يمكن أن تغير نسبة «LT» وتزيد من التحكم في مقاييس الجهود.

النظام الأكسجيني «الهوائي» لإنتاج الطاقة :

يستخدم هذا النظام الكربوهيدرات والدهون كعنصر أساسي. أما البروتين فهو لا يعتبر عامل أيضي فعال فيما عدا أثناء حالة الجوع الشديد أو التدريب العنيف لمدة كبيرة وأثناء فترة الراحة حيث يتم إنتاج ٧٠٪ من «ATP» من الدهون أما نسبة ٣٠٪ من الكربوهيدرات، أما في نهاية النشاط فيتم العكس وذلك نظرًا لأن الكربوهيدرات يكون وقود جيد في نهاية التمرين، ففي أثناء التمرينات الهوائية، يتم استهلاك ١٠٠٪ من الطاقة من الكربوهيدرات أما في حالة الراحة فيتم التبادل بين الدهون والكربوهيدرات.

ويبدأ الأيض الهوائي بسكر الجلوكوز بالدم والجليكوجين بالعضلات، ففي حالة وجود الأكسجين بكميات كافية لا يتم تحويل المنتج النهائي من الجلوكوز إلى حمض اللاكتيك ولكن يتم تحويله إلى العضلات في المكان الذي يتم استهلاكه بها والدخول في دائرة كربس أو دائرة حمض الستريك. **ودائرة كربس** هي سلسلة من التفاعلات التي تستمر فيها أكسدة المادة الخاضعة للخميرة «الجلوكوز»، تبدأ في إنتاج الجلوكوز وإنتاج ذرتين «ATP» من جينين ثلاثي الفوسفات «GTP» لكل عملية أيض للجلوكوز، والذي يتم إنتاجه أيضًا من عملية أيض واحدة للجلوكوز وستة عمليات أيض من «NADH» وتنتج أيضًا أدينين داينوكليوتيد الصبغ الأصفر «فلافين» $FAD\ H_2$ وتقوم عمليات الأيض هذه بنقل نواة الهيدروجين إلى حزمة نقل الإلكترون لاستخدامه لإنتاج «ATP» من «ADP» كما تستخدم سلسلة نقل الإلكترون(NADH» و «$NADH_2$» لإنتاج ريبو سفاويلات «ADP» إلى «ATP».

يتم نقل نواة الهيدروجين إلى أسفل السلسلة وتحمل سلسلة حاملات الإلكترون التي عرف باسم كيتوكروس لتشكيل بروتونات لتوفير طاقة لإنتاج «ATP».

وتعتبر سلسلة نقل الإلكترون Electron Tramport وبه أكسجين عملية نقل نهائي للالكترون «ليتحول إلى ماء» ونظرًا لدخول «FADH٢» و «NADH» في سلسلة نقل الإلكترون في مواقع مختلفة في القدرة على إنتاج «ATP» بالمصطلح فسفرة متأكسدة، يبدأ النظام المؤكسد بالجلوكوز أيضًا في استخدام الدهون من خلال نظام الطاقة المؤكسدة. فيمكن أن يتم تكسير الجلسيدات الثلاثية الموجودة في الخلايا الدهنية بالإنزيمات أو الهرمونات، وينتج عن ذلك أحماض دهنية من الخلايا الدهنية بالدم والتي يمكن بدورها أن تتحول وتدخل في ألياف العضلات ،بالإضافة إلى وجود بعضًا من هذه الجلسيدات في خلايا العضلات والتي تكون مصدرًا للأحماض الدهنية الحرة، وتدخل هذه الأحماض في الميتوكوندريا ليتم لها عملية أكسدة جزيئة «مجموعة من التفاعلات يتم فيها تكسير هذه الأحماض لينتج عنها أنزيم «A» المساعد – أستايل وذرات الهيدروجين، ويقوم هذا الأنزيم بالدخول في دائرة كربس مباشرة ويتم حمل ذرات الهيدروجين بواسطة «NAD+» و «FAD++» إلى سلسلة نقل الإلكترون.

وبالرغم من أنه مصدر غير فعال من الطاقة في معظم الأنشطة إلا أنه يمكن تكسير البروتين إلى أحماض أمينية التي يمكن تحويلها إلى جلوكوز أو دائرة كربس لإنتاج «ATP» وتتناقص المساحات الأمينية المتخلفة عن تحلل هذه الأحماض خلال تكوين اليوريا وجزء صغير من الأمونيا، ويعتبر تخلف جزء إلى أمونيا مؤشر خطير حيث أنه يعتبر من العناصر السامة التي يمكن أن تظهر من خلالها بعض الأمراض.

