الباب الرابع

تحليل الطاقة الحيوية للرياضيين

الفصل الأول

عمليات تحليل الطاقة في النشاط العضلي

المقدمة

تتداخل العلوم المرتبطة بالتدريب الرياضي كالكيمياء والفسلجة وغيرها عند دراسة الأداء الحركي. وذلك لأن أعضاء الجسم المختلفة عبارة عن وحدة واحدة متكاملة.

حيث يؤدي التدريب الرياضي إلى حدوث تغيرات فسيولوجية وكيميائية داخل الخلية العضلية، لإطلاق الطاقة اللازمة للأداء الرياضي، نتيجة زيادة نشاط أجهزة وأعضاء الجسم المختلفة في استهلاك الطاقة.

يُعدّ إنتاج الطاقة من أهم الموضوعات العلمية في مجال التدريب الرياضي، نظراً لارتباط الطاقة بأنواع الأنشطة والتدريبات التي يقوم بها الفرد، ويحصل على احتياجه من الطاقة عن طريق المواد الكربوهيدراتية والمواد الدهنية.

وتحتاج مختلف الأنشطة الرياضية للأنشطة بنسب مختلفة حسب شدة ودوام المثير، حيث يتوقف تقدم المستوى الرياضي للفرد على مدى إيجابية التغيرات الكيميائية، ومن مصادر الطاقة بما يحقق التكيف لأجهزة وأعضاء الجسم لكي يواجه التعب الناتج من الجهد البدني.

وتستعمل الطاقة عند قيام الجسم بالعمل سواء أكان عملاً إراديًا أم غير إرادي وهناك علاقة بين مقدار العمل وكمية الحرارة المتولدة داخل الجسم، **فالطاقة**: هي كمية الحرارة الناتجة من الربط بين الشغل الميكانيكي المنظور وحرارة الجسم نفسه، حيث يمكن حسابها من الكمية الكلية للشغل الناتج والكفاءة المقدرة سلفاً للفرد الرياضي.

وحدات قياس الطاقة :

الجولي ، الكيلو جولي ، الكيلو كالوري أو استهلاك الأوكسجين

١٠ جولي = ١ كم /متر = ١٠ نيوتن/متر

١ كيلو جولي = ١٠٠٠ جولي = ٠,٢٣٤ كيلو كالوري

١ لتر من الأوكسجين المستهلك = ٥ كيلو كالوري

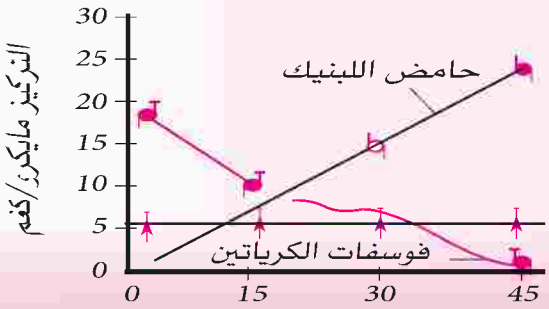
مصادر الطاقة
خلال النشاط العضلى

يعد تفاعل انشطار ATP المصدر المباشر للطاقة للنشاط العضلى . وعند التحليل الأنزيمى يحدث تحرر للطاقة المتكونة فى عملية الانقباض العضلى لإنجاز شغل ميكانيكى، وأثناء التحلل المائى لنهايات روابط ATP تتحرر طاقة تتراوح كميتها بين ٣٠ كيلو جول و ٤٦ كيلو جول لكل غرام جزيئى واحد من المادة المتحللة .

وتعتمد كمية الطاقة المتحررة على معيار PH للوسط وتركيز الفوسفات اللاعضوية وكذلك حالة تركيز كل من ATP - ADP فى الخلية، إن الطاقة فى الظروف الفيزيولوجية (الموجودة فى الجسم) لتحلل جزئ واحد عن ATP تساوى كمية مقدارها ٤٠ كيلو جول تقريباً .

يعد تركيز ATP فى العضلات ثابتاً تقريباً ويساوى هذا التركيز حوالى ٥ ملى مول فى كل كغم واحد من وزن العضلات الرطبة (حوالى ٢٥٪) . إن تجميع كمية كبيرة من ATP فى العضلة غير ممكن ، لأنه سينشأ عندئذ اضمحلال ATP العضلين ويمنع تكوين أواصر بين الخيوط الأكتينية والعضلينية فى الليفات العضلية مما يؤدى إلى فقدان الكفاءة الانقباضية للعضلة ، إضافة إلى ذلك فإن تركيز ATP فى العضلة لا يمكن أن ينخفض إلى أقل من ٢ ملى مول لكل كغم واحد من وزن النسيج الرطب ، لأنه عندئذ سيتوقف تأثير المضخة «التكلسية» فى فقاعات SR ، وعندئذ ستنقبض العضلة لغاية النفاذ الكامل لمجمل احتياطى ATP وإن احتياطي ATP فى العضلات عادة ما يكفى لـ ٣ – ٤ تقلصات انفرادية للقوة العظمى ، وكما تظهر الدراسات التى تستخدم الفحص المجهرى للعضلات فى عملية العمل العضلى أنه لم يظهر انخفاض جوهرى لتركيز ATP (الشكل رقم ١) ويفسر ذلك أنه خلال الفعالية العضلية فإن ATP تستعاد من نتائج الانحلال بالسرعة نفسها التى جرت فيها عملية التهشم خلال فعالية الانقباض العضلى ولمعالجة التفاعل المائى لـ ATP فإن النتائج النهائية لانحلال ADP و H_3PO_4 ينبغى أن تحصل على طاقة من الوسط الفعال تساوى تلك الطاقة التى تحررت أثناء انحلال ATP ، لذا فإن اتحاد ATP ينبغى أن يكون مصحوباً بتفاعلات تقويضية (CATABOLIC) تتحرر خلالها كمية كبيرة من الطاقة الكيميائية الكامنة .

الشكل (٢) تغير التركيز ATP وفوسفات الكرياتين وحامض اللبنيك في العضلة الهيكلية أثناء العمل



وتتكون خلال هذه التفاعلات مركبات مرحلية تضم مجاميع فسفورية قادرة على اجتيازها مع وجود احتياطي للطاقة من أجل ADP – إن تفاعلات الانتقال هذه تحمل اسم (transphosphoryi) وهي تحفز بواسطة أنزيمات خاصة . إن المركبات التي تستخدم لتحلل ATP إما أن تكون موجودة بصورة دائمة في الجسم (كفوسفات الكرياتين مثلاً) أو تكون خلال فترة العمل عند التحول التأكسدي لمواد مختلفة يمكن لتحلل ATP أثناء النشاط العضلي ، أن يتحقق خلال فترة التفاعل التي تتم دون وجود الأوكسجين وكذلك من خلال عملية الأكسدة التي تجري من خلال التحولات في الخلايا التي ترتبط باستهلاك الأوكسجين. وفي الظروف الاعتيادية فإن تحلل ATP يجري بصورة أساسية من خلال التحولات الحية الهوائية (ACROBICUS) ولكن عند النشاط العضلي المتوتر حيث يكون إيصال الأوكسجين إلى العضلات عملية تنطوي على صعوبة ، كما تقوى في الوقت نفسه في الأنسجة عملية التحلل اللاهوائي (ANAEROBICUS) لـ ATP وتحدد ثلاثة أنواع للعمليات اللاهوائية في العضلات الهيكلية للإنسان التي يمكن أن يتحلل فيها ATP وهي :

- العملية اللاهوائية اللاأسيدية ، إذ يحدث تحلل ATP بسبب عملية فسفورية بين فوسفات الكرياتين و ADP.
- عملية الميوكينازينة (MYOKINAS) ، وفيها تتم عملية تحلل ATP من خلال عملية فسفورية بجزء معين من ADP.
- تحلل السكر عملية أسيدية لا هوائية إذ يتحلل فيها ATP متزامناً مع التهشم الأنزيمي اللاهوائي للكربوهيدرات، وينتهي بتكون حامض اللبنيك.

ومن أجل التقويم الكمي للعمليات الهوائية واللاهوائية لتحويل الطاقة أثناء النشاط العضلي تستخدم معايير أساسية :

- معيار القدرة ، الذي يعكس سرعة تحول الطاقة في هذه العملية.
- معيار الحجم ، الذي يعكس الاحتياطي الإجمالي لمواد الطاقة أو كمية الطاقة المنحررة والعمل المنجز.
- معيار الفعالية ، الذي يبين العلاقة بين الطاقة التي تصرف لتحلل ATP والكمية الإجمالية للطاقة التي تحرر خلال هذه العملية.

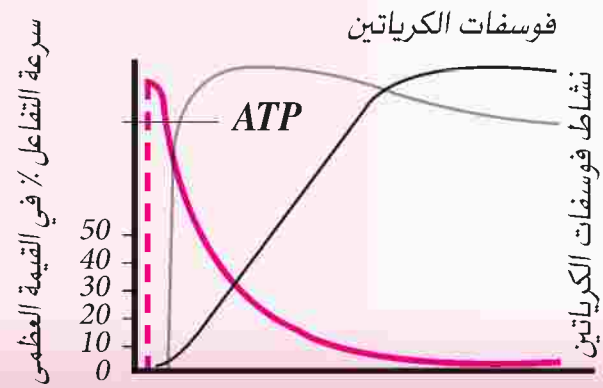
إن العمليات الهوائية واللاهوائية في تحويل الطاقة، تتميز بصورة ملحوظة في القدرة والحجم والكفاءة وبموجب هذه المعايير تمتلك العمليات اللاهوائية أرجحية عند تنفيذ تمارين قصيرة متكررة ذات تحمل عالٍ، أما الهوائية فلها الأرجحية عند العمل الطويل بشدة معتدلة.

انحلال ATP و'لتفاعل الفسفوري الكرياتيني:

يوجد في العضلات إضافة إلى ATP مواد أخرى من المركبات الفسفورية منها فوسفات الكرياتين، ولهذه المادة استجذاب (adsorption) إزاء الزلاليات الانقباضية في الألياف العضلية أو ما له ارتباط بالأغشية SR ويرتبط بالزلال الاكتيني الانقباضي بصورة وثيقة أيضاً أنزيم فسفور الكرياتين الذي يحفز تفاعل بين فوسفات الكرياتين وثنائي فوسفات الأدينوزين.

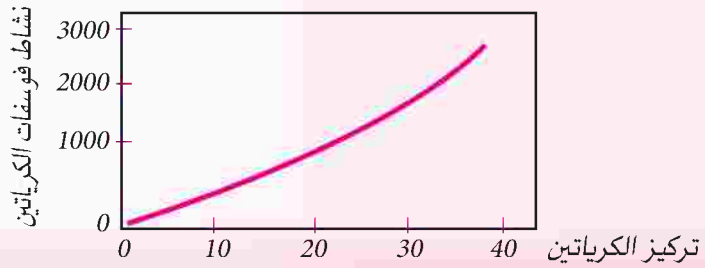
ويمتلك فسفور الكرياتين في العضلات الهيكلية للإنسان نشاطاً كبيراً، في حين أن فوسفات الكرياتين وثنائي فوسفات الأدينوزين وهما المواد الأولية في التفاعل الذي يحفز بواسطة الأنزيم المشار إليه، ويبديان فصيلة كيميائية عالية، الأمر الذي يؤدي إلى تعزيز هذا التفاعل مباشرة بعد بداية العمل العضلي وحالما تبدأ عملية انشطار ATP ويمكن بلوغ السرعة القصوى للتفاعل الفسفوري عند بداية اللحظة الثانية (الشكل رقم ٢).

الشكل (٢) سرعة تغير العمليات التي تولد الطاقة في العضلات العاملة بالاعتماد على فترة التمرين



وساعد في ذلك أيضاً القرب المباشر لفوسفات الكرياتين الاحتياطي من موقع تكوين ADP والألياف العضلية، إن أنزيم فسفور الكرياتين حساس جداً إزاء تغير قيمة PH في الوسط، ويظهر هذا الأنزيم النشاط الأعظم في وسط ذي قاعدية خفيفة، ويختفي هذا النشاط عند الهبوط الشديد لقيمة PH داخل الخلية، كما أن أيونات $ca++$ هي الأخرى تنشط التفاعل الفسفور – كرياتين ولعل الأكثر شدة يظهره تأثير تنشيط هذا الأنزيم من جانب الكرياتين الطليق الذي يتكون أثناء جريان هذا التفاعل (الشكل رقم ٣).

الشكل (٣) تغير نشاط الإنزيم لفوسفات الكرياتين في العضلات الهيكلية للإنسان بالاعتماد على الكرياتين الحر



إن تنشيط هذا الأنزيم بواحد من النواتج النهائية يمنع الهبوط الحاد لسرعة التفاعل خلال العمل، والذي كان يجب أن يحدث بموجب قانون المواد المتفاعلة بسبب الهبوط الذي يحدث في تركيز فوسفات الكرياتين في العضلات العاملة.

وبموجب الخصائص المشار إليها فإن تنظيم التفاعل الفسفور – كرياتين يبدأ أولاً في عملية إعادة تكوين ATP في لحظة بداية العمل العضلي ويجري بالسرعة القصوى إلى أن ينفذ احتياطي فوسفات الكرياتين في العضلات.

