المحور الثالث: الانظمة الطاقوية

المحاضرة رقم1

وحدة نظام الأيضي

الطاقة Energy

الطاقة هي القدرة او القابلية على انجاز عمل ما وهي القوة او الاستطاعة للقيام بشغل معين وترتبط بالحركة الميكانيكية وقدرة الفرد على الحركة. أن أساس الطاقة في الكون هي الشمس، إذ تعطي طاقة ضوئية وحرارية وكهرومغناطيسية و غيرها من أنواع وأشكال الطاقة، وتنتشر هذه الطاقة في الفضاء وأثناء انتشارها في الأرض تقوم النباتات بتحويلها الى الطاقة الكيميائية مخزونة على شكل كاربوهىدرات وبروتينات ودهون بمساعدة مادة الكلوروفيل وثاني أوكسيد الكاربون ومواد عضوية وغير عضوية من التربة والماء، ويتم ذلك بطريقة معقدة تسمى (التمثيل الضوئي). والطاقة موجوده في الكون وعند كل كائن حي، تحتاجها جميع المخلوقات حتى تتمكن من الاستمرار في الحياة.

الأيض

والايض هو التغيرات الكيمياوية او الاستجابات التي تحدث في الجسم اثناء انتاج الطاقة للشغل او العمل. او هو مجمل التفاعلات الكيميائية في الخلايا. ويشمل الايض عمليتين متقابلتين تجريان في آن واحد البناء anabolism والهدم catabolism.

البناء: هو عملية تصنيع او تخليق المركبات الكيمياوية المعقدة اللازمة لنمو الخلايا وصيانتها من مركبات بسيطة، ويتم ذلك بعملية كيميائية تدعى التصنيع بإزالة الماء وهي تحتاج الى طاقة.

الهدم: هو عملية تفكك او تحطيم المركبات الغذائية المعقدة الى صور بسيطة وتتم هذه العملية بواسطة التحلل المائي (hydrolysis) وهي تطلق طاقة.

أنظمة الطاقة

يستخدم الرياضي خلال النشاط الرياضي مخزون الطاقة في العضلات العاملة وعندما تثار العضلة عن طريق الأعصاب تنكسر هذه المواد وتتحرر منها الطاقة اللازمة لإحداث العمل الميكانيكي للانقباض

العضلي. نظرا لاختلاف الأنشطة الرياضية بعضها عن الاخر من حيث الزمن الذي تستغرقه وشدة العمل العضلي والراحة اللازمة خلال النشاط لذلك تحتاج الى مقادير مختلفة من الطاقة.

تقسم انظمة الطاقة الى:

1- النظام الفوسفاتي اللاهوائي

يعرف على أنه التغييرات الكيميائية التي تحدث في العضلات العاملة لإنتاج الطاقة اللازمة لأداء المجهود البدني مع عدم استخدام اوكسجين الهواء الخارجي. يتميز هذا النظام بسرعة انتاج الطاقة، وإن هذا النظام يعمل في حالة عدم وجود الأوكسجين لإنتاج ATP ويوصف بعدم تكون نواتج تحوي حمض اللبن. ونظرا لقلة المخزون لذا تعتمد العضلة على مصادر أخرى لإعادة إنتاج الطاقة في ظل غياب الأوكسجين بالطريقتين الأثنين:

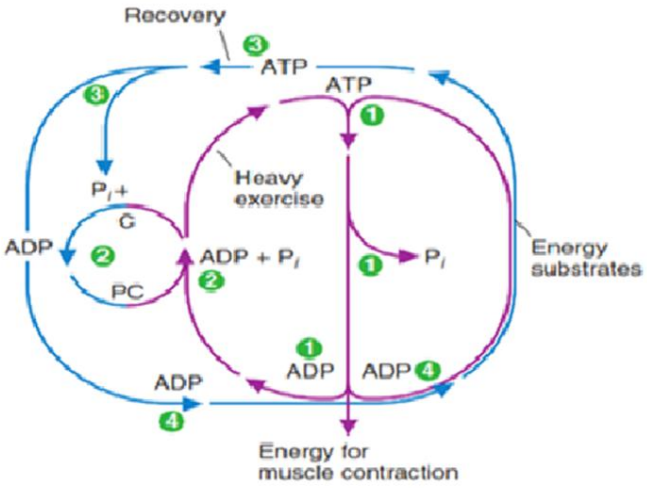
- يتحول ATP الى ثنائي فوسفات الأدينوزين ADP وينتج طاقة.

$$ATP \xrightleftharpoons[\text{ميوسين}]{\text{تحلل كيميائي}} ADP + Pi + \text{طاقة}$$

- عن طريق مركب الكرياتين فوسفات (CP) الذي يتفكك ويمنح الفوسفات لناتج تفكك الـــ ATP وهو ADP ليعيد يناء الـــ ATP.

$$CP \xrightarrow[CPK]{} C + Pi$$

$$ADP + Pi \longrightarrow ATP$$



شكل يوضح استعمال وإعادة بناء الـــ ATP–CP

ميزات النظام اللاهوائي الفوسفاتى:

- يعمل بدون وجود الأوكسجين

- تحدث عملية التفاعل في السيتوبلازم في منطقة الخيوط البروتينية الميوسين والاكتين ولا يعتمد هذا النظام عل سلسلة تفاعلات كيميائية طويلة

- يعد المصدر الأول للطاقة ومصادره ATP وCP والتي يمكن الحصول عليها بشكل مباشر اذ تخزن في العضلات.

- سريع جدا وتتحرر الطاقة خلال العمل العضلي عالي الشدة التي تتطلب زمنا قصيرا.

- لا يدوم طويلا (10 ثواني)

- انتاج الطاقة محدود جدا وينتج جزي واحد من ATP

- مخزون الطاقة في العضلة قليل.

2- نظام حمض اللبن:

ويعتمد هذا النظام أيضا على اعادة بناء ATP لاهوائيا بواسطة عملية الجلكزة اللاهوائية، ويختلف هنا مصدر الطاقة حيث يعتبر مصدرا غذائيا يأتي من التمثيل الغذائي للكربوهيدرات التي تتحول إلى صورة بسيطة في شكل سكر الجلوكوز الذي يمكن استخدامه مباشرة لإنتاج الطاقة أو يمكن أن يخزن في الكبد او العضلات على هيئة جليكوجين لاستخدامه فيما بعد، وعند استخدام الجليكوجين او الجلكوز لإنتاج الطاقة في غيابها الاكسجين، فان ذلك يؤدى إلى تراكم حامض اللبن في العضلة والدم. ويتم استعادة بناء ATP من خلال الانشطار الكيميائي للجليكوجين ليمر بعدة تفاعلات كيميائية حتى يصبح حمض اللبن وخلال ذلك تتحرر الطاقة اللازمة لإعادة بناء الـــ ATP.

يبدأ عمل هذا النظام في الفعاليات الرياضية التي تستغرق أكثر من 1 الى 30 ثانية وقد يستمر إلى دقيقتين، عدد جزيئات الـــ ATP المتكونة من اكسدة جزيء الكلوكوز هو 2 جزيئة اما اكسدة الجليكوجين فتنتج 3 جزيئات.

$$\text{glucose} \longrightarrow 2\ ATP$$

$$C_6H_{12}O_6 + 2\ ADP + 2Pi \longrightarrow 2ATP + 3C_3H_6O_3$$

جلوكوز حمض اللبن

مميزات نظام حمض اللبن (النظام اللاهوائي)

- يعمل بدون وجود الأوكسجين. تحدث التفاعلات في السيتوبلازم قرب خيوط الميوسين والاكتين. مصدر الطاقة فيه الجلوكوز في العضلات والموجود عل شكل حبيبات جليكوجينية في السيتوبلازم.

- سريع وتتحرر الطاقة فيه في النشاطات العضلية الشديدة والتي تستغرق فتره قصيره. يدوم من 1 الى 3 دقائق.

- انتاج الطاقة الكيميائية فيه محدود اذ تتكون 3 جزيئات من ATP وتتطلب 10 تفاعلات.

- مخزون الطاقة محدود في العضلة

– ينتج عنه حمض اللبن الذي يسبب التعب العضلي.