التحكم بالنظام الأكسجيني «الأكسدة»:

تعتبر خطوة تحديد النسبة هي تحويل الأيزوسترات إلى كيوجلوتارات «a-Keloglutatrate» ويتم تحفيز التفاعل بواسطة أنزيم أيزوسترات ديهيدرون جيناس والذي يتم تحفيزه بواسطة «ADP» ومنعه بواسطة «ATP»، تؤثر التفاعلات التي تنتج «NADH» و «NADH٢» على تنظيم دائرة كربس ، وعندما يتم تراكم OTP وزيادة تركيز حافز «A» سليوتيل والذي يمنع التفاعل الأولي «أكسالوسيتات+ هافر «A» أستايل سترات + الحافز «A» من دائرة كربس ، يتم منع سلسلة نقل الإلكترون بواسطة «ATP» وتحفيزها بواسطة «ADP».

قدرة إنتاج الطاقة

تختلف الأنظمة الثلاثة «رابطة الفوسفات والأكسجين والجلوكوز» في القدرة على توريد طاقة للأنشطة في كثافات وأوقات متنوعة، ويتم تعريف مدة التمرين أو مستوى كثافته على أنه مستوى النشاط العضلي الذي يمكن قياسه عن طريق الطاقة المبذولة «الجهد المبذول في وقت محدد»، وأوضحت الدراسات أن القوة عند استهلاك أقصى قدر من الأكسجين تكون حوالي ٢٠٪ إلى ٣٠٪ من الطاقة القصوى في مقياس الجهد «دائرة الجهد».

تدرج النسب وقدرة إنتاج «ATP»

النظام	معدل إنتاج «ATP»	قدرة إنتاج «ATP»
رابطة الفوسفات	1	5
أكسدة الكربوهيدارت	4	2
أكسدة الدهون	5	1
التحلل البطئ للسكر	3	4
التحلل السريع للسكر	2	2

تأثير مدة الحدث على نظام الطاقة الأولى المستخدمة

مدة الحدث	شدة الحدث	نظام الطاقة الأولى
6 ثواني	شديد جدًا	رابطة الفوسفات
6 – 30 ثانية	شديد	رابطة الفوسفات والتحلل السريع والبطئ للسكر
30 ث دقيقة	ثقيل	التحلل السريع
2 – 3 دقائق	متوسط	التحلل السريع ونظام الأكسدة
أكثر من 3 دقائق	عادي	نظام الأكسدة الأكسجيني

هناك بعض التمارين التي يتم دعمها بواسطة الآليات الهوائية حتى في حالة استهلاك نسبة ١٠٠٪ من الأكسجين، ولكن لا يتم تصنيفها كتمارين شديدة جدًّا. فالأنشطة قبل تمرينات الأثقال التي تتطلب مجهودًا عالٍ جدًّا لها إخراج شديد للطاقة، وتتطلب

معدل سريع من الطاقة الواردة، وتعتمد الطاقة الواردة من هذه الأنشطة على التحويل العالي على أساس شدة ومدة الحدث؛ لذا فالجهد القصير الشديد يعتمد على نظام رابطة الفوسفات، وتحلل السكر السريع وتناقص الشدة مع زيادة المدة، ويتم التحول إلى أنظمة الطاقة الأخرى.

تؤثر مدة النشاط أيضًا على نوع نظام الطاقة المستخدمة، وتتراوح أحداث الرياضي في المدة من «١-٣» ثواني «تمرينات الخطف ورمي الكرة الحديدية» وإلى أكثر من ٤ ساعات في السباقات الكبيرة المتعددة، ففي حالة بذل أقصى جهد في هذه التمارين، تكون المدة الموضحة معقولة.

أما في أوقات الراحة أو التمرينات العادية فيكون نظام الطاقة المنتجة مرتبط بالشدة والمدة، ففي أثناء التمرين يتم تحديد الدرجة التي تساهم بها أنظمة الأكسدة الهوائية واللاهوائية في الطاقة المنتجة بواسطة شد التمرين أولًا ثم بواسطة مدة التمرين.