وينفذ هذا التفاعل نوعاً خاصاً لـ « المحلول الطاقي » الذي يؤمن ثبات وجود ATP في العضلات عند الهبوط الحاد في سرعة استخدامه تتجاوز كمية فوسفات الكرياتين في العضلات ثلاث مرات تقريباً وجود ATP (الجدول رقم ١).

جدول رقم (١)

المواد الميتابولية	التركيز في العضلات مايكرو مول / كغم	الوجود الإجمالي في الجسم	كمية الطاقة المتحررة كجول / كغم
ثلاثي فوسفات الادينوزين	4 – 6	120 – 180	0.71 – 0.25
فوسفات الكرياتين	15 – 16	450 – 510	0.63 – 0.71
الاحتياطي الاجمالي			
فوسفات الكرياتين + ثلاثي فوسفات الأدينوزين	19 - 23	570 - 690	0.80 – 0.96

إن الاحتياطي الإجمالي ATP + فوسفات الكرياتين (مركبات الفسفور) تؤمن تكوين الطاقة بكمية مقدارها ٨٤٠ كجول / كغم تقريباً للنسيج العضلي كافية للحفاظ على القوة بالقدرة القصوى لفترة ١٠ – ١٥ ثا. أما سرعة انشطار فوسفات الكرياتين في العضلات العاملة فإنها تتناسب طردياً مع شدة التمرين المنفذ أو قيمة التوتر العضلي.

إن أكبر قدرة تستطيع أن تؤمن تفاعل الفوسفات والكرياتين تساوي ٣,٨٠ كجول / كغم من وزن الجسم في الدقيقة وفي اللحظات الأولى التي تعقب بداية العمل، وطالما كان تركيز فوسفات الكرياتين في العضلات كبيراً فإن نشاط أنزيم فسفور الكرياتين يبقى محافظاً عليه في مستوى عالٍ، ويحسب هذا التفاعل جزءًا كبيرًا من كمية ADP المتكون جراء انحلال ATP وهذا هو ما يمنع تعزيز عملية تحرير الطاقة الأخرى.

وبعد ذلك وما أن يكون احتياطي فوسفات الكرياتين في العضلات قد نفذ بمقدار الثلث (ويستغرق فترة زمنية مقدارها ٥ – ٦ث) فإن سرعة تفاعل الفسفوكرياتين يبدأ بالانخفاض، وعندئذ ستبدأ في عملية إعادة تكوين ATP مشاركة متزايدة لتحلل السكر والتنفس حيث تكون منظوميتهما قد حجمت في سيتوبلازم الألياف العضلية (سركوبلازم) وسبحيات العضلات الهيكلية، ويحدث ذلك مع زيادة طول فترة العمل فعند اللحظة ٣٠ ثانية تنخفض سرعة التفاعل إلى النصف وعندما تمضي دقيقتان أي عند الدقيقة الثالثة فإن هذه السرعة ستشكل ١,٥ ٪ فقط من السرعة الابتدائية.

عند تنفيذ التمرين تكون الأرجحية باتجاه التفاعل المستقيم الذي يؤدي إلى تكوين ATP والكرياتين وما إن ينتهي العمل وتظهر في العضلات فضلة من ATP تتعزز العملية التي تقود

لاستعادة احتياطي فوسفات الكرياتين إلى القيمة الأولية ولما كان الجزء الأكبر من ATP اللازم لتفاعل الفسفوكرياتين يتكون نتيجة التحولات التأكسدية، فإن إعادة تكوين فوسفات الكرياتين يكون ممكناً جزئياً طيلة فترة العمل الطويلة الذي ينفذ في ظروف أوكسجينية.

يشكل التفاعل الفسفوكرياتين أساساً بايوكيميائياً للتحمل العضلي الموضعي، وهو يلعب الدور الحاسم في تأمين الطاقة لتمارين قصيرة متكررة بالقدرة العظمى، كما هى الحال في ركض المسافات القصيرة، الوثب، الرمي، وتمارين رفع الأثقال وغيرها ويؤمن هذا التفاعل إمكانية الانتقال السريع من حالة السكون إلى العمل، والتغير المفاجئ في وتيرة تنفيذ التمرين وكذلك التعجيل الختامي.

إعادة تكوين ATP في عملية تحلل السكر:

عندما تتوقف عملية الفسفوكرياتين لتأمين السرعة المطلوبة لاستعادة ATP في عملية الشغل العضلي ، يزداد تركيز الجزيئات الحرة ADP ، ويبدأ التحلل السكري اللاهوائي يلعب دوراً أساسياً في إعادة تكوين ATP ، وفي عملية تحلل السكر فإن الاحتياطي العضلي للسكر الذي يرد إلى الخلية من الدم يتهشم بالأنزيمات قبل بداية تكوين حامض اللبنيك.

إن معظم الأنزيمات التي تحفز تفاعلات انفرادية لتحلل السكر تحجم موضعياً في أغشية SR أو تتشتت في الساركوبلازم للخلايا العضلية، إن أنزيم الفسفوريلاز (phosphorylase) وأنزيم هكسوكينيز (hexokinase) الذي يسبب التفاعلات الأولية لتحلل السكر ستنشط بسهولة عند مضاعفة تركيز ADP والفوسفات اللاعضوية في السيركوبلازم إضافة إلى ذلك فإن تكوين الشكل الفعال لانزيم الفسفوريلاز يتحفز بتحرر أيونات الكالسيوم ++ca وتحرر الكاتوهولامين (Cataholamine) في عملية تنشيط الانقباض العضلي، ويساعد هذا جميعه للإشراك السريع لتحلل السكر في عملية إعادة تكوين ATP مع بداية العمل العضلي.

إن جزئيات الكربون في المرحلة الابتدائية لتحلل السكر تنشط بسبب اتحاد مجاميع الفوسفات من ATP وخلال تفاعلات قادمة تتكون مركبات فسفورية تصلح أن تكون أساسا لعملية أكسدة لاهوائية في واحدة من التفاعلات المركزية لهذه العملية الأنزيمية، وفي المرحلة الختامية لتحلل السكر فإن مركبات الحجم الميتابولي لتحلل السكر الذي يمكن تحديده باحتياطي الكربون الموجود داخل العضلات وإبعاد منظومات المحاليل بثبات قيمة PH داخل الخلية، يؤمن الاحتفاظ بالقدرة المحددة لتنفيذ التمرين لفاصلة زمنية تتراوح بين ٣٠ ثا و ٢,٥ دقيقة. وهذا يعني أن حجم هذه العملية يزيد بأكثر من ١٥ مرة من حجم عملية تفاعل الفسفوركرياتين.

وتتميز عملية التحلل بالسكر بكفاءة غير عالية، إذ تتحرر في عملية التحلل الأنزيمي اللاهوائي للكربونات طاقة مقدارها ٢٤٠ كجول فقط من الطاقة الإجمالية التي تبلغ قيمتها ٢٨٪ كيلو جول الموجودة في جزئ واحد، ويبدو أن الجزء الأعظم من الطاقة سيتركز في الجزئيات المتكونة في حامض اللبنيك.

ويمكن أن تتحرر من خلال الأكسدة الهوائية وتتحول كمية من الطاقة تتراوح بين ٨٤ و ١٢٥ كيلو جول من الكمية الإجمالية للطاقة أثناء حدوث تحلل السكر بالشكل الذي يمكن استخدامه، للعلاقات الفوسفاتية ATP وانطلاقا من هذا فإن كفاءة تحلل السكر يجب أن تقوم بقيم عامل الكفاءة التي تتراوح بين ٠,٣٥ و ٠,٥٢ وهذا يعني أن نصف كمية الطاقة المتحررة تقريباً من الطاقة الإجمالية المتحررة تتحول إلى حرارة ولا يمكن أن تستخدم أثناء العمل.

ونتيجة مضاعفة سرعة النواتج الحرارية في العضلات العاملة أثناء عملية تحلل السكر في العضلات العاملة ، فإن درجة الحرارة ستزداد لغاية الدرجة ٤١ – ٤٢ .

إن تكوين حامض اللبنيك – المرحلة الختامية لتحلل السكر- يحدث فقط عند الظروف اللاهوائية، إلا أن السكر في هذه الحالة يمكن أن ينتهي بوجود كميات من الأوكسجين ولكنه في هذه الحالة سينتهي عند مرحلة تكوين العتبة الأوكسجينية الحرارية (pyroampeloth) التي يمكن أن يتعرض فيما بعد إلى تحول تأكسدي في سبحيات العضلات وعندما يكون تركيز المركب المشار إليه عالياً (وهو مركب حامضي) فإن جزءاً منه يمكن أن يتحول إلى الأنين، وعندما يخرج من العضلات حوامض فسفورية تعطي طاقة غنية إلى ADP وبذلك فهي تؤدي إلى إعادة تكوين ATP .

جدول رقم (٢)

يمثل الطاقة المتحررة عند التحلل السكري اللاهوائي

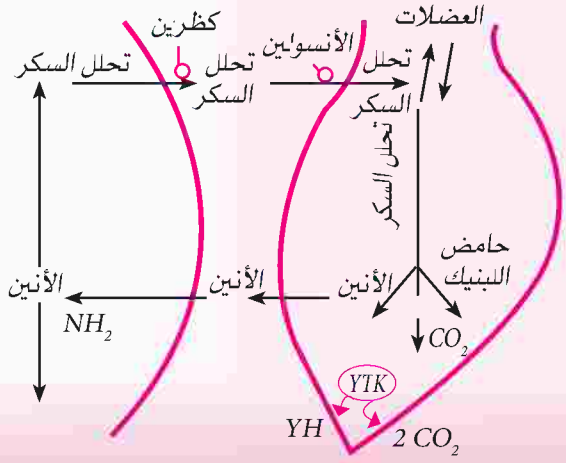
المؤشر	لكل كغم من النسيج العضلي	٣٠ كغم من الكتلة العضلية (لجميع كتلة الجسم)
كمية حامض اللبنيك المتكون (غم)	2 – 2.3	60 – 70
كمية ATP المعاد تكوينه	33 – 38	1000 – 12000
كمية الطاقة المتحررة كجول	1.38 – 1.59	40 – 50

وعند الأخذ بالحسبان هذه الكمية من ATP فإن ما سيحصل عليه من جديد من ATP ستتكون (في تلك الحالة التي يكون فيها تحلل الكليكوز المادة الأولية) جزئيتان لكل جزئ واحد من انشطار الكربون أو (في تلك الحالة التي يكون النشاء الحيواني للعضلات هو المادة الأولية) ثلاثة جزئيات لكل جزئ واحد للتحلل السكري المكافئ.

إن القدرة القصوى لتحلل السكر تساوي ٢٥٠ كجول / كغم دقيقة تقريباً وهو أقل بعض الشئ من قدرة تفاعل الفسفوكرياتين، ولكنه يتجاوز بمقدار ٢ – ٣ أضعاف التفاعل الهوائي ويتم التوصل إلى أكبر سرعة لتحلل السكر بعد مضي ٢٠ – ٣٠ ثانية على بداية العمل، وعندما تحل نهاية الدقيقة الأولى للعمل يصبح المصدر الأساسي مرة أخرى للتحلل السكري هو إعادة تكوين ATP إلا أن الهبوط الحاد الذي يؤدي إلى استهلاك الكميات غير الكبيرة نسبياً لاحتياطي النشا الحيواني في العضلات وهبوط نشاط الإنزيمات الأساسية فإن حلقة التحلل السكري تحت تأثير حامض اللبنيك المتكون وانخفاض قيمة PH داخل الخلية ستؤدي إلى انخفاض سرعة تحلل السكر كلما طالت فترة التمرين ، وعند الدقيقة ١٥ فإن سرعة تحلل السكر ستشكل نصف قيمة السرعة الابتدائية.

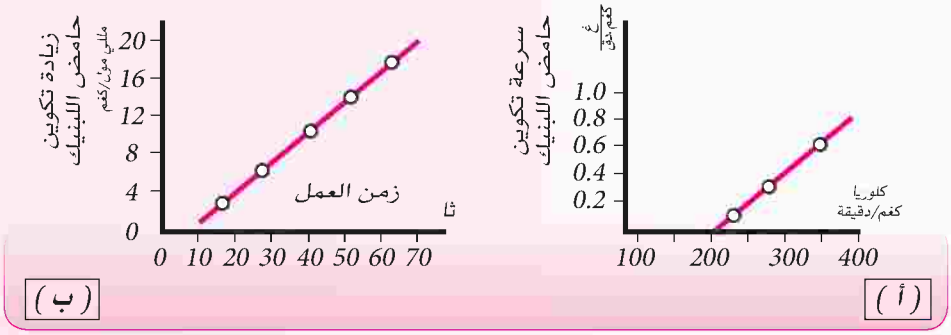
ويذهب إلى الدم ويرتبط بدورة السكر «الأنين» الذي يربط بصورة متحدة الكربونات في الكبد والعضلات (الشكل رقم ٤). وفي ظروف الفعالية العضلية الشديدة فإن هذه الدورة ستكون دوراً مساعداً فقط ولعل الجزء الأساسي من الكربونات التي ستتهشم عن طريق الخلل السكري سيتحول إلى حامض اللبنيك.