التخلص من حمض اللبن:

مستويات حمض اللبن في الدم تعكس التوازن بين إنتاج حمض اللبن (ظهور) وتصريفه (الإزالة). تطهير اللاكتات يحدث في المقام الأول عن طريق ثلاث عمليات:

الأكسدة (50–75 ٪)،

تكوين السكر/ تكوين السكر gluconeogenesis (10–25 ٪)،

التحول الى امين transamination (5–10 ٪).

جميع العمليات الثلاث كلها تنطوي على حركة اللاكتات، سواء داخل أو بين الخلايا. يتحرك اللاكتات بين مواقع إنتاج اللاكتات والمواقع المستهلكة للاكتات وفق نظرية نقل حمض اللبني بين الخلايا The Lactate Shuttle Cell–Cell عبر الأغشية الخلوية والميتوكوندريا، يحدث عن طريق تسهيل التبادل حسب التركيز وتدرجات أيون الهيدروجين باستخدام بروتينات نقل اللاكتات المعروفة باسم ناقلات أحادي الكربوكسيل monocarboxylate transporters (MCTs) . بمجرد دخول الميتوكوندريا، يتأكسد اللاكتات لينتج البيرووفات تحت تأثير الإيزوزيم LDH1 ويتحول NAD إلى $NADH^{+}+ H^{+}$ على الرغم من أنه بدا في الأصل أن هذا قد حدث داخل مصفوفة الميتوكوندريا، إلا أن الأدلة الحديثة تشير إلى أن الفضاء بين الغشاء المجاور للغشاء الميتوكوندريا الداخلي هو مكان حدوث التفاعل. تستمر البيروفات خلال المراحل الثانية والثالثة والرابعة من عملية الأيض الهوائي ، بينما ينتقل $NADH + H^{+}$مباشرة إلى المرحلة الرابعة .هذا هو مفهوم جديد نسبيا ومثيرة للجدل إلى حد ما يشير إلى أن خلايا العضلات يمكن أن تنتج وتستهلك اللاكتات في نفس الوقت.

نقل اللاكتات خارج الخلية يتم بتحريكه بين الأنسجة تقوم بروتينات الغشائية لخلايا العضلات MCT1) و MCT4) بنقل اللاكتات من وإلى الأنسجة. ينتقل معظم اللاكتات من الالياف السريعة (كلاً من [FOG] وكذلك ([FG]) إلى خلايا الالياف البطيئة (SO) يمكن أن يحدث هذا بشكل مباشر بين

الالياف أو من خلال الدورة الدموية، حيث ينتقل إلى خلايا القلب كمصدر طاقوي مفضل للقلب اثناء التدريب. وبهذه الطريقة ، يستطيع تحلل الجليكوجين في خلية واحدة توفير الوقود لخلية أخرى.

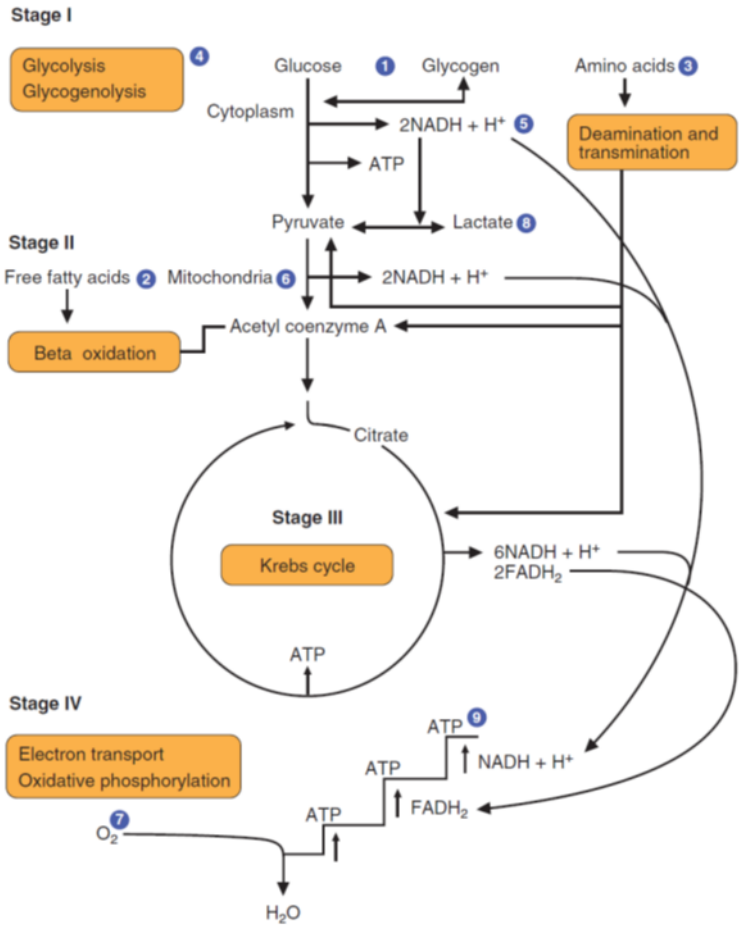
النظام الاكسجيني (الهوائي):

يتميز هذا النظام من النظامين الآخرين لإنتاج الطاقة بوجود الأكسجين كعامل فعال خلال التفاعلات الكيميائية لإعادة بناء الـــ ATP وفي وجود الأكسجين يمكن استعادة بناء 39 مول ATP بواسطة التكسير الكامل لجزيء جليكوجين ليصبح ثاني أكسيد الكربون وماء. ومثل هذا يتطلب مئات التفاعلات الكيميائية ومئات من النظم الأنزيمية والتي تزيد في تعقيدها بدرجة كبيرة عن انتاج الطاقة اللاهوائي في النظامين السابقين، ويتم نظام الاكسجين في داخل الخلية العضلية، ولكن في حيز محدد وهو ما يسمى الميتوكوندريا Mitochondria وهي عبارة عن اجسام تحمل المواد الغذائية للخلية ويكثر تواجدها في الخلايا العضلية.

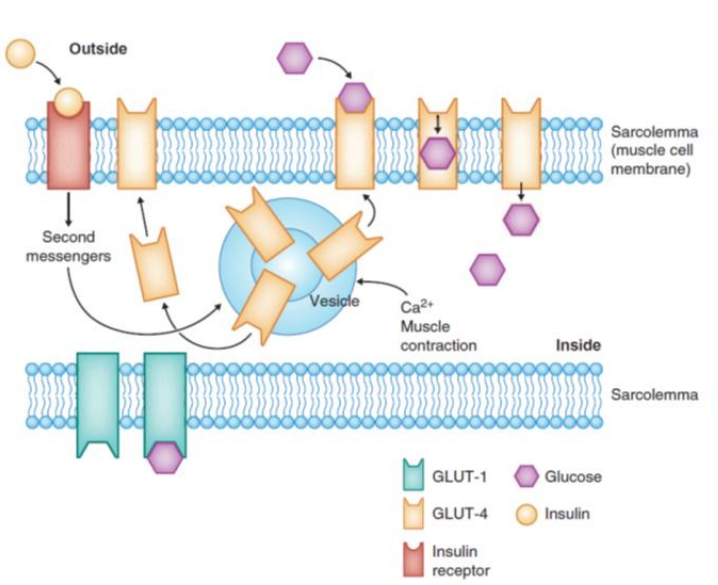
تستخدم المواد (الكاربوهيدرات الدهون و البروتينات بنسبة لا تتعدى 7% من مجمل الطاقة الكلية وفي بعض الحالات النادرة) لإنتاج الطاقة في هذا النظام يوفر وجود الأوكسجين اكبر قوة مؤكسده لأيونات الهيدروجين وتحولها الى ثنائي اوكسيد الكربون وماء مع امكانية كبيره لإنتاج الـــ ATP تتعدى امكانية النظامين اللاهوائين، اذ يمكن بناء 36 جزيئه ATP من التحلل الكامل لجزيء واحد من الكلوكوز بهذه الطريقة في حين ينتج 2 جزيئه من ATP في النظام اللاهوائي، ويمكن الحصول على139 جزيئه من ATP عند تحلل جزيء من الحمض الدهني.