عناصر الطاقة:

عناصر الطاقة هي الجزئيات التي توفر مواد أولية لتفاعلات سريان الطاقة في النظام الحيوي بما فيها الفوسفاجينات والأحماض الدهنية الحرة والأحماض الأمينية، والتى يمكن إنتاجها بواسطة أنظمة سريان الطاقة في الأنظمة الحيوية، أثناء الأنشطة العديدة وتكون مرتبطة باستنفاد الفوسفوجينات والجليكوجين. ولا يظهر استنفاذ المادة التي تمت معاملتها، مثل: الأحماض الدهنية، وأملاح اللاكتيك، والأحماض الأمينية لدرجة تحدد مستوى الأداء، ويعتبر نموذج استنفاذ وإشباع الفوسفوجينات والجليكوجين التي تتبع النشاط البدني هامًا في التمرين وسريان الطاقة في النظام الحيوى الرياضي.

الفوسفوجينات :

يظهر الإرهاق أثناء التمرين جزئيًا ويكون مرتبطًا بانحفاض الفوسفوجينات، حيث يتم استنفاذ تركيزات الفوسفوجين بالعضلة نتيجة للتمرين اللاهوائي والمرتفع الكثافة أكثر من التمرينات الهوائية، وينخفض كرياتين الفوسفات أثناء المرحلة الأولى للتمرين مرتفع الكثافة، ويمكن استنفاده نتيجة للتمرين المرتفع الشدة إلى درجة الإجهاد. ومن ثم فلا يتم إنقاص تركيزات «ATP» في العضلة أكبر من «٦٠٪» من القيم الأولية حتى أثناء التمرين الكثيف، ويجب أن يتم ملاحظة أن الحركات الديناميكية للعضلة التي تنتج العمل الخارجي واستخدام الطاقة الأيضية واستنفاد الفوسفاجينات لدرجة أعلى من

حركات العضلات المتساوية الجزيئات.

ويعتبر مركب «ATP» الموجود بالعضلات احتياطيًا لاستخدامه بعد استنفاد كرياتين الفوسفات، ويلعب دورا كبيرا في إمداد العضلات بجانب مصادر الطاقة الأخرى، مثل الجليكوجين والأحماض الدهنية الحرة، وقد يحدث إشباع الفسفوجين قبل التمرين في مدة قصيرة. ويظهر «ATP» المعاد تجميعه خلال «٣ : ٥» دقائق، ويتم استهلاك الفسفوجينات كنتيجة لعملية الأيض الهوائية، وذلك بالرغم من إمكانية إسهام التحلل السريع للسكر في الاستشفاء بعد أداء التمرينات الشاقة.

ولم تتم دراسة تأثيرات التدريبات على تركيزات الفوسفوجينات، وقد تزيد التمرينات الهوائية من تركيزات الراحة للفوسفوجينات وتنقص معدلات الاستنفاذ في مخرجات الطاقة الفرعية، وبالرغم من ملاحظة الباحثين لإشارات تركيزات الفوسفوجينات أثناء الراحة، فلم توضح الدراسات قصيرة المدى بدائل في تركيزات الفوسفوجينات أثناء الراحة، ويمكن أن يكون محتوى الفوسفوجين الإجمالي أكبر من العدد المتتالي نتيجة الزيادات في كتل العضلات، وقد أوضحت الدراسات أن تدريب الوزن يزيد من تركيزات الفوسفوجينات أثناء الراحة في عضلة العضد الثلاثية الرأس بعد خمسة أسابيع في التدريب، وقد ظهرت الزيادة في تركيز الفوسفوجينات نتيجة للتضخم في ألياف النوع الثاني والتي يمكن أن تحتوي على تركيز فسفوجينات أعلى من ألياف النوع الأول.

الجليكوجين:

يعتبر الجليكوجين أحد أهم مصادر الطاقة اللازمة للتمارين البدنية، ويتم تخزين الجليكوجين في إجمالي عضلات الجسم «٣٠٠إلى ٤٠٠ جم»وحوالي «٧٠ إلى ١٠٠ جم» في الكبد، وقد تتأثر تركيزات الجليكوجين في الكبد و العضلات بسبب التدريب.

ويقترح الباحث أن كلًّا من التدريب اللاهوائي - بما فيها تدريبات الأثقال والتدريب الهوائي المثالي - قد تكون السبب في زيادة تركيز جليكوجين العضلة في وقت الراحة.