الشكل (٤) تنشيط دورة تحلل السكر الأنين أثناء العمل العضلي



الشكل (٥) (أ) مستوى ناتج الطاقة .

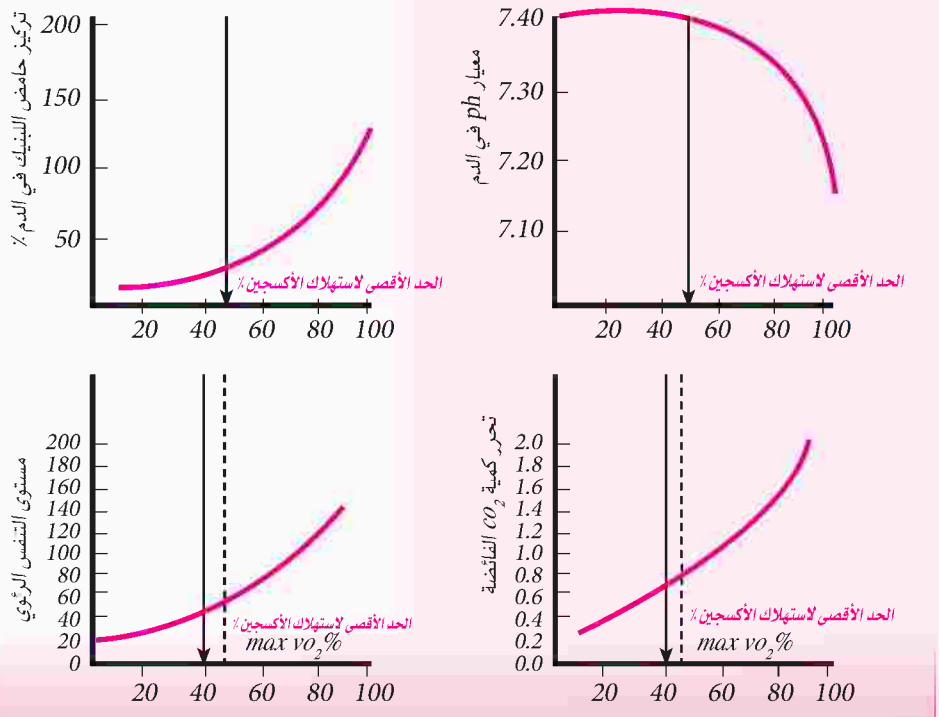
(ب) تكوين حامض اللبنيك في عملية تحلل السكر اعتمادا على تركيز وطول فترة التمرين



إن تكوين كل جزئ من حامض اللبنيك في هذه الحالة سيكافئ إعادة تكوين ما مقداره ١,٠ إلى ١,٥ جزئ لـ ATP ويتواجد حامض اللبنيك المتراكم خلال العملية اللاهوائية بعلاقة طردية مع قدرة وإجمالية فترة استمرار التمرين (الشكل رقم ٥).

يتعرض حامض اللبنيك شأنه شأن أي حامض عضوي آخر، إلى تحلل في الوسط المائي وعندما تتراكم كمية كبيرة منه فسيؤدي إلى تغير تركيز أيونات الهيدروجين الحامضي - العمل الأنزيمي للحلقة التنفسية في السبحيات - ولكن إذا كانت الإزاحة كبيرة فعندئذ وكما وردت الإشارة إلى ذلك سابقاً. سيحدث استنفاذ الأنزيمات التي تنظم النشاط الانقباضي للعضلات والسرعة الهوائية لإعادة تكوين ATP . ويمكن أن نذكر من هذه الأنزيمات بالدرجة الأساسية أنزيم ATP وأنزيم الليفات العضلية وأنزيم الفسفوكرياتين ومعظم أنزيمات التحلل السكري، إن زيادة كمية حامض اللبنيك في الفضاء السيركوبلازمي للعضلات سيكون مصحوباً بتغير الضغط التناضجي (osmoticus) وفي هذه الحالة، فإن الماء الموجود في حيزٍ ما بين الخلايا سيذهب إلى داخل الألياف العضلية مسبباً انتفاخها (الشكل رقم ٦).

الشكل (٦) إيجاد (عتبة التبادل اللاهوائي) اعتماداً على تغير تركيز حامض اللبنيك ومؤشر PH في الدم ومستوى التنفس الرئوي وتحرر فائض Co_2



إن التغير الجوهري لهذا الضغط في العضلات يصلح أن يكون سبباً لشعور مرضي، ومن السهل على حامض اللبنيك أن ينفذ خلال أغلفة الخلايا وهو عندما ينفذ إلى الدم قادماً من العضلات العاملة فإنه سيساهم في تفاعل مع منظومة المحاليل البيكربونية مما سيؤدي إلى تحرر فائض لاميتابولي من co_2.

ولما كانت زيادة تركيز أيونات الهيدروجين وزيادة ضغط co_2 يصلحان أن يكونا مؤشرات ميتابولية أساسية للمركز التنفسي، لذا فإنه عند ورود الحامض اللبني إلى الدم ستعزز التنفس الرئوي وإيصال الأوكسجين إلى العضلات العاملة.

إن تراكم حامض اللبنيك وظهور فائض co_2 وتغير PH وفرط التهوية الرئوية، التي تعكس تقوية تحلل السكر في العضلات عادة ما يتم ملاحظته عندما تكون شدة تنفيذ التمرين تشكل نسبة مقدارها ٥٠ ٪ من القدرة الهوائية القصوى كما في الشكل السابق، شكل (٦).

إن هذا المستوى من الحمولة يؤشر باعتباره (عتبة التبادل اللاهوائي) وكلما كان الحصول عليه مبكراً كلما بدأت عملية تحلل بسرعة أكبر، ويصاحب ذلك تراكم حامض اللبنيك ونمو التعب في العضلات العاملة، إضافة لذلك لابد من الإشارة إلى أن تحلل السكر يلعب دوراً مهماً أثناء النشاط العضلي المتوتر في ظروف عدم التكيف في إيصال الأوكسجين إلى الأنسجة.

وهو يصلح أن يكون أساساً بايوكيميائياً لما يسمى بسرعة التحمل كما يعد مصدراً استعراضياً للطاقة في التمارين التي تساوي فترتها القصوى من ٣٠ ثانية إلى ٢,٥ دقيقة (العدو للمسافات المتوسطة سباحة ١٠٠ متر و ٢٠٠ متر، سباق الدراجات .... الخ) ويتم من جَرَّاء تحلل السكر تعجيل طويل أثناء سير التمرين وكذلك في المسافة الختامية.

إعادة تكوين ATP في تفاعل انزيم الميوكيناز (Myokinase):

يجري تفاعل أنزيم الميوكيناز في العضلات عند الزيادة الملحوظة في تركيز ADP في السيركوبلازم.

وتنشأ مثل هذه الحالة عندما يكون الإجهاد العضلي واضحاً، حيث لن يكون بإمكان سرعة جريان العمليات التي تساهم في هذا التفاعل لإعادة تكوين ATP ، إن تعادل سرعة انشطار ATP من هذا الجانب يمكن النظر إلى تفاعل الميوكيناز كآلية اضطرارية لتأمين إعادة تكوين ATP ، في تلك الظروف التي لا يمكن تخفيف ذلك بطرق أخرى.

عند تعزيز تفاعل الميوكيناز فإن جزءاً من أحادي فوسفات الأدينوزين المتكون سيخرج من نطاق التبادل الهوائي، إذ سيتحول إلى حامض أيوني وبالطبع فإن هذه العملية غير مفيدة للجسم لأنه سيؤدي إلى انخفاض الاحتياطي الإجمالي لأحادي فوسفات الأدينوزين في السيركوبلازم في العضلات مع جميع ما يترتب عن ذلك من نتائج، وفي الوقت نفسه فإن جزءاً من زيادة تركيز أحادي فوسفات الأدينوزين في السيركوبلازم سيُظهر في تفاعل الميوكيناز تأثيراً في أنزيم تحلل السكر، ويؤدي هذا بدوره إلى زيادة مضاعفة سرعة إعادة التكوين اللاهوائي لـ ATP ، وفي الحال سينفذ تفاعل الميوكيناز دوراً في تعزيز الميتابولي، الذي يؤدي بدوره إلى إيصال الإشارة من ATP الليبفات العضلية إلى منظومة تكوين لـ ATP.

إن تفاعل الميوكيناز كتفاعل الفسفوكرياتين مثلا سيكون ببساطة تفاعلاً يستخدم لتحليل الهبوط الحاد في سرعة تكوين ATP واستخدامه، وعندما يظهر في الخلية فائض من ATP فإنه سيستبعد حالاً من خلال تفاعل الميوكيناز.

إعادة تكوين ATP في العملية الهوائية:

تتميز الآلية الهوائية لإعادة تكوين ATP بإنتاجيتها العالية، إذ يكون نصيبها في الظروف التقليدية ما يقارب ٩٠ ٪ من الكمية الإجمالية لـ ATP التي تتكون من جديد في الجسم، وتنتشر المنظومة الأنزيمية للتبادل الهوائي في الدرجة الأساسية في الخلايا ويمكن تقسيمها إلى قسمين هما: حلقة التأكسد المتأثرة بانزيم معين والتي يتميز فيها خلال التحولات المختلفة تحت تأثير أنزيم الهيدروجينات – الهيدروجين الذي يستقبل (الأكسدة الأولية) وحلقة التأكسد الإنترمدينين (intermedinun)، حيث ينقل الهيدروجين المتكون في تفاعلات من خلال منظومة الأنزيمات التنفسية ليتحد مع الأوكسجين مكوناً ماء.

وتنتمي إلى مجموعة دورات التأكسد المتأثرة بالأنزيمات الآتية:

حلقة انشطار الكاربوهيدرات بالتحلل السكري التي تنتهي بحامض اللبنيك، وحلقة تحول حامض الكربونيك الثلاثي، وأكسدة B للحوامض الدهنية. إن مغزى التحولات الكيميائية في الحلقات المتأثرة بالأنزيمات تكمن في قدوم الأنزيمات الأولية المتكونة في صيغة تلائم تأثير أنزيم الديهيدروجيتاز وما يتبعه من تحرير طاقة خلال عملية الأكسدة – الاختزال، حيث تساهم التفاعلات الأنزيمية التنفسية، وتحافظ الطاقة التي تتحرر في عمليات الديهيدروجيناز، في تشكيلات الهيدروجين مع الأنزيمات وهي تستخدم في عمليات إعادة تكوين ATP عندما يتم نقل الهيدروجين إلى الأوكسجين عبر منظومة الأنزيمات التنفسية التي تنتشر على الأغشية الداخلية للسبحيات.

توجد في الحلقة التنفسية ثلاثة مراكز للاتحاد حيث يمكن إعادة تكوين ATP بسبب الطاقة التي يمكن أن تتحرر خلال عملية انتقال الألكترونات، ويوجد المركز الأول للاتصال في قاطع انتقال الهيدروجين، وإن كمية الطاقة المتحررة في هذا التفاعل تكون كافية لإعادة تكوين جزئ واحد من ATP ، ويوجد المركز الثاني للاتصال في قاطع انتقال الألكترونات من الأنزيم خلال السيتوكروم Cytocrome (b) إلى السيتوكروم (c).

ويجري إعادة تكوين الجزيئة الثالثة ATP في المرحلة الختامية للحلقة التنفسية في تفاعل سيتوكرومي Cytocrome إذ يجري انتقال الألكترونات من منظومة سيتوكروم إلى الأوكسجين، وتتحرر في هذا المركز للاتصال كمية من الطاقة تفوق الكميات التي تتحرر في أي تفاعل في الحلقة التنفسية، ويمكن لهذه الطاقة بسهولة أن تكفي لإعادة تكوين بضع جزيئات من ATP ، ومع ذلك فإنه في هذا المركز للاتصال كما في المراكز الأخرى تجري عملية تكوين جزئ واحد فقط من ATP. أما فائض الطاقة المتحررة فتصبح القوة المحركة الرئيسة لعملية نقل الألكترونات في الحلقة التنفسية برمتها.

إن الأوكسجين الذي يستقبل حزمة الألكترونات الناجمة عن التفاعل السيتوكرومي يصلح أن يكون المصدر الاحتياطي الذي يؤمن انجذاب الألكترونات من الحلقة التنفسية ويحافظ على مكونات هذه الحلقة في حالة أكسدة. الأمر الذي يمكنها من استلام الهيدروجين من جميع مصادر التأكسد. تعتمد سرعة انتقال الألكترونات عبر المنظومة التنفسية على تركيز ADP وعلى الكمية اللامحدودة للفسفور بالقرب من مراكز النشاط لـ ATP على السطوح الداخلية لأغشية السبحيات، فإذا ما انعدم وجود ADP و H_3PO_4 في الخلية اللازمة لتركيز طاقة البروتون Proton الكامنة في الغشاء فإنه رغم وجود فائض من الأوكسجين فإن تيار الألكترونات سيضحى معزولاً. وعند الانتقال من حالة السكون إلى حالة النشاط في العضلات فإن ATP سينشطر بسرعة عالية متحولاً إلى ADP و H_3PO_4. وبزيادة تركيز هذه المركبات ستصبح عند الألكترونات القابلية على الانتقال عبر مراكز الاتصال بسرعة تساوي سرعة انتقال البروتونات خلال الغشاء عند إعادة تكوين ATP في مجموعة التكوين الفعال لـ ATP. وتستمر شدة التنفس طالما هنالك حاجة للطاقة لتنفيذ العمل.

