الفصل الثاني

# علم الطاقة للجهد البدني

## Energetics of Exercise

### المقدمـــــة

### Introduction

إن المعرفة القليلة بالكيمياء الحيوية هي أمر ذو قيمة ! عندما تصبح أولاً مدركاً للعمليات الخلوية المتضمنة تحول المواد الغذائية إلى طاقة ميكانيكية من أجل انقباض العضلات ، يشبه هذا تساقط هائل للبنس Penny ليجمع الكثير مما يخبرنا به علماء التغذية . لأجل أداء الخيول ، فإن أحد أهم الاعتبارات هو محتوى الطاقة للغذاء يساعد التأكد من أن حصاننا لديه طاقة كافية للجهد البدني ، على فهم حصول عضلات الحصان على الطاقة من المواد الغذائية في العليقة ، ويشكل هذا أساس دراسة علم الطاقة للجهد البدني . يستطيع الإدراك لعلم الطاقة للجهد البدني المساعدة في تركيب العليقة لكي تحقق نتيجة معينة . وبخصوص تفسير علم الطاقة فإن الحصان مشابه للسيارة ، فنحن ندخل الوقود بكلفه كبيرة ونتوقع أداء معين من حيث المخرج الميكانيكي . الحصان ، كمحرك البترول في السيارة ، يحتاج إليه ليؤدي عمل ميكانيكي . على أية حال ، يستطيع الحصان بعكس السيارات ، أن يسير بوقود

متنوع ، ومن ثم نستطيع توقع وجود اختلاف في الأداء اعتمادا على نوع الوقود الذي نقدمه .

تختلف علائق الخيول عادة من عليقة أساسها ١٠٠ ٪ علف أخضر خشن Forage-based إلى عليقة أساسها حوالي ٨٠ ٪ حبوب Cereal based . يجب أن لا نغذي الخيول أبداً بعليقة أساسها ١٠٠ ٪ حبوب ، حيث تحتاج كمية محددة قليلة من العلف الخشن لكي تؤدي القناة الهضمية وظيفتها بفعالية . وبالتالي ، تُغذى معظم الخيول على خليط من العلف الخشن والحبوب التي يتم تحليلها عن طريق تآلف للعمليات الهضمية الميكانيكية ، الكيميائية والميكروبية . تمتص نواتج الهضم إلى مجرى الدم أساسا من الأمعاء الدقيقة والأمعاء الغليظة . قد تستعمل بعض هذه النواتج في الحال لتوفير الطاقة اللازمة للانقباض العضلي ، ولكن الغالبية منها تكون أكثر احتمالية للتحول إلى مخازن للوقود داخل الكبد ، العضلات والنسيج الدهني (الشحم) لتستخدم فيما بعد . وبغض النظر عن نوع الغذاء الذي تقدمه للحصان ، فإن جميع المواد الغذائية قادرة على إطلاق طاقة لأجل العمل ( الجلوكوز ، الأحماض الدهنية ، والأحماض الأمينية ) وهذه تحول في النهاية إلى مجرد مكون حيوي واحد وهو ثلاثي فوسفات الأينوسين ATP . يعتبر ATP هو " عُملة " طاقتنا والتي نحتاج إليها للوظائف الطبيعية لجميع الخلايا في حالة الراحة والجهد البدني .

## الحصان عند السكون ( الراحة )

### The Resting Horse

يجب تزويد العليقة بكمية معينة من الوقود ؛ لتدعيم احتياجات الطاقة للحصان عند الراحة ويُعمل هذا فيما نحافظ على كتلة الجسم . ترتفع خلال ساعة أو ساعتان من تناول الوجبة الغذائية ، وعلى وجه الخصوص ، وجبة