ويرتبط استنفاذ نسبة الجليكوجين بشدة التدريب، ويعتبر جليكوجين العضلة مصدر للطاقة أكبر من الجليكوجين في الكبد أثناء التمرين الشديد، ويكون جليكوجين الكبد مفيدًا في التمرين منخفض الشدة ويزيده مساهمته لعمليات الأيض بمدة التدريب. وترتبط نسبة أيض الجلوكوز في العضلة بالزيادات في شدة التمارين المرتبطة بنسبة استهلاك الأكسجين.

وبذلك يصبح جليكوجين العضلة طاقة هامة. وقد يستنفد محتوى الجليكوجين لبعض خلايا العضلات أثناء التمرين.

ويتم الحفاظ على تركيزات الجلوكوز في الدم في التمرينات ذات الشدة المنخفضة كنتيجة لاستهلاك جليكوجين العضلات ذات التركيز المنخفض، ويقل تركيزات الجلوكوز بالدم بزيادة المدة بعد «٩٠ دقيقة» ولكن نادرًا ما يقل ليكون «٢٠٨ مليمون/ لتر».

وقد ينتج عن التمرينات الشاقة انخفاض في تركيزات الجلوكوز بالدم، وذلك نتيجة لاستنفاذ الجليكوجين الموجود بالكبد. فقد يظهر نقص في تركيزات السكر في الدم في بعض الأشخاص أثناء تحفيز التمرين لقيم السكر بالدم أقل من «٢٠٥ مليمول/ لتر»، وينتج انحدار نسبة السكر بالدم إلى حوالي ٢٠٥ إلى ٣ مليمول/ لتر من انحفاض نسبة الكربوهيدرات المخزنة في الكبد والتي تسبب بدورها أكسدة الكربوهيدرات وتعب مفاجئ.

كذلك يمكن أن تسبب التمرينات الشاقة كتمرينات الأثقال استنفاذ لجليكوجين العضلات «٢٠-٥٠٪»، وبالرغم من أن الفوسفوجينات تعتبر عنصرًا محددًا أثناء تمرينات المقاومة عند التكرارات القليلة له، إلا أن جليكوجين العضلات يمكن أن يصبح عنصرًا محددًا لتمرين المقاومة للعديد من إجمالي الأجهزة وإجمالي الأعمال الأكبر من ذلك، ويمكن أن يسبب هذا النوع من التمرينات استنفاذ للجليكوجين الموجود في الألياف العضلية مما يحدد الأداء، أما مع الأنواع الأخرى من التمرينات الحيوية، فتعتمد نسبة الجلوكوز في العضلات أثناء تمرين المقاومة على شدة هذا التمرين، وبذلك يكون إجمالي العمل الذي تم إنتاجه مساويًا لإجمالي استنفاذ الجليكوجين بغض النظر عن شدة التمرين، وتتشابه هذه النتائج بالنسبة لتحلل السكر في العضلات أثناء تمرين المقاومة مع النسبة الموجودة أثناء التحفيز الكهربائي للعضلات.

يرتبط استنفاذ جليكوجين العضلات أثناء الشفاء بمعدل الكربوهيدرات قبل التمرين ويظهر الاستنفاذ على الوجه الأفضل إذا تم استهلاك من «٠,٧ إلى ٠,٣» من الكربوهيدرات كل ساعتين من التمرين المتواصل، ويمكن أن يزيد مستوى استهلاك الكربوهيدرات من استنفاذ الجليكوجين بالعضلات من «٥ إلى ٦ مليمول/ جم» في كل ساعة أثناء الأداء من «٤-٦» في التمرين المتواصل.

عوامل تحديد سريان الطاقة في النظام الحيوي أثناء أداء التمرينات:

يجب أن يتم وضع العوامل المحددة للأداء في الاعتبار عند وجود أي إرهاق أو تعب أثناء التمرينات أو التدريبات، كذلك يجب أن يتم التعرف على أهم العوامل المحددة للتمرين والمرتبطة بلاعب معين عند تصميم برنامج تدريب معين، ومحاولة تقليل حجم الإرهاق لتعزيز الأداء بوضع جدول لنماذج العوامل المحددة المتنوعة على أساس استنفاذ الطاقة، وزيادة أيونات الهيدروجين في العضلات.

وقد يكون الجليكوجين عاملًا محددًا لكل من التمرينات ذات المدة الطويلة، والتمرينات غير الشاقة المدعمة بالأيض الهوائي، وبالنسبة للتمرينات المتكررة الشاقة تكون مدعمة بالأيض اللاهوائي.