وعندما تزول هذه الحاجة فإن قسماً كبيراً من ADP يتحول إلى ATP ، وعندئذ ستحل الرقابة التنفسية من جديد، وعليه فإن العلاقة بين ATP و ADP ستنظم بدقة الحلقة الوظيفية لانتقال الألكترونات تبعاً لحاجة الخلايا للطاقة.

ويمكن الحكم على كفاءة عملية الأكسدة الفسفورية من قيمة علاقة الفوسفات اللاعضوية المرتبطة في عملية تكوين ATP إلى الأوكسجين الممتص وكما ذكرنا سابقاً فإنه عند انتقال ذرتين للهيدروجين خلال الحلقة التنفسية من المواد المتأثرة بالأنزيمات التي تعطي ألكتروناتها ثلاثة جزيئات من ATP ، أما عند أكسدة مواد أخرى تعطي ألكتروناتها في الحلقة التنفسية بمساهمة الفلونروتيدات (phlavonroteeid) تكون اثنين من الجزيئات. إن أكسدة حامض الاسكوربيك (فيتامين ج) الذي يتم بمساعدة الاسيتوكروم يصاحب عند تجاوز مرحلتي الاتصال، بتكوين جزئ واحد من ATP.

ولابد من الأخذ بالحسبان أيضاً إن حالة الغشاء السبحي ونشاط أنزيمات الحلقة التنفسية تخضع لتأثير عوامل متفرقة قابلة على حجز ATP المتكون أثناء انتقال الألكترونات إلى الأوكسجين.

إن مثل هذا التأثير الإجمالي على عملية الأكسدة الفسفورية في العضلات الهيكلية يمتلك هرمون الغدة الدرقية والحوامض الدهنية وحامض اللبنيك ذا التركيز العالي وبعض السموم الخاصة.

ويتعجل تحت تأثير هذه العوامل انتقال الألكترونات ولكن ATP في هذه الحالة سوف لن يتكون وتتشتت الطاقة المتحررة على شكل حرارة.

ويوجد بالإضافة للطريق الاعتيادى في أكسدة المواد ذات الصلة بتأثر الأنزيمات في الأغشية الداخلية طريق أكسدة أيضاً ولكنها أكسدة موضعية في الأغشية الخارجية حيث يشارك سيتوكروم 2 ومنظومة بسيتوكروم bs ، ويقود تنشيط هذا الطريق إلى الأكسدة السريعة، ولكنه لا يرتبط مع تكوين ATP ويؤدي إلى تشتت الطاقة بشكل حرارة ويستخدم هذا الطريق كمنظومة محاليل من شأنها الحفاظ على التركيز المطلوب للأكسدة ويطرد فائض حامض اللبنيك الذي يتكون في عملية تحلل السكر.

ويدخل ATP الذي يرد من الأرضية في فضاء ما بين الأغشية في تفاعل مع الكرياتين الذي ينفذ خلال الغلاف السبحي الخارجي من السيكروبلازم وينشط هذا التفاعل بمساعدة أنزيم الفسفوكرياتين الموجود على الغلاف السبحي الخارجي، أو في فضاء ما بين الأغلفة ويتحول الفسفوكرياتين المتكون مرة أخرى إلى السيركوبلازم حيث يصبح في وضع يسهل الوصول إليه لتأثير الفسفوكرياتين في الليفات العضلية. إن ATP الذي يرجع إلى الأرضية يبدأ بالمساهمة في تفاعلات الأكسدة الفسفورية المصحوب بانتقال الألكترونات في الحلقة التنفسية.

إن إجمالي الطاقة المنتجة في العملية الهوائية يتجاوز أكثر من ١٠ أضعاف التغير في الطاقة الحرة أثناء التحلل السكري للهيدروكربونات في ظروف لاهوائية، إن كفاءة تحويل الطاقة في ظروف هوائية تساوي ٥٥ – ٦٠ ٪. إن المعلومات التي تتعلق بكمية الطاقة المتحررة في العضلات العاملة في الظروف الهوائية لتحول النشا الحيواني يبينها الجدول رقم (٣).

جدول رقم (٣)

المؤشر	لكل كغم واحد من وزن العضلات	الوزن عموم الجسم ٣٠ كغم من وزن العضلات
كمية النشا الحيواني في العضلات / غ	15 – 13	500 – 400
الكمية الإجمالية لـ ATP المعاد تكوينه / جزيئ	3.2 – 2.8	98 – 87
كمية الطاقة المتحررة / كيلو جول	134 – 117	8640 – 4100

وكتطبيقات للتحول الهوائي في العضلات العاملة يمكن استخدام ليس فقط احتياطي النشا الموجود داخل العضلات، وإنما الاحتياطي الخارجي للكربوهيدرات (مثلا نشأ الكبد)، الدهون، وكذلك الزلاليات في بعض الحالات، لذلك فإن الحجم الإجمالي للعملية الهوائية كبير جداً ويصعب تقييمه بدقة. إن الحجم الميتابولي الذي يتحجم بدرجة كبيرة بتغير تجانس الوسط ، وعلى خلاف التحلل السكري فإنه وكنتيجة لتراكم فضلة حامض اللبنيك في الجسم، إن النتائج النهائية للتحولات الهوائية (CO_2 ، H_2o) لا تسبب أي تغير جوهري في الوسط الداخلي ويمكن بسهولة طردها من الجسم.

إن تكوين جزئ واحد من ATP في عملية الأكسدة الفسفورية يكافئ الحاجة إلى ٣,٤٥ لتر من الأوكسجين ، وإن مثل هذه الكمية تستهلك في حالة السكون خلال فترة ١٠ – ١٥ دقيقة أما خلال العمل العضلي الذي يسبب التعب (كما هي الحال في سباق الماراثون مثلا) فإن الفترة ستتقلص إلى دقيقة واحدة فقط، ولكن احتياطي الأوكسجين في العضلات العاملة نفسها ضئيل، حيث إن الكمية الضئيلة الموجودة هناك ستكون في حالة ذائبة في داخل خلية البلازما وفي حالة الارتباط مع الجلوبين العضلي للعضلات.

أما القسم الأساسي من الأوكسجين في العضلات لإعادة تكوين ATP فإنه سينتقل إلى النسيج خلال منظومة التنفس الرئوي والدورة الدموية.

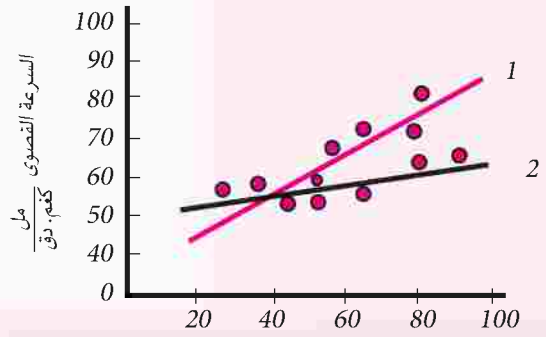
ومن أجل العمل المستمر للحلقة التنفسية وآلية الأكسدة الفسفورية لضغط الأوكسجين في الخلايا ينبغي الاحتفاظ بمستوى لا يقل عن ١٥ – ١٠ ملم زئبق. ولأجل تأمين ذلك ينبغي أن يكون ضغط الأوكسجين من الخارج (في الشعيرات العضلية) ما يقارب من ١٥ – ٢٠ ملم زئبق، لأن الأوكسجين يدخل إلى الخلايا بواسطة التنافذ، إن الاحتفاظ بالضغط الحرج للأوكسجين على الغشاء الخلوي الخارجي لا يعتمد على تغير سرعة استهلاك الأوكسجين في النسيج ويمكن تحقيقه بمساعدة منظومة معقدة للتنظيم، والتي يدخل فيها إضافة إلى الآليات الميتابولية التنظيمية داخل الخلايا، التنظيم العصبي والهرموني للتنفس الخارجي للدورة الدموية، إن القدرة القصوى للعملية الهوائية تعتمد بقدر معلوم على سرعة الأوكسجين المستنفذ في الخلايا . (وهي بدورها تعتمد على العدد الإجمالي للسبحيات في الخلية وعدد نشاط أنزيمات الأكسدة الهوائية).

وتعتمد على سرعة إيصال الأوكسجين إلى التسبيح. وتقوم قدرة التكوين الهوائي للطاقة من خلال قيمة الاستهلاك الأقصى للأوكسجين الذي يمكن الوصول إليه – أي الأوكسجين – أثناء تنفيذ العمل العضلي وتساوي هذه القيمة عند الرياضيين ٥٥ – ٦ لتر / دقيقة. ولما كانت هذه القيمة تعكس سرعة استهلاك الأوكسجين في العضلات العاملة في الوقت الذي يحدث فيه في العضلات الهيكلية جزء كبير من الكتلة الفعالة للجسم، فإنه على العموم عند مقارنة قيمة الحد الأقصى لاستهلاك الأوكسجين في الكفاءة الهوائية للأشخاص المختلفين سيعبر عنها،

أي عن القيمة بوحدات نسبية، أي منسوبة للكيلو غرام الواحد من وزن الجسم وتساوي قيمة الحد الأقصى لاستهلاك الأوكسجين عند الأشخاص الفتيان الذين لا يمارسون الرياضة ٤٠ – ٤٥ ملي لتر / كغم. دق (٨٠٠ – ١٠٠٠ جول كغم) في حين تساوي هذه القيمة عند الرياضيين الدوليين ٨٠ – ٩٠ مل / كغم – دق (١٦٠٠ – ١٨٠٠ جول / كغم. دق).

ويلاحظ أكبر قيمة للسبحيات، وأكبر قيمة ونشاط أنزيمات الدورة التنفسية في الألياف العضلية الحمراء ذات الانقباض البطئ، وكلما كانت نسبة تركيز هذه الألياف في العضلات التي تتحمل أثناء تأدية التمارين أكبر كلما كانت القدرة الهوائية العظمى عند الرياضيين أكبر وبالتالي سيكون مستوى إنجازاتهم باستمرارية فترة التمرين أكبر (شكل رقم ٧).

الشكل (٧) العلاقة بين قيمة الحد الأقصى لاستهلاك الأوكسجين عن الرياضيين (١) وغير الرياضيين (٢) وقيمة الألياف الحمراء ذات الانقباض البطئ



ST للألياف في تركيب العضلات ٪

عمليات إعادة تكوين ATP في التدريبات الهوائية واللاهوائية:

من المواصفات التي ذكرت سابقاً للعمليات الهوائية واللاهوائية لإعادة تكوين جزيئات ATP أن هنالك علاقة واضحة في ديناميكية تحرير الطاقة عند العمل العضلي. ففي بداية العمل واللحظات الأولى التي تعقب تلك البداية تتخذ عملية إعادة تكوين جزيئات ATP في عملية الفسفوكرياتين أرجحية واضحة ، ومع استنفاذ الحجم اللاأسيدي للاحتياطي يبدأ في العضلات العاملة دور متصاعد لعملية التحلل السكري اللاهوائي.

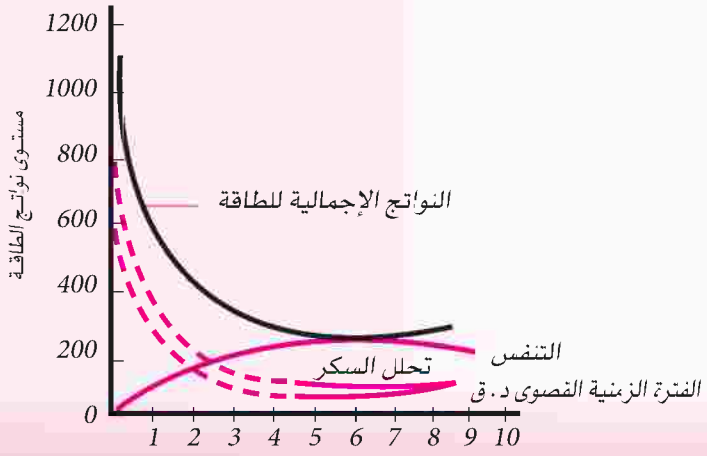
ويبلغ أكبر قيمة له في الفترة المحصورة بين ٢٠ ث و ٢,٥ دقيقة من العمل، ولكن مع التراكم الكبير لحامض اللبنيك وتعزيز إيصال الأوكسجين إلى العضلات العاملة فإن سرعته

تتناقص بالتدريج ، وما أن تحل الدقيقة ٢ – ٣ للعمل تأخذ العملية الهوائية التي تنفذ في سبحيات الخلايا على عاتقها الدور الرئيس في إيصال الطاقة.