ايض الكربوهيدرات

يتبع التفكيك الكامل للجلوكوز والجليكوجين عملية المراحل الأربع المبينة في الشكل



المرحلة الأولى: نظرة عامة على تحلل السكر: تحلل السكر يعني حرفيًا تفكيك السكر أو انحلاله. إنه مسار الطاقة المسؤول عن الهدم الأولي للجلوكوز. ثم يتم نقل الجلوكوز في خلية العضلات. يحدث النقل عبر غشاء الخلية عبر الانتشار الميسر، باستخدام حامل البروتين ويحدث تدرج تركيز. تسمى الناقلات بروتينات ناقل الجلوكوز، أو GLUT، النقل هو عملية سلبية لا تتطلب إنفاق الطاقة.

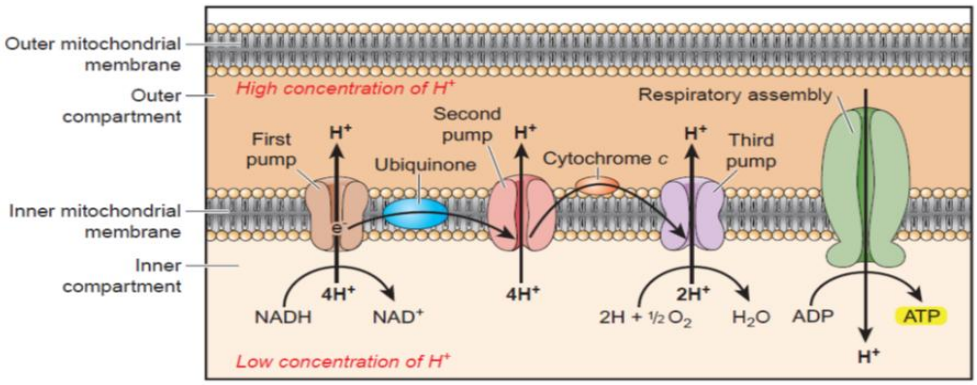


شكل يوضح نقل الجلوكوز داخل الخلية

المرحلة الثانية: تكوين إنزيم الأسيتيل A يحدث تحويل البيروفات إلى الأسيتيل CoA داخل مصفوفة الميتوكوندريا. لا يتم استخدام الأكسجين مباشرة في هذه المرحلة، ولكن تحدث هذه الخطوات فقط في وجود الأكسجين.

المرحلة الثالثة: دورة كريبس دورة كريبس هي دورة لأنها تبدأ وتنتهي بنفس المادة، وتسمى أوكسالو أسيتات (أو حمض الأكسالوسيتيك، الدورة عبارة عن عملية من ثماني خطوات.

المرحلة الرابعة: نقل الإلكترون والفسفرة المؤكسدة يعتبر نظام نقل الإلكترون (ETS) أو السلسلة التنفسية هو المسار الأيضي الرئيسي في إنتاج الـــ ATP وهي تبدأ كسلسلة من التفاعلات الكيميائية في الميتوكوندريا التي تنقل الإلكترونات من ناقلات ذرة الهيدروجين NAD و FAD إلى الأكسجين.
تتشكل المياه كمنتج ثانوي، وتقترن الطاقة الكهروكيميائية المنبعثة من أيونات الهيدروجين بتكوين ATPمن ADP وP_i



شكل يوضح نقل الإلكترون والفسفرة المؤكسدة

العوامل التي تؤثر سلبيا على استمرار النظام الهوائي

- فقدان السوائل والاملاح

- النقص الكبير في مخزون الكلوكوز المغذي الاساسي لعمل الجهاز العصبي المركزي.

- نقص الجليكوجين في العضلة يؤثر بشكل مباشر على استمرار عملها.

مميزات النظام الهوائي

- يعمل بوجود الأوكسجين. تحدث التفاعلات الكيميائية في السيتوبلازم وتكتمل بعيدا في الخيوط البروتينية الانقباضية في الميتوكوندريا، ويتتطلب تفاعلات كيميائيه كثيره ومعقده.

- مصدر الطاقة فيه الجليكوجين والدهون والبروتينات ويتطلب اشراك مصدرين من مركبات الطاقة الغذائي (جلوكوز وحامض دهني)

- بطيء وتتحرر الطاقة في الأنشطة المتوسطة والخفيفة الشده و التي تستغرق وقتا طويلا(انشطة التحمل)

- يدوم لفتره طويله

- انتاج الطاقة فيه كبير وغير محدود، وتعتمد التفاعلات فيه على توفر الاوكسجين الذي بدوره يعتمد عل عمل الجهازين الدوري والتنفسي، اللذان يخضعان للتأثيرات العصبية و الهرمونية وتستخدم الطاقة

الناتجة لبناء المركبات الفوسفاتية الغنية بالطاقة حيث تخزن فيها على شكل طاقة كيمياوية والجزء الاخر يصرف لتغطية متطلبات انجاز النشاط

- لا يحدث التعب العضلي مصاحب لإنتاج الطاقة.

- يتطلب تداخل العديد من المركبات الأمفيتامينية مثل الفيتامينات يمكن اعتماد تقسيمات الطاقة في تحديد الوقت الملائم للتدريب و الطاقة اللازمة للنشاط وتقسيم الانشطة الرياضية وفق النظام الملائم له

اسهامات نظم الطاقة

خلال زمن الاداء تسهم نظم الطاقة خلال زمن الأداء الاقصى بقيم تتوقف على الزمن الذي يستغرقه الاداء، وكلما زاد زمن النشاط البدني قل تبعا لذلك الاعتماد على الطاقة اللاهوائية بواسطة العضلات، وفي حالة العمل الفترة قصيرة والتي تقل عن 2 دقيقه حيث يكون مصدر الطاقة لاهوائيا، وعندما يطول زمن الأداء فأن مصادر الطاقة الهوائية تسهم بشكل اكبر لذلك فأن معظم الاختبارات التي تقيس نظم الطاقة تعتمد على الزمن وفي ادناه.

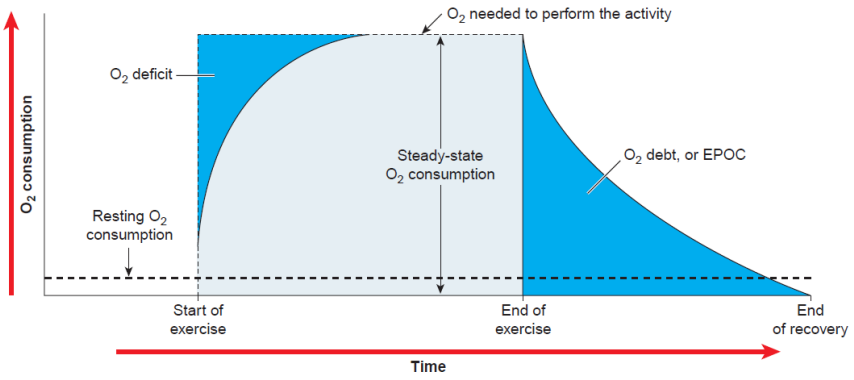
زمن الشغل	طاقة لاهوائية فوسفاتية	طاق لاهوائية لبنية	هوائية
5 ثواني	%85	%10	%5
10 ثواني	%50	%35	%15
30 ثانية	%15	%65	%20
1 دقيقة	%8	%62	%30
2 دقيقة	%4	%46	50%
4 دقيقة	%2	%28	%70

10 دقائق	%1	%9	%90
30 دقيقة	%1	%5	%95
1 ساعة	%1	%2	%98
2 ساعة	%1	%1	%99

جدول يبين اسهامات نظم الطاقة وفقا للزمن المستغرق في النشاط البدني

عجز الأكسجين واستهلاك الأوكسجين في مرحلة ما بعد التمرين

عجز الأكسجين هو الفرق بين الأكسجين اللازمة أثناء ممارسة الرياضة والأكسجين الموردة والمستخدمة. يحدث في بداية كل نشاط.