الحبوب مستويات الجلوكوز في دم الحصان من ٥ مللي مول/لتر من الدم إلى حوالي ٧ مللي مول/لتر من الدم . استجابة لهذه الزيادة ، يزيد البنكرياس من إفراز الأنسولين ، الهرمون الذي يعمل على خفض جلوكوز الدم ، وبعد عدة ساعات تعود مستويات جلوكوز الدم إلى ٥ مللي مول/لتر . يعمل الإنسولين على خفض جلوكوز الدم عن طريق تحويله إلى العضلات والكبد . وبمعنى آخر ، في وقت وفرة الجلوكوز يتأكد تراكم المصادر الكامنة للوقود داخل الكبد والعضلة . ويؤكد هذا أن العضلة لديها مخازن وقود كافية إذا كان هناك زيادة في نشاط العضلة ، وكذلك تحتوي الكبد على مخازن وقود كافية " لينظم " التذبذب في جلوكوز الدم الذي يرتفع كنتيجة للجهد البدني . ومع أن للجلوكوز دوراً هاماً للغاية في الإمداد بالطاقة لأجل الانقباض العضلي ، فإن له أهمية أكثر في " تدبير الشؤون " الفسيولوجية لضمان إمداد المخ والقلب بالجلوكوز ، وهو مصدر الوقود الأساسي لهذه الأعضاء الحيوية . أحد وظائف الكبد الأكثر أهمية ، والتي تُدعم عن طريق عدد من الهرمونات ، هو عمله كأداة لتنظيم الجلوكوز "Glucostat" ، بمعنى آخر ، يعمل كمنظم لجلوكوز الدم أن لا يزيد أو ينقص جلوكوز الدم معنوياً ، وبالتالي يضمن إمداداً ثابتاً من الجلوكوز للمخ والقلب ، بغض النظر أيا كان الحصان مغذى ، مجوع ، يبذل جهداً بدنياً أو في حالة الراحة .

## طاقة انقباض العضلة

## The Energy for Muscle Contraction

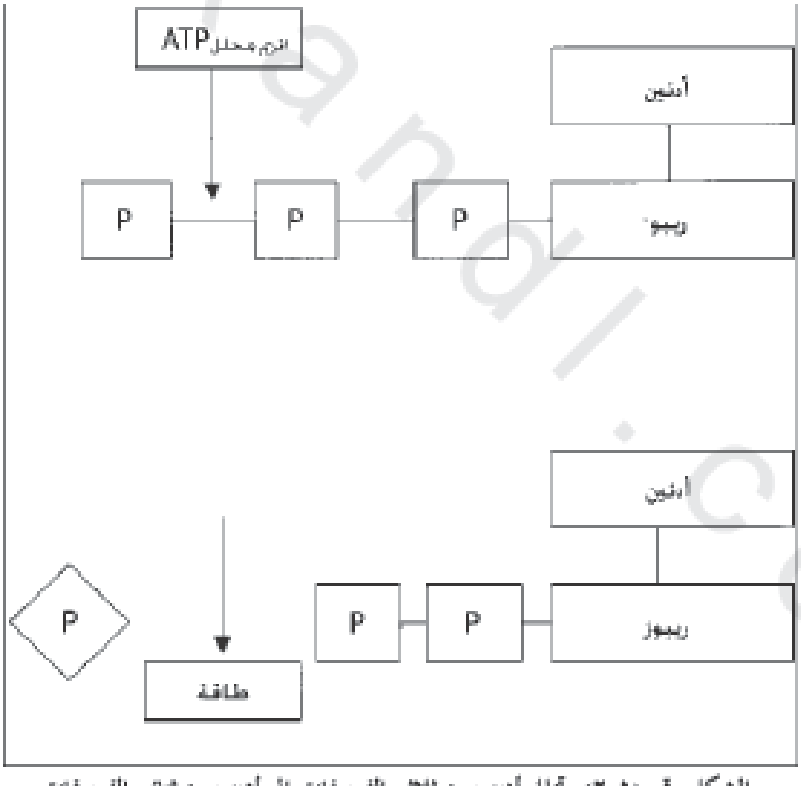
الطاقة لا تستحدث ( تبنى ) ولا تفنى وإنما تتحول من شكل لآخر . تحول جميع الحيوانات الطاقة الكيمائية من الغذاء إلى طاقة ميكانيكية للعمل وتنطلق الحرارة