إن تغير سرعة العمليات الجزئية للتبادل الطاقي بالاعتماد على الزمن الأقصى للتمرين يوضحها (الشكل رقم ٨) ويتم بلوغ القدرة القصوى للعملية اللاهوائية اللاأسيدية التي تشكل مجموع عملية انشطار ATP عملية الفسفوكرياتين في تمارين ذات الشدة القصوى والتي تستغرق ٥ – ١٠ ث. وفي التمارين الطويلة فإن هذه القدرة ستنخفض بسرعة ، وعندما تصبح فترة التمرين ٣ دقائق لن تلعب العملية اللاهوائية الأسيدية دوراً يذكر، ويتم بلوغ القدرة القصوى لتحرير الطاقة في العملية اللاهوائية في تحلل السكر في تلك التمارين التي يستغرق تنفيذها ٢٠ – ٤٠ ث ، ومن ثم تنخفض القيمة مجدداً، وفي تلك التمارين التي يستغرق تنفيذها ٦ – ٧ دقائق ستشكل القدرة حوالي ٠,١ من القدرة العظمى لهذه العملية اللاهوائية وتتزايد قدرة العمليات الهوائية في تكوين الطاقة بسرعة مع مضاعفة فترة التمرين لغاية ٥ – ٦ دقائق وقلما تتغير عندما تكون الفترة الزمنية طويلة، واستناداً إلى ذلك فإن سرعة النواتج الإجمالية للطاقة عالية بصورة لا تناسبية في تلك التمارين القصيرة ، ولكن سرعان ما تتناقص بزيادة طول فترة العمل، وعند تنفيذ تمرين تزيد فترته عن ١٥ دقيقة فإن التغير الإجمالي لنواتج الطاقة سيتحدد بصورة كاملة من خلال السرعة الهوائية لتكوين الطاقة.

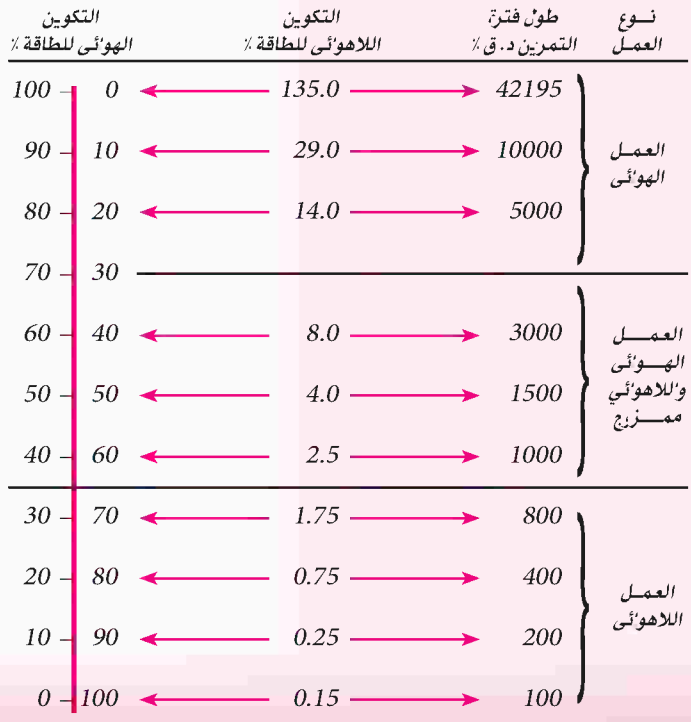
الشكل (٨) تغير سرعةالتحول الهوائي واللاهوائي للطاقة

اعتماداً على الفترة الزمنية القصوى للتمرين



ومن السهل تحديد الجزء النسبي لعمليات إعادة تكوين ATP الهوائية واللاهوائية في طاقة تمارين مختلفة بمساعدة مخططات يوضحها (الشكل رقم ٩).

الشكل (٩) الحصيلة النسبية للعمليات الهوائية واللاهوائية للطاقة في التوازن العام للتمرين



وفي التطبيق الرياضي فإن التمارين التي تشكل النسبة الإجمالية لمساهمة العمليات اللاأسيدية والعمليات اللاهوائية لتحلل السكر أكثر من ٦٠ ٪ من الطلب على الطاقة، عادة ما تعرف بأنها تمارين ذات طابع لاهوائي. إن طول فترة التمرين حيث تكون النسبة الإجمالية لمساهمة العمليات الهوائية في نفاذ الطاقة تتجاوز ٧٠ ٪ تدعى تمارين ذات طابع هوائي، أما للتمارين الوسيطة فيمكن أن تنتمي تمارين ذات النوع المختلط في تأمين الطاقة، حيث تتخذ نسبة العمليات الهوائية واللاهوائية قيمة واحدة، ويمكن أن ينتمي إلى هذا النوع من التمارين الجري لمسافة تتراوح بين ١٠٠٠ – ٣٠٠٠ متر.

تحليل استهلاك الطاقة في جسم الإنسان خلال العمل العضلي:

إن التغير البايوكيميائي أثناء النشاط العضلي يتم ليس فقط في العضلات العاملة وإنما في أعضاء متعددة وأنسجة مختلفة عند الإنسان. إن تعزيز تبادل الطاقة في العضلات تسبق الزيادة الملحوظة للنشاط العصبي والهرموني. ففي الحالة التي تسبق البداية وحالة التهيؤ تنشط فعالية عدد من إفرازات الغدد الداخلية وخاصة الغدة النخامية والقشرة الكظرية. وتحت تأثير النبضات العصبية وتحرر الهرمون المنبه للحام الكظر (odrenocorticozropic hormonum) سيزداد تكوين الأدرينالين (كظرين adrinalin) وقذفه إلى الدم.

إن التأثير المشترك لمنظومة العصب السمبثاوي العصب السمبثاوي والإدرينالين يؤدي إلى زيادة تردد تقلصات القلب وتبادل الدم. إن تكون النواتج الوسطية لتبادل الطاقة في العضلات (كحامض اللبنيك والهيدروكربونات وغيرها) وتعزيز طرح أيونات البوتاسيوم k^+ ستظهر تأثيراً موضعياً على جدران الشعيرات في العضلات مسببة توسعها، وفي الوقت نفسه سيسبب الأدرينالين تقلص عضلات الأحشاء الداخلية. ولذا فإنه مع بداية العمل العضلي تحدث إعادة توزيع تدفق الدم في الجسم ويتحسن وضع إيصال الدم إلى العضلات العاملة وتحت تأثير الأدرينالين تسترخي العضلات الصقيلة في القصبات مما يسهل التبادل الهوائي في الرئتين وتؤدي جميع هذه التغيرات لمضاعفة إيصال الأوكسجين إلى العضلات العاملة وإلى تحسين كفاءة العمل.

نقل الأوكسجين إلى العضلات العاملة:

في أنشطة المنظومة التنفسية ومنظومة الأوعية القلبية لإيصال الأوكسجين إلى العضلات العاملة، يلعب تأثير النواتج (حامض اللبنيك ، الكربوهيدرات) على المستقبلات chemoreceptor المتوزعة في جدران الأوعية الدموية والتي تعطي الإشارات، كذلك الانخفاض تحت تأثير PH الدم لهذه المواد دوراً كبيراً، الأمر الذي يعزز نشاط المركز التنفسي.

تعتبر سرعة ايصال الأوكسجين أحد العوامل الرئيسة التي تحدد إمكانية تأمين الطاقة في العضلات العاملة حيث ينفذ الأوكسجين الموجود في هواء الزفير، إلى الدم من خلال جدران الحويصلات الرئوية والشعيرات الدموية من جراء الفرق في الضغط الجزيئي في هوائه الشعيري وفي الدم.

ويساوي في الهواء الحويصلي حوالي ١٠٠ – ١٠٦ ملم زئبق، أما في الدم الذي يسير نحو الكليتين في حالة الهدوء ٧٠ – ٨٠ ملم زئبق ، أما أثناء العمل العضلي فأقل بكثير.

إن الجزء الصغير الذي يذهب إلى الدم من الأوكسجين الموجود في البلازما حوالي ٠,٣ مل لكل ١٠٠ مللتر من الدم وعند درجة الصفر المئوية والضغط الجوي الذي يساوي ٦٧٠ ملم زئبق فإن ١٠٠ غرام من الهيموغلوبين باستطاعتها أن ترتبط بـ ١٣٤ جزئ من الأوكسجين، أما عند درجة الحرارة الاعتيادية فستكون هذه الكمية أقل بعض الشيء ويوجد في دم الإنسان البالغ ما يقارب من ١٤ – ١٦ غم من الهيموغلوبين وعليه فإن حجم الأوكسجين في الدم أي الكمية الإجمالية من الأوكسجين المرتبطة، عندما يتشبع الهيموغلوبين كلياً يمكن أن تساوي ٢٢ – ٢١ مليلتر من الأوكسجين لكل ١٠٠ غم من الدم.

يؤثر في قابلية الهيموغلوبين في ربط جزيئات الأوكسجين درجة الحرارة في الدم وتركيز أيونات الهيدروجين ، فكلما كانت درجة الحرارة منخفضة كانت قيمة PH أعلى وكان بالإمكان ربط كمية أكبر من الأوكسجين مع الهيموغلوبين. ويساعد تحرير co_2 من الدم في هواء الزفير على زيادة قلوية الدم وتشبع الهيموغلوبين بالأوكسجين وتحتوي جزيئة الهيموغلوبين على أربع هيمات (*haema*) وبإمكانها أن تربط أربعة جزيئات من الأوكسجين كحد أعلى.

وبعد تفاعل واحدة من الهيمات مع الأوكسجين فإن تقبل الهيموغلوبين للأوكسجين يزداد، وبذلك فإن ارتباط كل جزئ من جزيئات الأوكسجين اللاحقة ستصبح أكثر سهولة.

يذهب الدم المشبع بالأوكسجين إلى الدورة الدموية الكبرى ويضخ القلب في حالة الراحة ما يقارب من ٥ – ٦ لترات من الدم في كل دقيقة وهذا يعني سحب كمية مقدارها ٢٥٠ – ٣٠٠ مليلتر من الدم من الرئتين كل دقيقة. وخلال العمل يزداد حجم الدم في الدقيقة الواحدة إلى ٣٠ – ٤٠ لتراً. وهذا يعني زيادة كمية الأوكسجين الذي يحملها الدم إلى ٥ – ٦ لترات في الدقيقة الواحدة.

إن زيادة تواجد co_2 وغيرها من المواد الحامضية في التبادل وكذلك الزيادة الموضعية لدرجة حرارة الدم ستُنشىء في أنسجة الشعيرات ظروفاً لتعزيز انحلال الهيموغلوبين المؤكسد وتحرير الأوكسجين ، ولما كان تركيز الأوكسجين الطليق في أنسجة الشعيرات أكبر مما هو عليه في الفضاء الموجود داخل الخلية، لذا فإنه سينفذ إلى داخل الخلية. ويجري تبادل الأوكسجين داخل الخلايا بمساهمة الجيلوبين العضلي، الذي له مواصفات تركيب الهيموغلوبين نفسه، ويحمل الجيلوبين العضلي الأوكسجين إلى السبحيات حيث تجري عمليات الأكسدة، ومع تعزيز استخدام الأوكسجين من قبل السبحيات أثناء العمل العضلي فإن الجيلوبين العضلي يعطي احتياطياً من الأوكسجين ويبدأ باستلامه من هيموغلوبين الدم.

وللجيلوبين العضلي قابلية كيميائية كبيرة للتعامل مع الأوكسجين أكبر مما هي عليه عند الهيموغلوبين الأمر الذي يؤمن الاستخدام الأكبر للأوكسجين الذي يقدمه الدم للأنسجة.

احتياطي الطاقة أثناء العمل العضلي:

تساعد زيادة سرعة التفاعل الذي يؤمن إيصال الطاقة للعضلات العاملة بتعزيز تعبئة احتياطي مصادر الطاقة في الجسم. وينخفض احتياطي كرياتين الفسفور الذي يستخدم في اللحظات الأولى للعمل بسرعة لذلك ستصبح الكربوهيدرات بعد ذلك المصدر الأساسي للطاقة وستنفذ في الظروف اللاهوائية بالدرجة الأولى النشا الحيواني العضلي وتنشط هذه العملية بفعل أيونات الكالسيوم ca^{++} والأدرينالين والأسيتيكولين نسبة لفوسفات العضلات وهو إنزيم يعجل المرحلة الابتدائية لتحلل السكر. وعندما تكون فترة تنفيذ التمارين طويلة فإن احتياطي النشا الحيواني في العضلات يمكن أن يكون غير كاف وعندئذ تبدأ استخدام مصادر الطاقة خارج العضلات، وبالدرجة الأولى النشا الحيوانيً في الكبد. وهنا وقبل كل شيء أن ينشطر ليتحول إلى سكر يستطيع الدم أن يحمله إلى العضلات العاملة وتنحفز عملية شطر النشا الحيواني في الكبد بمساعدة الادرينالين وكلوكاجون (glucagon) ولا يمكن لاحتياطي الكربوهيدرات أن يستنفذ بالكامل لذا فمع زيادة فترة التمرين تلعب نواتج انحلال الدهون، الحوامض الدهنية وغيرها، دورًا متزايدًا في تزويد العضلات العاملة بالطاقة وطالما بقى مستوى السكر وحامض اللبنيك في الدم عالياً بما فيه الكفاية فإن تجديد الدهون من مستودعاتها ستكون عملية معقدة. كما أن انخفاض تركيز هذه المواد الميتابولية في الدم يسهل عملية انحلال الدهون.