شكل يوضح عجز الأكسجين واستهلاك الأوكسجين في مرحلة ما بعد التمرين

لقد تم تفسير عجز الاكسجين بشكل تقليدي على أنه عجز الجهازين الدوراني والجهاز التنفسي عن توفير الأكسجين بسرعة كافية لتلبية متطلبات الطاقة المتزايدة. ومع ذلك، تشير الدلائل الآن إلى أن العجز يرجع على الأرجح إلى الاستخدام الخلوي المحدود للاكسجين نتيجة التعديلات الأيضية في كلا النظامين اللاهوائي والهوائي. يتم تحديد وقت الاستجابة البطيء نسبيًا لإنتاج ATP الهوائي من خلال سرعة الاستجابة السريعة لنظام ATP–PC ومحتوى الميتوكوندريا في العضلات. حقيقة أن نظام ATP–PCيستجيب بسرعة لا يشير إلى أي تأخير أو قصور في تنشيط النظام اللبني أو الاكسجيني، فجميع المسارات الثلاثة تستجيب في وقت واحد بطريقة متكاملة. يتم تنظيم الاستجابة الأيضية من

خلال سلسلة من أنظمة التحكم المتحسسة لإفراز Ca^{2+} من العضلات المتقلصة و تفكيك الـ ATP، تستجيب أنظمة التمثيل الغذائي ببساطة بسرعات مختلفة. لذلك، أثناء الانتقال من الراحة الى العمل، يتم توفير الطاقة عن طريق:

1- نقل واستخدام الاكسجين؛

2- الاستفادة من مخازن O2 في الدم الشعري ومنضم إلى الميوغلوبين.

3- تفكيك ATP-PC المخزنة؛ و

4- تحلل اللاهوائي anaerobic glycolysis، مع ما يصاحب ذلك من إنتاج حمض اللبن.

في النهاية، إذا كانت شدة التمرين منخفضة بدرجة كافية، فإن النظام الهوائي سيفي بالغرض والإمداد بالأكسجين يساوي الطلب على الأوكسجين. تسمى هذه الحالة تمرين الحالة المستقرة أو الثابت أو الثابت. استهلاك الاكسجين أثناء وبعد ممارسة التمرينات التي يكون فيها متطلبات الطاقة أكبر من VO_2max، والذي يُسمى أحياناً التمرين فوق الحد الأقصى. فترة التأخر الأولي بين العرض والطلب على الاكسجين تكون واضحة، ويتم توفير الطاقة عن طريق نظام اللاهوائي (ATP-PC اللاكتات)، مع بداية استهلاك الاكسجين المخزن ومع ذلك، عند هذا المستوى ما زالت هناك حاجة إلى مزيد من الطاقة باستمرار التمرين. لا يعتبر هذا المستوى حالة مستقرة لأن متطلبات الطاقة لا يتم تلبيتها تمامًا. يتم توفير الطاقة الإضافية عن طريق تحلل اللاهوائي.

تاريخياً، كانت تسمى فترة الأيض المرتفعة بعد التمرين بدين الاكسجين بناءً على افتراض أن O_2 "الإضافي" المستهلك أثناء فترة "الدين" كانت تستخدم لاسترجاع مستوى المخزون المستعمل في بداية التمرين. في الآونة الأخيرة تغير المصطلح وأصبح استرجاع الاكسجين أو استهلاك الأكسجين الزائد بعد التمرين (**excess postexercise oxygen consumption** EPOC) الاكثر استعمالا ويشير الى استهلاك الأكسجين أثناء الاسترجاع والتي تكون أعلى من قيم الراحة الطبيعية. لا يمكن أن يفسر بشكل أوضح في هذا الوقت، لذلك تم اقتراح ستة عوامل متحكمة في الظاهرة:

- **استعادة مخزونATP-PC :** يستخدم حوالي 10٪ منه في إعادة تكوين الكرياتين فوسفات و الـــ ATP، تتم استعادة ما يقرب من 50 ٪ من ATP-PC في 30 ثانية، تسمى هذا الزمن استعادة نصف عمر ATP-PC يتطلب الاسترجاع التام من 2 إلى 8 دقائق.

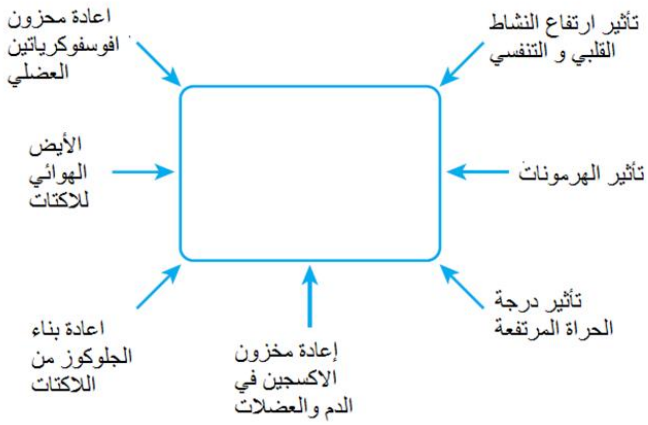
- **استعادة مخزون الاكسجين:** على الرغم من أن الكمية المخزنة في الدم (مرتبطة بالهيموغلوبين) والعضلات (مرتبطة بالميوغلوبين) ليست كبيرة، الا انه من الضروري تجديدها. ربما يحدث تماما خلال 2-3 دقائق.

- **نشاط القلب والأوعية الدموية والجهاز التنفسي:** كل من الجهاز التنفسي والجهاز القلبي الوعائي تبقى نشطة بعد التمرين. على الرغم من أن هذا يمكّن من استهلاك كميات إضافية من الأكسجين، فإن تكلفة الطاقة الفعلية لهذه العمليات التنفسية القلبية الوعائية ربما لا تمثل سوى 1-2٪ من الأكسجين الزائد.

- **نشاط هرموني مرتفع:** أثناء ممارسة التمارين الرياضية مستويات الكاتيكولامينات، هرمون الغدة الدرقية، والكورتيزول ترتفع كلها، بالإضافة إلى تأثيرات تعبئة المصادر الطاقوية واستخدامها، تزيد هذه الهرمونات من نشاط مضخة Na^+ K^+ في العضلات والأعصاب عن طريق تغيير نفاذية غشاء الخلية إلى Na^+ و K^+ . كعملية نقل نشطة، تتطلب طاقة وهذا يعني زيادة الحاجة إلى الاكسجين إلى أن تتم إزالة الهرمونات من مجرى الدم.

- **ارتفاع درجة حرارة الجسم:** عندما يتم تفكيك الـــ ATP أو العمل الميكانيكي، يتم إنتاج الحرارة كمنتج ثانوي. التمرين يؤدي إلى ارتفاع في درجة حرارة الجسم الأساسية. لكل درجة مئوية ترتفع درجة حرارة الجسم يزيد معدل الأيض حوالي 13-15٪. في الاسترجاع، على الرغم من عدم الحاجة لمستويات مرتفعة من الطاقة يبقى تأثير درجة الحرارة المرتفعة، لأن التبريد يستغرق بعض الوقت لكي يحدث. هذا التأثير لدرجة الحرارة هو إلى حد بعيد أهم سبب لـــEPOC .

- **التخلص من اللاكتات:** إن مصير حمض اللبنيك أصبح الآن أكثر تعقيدًا ومساهمته كعامل مسبب ل EPOCتقلصت بالإضافة إلى هذه العوامل الستة، قد يكون التحول من الكربوهيدرات إلى الدهون كمصدر طاقة أمرًا مهمًا لـــ EPOC



تغييرات ATP–PC

أثناء ممارسة تمرين بحمل ثابت فوق الاقصىconstant–load, supramaximal exercise VO2max٪105–110 تدوم 3 دقائق أو أقل. ينخفض مستوى ATP في العضلات فقط بعض الشيء. في الواقع، يبلغ الحد الأقصى لاستنفاذ الـــ ATP الذي لوحظ في العضلات الهيكلية بعد التمرينات الشديدة حوالي 30–40 ٪ لدى الذكور والإناث. وهكذا، حتى بعد العمل الشامل، 60 إلى 70٪ من كمية الراحة للـــ ATP تبقى موجودة، على العكس من ذلك، يتغير مستوى الكرياتين فوسفات بشكل كبير وهو مستنفد تقريبًا. يحدث أكبر استنفاد للكرياتين فوسفات في أول 20 ثانية من التمرين، مما يسمح بالحفاظ على ATP عند مستويات الراحة تقريبًا خلال تلك الفترة الزمنية. من 20 إلى 180 ثانية، كان الانخفاض في الكرياتين فوسفات و ATP تدريجياً ومتوازيًا. من الواضح، يتم الحفاظ على مستوى ATP على حساب الكرياتين فوسفات. لكن، يتم توفير بعض ATP من تحلل السكر، كما يتضح من ارتفاع اللاكتات في كل من العضلات والدم، وكمية إضافية عن طريق الأكسدة.