ترتيب العوامل المحددة في سريان الطاقة داخل النظام الحيوي

درجة التمرين	ATP أدينوزين ثلاثي الفوسفات	جليكوجين العضلات	جليكوجين الكبد	الدهون المخزنة	PH الأس الهيدروجيني
سباق خفيف	1	5	5 – 4	3 – 2	1
متوسط	2 – 1	3	20	1 – 1	3 – 2
ثقيل	3	3	1	1	5 – 4
كثيف جدًا	3 – 2	1	1	1	1
كثيف جدًا (متكرر»	5 – 4	4 – 4	2 – 1	2 – 1	5 –4

استهلاك الأكسجين وإسهام الأكسجين اللاهوائي في التدريب:

استهلاك الأكسجين:

وهو قياس قدرة الفرد على أداء الوظيفة في وجود الأكسجين، ففي أثناء التمرينات

ذات الشدة المنخفضة، يتزايد استهلاك الأكسجين في الدقائق الأولى حتى يتم الوصول لمرحلة الثبات «التي تتطلب استهلاك متساوي من الأكسجين»، ومن ثم يجب أن يتم توفير نسبة عالية من الطاقة عند بدء التمرين خلال التمرينات اللاهوائية، ويتم إطلاق مصطلح نقص الأكسجين على إسهام الاستهلاك اللاهوائي، أثناء التدريب يكون معدل استهلاك الأكسجين أعلى منه بعد التمرين بالنسبة للفترة الزمنية التي تتنوع طبقًا لشدة ومدة التمرين، ويطلق مصطلح تجاوز استهلاك الأكسجين قبل التمرين على الأكسجين المستهلك قبل التمرينات، ويستخدم هذا المصطلح والقيم التي يتم تطبيقها طبقًا لها لاستعادة الجسم إلى حالته بعد التمرين، وهناك علاقة مناسبة بين نقص الأكسجين ومصطلح تجاوز نسبة الأكسجين، فنقص الأكسجين قد يؤثر على تجاوز نسبة الأكسجين ولكنهما غير متساويي العوامل التي يمكن أن تؤثر على نسبة تجاوز الأكسجين.

وتوفر التمرينات اللاهوائية طاقة أكبر للعمل إذا كانت شدة التمرين أكبر من أقصى استهلاك للأكسجين يمكن أن يتحمله الشخص.

وبما أن استهلاك التمرينات اللاهوائية يدعم زيادة التمرين بالتناقص مع مدة التمرين فهي علاقة عكسية والقيم التقريبية لهذه المعدلات تكون طبقًا لمقياس الجهد.

إن الإسهام بالنسبة للتمرينات اللاهوائية يتراوح بين «٣٠ إلى ٦٠ ثانية» وذلك بعد أن يصبح الأيض الهوائي المورد الأول للطاقة، ولذلك تعتمد أقصى المجهودات على الأيض الهوائي، ويمثل إسهام التمرينات اللاهوائية لهذا النوع من التمرين أقصى قدرة للتمرينات اللاهوائية.

وتحدد الحالة الثابتة للأيض في التمرينات ذات الشدة المنخفضة «٧٥٪» من أقصى استهلاك للأكسجين VO_2 max وحجم استهلاك الأكسجين VO_2 .

ومن العوامل المحتملة التي تزيد نسبة تجاوز استهلاك الأكسجين بعد التمرين:

تركيب ATP ومخزون كرياتين الفوسفات.

تركيب الجليكوجين من حمض اللاكتيك.

إشباع الأكسجين في أنسجة الماء.

إشباع الأكسجين في أوردة الدم.

إشباع الأكسجين بالدم في عضلات الهيكل العظمي.

إشباع الأكسجين للأصباغ البروتينية.

توزيع الأيونات بداخل الجسم.

إصلاح الأنسجة التالفة.

جهد زائد إضافي.

تأثير الهرمونات بالزيادة أو بالنقص.

زيادة درجة حرارة الجسم.

وتؤدي التمرينات عالية الجهد في الحالات غير الثابتة من التمرين إلى زيادة استهلاك الأكسجين المطلوب VO_2 للتمرين في حالة إمكانية استهلاك هذه النسبة، ولكن في عدم وجود هذه الإمكانية، يتناقص الأكسجين بالنسبة لمدة التمرين.