إن انحلال الشحوم ينشط أيضًا بواسطة الادرينالين وهرمون الغدة النخامية كما يعزز أيضًا امتصاص الدم لشحوم الكبد وأكسدته مما يؤدي ذلك إلى تحرر أجسام كيتونية من الكبد وتذهب إلى الدم وتستهلك العضلات كميات كبيرة من الأجسام الكيتونية والحوامض الدهنية الحرة من الدم وتؤكسدها.

وبالإضافة إلى مضاعفة استهلاك الدهون في تبادل الطاقة يمكن أثناء العمل الطويل أن يحدث تكوين جديد للكربوهيدرات من مواد ذات طبيعة غير كربونية – ويؤثر في هذه العملية هرمون الكورتيزول (cortizole) ومن الممكن أن يحدث تكوين الكربوهيدرات بكميات صغيرة من الحوامض الدهنية أيضاً وتحدث هذه العملية بالدرجة الأساسية في الكبد.

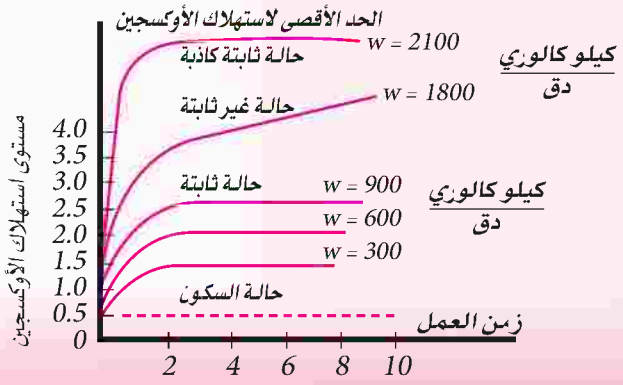
استهلاك الأوكسجين خلال العمل العضلي:

عند الانتقال من حالة السكون إلى نشاط عضلي مكثف يتضاعف احتياج الأوكسجين ببضع مرات، ولكن لا يمكن أن يتحقق على الفور، لابد من فترة زمنية كي يتعزز نشاط منظومة التنفس ومنظومة الدورة الدموية ولكي يمكن الدم الذي تشبع بالأوكسجين أن يصل إلى العضلات العاملة.

ومع تعزيز نشاط أنظمة إنتاج الطاقة يزداد تدريجياً استهلاك الأوكسجين في العضلات العاملة.

وفي الأعمال المتكافئة، إذا ازدادت قيمة تردد التقلصات القلبية عن ١٨٠ ضربة / دقيقة تتضاعف سرعة استهلاك الأوكسجين إلى تلك اللحظة التي تحل فيها حالة التوازن في عمليات ميتابولية حيث تبلغ قيمة الأوكسجين المستهلك مستوى ثابتًا يتناسب تماماً في كل دقيقة مع حاجة الجسم له. ويطلق على هذه الحالة الثابتة بالحالة الحقيقية. وتعتمد كمية الأوكسجين المستهلك في الحالة الثابتة على قدرة التمرين الذي سينفذ (شكل رقم ١٠).

الشكل (١٠) تغير مستوى استهلاك الأوكسجين اعتماداً على زمن العمل لقدرات مختلفة



وفي الأعمال ذي الشدة العالية « التى تتراوح ضربات القلب فيها بين ١٨٠ – ١٥٠ ضربة / دقيقة » فإن الحالة الثابتة سوف لن تحل ويمكن لكمية الأوكسجين المستهلك أن تتضاعف للنهاية أو لتلك الحالة التي يحل فيها الاستهلاك الأقصى للأوكسجين ومن الممكن ملاحظة في الحالة الأخيرة « حالة ذات استقرار كاذب » عندما يكون استهلاك الأوكسجين لفترة من الوقت (٦ – ١٠ دقائق) محافظاً على مستوى أعظم ثابت. ويحدث ذلك ليس بسبب أن حاجة الجسم للأوكسجين قد لبيت بالكامل ، وإنما بسبب نفاذ إمكانية منظومة الأوعية القلبية لإيصاله إلى أنسجة الجسم.

إن هذه الإمكانيات بالذات هي التي تحجم في أغلب الأحيان استهلاك الأوكسجين في الخلايا العضلية على الرغم من أن العوامل المحددة هي الكفاءة التأكسدية للخلايا العضلية العاملة نفسها وبالتحديد نشاط الأنزيمات التنفسية. ولا يمكن المحافظة على المستوى في الفترات الطويلة بسبب التعب، وعند العمل الكثيف فإن الاستهلاك الحقيقي للأوكسجين سيشكل جزءاً من الطلب على الأوكسجين ويشكل الفرق بين كمية الطلب على الأوكسجين

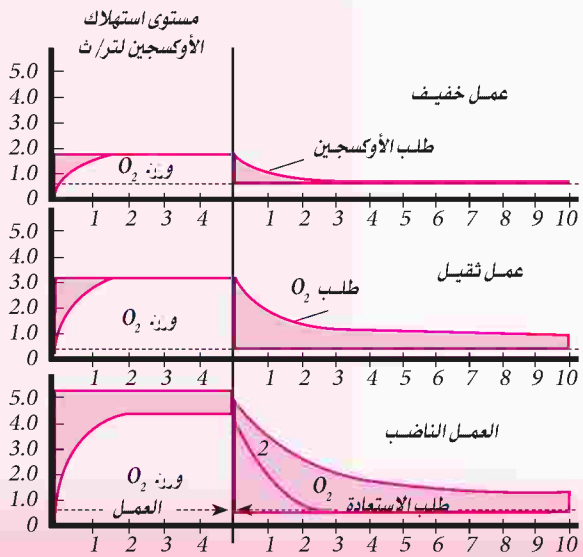
للعمل وبين الاستخدام الحقيقي للأوكسجين « بالعجز الأوكسجيني » لإعادة تكوين ATP. مما يقود لتراكم نواتج الانحلال اللاهوائي غير المؤكسد في الجسم. ومن خلال العمل الذي يمكن عند تحقيق الحالة المستقرة يستطيع جزء من الميتابول اللاهوائي أن يطرد بمرور الزمن بمساعدة تعزيز الفعالية الهوائية، أما الجزء الآخر فيطرد بعد العمل.

وإذا لم تحل الحالة المستقرة أو في الحالة المستقرة الكاذبة ستزداد كمية النواتج غير المؤكسدة بمرور الزمن. أما استبعادها فيتم في مرحلة الاستعادة.

تكوين الطلب الأوكسجيني أثناء العمل:

يمكن أن يحدث الاستبعاد اللاهوائي للميتوبوليات بطريقة الأكسدة الكاملة لحين بلوغ النواتج النهائية (CO_2 H_2) أو عن طريق إعادة التكوين، ولتحقيق هذه العمليات ينبغي توفر كمية إضافية من الأوكسجين لذلك سيبقى استهلاك الأوكسجين لفترة من الزمن الذي يعقب انتهاء العمل مرتفعاً مقارنة بمستوى السكون. ويطلق على الاستهلاك الأوكسجيني الفائض تسمية « الطلب الأوكسجيني » . وتكون قيمة الطلب الأوكسجيني دائماً أكبر من كمية العجز الأوكسجيني وكلما كانت الشدة أكبر وطول فترة العمل أطول، كلما كان الفرق بينهما أكبر (الشكل رقم ١١).

الشكل (١١) ورود الأوكسجين ، العجز الأوكسجيني والطلب الأوكسجيني أثناء الركض بقدرات مختلفة



وفي مرحلة الاستعادة وبعد أن ينجز العمل إذ تكون في الجسم كمية كافية من المواد ذات الصلة بالأنزيمات وتصبح عملية إيصال الأوكسجين إلى السبحيات غير محدودة.

سيعتمد مستوى استهلاك الأوكسجين على كميات جزيئات ATP الطليقة التي تنفذ واجب الرقابة التنفسية في السبحيات. وإن المواد ذات الصلة بالأنزيمات المشار إليها هي الميتابول اللاهوائي المتجمع أثناء العمل منها: حامض اللبنيك، السكريات ، وفي المراحل الختامية لعملية الاستعادة يمكن ذكر الحامض الزلالي أما مصدر ADP فيمكن اعتبار عملية إعادة تكوين فسفور الكرياتين من الكرياتين والنشا الحيواني من حامض اللبنيك والسكريات وكذلك استعادة الخرق الذي يحدث أثناء العمل في تركيب الأغشية الخلوية وصرف الطاقة للأنظمة التنفسية ونظام الأوعية القلبية، التي تحافظ على نشاطها لفترة معينة بعد انتهاء العمل. إن جزءاً من كمية الأوكسجين الفائض التي تستخدم في فترة الاستراحة تذهب لاستعادة احتياطاته في مستودعات الجلوبين العضلي وتهبط كفاءة استخدام الأوكسجين أثناء العمل المضني بسبب التنوع الخاص في عمليات أكسدة وتكوين ATP ويبقى هذا التنوع قائماً حتى بعد انتهاء العمل مما يؤدي إلى مضاعفة مستوى استخدام الأوكسجين مقارنة بحالة السكون.

تصبح العوامل المختلفة أثناء العمل ذات الطبيعة المتنوعة أساسية في عملية تكوين الطلب الأوكسجيني، فمثلا عند التنفيذ المتكرر للتمارين قصيرة الزمن تلعب إعادة تكوين فوسفات الكرياتين وثلاثي فوسفات الأدرنوزين دوراً حاسماً في تكوين الطلب الأوكسجيني، أما في حالة مضاعفة الجهد فإن دور إعادة تكوين النشا الحيواني يتضاعف، كما يتضاعف أيضا زمن الاستعادة الكاملة للشفاء.

وبعد تنفيذ العمل الذي يمكن أن تكون فيه حالة ثابتة، فإن استهلاك الأوكسجين يتم بطريقة أسرع، كما أن الطلب الأوكسجيني ينفذ نصفه خلال فترة ٢٧ – ٣٠ ث، وينفذ كاملاً بعد ٣ – ٥ دقائق.

كما يظهر عند تنفيذ عمل أكثر شدة في منحنى انخفاض استهلاك الأوكسجين طوران وهما: الهبوط الأولي الحاد، وإطالة عملية العودة إلى مستوى الراحة، إن مكونة الطلب الأوكسجيني السريع (هكذا يطلق على العملية اللاأسيدية) تساعد على التقويم التقريبي لحصيلة آلية العملية الفسفوكرياتينية في تأمين العمل بالطاقة.

أما المكونة البطيئة للطلب الأوكسجيني (الأسدية) فإنها تصلح عند تنفيذ أعمال قصيرة نسبياً لأن تعكس تنمية عملية التحول السكري ولكن عندما تكون العملية بطيئة فإن عملية التحول هذه ستؤثر عليها عمليات أخرى متعددة بحيث يتعذر هنا التقويم بدقة وتتضاءل المكونة البطيئة للطلب الأوكسجيني بعد مضي ١٥ – ٢٥ دقيقة وتنتهي بصورة كاملة بعد مرور ١,٥ ساعة.

تغيرات تحليل استهلاك الطاقة

في أعضاء وأنسجة انفرادية خلال الجهد العضلي:

يتطلب تعجيل وتقوية الانقباضات القلبية أثناء الجهد العضلي مضاعفة سرعة تبادل الطاقة في عضلة القلب ، من الواضح أنه توجد في العضلة القلبية شبكة كثيفة من الشعيرات الدموية ، يمر عبرها الدم الأكثر تشبعاً بالأوكسجين، ويحدث فيها نشاطاً عظيماً للأنزيمات في عمليات التبادل الهوائي، لذلك فإن عملية تبادل الطاقة الهوائية تتخذ أرجحية معينة في القلب وتعتبر الأحماض الدهنية والأجسام الكيتونية وتحلل السكر التي يحملها الدم المصدر الأساسي للطاقة في حالة الراحة النسبية.

أما في حالة الجهد العضلي لعضلة القلب فعندئذ يبدأ تدريجياً نمو عملية حامض اللبنيك في الدم وأكسدته، أما احتياطي النشا فيها فيبقى دون نقصان تقريباً.