تغييرات اللاكتات

مستويات اللاكتات في الاستجابة للتمرين تعتمد في المقام الأول على شدة التمرين. التمرينات الحادة لا تؤدي إلى أي تعزيز ذي معنى لناقلات اللاكتات، بدلا من ذلك زيادة تدرجات اللاكتات و ايونات الهيدروجين تكون عملية نقل اللاكتات أسرع في الالياف البطيئة المؤكسدة مقارنة بالسريعة قد يعكس الانتقال السريع للاكتات بواسطة الأكسدة دور اللاكتات كمادة طاقوية، بينما النقل الأبطأ في الالياف السريعة في زيادة الاحتفاظ باللاكتات أثناء الاسترجاع لإعادة التحول إلى الجليكوجين.

لماذا تراكم حمض اللبن مشكلة؟

إن أيونات الهيدروجين (H^+) هي التي تنفصل عن حمض اللبن، بدلاً من حمض اللبن غير المفصول أو اللاكتات (La^+)، التي تمثل المشاكل الأساسية للجسم. هذا التمييز مهم لأنه عند مستويات PH الطبيعية، يتم فصل 99 ٪ من حمض اللبني على الفور إلى H^+ و$(C3H5O3)^-La$. تنشأ معظم المشكلات عندما تتجاوز كمية حمض اللبن وبالتالي H^+ قدرة التخزين المؤقت الفوري للجسم وانخفاض PH درجة الحموضة، ليصبح الدم أكثر حمضية. عند هذه النقطة يتم الشعور بالألم ويتأثر الأداء.
آليات هذه النتائج هي على النحو التالي:
– **ألم:** أي شخص تسابق أو ركض مسافة 400 متر، يفهم الألم المرتبط بتراكم حامض اللبن. يستغرق 400 متر ما بين 45 ثانية و 3 دقائق تقريبًا (اعتمادًا على قدرة العداء) ويعتمد اعتمادًا كبيرًا على أنظمة ATP–PC و LA لتوفير الطاقة اللازمة. تتراكم أيونات الهيدروجين الناتجة وتحفز الألم في النهايات العصبية في العضلات.

– **انخفاض الأداء:** النقصان في الأداء المرتبط بحمض اللبن ناتج عن التعب الذي هو في نفس الوقت عضلي وايضي في الأصل.

– **التعب الأيضي:** ينتج التعب الأيضي عن انخفاض إنتاج ATP المرتبط بتغيرات الإنزيم، والتغيرات في آليات النقل الغشائي، والتغيرات في توافر المصادر الطاقوية. الإنزيمات يمكن تعطيلها بتركيزات عالية من أيون الهيدروجين. أيون الهيدروجين يرتبط بجزيئات الإنزيم وبذلك يغير حجمها وشكلها وبالتالي قدرتها على العمل. يُعتقد أن فسفوفركتوكيناز Phosphofructokinase (PFK) حساس بشكل خاص، على الرغم من أن الإنزيمات المؤكسدة يمكن أن تتأثر أيضًا.

في الوقت نفسه، تحدث تغييرات في آليات النقل الغشائي (إما إلى الناقلات في الغشاء أو إلى قنوات النفاذية). هذه التغييرات تؤثر على حركة الجزيئات عبر غشاء الخلية و بين السيتوبلازم والعضيات مثل الميتوكوندريا.
يمكن أن يكون تثبيط توافر المصادر الطاقة في التركيز العالي من أيونات الهيدروجين.

تفكيك الجليكوجين يتباطأ من تعطيل إنزيم الجليكوجين فسفوريلاز glycogen phosphorylase. انخفض استخدام الأحماض الدهنية لأن حمض اللبن يمنع التعبئة. وبالتالي، يحدث موقف مزدوج الخطورة. مع توافر الأحماض الدهنية منخفضة، يتم وضع اعتماد أكبر على مصادر الكربوهيدرات في الوقت الذي يتم فيه تعطيل تفكيك الجليكوجين. في الوقت نفسه، تتسارع عملية تعطل الفسفوكرياتين (PC)، مما يؤدي إلى استنزاف سريع لمصادر تجديد ATP وبالتالي، فإن كل من تعطيل الإنزيمات وتناقص توافر المصادر الطاقوية سيؤدي إلى انخفاض في إنتاج ATP، وفي النهاية انخفاض في الأداء.

– **التعب العضلي:** يتضح التعب العضلي من خلال تقليل قوة وسرعة تقلص العضلات. ويكفي أن نقول هنا أن فرضية حمض اللبن من التعب العضلي تستند في المقام الأول على اثنين من آثار انخفاض pH على تقلص العضلات. الأول هو تثبيط للاكتوموسين ATPase (actomyosin ATPase)، الإنزيم المسؤول عن تفكيك ATP لتوفير الطاقة الفورية لتقلص العضلات. والثاني هو تدخل من H^+ مع تصرفات واستيعاب الكالسيوم (Ca^{2+}) ، وهو أمر ضروري للاقتران بين الانقباض والإثارة والاسترخاء للبروتين الجسور المتقاطعة داخل الليف العضلي. قد تتداخل أيضًا مستويات عالية من أيونات اللاكتات (La^-) مع الجسور المتقاطعة، هذه الإجراءات تؤدي إلى انخفاض في القوة التي يمكن أن تمارسها العضلات وسرعة تقلص العضلات. تشكك الدراسات الحديثة في هذه الأدوار المقبولة تقليديًا لحمض اللبن في التعب العضلي، حتى إلى حد النظر في التغييرات التي تحدث عن اللاكتات أثناء التمرينات الرياضية على انها مفيدة. بمعنى أنه من غير الواضح ما إذا كان اللاكتات هو عامل مسبب أو وقائي لإرهاق العضلات، على الرغم من استمرار الخلاف، إلا أن الأمر المؤكد هو أنه على الرغم من أن اللاكتات\ H^+ قد تساهم في التعب فإن حمض اللبن ليس هو السبب الوحيد للتعب العضلي.

الإطار الزمني لإزالة اللاكتات

تتم إزالة اللاكتات من مجرى الدم بسرعة نسبيا بعد التمرين. ومع ذلك، لا تحدث الإزالة بمعدل ثابت. تمتلك العديد من التفاعلات الكيميائية هذه القدرة على تغيير المعدل أو السرعة التي تحدث بها. معدل يتناسب مع كمية المادة والمنتج الحالي. كلما كانت المادة متوفرة وتنتج أقل، زادت سرعة رد الفعل، والعكس بالعكس. وتسمى هذه الخاصية **تأثير الحركة الجماعية.mass action effect** يبدو أن

اللاكتات هو أحد تلك المواد التي يرتبط استخدامها وتحويلها بكمية المادة الحالية، وبالتالي، على الرغم من الاختلافات الواسعة بين الأفراد (والتي قد تكون مرتبطة بنوع العضلات)، في حالة الاسترجاع للراحة تتم إزالة ما يقرب من نصف اللاكتات في حوالي 15–25 دقيقة بغض النظر عن مستوى البداية. هذا الزمن يسمى نصف عمر اللاكتات. يتم تحقيق مستويات شبه الراحة في حوالي 30–60 دقيقة، بغض النظر عن مستوى البداية. وبالتالي، فإن تركيز اللاكتات الأولي بعد التمرين هو العامل الأول الذي يؤثر في معدل الإزالة. كلما زاد التركيز، كان معدل الإزالة أسرع. العامل الثاني الذي يحدد معدل إزالة اللاكتات هو ما إذا كان الفرد يتبع الراحة سلبية أو بتمرين (نشط). ثالثا، مع تمارين الاسترجاع، وشدة التمرين تحدث فرقًا. الرابعة، طريقة ممارسة التمرين المستخدمة في مرحلة الاسترجاع قد تؤثر على النسبة المئوية المثلى من VO2max عند حدوث الإزالة. وفي النهاية، ما اذا كان تمرين الاسترجاع مستمر أو متقطع continuous or intermittent يبدو أنه يحدث فرقًا. تشير الدلائل إلى أن عملية إزالة اللاكتات تحدث بسرعة أكبر عندما يتدرب الفرد أثناء الاستشفاء منه عندما يجلس بهدوء.