إسهام التمرينات الهوائية واللاهوائية في أقصى مجهود (مدة المجهود)

	90	60	30	-5
شدة التمرين	31	35	55	100
إسهام التمرينات اللاهوائية	35	50	75	96
إسهام التمرينات الهوائية	65	50	25	4

وتتناقص مخرجات الطاقة طرديًا مع إسهام الطاقة من زيادة التمرينات الهوائية في مقياس الجهد ويكون مخرج الطاقة لأقصى استهلاك للأكسجين هو أقل من ٣٥٪ لأعلى مخرجات للطاقة، ومن ثم يتم دعم التمرين من خلال الأيض الهوائي والذي يجب أن يستمر في التمرينات الشاقة المرتبطة بأقصى قدرات مخرجات الطاقة.

ويجب أن يتم ملاحظة أن الأنواع المختلفة من التدريب يمكن أن تعزز قدرة الأيض الهوائي واللاهوائي وقد يزيد هذا التعزيز نسبة التحمل وإجمالي العمل المؤدى أثناء أقصى جهد.

نوعية الأيض أثناء التمرين

تعمل شدة التمرينات على تحديد أنظمة الطاقة أثناء التدريب في مختلف الأنشطة الرياضية، وقد تتطلب ممارسة بعض التمرينات والأنشطة البدنية الوصول لأقصى جهد مبذول، ولكن معظم الرياضات تتطلب أو تنتج عمليات أيض تكون مشابهة لسلاسل الجهد المرتفع مع فترات راحة يكون مطلوبًا لهذا النوع من التمرين تكون شدة التمرين المطلوبة أثناء كل تمرين أكبر من أقصى مخرجات الطاقة التي يمكن بذلها باستخدام مصادر الطاقة الهوائية.

التدريب الزمني

هو أحد طرق التدريب التي تسمح باستخدام أنظمة أيض مناسبة أثناء الفترة الزمنية للتدريب؛ ويعتمد هذا التدريب على فكرة أن العمل يمكن أن يتم أداؤه بالنسبة للتدريبات الشاقة بنفس الاحتياجات مقارنًا بالتدريب المتواصل، ويعتمد الأيض النظري للتمرين، والأيض الهوائي للفترة الزمنية للراحة، والتحلل السريع للسكر، ونظام رابطة الفوسفات على المسمى بأنظمة الطاقة أثناء التمرين، وأثناء فترة الشفاء، ويوضح الجدول التمرين المقترح والفترات الزمنية للراحة على أساس التمرين المرتبط بأقصى طاقة محتملة وفترات الشفاء.

ويمكن باختيار شدة التمرين المناسبة ومدة التمرين وفترات الراحة ونظام الطاقة المناسب ان تحدد شكل ومدة وفترة الراحة للتمرين.

وقد تتغير فترات الراحة طبقًا للجهد المبذول أثناء برنامج التدريب، فقد تتطلب بعض التمرينات مثل الأثقال تخزين زائد للفسفوجينات والجليكوجين لتعزيز التفاعلات وتعزيز الأيض اللاهوائي.

التدريبات المزدوجة :

اقترح بعض العلماء إضافة التمرين الهوائي إلى الألعاب الرياضية اللاهوائية؛ لتعزيز مرحلة الشفاء؛ لأنه يعتمد على الآليات الهوائية، فقد يخفض التدريب الهوائي قدرات الأداء للطاقة المرتفعة.

التمرين المقترح : فترات الراحة

نسبة الجهد إلى الراحة	المصدر الرئيسي للطاقة	زمن التدريب الفعلي	نطاق التدريب نسبة الجهد إلى الراحة
100٪ – 90	نظام الفوسفات	5 – 10ث	1 : 12 – 1 : 20
75٪ – 90	التحلل السريع للسكر	15 – 30 ث	1 : 3 – 1 : 4
30٪ – 75	التحلل السريع للسكر والأكسدة	1 – 3 د	1 : 3 – 1 : 4
20٪ – 35	الأكسدة	3 دقائق	1 : 1 – 1 : 3

الخلاصة:

يمكن أن يتم تصميم برامج التدريب ذات إنتاجية عالية في الأداء من خلال التعرف على كيفية إنتاج الطاقة لأنواع متعددة من التدريبات، وكيفية تعديل إنتاج الطاقة باستخدام أنظمة تدريب محددة.

ويحدد اختيار استخدام نطاق الطاقة من خلال شدة التمرين ومدته، كما تحدد نسب الأيض والتمرينات بصفات التمرين من وقت وشدة وفترات راحة. ويتيح لك هذا المفهوم تعزيز الأداء الرياضي من خلال تنفيذ برامج التدريب المعدلة طبقًا لهذه المعايير.