يتعزز دور تبادل الطاقة في المخ خلال فترة الجهد العضلي، وهو ما يظهر من خلال مضاعفة استهلاك المخ للسكر والأوكسجين الموجودين في الدم، ومضاعفة سرعة تكوين النشا الحيواني، كما تتعزز عملية تحلل الزلال وتراكم (الأمونيا). يزود المخ تماماً كما يزود القلب، بالطاقة من خلال العمليات الهوائية، وعند تنفيذ أعمال بقدرة عالية أو بفترة زمنية طويلة فإنه يصبح من الممكن هبوط احتياطي بعض مركبات الفسفور في الخلايا العصبية، و من غير الممكن خلال فترة تنفيذ العمل ملاحظة الإزاحة البايوكيميائية التي تحدث بصورة مباشرة في العضلات العاملة ، ولكنها تجد انعكاساً في تغير تركيب الدم والبول وهواء الزفير ، وعليه .. فبمعرفة القوانين الأساسية لحدوث عمليات التبادل وانتشار المواد في الجسم يصبح بالإمكان تقويم التغير الحادث في عمليات تبادل الطاقة في العضلات وقابلية الجسم في مقاومة الخروقات التي يمكن أن تحدث في أعضائه الداخلية، إضافة إلى سرعة الاستجابة في حشد احتياطي الطاقة.

مؤشرات تحليل استهلاك الطاقة أثناء الجهد العضلي:

يعد استهلاك الأوكسجين أكثر المؤشرات دقة لشدة وحجم الآليات الهوائية في تأمين الطاقة. ويمكن لمستوى تطور التحلل السكري أن يقوم التغيرات التي تحدث خلال فترة العمل، وفي اللحظات الأولى للاستعادة في تركيز حامض اللبنيك. إن درجة إسهام عملية الفسفوكرياتين في تأمين الطاقة للعضلات يمكن أن تحدد بمساعدة تركيز نواتج انحلال كرياتين الفسفور في الدم كما يمكن الحكم على مساهمة الدهون في عملية الطاقة بمساعدة تركيز الدهون الطليقة والأجسام الكيتونية في الدم.

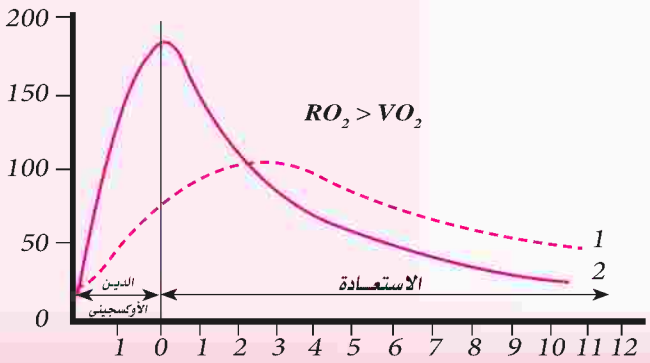
ويساعد تغير مؤشرات التوازن الحامضي – القلوي على الاستنتاج في قابلية الجسم بمقاومة التأثيرات السيئة للنواتج الحامضية في التبادل اللاهوائي.

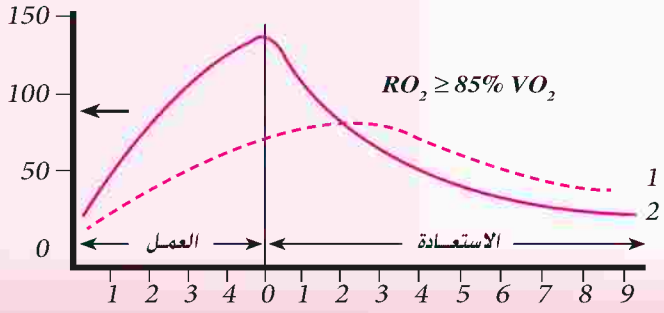
يعتمد تركيز النواتج العرضية للتبادل في الدم على تكوينها في الخلايا وانتشارها خلال الأغلفة الخلوية واستخدامها من قبل الأعضاء والأنسجة المختلفة، وعليه فإن المؤشر نفسه الذي يتم قياسه في الدم بدقة متباينة يمكن في ظروف متباينة للنشاط العضلي أن يعكس التغيرات التي تحدث في الخلايا العضلية. إن وجود السكر في الدم يعني أشياء كثيرة حول سرعة تحشيد احتياطي الكربوهيدرات في الكبد، ففي بداية العمل. وكذلك عند تنفيذ تمرين قصير الزمن بقدرة عالية يتضاعف تركيز السكر في الدم، ليؤشر السرعة القصوى لتحشيد النشا الحيواني والسرعة الأوطأ لاستخدام العضلات للسكر.

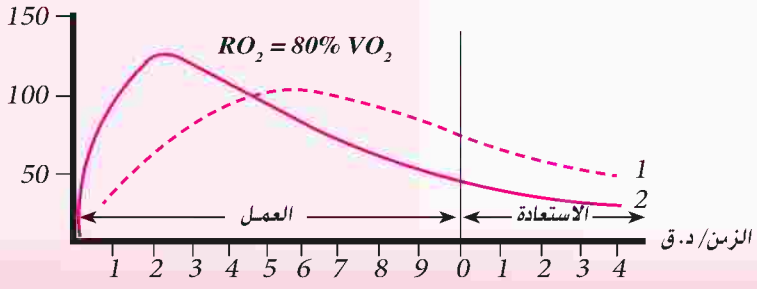
وعند تنفيذ عمل في ظروف مستقرة، فإن تركيزه في الدم يكون مقارباً لمستوى الراحة لأن سرعة وروده إلى الدم وسرعة استخدامه في العضلات متساوية تقريبًا. وعند تنفيذ عمل طويل يهبط تركيز السكر في الدم إلى دون مستوى الراحة، لأن احتياطي النشا الحيواني في الكبد وسرعة تحشيده تنخفض، في حين يبقى احتياج الخلايا إلى السكر عاليًا.

ويعطي تغير تركيز حامض اللبنيك في الدم تصورًا كافيًا حول شدة عملية التحلل السكري، ويتميز حامض اللبنيك بكفاءة سرعة تنافذه من العضلات العاملة إلى الدم، أما أكسدته اللاحقة أثناء التعب فتحدث بسرعة بطيئة، بحيث يعتمد تركيزه في الدم على سرعة التكوين في الخلايا العضلية وفي العادة يكون تركيز حامض اللبنيك في الخلايا العضلية أكبر بعض الشيء مما عليه في الدم، أما في تلك اللحظة حيث يصبح التركيز أكبر مما يمكن فعندئذ ستحل عملية التوازن. ويساوي تركيز حامض اللبنيك في الدم في حالة الهدوء ١,٠ – ٢,٠ غ / ل. وعند بداية العملية العضلية تتعزز عملية تكوين حامض اللبنيك في العضلات وخروجه من الدم بصورة قوية، وعندئذ فإن زيادة التركيز في الدم سوف لن يحدث مباشرة، إنما بعد مضي بضع دقائق على بداية العمل (الشكل رقم ١٢).

الشكل (١٢٠) تراكم حامض اللبنيك في العضلات أثناء العمل بقدرة مختلفة ولفترة زمنية متباينة





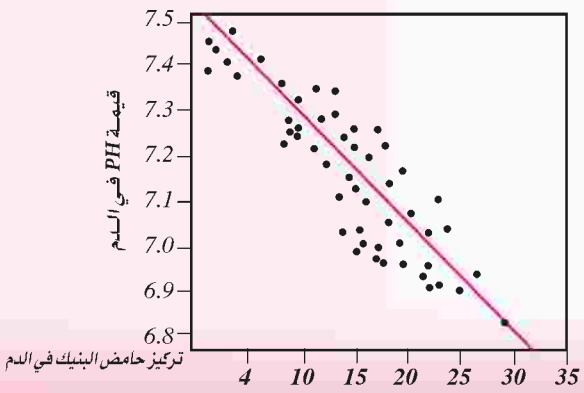


عند تنفيذ عمل خفيف أو معتدل (مستوى الأوكسجين يشكل ٥٠ ٪ من الحد الأعلى لاستهلاك الأوكسجين)، فإن تركيز حامض اللبنيك في الدم لا يكون كبيرًا (لا يتجاوز ٠,٤ – ٠,٥ غ /ل) وعند تنفيذ تمرين بطول لا بأس به (بمستوى طلب أوكسجين لا يزيد عن ٥٠ – ٨٥ من الحد الأقصى لاستهلاك الأوكسجين)، فإن التركيز سيكون أكبر بكثير. إذ يصل إلى ١ – ١,٥ غ / ل. ومما تجدر الإشارة إليه هو أن تركيز حامض اللبنيك يتضاعف بسرعة في الدقائق ٢ – ١٠ من العمل.

وفي كل الأحوال، فإما أن يبقى محافظًا على هذا المستوى أو ينخفض، وعليه فإن القيمة العظمى لتركيز حامض اللبنيك في الدم ستحل في بداية التمرين طالما لم تتطور عملية التنفس وأن تكوينه لا يمكن مقارنته بعملية التخلص منه بالتأكسد. وعند تنفيذ تمرين يكون مستوى الطلب الأوكسجيني فيه لا يتجاوز ٨٥٪ من الحد الأقصى لاستهلاك الأوكسجين، فإن تركيز حامض اللبنيك في الدم يتضاعف تدريجيًا إلى أن يصل إلى القيمة العظمى. والتي يمكن ملاحظتها ليس في فترة التمرين إنما عند الدقيقة ٢ – ١٠ من فترة استعادة الشفاء.

إن تأخر القيمة العظمى لحامض اللبنيك في الدم يمكن أن يعلل بسبب خروج هذا الميتابول في الدم أثناء العمل. إضافة إلى استخدام طاقة التحلل السكري في فترة استعادة الشفاء لإعادة تكوين الكرياتين فسفور. وتشكل القيمة العظمى لحامض اللبنيك الذي لا يمكن أن يسبب ضررًا لجسم مدرب بصورة جيدة ٢ – ٢,٥ غ / ل في الدم وأكثر بعض الشيء في العضلات. أما عملية التقوية اللاحقة لتحلل السكر فلن تتم لأن القيمة الأكبر لتركيز حامض اللبنيك ستؤثر بصورة غير مرضية في الجسم، يعد حامض اللبنيك حامضًا شديدًا عند تفكك كمية كبيرة من أيونات الهيدروجين وأن جزءًا منه يمكن أن ترتبط بمنظومات محاليل في الخلايا والدم، وهنا ستلعب البيكربونات دورًا كبيرًا في الدم، كما ستلعب محاليل الزلال دورًا كبيرًا في الخلايا، وعندما ينفذ حجم منظومة المحاليل ستحدث إزاحة في الاتجاه الحامضي وفي الوسط ما دون الحامضي ويلاحظ قيام بعض المواد الحامضية المتكونة خلال العمل، كحامض الكربونيك والفسفوريك وغيرهما بدور معين ولكن دور حامض اللبنيك في هذه العملية يبقى الدور المتميز. كما توجد بين تركيز حامض اللبنيك وقيمة المؤشر PH في الدم علاقة عكسية واضحة (الشكل رقم ١٣).

الشكل (١٣) العلاقة بين قيمة PH و تركيز حامض اللبنيك في الدم خلال عمل عضلي مضن



عند انخفاض قيمة PH بأكثر من ٠,٢ مقارنة بمستوى الراحة ستهبط قيمة النشاط للعديد من الأنزيمات وبالدرجة الأساسية الفسفورية التي تراقب التفاعل الأساسي لتحلل السكر، لذلك ستنخفض سرعة تحلل السكر. ويؤدي انخفاض قيمة PH أيضًا إلى حدوث خرق لنشاط الخلايا العصبية. وإلى نمو إعاقات الحماية فيها، وتسوء عملية نقل الإشارة من العصب إلى العضلة، كما ينخفض تأثير انزيم ATP في نشاط الميوزين، وستهبط بسرعة انشطار ATP.

وبسبب التركيز العالي لحامض اللبنيك في الخلايا العضلية مضاعفة الضغط التناضحي (osmoticus) فيها مما يسبب نتيجة لذلك انتفاخها. وتضغط الخلايا المنتفخة على نهايات الأعصاب مما قد يسبب ظهور ألم في العضلات تساوي قيمة PH في حال الهدوء في الدم الشرياني ٧,٤ وفي الدم الوريدي ٧,٣٥ (بسبب الكمية الكبيرة للكربوهيدرات فيه) كما يمكن أن تنخفض هذه القيمة في النشاط العضلي إلى ٧,٠ ويستطيع العديد من الرياضيين المدربين بصورة جيدة تحمل قيمة ٦,٨ للمؤشر PH. ولكن قد يلاحظ في هذه الحالة في بعض الأحيان ظهور شعور بالغثيان والدوار وألم في العضلات.

إن إزاحة PH في الدم في الاتجاه القلوي الذي يستطيع الجسم تحمله بدون أن يحدث أي خرق حاد في عمليات التبادل يمكن أن يكون ٧,٦ إن تغير قيمة PH في الخلايا العضلية يكون دائمًا أكبر مما عليه في الدم ويشكل (فائض المحاليل القاعدية) و (البيكربونات القياسية) قيمًا لمؤشرات احتياطي المحاليل القلوية في الدم، بحيث أن الأول يعكس تغير الحجم الإجمالي للمحلول، في حين يعكس الثاني تغير حجم البيكربونات فقط.