المحاضرة رقم2

النظام الأيضي والتعب أثناء التمرين

- استنفاذ ATP

من المعلوم الان انه يجب تجديد مخازن ATP بشكل مستمر لتجنب نضوب الـ ATP. إذا تم استنزاف مخازن ATP في العضلات الهيكلية سوف تدخل في حالة من الخطر، وهي حالة التقلص بشكل دائم حيث تصبح غير قادرة على الاسترخاء. دراسات أجريت على العضلات تبين أن تركيز الـ ATP العضلي لا يقل عن حوالي 60 ٪ من مستويات الراحة حتى أثناء ممارسة التمرينات الرياضية عالية الشدة، لذلك يبدو ان استنزافه ليس سببا مباشرة للتعب. فالعضلات تحافظ على المخزون الخاص بها من حيث ان انخفاض قوة التقلص تحدث قبل انخفاض المخزون لمنع حدوثه فبداية التعب هي استراتيجية وقائية استباقية للمحافظة على التوازن homeostasis.

على الرغم من عدم استنفاد ATP على مستوى العضلات، يمكن أن يحدث انخفاض على مستوى الألياف العضلية إلى 20 ٪ من قيم الراحة بعد التمرين وخاصة في الألياف من النوع الثاني، وهذا لمنع تلك الألياف من المساهمة في تقلص العضلات وبالتالي المساهمة في تعب من العضلة ككل. بالنظر إلى هذا التضارب بشأن استنفاد ATP في كامل العضلة وعلى مستويات الألياف، حقيقة التعب لا تزال مفتوحة للنقاش، ومع ذلك، فإن الرسالة المهمة التي يجب أخذها هي أن استنزاف الـــ ATP بعيد عن كونه سببًا مقبولًا للتعب الناجم عن ممارسة التمارين الرياضية.

- استنفاذ الفوسفوكرياتين PCr

يمكن تصنيف استعمال الفوسفوكرياتين حسب نوعية التمارين:

التمارين القصوى: اكدت الدراسات ان محتوى PCr ينخفض إلى حوالي 35-55 ٪ من مستويات الراحة ويساهم بحوالي 50 ٪ من الـــ ATP المنتج خلال سباق لمدة 6 ثوانٍ، مع زيادة مدة الركض إلى 20 ثانية، ينخفض إلى حوالي 27 ٪ من مستويات الراحة، و 9 إلى حوالي 20 ٪ في نهاية سباق 30 ثانية. علاقة الإيجابية بين استرجاع PCr العضلات وإنتاج الطاقة، ومع ذلك، PCr لا ينضب تماما في سباق واحد. كما ان غالبية الناس قادرون على إكمال نوبة واحدة من التمرين الأقصى لمدة 5-30 ثانية دون توقف، على الرغم من ذلك يظهر التعب، قد يكون الانخفاض في ناتج الطاقة ناتجًا جزئيًا عن نضوب PCr، مما يقلل من معدل إعادة تكوين ATP ويستلزم خفضًا في خرج الطاقة لمنع حدوث انخفاضات حرجة في تركيز الـــ ATP . قد لا يكون استنفاد PCr هو السبب الوحيد، لأن PCr لا يتم استنزافه بالكامل في سباق واحد من هذا الطول.

- **التمارين المتقطعة intermittent:** يشير التمرين المتقطع إلى فترات قصيرة من التمرين الأقصى (عادة من 5 إلى 30 ثانية تتخللها فترات الاسترجاع، نموذجية للعديد من الألعاب الجماعية مثل كرة القدم. هناك بيانات محدودة على ردود الأيض على ممارسة متقطعة ، تم الكشف عن علاقات إيجابية كبيرة بين القدرة على إعادة إنتاج PCr واستعادة انتاج الطاقة خلال الدورة المتكررة. توفر الدراسات دليلا على أن الأداء أثناء التمرينات المخبرية المتقطعة تعتمد جزئيا على مساهمة الـــ PCr . دراسات التحقيق في تأثير مكملات الكرياتين على فترات متقطعة تقدم مزيد من الأدلة على أن تأثير PCr على التعب خلال هذا الشكل من التمرينات ليس مطلقًا. ومع ذلك، قد يلعب دورًا في التعب أثناء ممارسة التمارين لمدة طويلة والتي تتضمن فترات عمل قصيرة عالية الشدة، مثل الألعاب الجماعية.

- **استنفاذ الجليكوجين:** الاستنزاف يؤدي إلى أزمة طاقة في العضلات مما يسبب التعب، غير انه لا يمكن الجزم بذلك وهنا نذكر اهم دواعي التعب لاستنفاذ الاجليكوجين:

– استنفاد الجليكوجين العضلي مرتبط بطريقة أو بأخرى تطور التعب أثناء التمرين.

– استنفاد الجليكوجين في العضلات ربما لا يؤدي إلى استنفاذ ATP العضلات الكاملة، لكن يمكن ان يكون موضعي داخل العضلات. هناك أدلة لإظهار ذلك اذ يحدث التعب أثناء التمرين لفترات طويلة عندما تكون مستويات الجليكوجين في العضلات منخفضة، و مستويات ATP لم تختلف اختلافًا كبيرًا عن المستويات الراحة، تشير هذه البيانات بالتالي إلى أن انخفاض عملية إعادة تكوين ATP بسبب استنفاد الجليكوجين في العضلات ليس سببا مباشرا للتعب.

– حاليا، يبدو أن استنزاف الجليكوجين العضلي الموضعي ربما تتداخل مع العملية المعتمدة على ATP لحركة Ca^{2+} داخل و خارج الخلية العضلية، والتي من شأنها أن تتداخل مع قدرة العضلات على انتاج القوة. ويعتقد ان كتلة الجليكوجين العضلية لها دور مهم في إطلاق Ca^{2+} في الساركوبلازم (التي تلعب دورا حاسما في تشكيل جسور الأكتين والميوسي) استنزاف الجليكوجين داخل الالياف قد يسبب استنزاف ATP موضعياً وإضعاف هذه الخطوة المهمة في عملية اقتران الإثارة–الانقباض.

– أثناء التمرين لفترات طويلة، قد يؤدي استنفاذ الجليكوجين الكبدي والعضلي إلى نقص السكر في الدم. دور نقص السكر في الدم في التعب قد تكون محيطي (أقل امتصاص الجلوكوز في العضلات) أو مركزي (انخفاض امتصاص الجلوكوز من قبل الدماغ).

– **الاحماض الدهنية:** توافر الأحماض الدهنية ليس عاملا مباشرا في تطور التعب. ومع ذلك، التمرين المطول مثل التدريب على التحمل والتدريب في حالة الصوم قد تشجع على التكيفات الأيضية التي تسمح للعضلات أكسدة المزيد من الدهون أثناء التدريب، وبالتالي تجنب استعمال الجليكوجين في العضلات و تأخير التعب، خاصة أثناء التمرين لفترات طويلة. غير ان نتائج البحوث لم تكن متسقة وهناك حاجة إلى مزيد من العمل في هذه المسألة.

التأقلم النظام الأيضي للتدريب

التكيفات الأيضية للتدريب الهوائي

تنعكس هذه التكيفات المتكاملة في ثلاثة متغيرات فسيولوجية مهمة تتعلق بعملية التمثيل الغذائي:

–**عتبة اللاكتات:** عتبة اللاكتات، هي علامة فسيولوجية ترتبط ارتباطًا وثيقًا بأداء القدرة على التحمل – فكلما ارتفعت عتبة اللاكتات، زادت قدرة الأداء. فوق عتبة اللاكتات، من المحتمل أن يعزى اللاكتات الأقل بمعدل

عمل معين إلى مزيج من انخفاض إنتاج اللاكتات وزيادة قدرة التخلص من اللاكتات. عندما يصبح الرياضيون مدربين بشكل أفضل، يكون تركيز اللاكتات في الدم بعد التمرين أقل في نفس معدل العمل.

– **نسبة التبادل التنفسي**RER : هي نسبة ثاني أكسيد الكربون المنبعثة إلى الأكسجين المستهلك خلال عملية التمثيل الغذائي، يعكس RER تركيبة خليط من المواد المستخدمة كمصدر للطاقة، مع انخفاض RER يعكس زيادة الاعتماد على الدهون لإنتاج الطاقة و RER أعلى يعكس مساهمة أكبر من الكربوهيدرات. بعد التدريب، يتناقص RER في التمرينات منخفضة الشدة المطلقة والنسبية. وتعزى هذه التغييرات إلى زيادة استخدام الأحماض الدهنية الحرة بدلاً من الكربوهيدرات بمعدلات العمل التالية بعد التدريب.

المحاضرة رقم3

إمدادات المواد الطاقوية

الهرمونات التنظيمية: مبدئيا من بين التعديلات الأيضية لبرنامج تدريبي التغييرات التي تحدث في الهرمونات المسؤولة عن تنظيم الايض. على الرغم من أنه لا يُعرف سوى القليل عن تأثير التدريب على عوامل الإفراز تحت المهاد وعلى هرمون قشر الكظر، إلا أن هناك نمطًا محددًا يحدث مع الهرمونات الخمسة المتدخلة بشكل مباشر في تنظيم الكربوهيدرات، والدهون، والبروتين. حيث يتم تقليل كمية الهرمون الذي يفرز خلال النشاط الهوائي تحت الحد الأدنى, وبالتالي، فإن الارتفاع في الإيبينيفرين والنورادرينالين هو أقل في حالة التدرب. نتيجة لذلك، يكون ارتفاع الجلوكاجون (الذي تحفزه الإيبينيفرين) منخفضًا، كما أن هناك انخفاضًا في تثبيط الأنسولين (الناجم عن النورابينفرين). وبالمثل، فإن الزيادة في هرمون النمو والكورتيزول أقل خلال التمرينات لدى الأفراد المدربين مقارنة بالأفراد غير المدربين. بسبب هذه التعديلات، يمكن القيام بالمزيد من العمل قبل الوصول إلى الحد الأقصى.

الكربوهيدرات

الخطوة التي تحد من معدل استخدام الجلوكوز في العضلات هي نقل الجلوكوز، ونقل الجلوكوز هو في المقام الأول وظيفة من الناقلات GLUT–4 يزيد التمرين من عدد GLUT–4 وتركيزه في العضلات الهيكلية، خاصة الالياف البطيئة المؤكسدة. هذا يؤدي إلى زيادة امتصاص الجلوكوز تحت تأثير الأنسولين. وبالتالي، في أي مستوى من أنسولين الراحة، يتم تحسين إزالة الجلوكوز في الجسم كله. على الرغم من هذه الزيادة في عدد الناقلات GLUT–4، يقلل تمرين التحمل من استخدام الجلوكوز أثناء ممارسة التمرين. يحدث هذا بسبب

انخفاض انتقال GLUT-4 أثناء التمرين. نتيجة لذلك، تستهلك العضلات المدربة نسبة أقل من الجلوكوز مقارنة بالعضلات غير المدربة أثناء التمارين المعتدلة. كل من التحمل وتدريبات العدو السريع تزيد من احتياطي الجليكوجين في العضلات والكبد. بالإضافة إلى ذلك، في نفس عبء العمل دون الحد الأقصى المطلق يحدث استنفاد الجليكوجين في العضلات والكبد بمعدل أبطأ لدى الأفراد المدربين مقارنة بالأفراد غير المدربين. هذه التغييرات تؤدي إلى انخفاض قيم نسبة التبادل التنفسي. نظرًا لأن الجليكوجين هو المصدر الرئيسي للطاقة في العمل ذي الشدة العالية، فإن الإمداد الأكبر من الجليكوجين المستخدم بسرعة أقل يمكّن الفرد من المشاركة في أنشطة مكثفة إلى حد ما على مستويات دون الحد الأقصى لفترة أطول قبل حدوث التعب. من ناحية أخرى، يمكن أن يؤدي التدريب السريع أيضًا إلى زيادة معدل انحلال الجليكوجين في مستويات أعلى من العمل، مما يمنح المتمرن إمدادات سريعة من الطاقة عند الحاجة لفترات قصيرة من النشاط الأقصى أو فوق الحد الأقصى.

الدهون

يمكن للفرد المدرب استخدام مخازن الكربوهيدرات الخاصة به ببطء أكثر من الفرد غير المدربين بسبب التغيرات التي تحدث في استقلاب الدهون. كل من الأفراد المدربين وغير المدربين لديهم أكثر من مخازن كافية من الدهون. ومع ذلك، يتم تحديد معدل أكسدة الأحماض الدهنية الحرة ليس من خلال كمية التخزين ولكن من خلال تركيز الأحماض الدهنية الحرة في مجرى الدم وقدرة الأنسجة على أكسدة الدهون. التدريب يجلب العديد من التعديلات في استقلاب الدهون:

- زيادة تعبئة أو إطلاق الأحماض الدهنية الحرة من الأنسجة الدهنية تحت الجلدية.

- زيادة مستوى الأحماض الدهنية الحرة في البلازما أثناء ممارسة التمرينات.

- زيادة في تخزين الدهون المتاخمة للميتوكوندريا داخل العضلات,

-زيادة القدرة على استخدام الدهون في أي تركيز لها في البلازما.

الزيادة في قدرة العضلات على أكسدة الدهون أكبر من الزيادة في قدرتها على أكسدة الجليكوجين. هذا بالاقتران مع انخفاض امتصاص الجلوكوز في البلازما، يؤدي إلى مساهمة أكبر من الدهون في إنتاج الطاقة. يقال إن الاعتماد المتزايد على الدهون كوقود له تأثير على توفير الجليكوجين glycogen-sparing effect وهو مسؤول عن خفض قيم RER في نفس شدة العمل لأن إمدادات الجليكوجين تستمر لفترة أطول، يتم تأخير

التعب مما يتيح قدرًا أكبر من القدرة على التحمل عند مستويات العمل دون الحد الأقصى. كل من التدريب على التحمل والركض لهما تأثيرات على الجليكوجين.

نشاط الانزيم

مفتاح زيادة إنتاج ATP هو نشاط الإنزيم. نظرًا لأن كل خطوة في كل مسار استقلابي يتم تحفيزها بواسطة إنزيم منفصل، فإن إمكانات هذا التكيف التدريبي مع إنتاج الطاقة كبير. ومع ذلك، يبدو أن جميع الإنزيمات لا تستجيب لنفس الحافز التدريبي ولا تتغير بنفس القدر.

انزيمات الجلكزة Glycolytic Enzymes نتائج الدراسات حول نشاط انزيمات السكر في الدم تاريخيا متناقضة، ولكن نمط أخذ في الظهور. تشارك تحلل السكرGlycolysis في كل من إنتاج الطاقة الهوائية واللاهوائية، وقد يحدث أن يكون التدريب عالي الشدة يتطلب تكيف لبعض أنواع الإنزيمات المحللة glycolytic enzymes مع استجابة البعض الآخر بشكل أفضل لتدريب التحمل. يبدو أن تدريب القوة والسرعة يزيد من نشاط إنزيم الجلكزة. هذه التغييرات بشكل عام أقل من الزيادات في النشاط في الإنزيمات الهوائية، والمعنى الوظيفي من حيث الأداء الفعلي لا يزال موضع شك. ثلاثة الانزيمات الرئيسية أظهروا تغييرات كبيرة في التدريب: فسفوريلاز الجليكوجين وفوسفو فركتوكيناز (PFK) واللاكتات.

فسفوريلاز الجليكوجين يحفز تفكيك الجليكوجين المخزن في خلايا العضلات لاستخدامه كوقود. تم العثور على زيادة في نشاط هذا الإنزيم من خلال تدريب السرعة الشدة عالية يتألف إما من فواصل زمنية قصيرة أقل من 10 ثوانٍ أو طويلة اكثر من 10 ثوانٍ فتري.