يسبب فائض حامض اللبنيك تحلل محلول بيكربونات الخلايا في الدم. وينشأ نتيجة ذلك فائض (لاميتابولي) لحامض الكربونيك ($Excess\ Co_2$) أي حامض الكربونيك، الذي يرتبط تكونه بعمليات التأكسد البايولوجية، وبتحديد قيمة فائض Co_2 (اللاميتابولي) في هواء الزفير يمكن بدقة لا بأس بها تقويم درجة تطوير عملية التحلل السكري في العضلات العاملة، وتوجد في حالة الراحة علاقة محددة بين كمية الكربوهيدرات المتحررة في هواء الزفير (المؤشر الزفيري) والتي تعتمد على طبيعة المواد المؤكسدة للطاقة. وعند أكسدة كربوهيدرات هواء الزفير سيساوي المؤشر (١) في حين أكسدة الدهون تجعل قيمته تتراوح بين ٠,٧ و ٠,٧٥ ، وستصبح القيمة عند أكسدة الزلاليات ٠,٨ وعند التوازن للزلال والكربوهيدرات والدهون ٠,٧٥ وهكذا يمكن بمساعدة قيمة المؤشر الزفيري في حالة الراحة يمكن لدرجة ما الحكم على طبيعة المواد المؤكسدة في ظروف تحدث فيها عمليات تأكسدية، ولكن عند القيام بعمل عضلي مرهق فإن قيمة المؤشر الزفيري يمكن أن يتجاوز الواحد ليشير إلى ظهور فائض في حامض اللبنيك. يتغير تركيز الحوامض الدهنية والمواد الكيتونية في الدم عادة في علاقة عكسية مع وجود السكر وحامض اللبنيك، إذ أن استخدامها يتزايد مع زيادة فترة العمل، وعند العمل الطويل ستتضاعف بدرجة كبيرة كمية الفوسفات في الدم، لأنها تنشطر بشدة في الأنسجة المختلفة في حين يحدث اتحادها في الكبد بسرعة قليلة. بسبب العمل العضلي تغيرًا في وجود الزلال ونواتج انحلاله في الدم في حين يتضاعف وجود الزلال في بلازما الدم.

وبالأخص الأنزيمات الزلالية، نتيجة خروجها من الخلايا العاملة وإن العلاقة بين زلاليات الدم المختلفة تتغير، وتتضاعف كمية نتائج انحلال السكر منها: الحوامض الأمينية القادمة من الخلايا العضلية في الكبد و « الأمونيا » والبول. ويعتمد هذا التغير على طول فترة العمل، وفي الأعمال القصيرة المتكررة يكون خروج الزلال في الدم ضئيلاً، أما في حالة الأعمال الطويلة، عندما تتغير قابلية الغشاء في التنافذ، فإنه يتضاعف بطريقة بحيث إن الزلال يمكن أن يظهر في البول أيضاً.

إن مستوى الأمونيا يتضاعف كثيرًا عندما لا يحدث توازن في الحالة الثابتة للعمليات الميتابولية، وكذلك في حالة تنفيذ حمولة عضلية طويلة ويؤدي العمل الطويل إلى مضاعفة وجود البول في الدم بحوالي ٤ – ٥ أضعاف، ويتعزز انشطار الزلال خاصة عند تنفيذ العمل الذي تتخذ العمليات اللاهوائية أرجحية معينة عند تأمين الطاقة.

التغيرات البايولوجية عند أداء التمارين ذات الطبيعة المنتظمة:

يعتمد تغير سرعة العمليات الميتابولية أثناء النشاط العضلي على العدد الإجمالي للعضلات، التي تساهم في أداء العمل ونظام عمل العضلات (الاستاتيكي أو الديناميكي) والشدة والفترة وعدد التمارين المتكررة وكذلك على فترة الراحة بين التمارين.

تقسم العضلات تبعًا لعددها المشارك في أداء الواجب إلى عضلات موضعية (إذا ساهم ١/٤ العدد الإجمالي لعضلات الجسم) وشاملة إذا ساهم ٣/٤ العدد الإجمالي لعضلات الجسم بسبب العمل الشامل (مشي، الجري الطويل، الضاحية، السباحة... الخ) تغيرات بايوكيميائية كبيرة في جميع أعضاء الجسم وأنسجته.

أما العمل الموضعي (سحب القوس أثناء الرمي...) فإنه يمكن أن يحدث تغيرات في العضلات العاملة ولكن تغيرات بايوكيميائية كبيرة في الجسم لن تحدث، ويسبب العمل الشامل تمارين الجمناستك المختلفة، ضرب الكرة من وضع الوقوف.. الخ) تغيرات بايوكيميائية أكبر مما يسببه العمل الموضعي.

وكلما انحصر موضع العمل أكثر (عند تنفيذ عمل عضلي خارجي بحجم واحدٍ) كلما كانت نسبة التفاعلات اللاهوائية في تأمين الطاقة أكبر ويسبب العمل الشامل نشاطًا أكبر للجهاز التنفسي ومنظومة الأوعية القلبية. وهنا تؤمن العضلات بالأوكسجين بطريقة أفضل، لذلك يساهم في عملية تأمين الطاقة لها وبنسبة كبيرة تفاعل إعادة تكوين ATP.

ويؤثر النشاط العضلي بصورة كبيرة في المتغيرات الميتابولية، ويؤدي النظام الاستاتيكي للتقلص العضلي للضغط على الشعيرات، وإذا كانت قوة الانقباض كافية وتتجاوز ضغط الدم في الشرايين فإنها تؤدي إلى ضعف تأمين العضلات بالأوكسجين والمواد الغذائية ويساهم التفاعل اللاهوائي بحصة كبيرة في هذا العمل. ويؤمن النظام الديناميكي تأمين الأنسجة بالأوكسجين بصورة أفضل، لأن تقلص العضلات المتقطع تكون كمضخة من نوع خاص يدفع بالدم خلال الشعيرات. ولا تحتاج الراحة التي تعقب العمل الاستاتيكي إلى السكون وإنما إلى عمل ديناميكي (مثلا يحتاج الرباع بعد أداء حركات الرفع بثقل كبير إلى المشي كي يرتاح بسرعة).

تعتمد العمليات البايوكيميائية على قدرة العمل العضلي المنفذ واستمراريته ويظهر ذلك من خلال الآتي: كلما كانت القدرة أكبر كلما ازدادت سرعة انشطار ATP أكبر، وكانت إمكانية تلبية الطلب الأوكسجيني من خلال العمليات التنفسية أقل، وبالتالي فإن العمليات اللاهوائية لإعادة تكوين ATP أكبر.

إن زيادة قدرة العمل المنفذ يؤدي إلى مضاعفة مستوى استهلاك الأوكسجين وسرعة تأمين الطاقة الهوائية إلى القيمة القصوى، وعندما تقترب القدرة من القيمة العظمى، ستنخفض حصة العملية الهوائية في تأمين الطاقة، ولكن هذا يحدث ليس بسبب انخفاض الحاجة إلى الطاقة وإنما لأن هذا العمل يكون قصيرًا نسبيًا، لذلك لا تتمكن العمليات الهوائية من التطور بصورة كاملة. وتدعى القدرة التي يصل فيها الجهد إلى الحد الأقصى لاستهلاك الأوكسجين بالقدرة الحرجة.

وإلى أن يتم بلوغ القدرة الحرجة، فإن أية زيادة في ثقل العمل ستصاحبه زيادة طردية في العمليات الهوائية لإعادة تكوين ATP. وإذا ما تم تجاوز القدرة الحرجة فإن ثقل العمل يمكن أن يزداد باتجاه العمليات اللاهوائية. ولكن تطورها يبدأ عند قدرة أوطأ من القدرة الحرجة ويطلق على قدرة التمارين التي يلاحظ فيها لأول مرة نمو العمليات اللاهوائية «بعتبة التبادل اللاهوائي». وتساوي هذه العتبة عند الأشخاص الذين لا يمارسون الرياضة ٤٥ – ٥٠ ٪ من القدرة الحرجة، كما تساوي عند الرياضيين ٦٠ – ٧٥ ٪. وعند تجاوز عتبة التبادل اللاهوائي تتضاعف بشدة حصة التفاعلات اللاهوائية في تأمين العمل. وتجدر الإشارة هنا إلى أن المضاعفة الكبيرة التي تحدث في نواتج الطاقة عند تحلل السكر.

إن أكبر دور لتحلل السكر كمصدر للطاقة، هو ذلك الدور الذي يتحقق عندما تكون القدرة مساوية ٦٠ – ٨٥ ٪ من القدرة العظمى. أما القدرة التي يتم عندها بلوغ أكبر تطور لعملية تحلل السكر فيطلق عليها القدرة القليلة، ويطلق على القدرة القصوى الممكنة للإنسان بالقدرة اللاهوائية العظمى. وعندها يمكن بلوغ القيمة العظمى لسرعة تكوين الطاقة في عملية الفسفوكرياتين. ترتبط قدرة العمل بصورة طردية مع استمرارية العمل نفسه، فكلما كانت القدرة أكبر كلما حصلت التغيرات البايوكيميائية بصورة أسرع مما يؤدي ذلك إلى التعب وكلما كانت فترة العمل أقصر، وإذا وضعت هذه العلاقة بشكل منحنى بحيث يمثل المحور الرأسي لوغاريتم القدرة (أو السرعة) ويمثل المحور الأفقي لوغاريتم الزمن الأعظم للعمل بهذه القدرة، فإن المنحنى سيتخذ شكل خط منكسر مقسوم إلى أربعة أقسام تمثل أربع مناطق للقدرة النسبية (بموجب تصنيف الباحث ب، س، فرافل) العظمى، ودون العظمى، كبيرة، معتدلة، وتساوي الفترة الزمنية القصوى للعمل في حقل القدرة العظمى ١٥ – ٢٠ ثا وفي حقل دون العظمى ٣٠ ثانية ولغاية ٢ – ٣ دقائق، وفي حقل القدرة الكبيرة لغاية ٣٠ دقيقة.

وأخيرًا في حقل القدرة المعتدلة ٤ – ٥ ساعات. إن وجود عدد من العناصر في المنحنى اللوغاريتمي للعلاقة بين القدرة، والزمن، يعني أن العوامل التي تحدد كفاءة الجسم في مناطق القدرة المختلفة متباينة أيضاً، ويؤمن العمل الذي ينفذ في منطقة القدرة العظمى بالطاقة بالدرجة الأساسية بواسطة التحلل السكري اللاهوائي، وتظهر في الدم وبكمية كبيرة كميات من حامض اللبنيك، (يمكن أن يصل تركيزه إلى ٢٫٥ غ / مل، فأكثر) ويمكن للطلب الأوكسجيني عند تنفيذ مثل هذا العمل أن تبلغ كميته ٢٠ – ٣٠ لتراً، في حين يتجاوز مستوى صرف الطاقة بحوالي ٤ – ٥ مرات القيمة العظمى للإنتاج الهوائي للطاقة ويتضاعف عند نهاية العمل حصة العمليات الهوائية في تأمين الطاقة له.

ويكون الدين الأوكسجيني في هذه المنطقة، هو الأكبر بالقيمة المطلقة (٢٠ لترًا) ويشكل ٥٠ – ٩٠ ٪ من قيمة الطلب الأوكسجيني، كما تتطور عملية تحشيد النشا الحيواني في الكبد

ويمكن لمستوى السكريات في الدم أن يبلغ ٢ غ / ل وتحت تأثير نواتج الانحلال اللاهوائي تتغير نفاذية الحجاب الخلوي للزلاليات وتتضاعف كمياته في الدم ويمكن لها أن تخرج مع البول إذ تصل نسبة تركيزها إلى ١,٥ ٪.

أما في منطقة القدرة الكبيرة تتخذ مصادر الطاقة الهوائية الأهمية الأساسية عندما يكون مستوى نمو عمليات التحلل السكري كبيرة، وتنخفض بشدة حصة العمليات اللاهوائية كلما طالت الفترة الزمنية، ويمكن في مثل هذه القدرة للطلب الأوكسجيني أن يبلغ ٥٠ – ١٥٠ لتراً، كما يتضاعف مستوى صرف الطاقة بحوالي ١,٥ – ٢ مرة أكبر من الإنتاج الهوائي للطاقة، ويساوي تركيز حامض اللبنيك في الدم ١,٨ – ١,٥ غ / ل والسكريات حوالي ١,٥، أما تركيز الزلاليات في البول فيكون أقل مما هو عند العمل بالقدرة دون القصوى ويساوي ٠,٦ ٪ تقريباً، ويكون تنفيذ التنظيم على أشده في منطقة القدرة المعتدلة إذ تتخذ العملية الهوائية لإنتاج الطاقة قيمتها العظمى. ومن الممكن أن تتخذ قيمة الطلب الأوكسجيني ٥٠٠ – ١٥٠٠ لتر والدين الأوكسجيني يتجاوز ٥ لترات، كما يساوي تركيز حامض اللبنيك في الدم ٠,٦ – ٠,٨ وهو يمكن أن يتم التخلص منه أثناء سير العمل، وتنخفض قيمة السكريات في الدم إلى دون ٠,٨ غ / ل نتيجة الاستهلاك الشديد لاحتياطي النشا الحيواني في الكبد، وتظهر في البول نتائج انحلال الزلال بكميات كبيرة كما يؤشر فقدان كبير للماء والأملاح المعدنية في الجسم.