فوسفو فركتوكيناز PFK هو الإنزيم الرئيسي الذي يحدد معدل تحلل السكر. نتائج دراسات التدريب على التحمل والركض السريع غير متناسقة ولكنها تميل إلى اقتراح زيادة في نشاط الإنزيم بمستويات كافية من التدريب. تؤدي زيادة نشاط PFK إلى إنتاج كمية أكبر وأكبر من ATP التي يتم إنتاجها على مستوى السكر في الدم.

اللاكتات ديهيدروجينيز LDH تحويل البيروفات إلى اللاكتات. يوجد بأشكال مختلفة منفصلة، بما في ذلك شكل عضلة القلب (LDH 1) الذي يتميز بتقارب منخفض مع البيروفات مما يجعل تكوين اللاكتات أقل احتمالا. وفي العضلات الهيكلية الشكل (LDH 5) الذي يتميز بدرجة عالية من تقارب البيروفات مما يجعل تشكيل حمض اللبن أكثر احتمالا. التدريب على المداومة يميل إلى أن يكون له تأثيران على .LDH فهو يقلل من النشاط الكلي للـــ LDH، ويسبب تحولاً من شكل الخاص بالعضلات الهيكلية إلى شكل خاص بعضلة

القلب. وبالتالي، اللاكتات من غير المرجح أن يتم إنتاجه في العضلات الهيكلية، والأرجح أن تدخل البيروفات في الميتوكوندريا للاستخدام كوقود. كل من هذه التغييرات مفيد لأداء المداومة. تدريب القوة والسرعة تظهر آثارًا معاكسة من التدريب على المداومة، مما يزيد من الكمية الإجمالية للـــ LDH ويفضل شكل LDH الخاص بعضلات الهيكل العظمي نظرًا للتغيرات في تضخم الالياف السريعة.

إنزيمات الميتوكوندريا التغييرات في أنزيمات الميتوكوندريا من أكسدة بيتا beta-oxidation ، ودورة كريبس، والنقل الإلكتروني، والتفسفر التأكسدي تقترن بالتغيرات في الميتوكوندريا نفسها. كل من حجم وعدد الميتوكوندريا يزداد مع التدريب. وهكذا، تحتل الميتوكوندريا حصة أكبر نسبيًا من مساحة الليف العضلي. يبدو أن المنبه لهذه الزيادة هو نشاط التقلص في حد ذاته، بدلاً من أي منبه خارجي مثل تغييرات الهرمونات، نظرًا لأن تلك العضلات التي تشارك مباشرة في التدريب فقط تظهر فيها هذه التغييرات. على سبيل المثال، يزداد لدى المتسابقون في حجم الميتوكوندريا وعددهم فقط في الساقين، في حين أن المتزلجين لديهم زيادة في الميتوكوندريا في كل من الذراعين والساقين. في حدود معينة، تدريب المقاومة لا يبدو أنه يؤدي الى زيادة الميتوكوندريا. مع الميتوكوندريا اكبر، تتوفر المزيد من مواقع النقل لحركة البيروفات في الميتوكوندريا. يبدو أن النشاط الأنزيمي لكل وحدة من الميتوكوندريا هو نفسه في الأفراد المدربين وغير المدربين؛ ومع ذلك، فإن زيادة محتوى البروتين الميتوكوندريا يعني نشاط إنزيم أكبر بشكل عام لاستخدام البيروفات التي تم نقلها هناك. ومن المثير للاهتمام، على الرغم من أن معظم إنزيمات الميتوكوندريا تزيد في النشاط، إلا أن جميعها لا تفعل ذلك؛ ولا هو معدل التغيير هو نفسه للجميع. التأثير الكلي لزيادة نشاط الإنزيم وزيادة توافر البيروفات هو قدرة معززة على توليدATP بواسطة الفسفرة المؤكسدة. تعد هذه القدرة المعززة أكثر أهمية في توفير الطاقة لممارسة التمرينات دون الحد الأقصى مقارنةً بالتمرينات القصوى.

تراكم اللاكتات

يتراكم اللاكتات عندما يتجاوز معدل الإنتاج معدل التخلص. على الرغم من أنه من المعروف أن الفرد المدرّب يراكم لاكتات أقل من فرد غير مدرّب، سواء انخفض معدل إنتاج اللاكتات أو زاد معدل الخلوص مع التدريب.

حجم الميتوكوندريا والكثافة

نتائج التدريب في تعزيز حجم وكثافة الميتوكوندريا. ما إذا كانت هذه الزيادة سوف تكون واضحة في جميع أنواع ألياف العضلات يعتمد على توظيف كل نوع من الألياف أثناء التدريب. فمن المحتمل أن يلاحظ أكبر تحسن في حجم وكثافة الميتوكوندريا داخل الألياف البطيئة. إلى جانب زيادة في حجم الميتوكوندريا هي زيادة

مصاحبة في إنزيمات دورة كريبس وسلسلة نقل الإلكترون و إن الزيادة في هذه الأنزيمات بعد التدريب هي التي تسهل زيادة القدرة على التخليق الهوائي للـــ ATP تتيح هذه التعديلات للرياضي ممارسة التمارين الرياضية بنسبة أعلى من VO2max وبالتالي قد تعزز التحسينات في أداء التحمل. قدرة التأكسد المحسنة داخل ألياف النوع الأول قد تؤخر توظيف ألياف النوع الثاني. علاوة على ذلك، فإن ألياف النوع الثاني التي تعتمد على توظيفها في التدريب قد تواجه أيضًا قدرة أكسدة متزايدة. سيؤدي كلا هذين التعديلين إلى تقليل مساهمة التحلل اللاهوائي في إجمالي إنتاج الطاقة أثناء ممارسة التحمل وبالتالي تعزيز مقاومة التعب داخل الرياضي.

التكيفات في أنظمة الطاقة للعمل اللاهوائي

تمامًا كما يحدث التدريب الهوائي في تغييرات في نظام الطاقة الهوائية، يغير التدريب اللاهوائي جهاز ATP–PCr وأنظمة الطاقة للتحلل اللاهوائي. هذه التغييرات ليست واضحة أو يمكن التنبؤ بها كتلك التي تنتج عنها من التدريب على التحمل ، لكنها تحسن الأداء في الأنشطة اللاهوائية. عمليات التكيف في نظام ATP–PCr التي تركز على أقصى إنتاج لقوة العضلات، مثل تمارين الركض ورفع الأثقال، تعتمد بشكل كبير على نظام ATP–PCr للحصول على الطاقة. أقصى جهد يدوم أقل من حوالي 6 ثوانٍ يضع أكبر المطالب على تفكيك وإعادة تصنيع ATP و PCr بغض النظر عن النتائج المتضاربة، تشير الدراسات إلى أن القيمة الرئيسية لنوبات التدريب التي تستمر لبضع ثوانٍ فقط هي تطور القوة العضلية. مكاسب القوة هذه تمكن الفرد من أداء مهمة معينة بأقل جهد، مما يقلل من خطر التعب. إذا كانت هذه التغييرات تسمح للعضلات بأداء المزيد من العمل اللاهوائي، فلا تزال دون إجابة، على الرغم من أن اختبار الركض لمدة 60 ثانية يشير إلى أن التدريب اللاهوائي القصير من نوع العدو السريع لا يعزز القدرة على التحمل اللاهوائي.

يزيد التدريب اللاهوائي (30 ثانية) من أنشطة العديد من الإنزيمات الرئيسية لتحلل السكر. في كثير من الأحيان إنزيمات تحلل السكر المدروسة هي فسفوريلاز، فسفوفركتوكيناز (PFK)، و (LDH) زادت أنشطة هذه الأنزيمات الثلاثة من 10٪ إلى 25٪ مع فترات تدريب متكررة لمدة 30 ثانية ولكنها لم تتغير إلا قليلاً مع الفترات القصيرة (6 ثوان). نظرًا لأن كلا من PFK و الفوسفوريلاز ضروريان للحصيلة اللاهوائية لـــ ATP ، فإن هذا التدريب قد يعزز القدرة على إزالة السكر ويسمح للعضلات بتطوير توتر أكبر لفترة أطول من الوقت. وبالتالي، يجب أن نستنتج أن مكاسب الأداء مع هذه الأشكال من التدريب تنتج عن تحسينات في القوة بدلاً من التحسينات في العائد اللاهوائي لـــATP .