كمنتج ثانوي . ليست هناك عملية لتحويل الطاقة الكامنة أو المخزنة إلى عمل أو حركة ذات كفاءة ١٠٠ ٪ . في الحقيقة ، تعتبر الحيوانات ( بما فيها الإنسان ) محولات طاقة غير فعالة لحد ما ، فحوالي ٢٠ ٪ من الطاقة المتحصل عليها من الغذاء تتحول إلى عمل مفيد ، بمعنى آخر تستخدم للحركة بواسطة العضلة ، والباقي ( حوالي ٨٠ ٪ ) فينطلق كحرارة . ولنضع ذلك في سياق الحديث عن المحركات الميكانيكية ، حيث تستطيع محركات السيارات الحديثة تحويل حوالي ٢٠- ٣٠ ٪ من الطاقة الكامنة في البترول إلى حركة .

إن ثلاثي فوسفات الأدينوسين هو المصدر الأساسي للوقود : الذي يجب أن ينتج ويخزن داخل جميع الخلايا في الجسم ، سواء الخلايا العضلية أو غيرها ؛ لأنه لا يمكن خزنه خارج الجسم . يخزن ثلاثي فوسفات الأدينوسين في خلية العضلة وتركيبه موضح في الشكل رقم (٢,١) . يتكون من أدينوسين متصل بسكر ريبوز وثلاث مجاميع من الفوسفات . يوجد كمية معينة من ثلاثي فوسفات الأدينوسين داخل العضلة ٦ ملي مول/كجم تقريباً من العضلة الرطبة أو الطازجة ( مكافئة لـ ٢٤ملي مول / كجم من العضلة الجافة ) أو ٧٠٠ جم تقريباً في جميع العضلات الهيكلية في جسم حصان وزنه ٥٠٠ كجم .

يعتبر ثلاثي فوسفات الأدينوسين مصدر الطاقة الكيميائية التي تُستَعمل بواسطة جميع الخلايا ، في جميع الحيوانات . لا تستطيع العضلات أن تنقبض أو تنبسط بدونه . عندما تنقبض خلايا العضلات ، يتحول ثلاثي فوسفات الأدينوسين إلى ثنائي فوسفات الأدينوسين ADP وفوسفات ( انظر الشكل رقم ٢,١) يُحفَز هذا التفاعل بواسطة أنزيم داخل خلية العضلة يدعى ثلاثي أدينوسين الفوسفاتاز ATPase . يُطلق تحلل ثلاثي فوسفات الأدينوسين إلى ثنائي فوسفات الأدينوسين كمية محدودة من

الطاقة . بالضبط ١,٨ كيلو جول لكل مول من ثلاثي فوسفات الأدينوسين . ولإعطاء فكرة عن المعدل الهائل لتجديد ثلاثي فوسفات الأدينوسين ، اعتبر أن الشخص المتوسط يعيد تنظيم ( يحلل ويجدد) أكثر من نصف وزن جسمه بوحدات ثلاثي فوسفات الأدينوسين في اليوم ، عند الراحة . فالحصان النشط يعيد تنظيم Turn over أربع مرات وزن جسمه بوحدات ثلاثي فوسفات الأدينوسين في اليوم . يضمن التحليل الكيميائي للوقود المخزن داخل العضلة تلبية هذا الطلب الهائل لثلاثي فوسفات الأدينوسين .




الشكل رقم (٢,١). تحلل أدينوسين ثلاثي الفوسفات إلى أدينوسين ثنائي الفوسفات.

الوقود الأساسي المستعمل للإمداد بالطاقة هو الجلوكوز ، النشا الحيواني Glycogen ( كلاً من الجلوكوز والجليكوجين أشكال من الكربوهيدرات ) والأحماض الدهنية ( الدهن) . يستخدم البروتين فقط للإمداد بالطاقة في حالات الإجهاد الشديد ، الجوع أو المرض . يسير كلاً من الجلوكوز والحموض الدهنية في مجرى الدم ويمكن أن تُلتقط أو تُطلق بسهولة بواسطة العضلات . الجليكوجين هو النشا الحيواني المقابل للنشا في النباتات وببساطة هو خيط طويل من وحدات الجلوكوز مرتبطة معاً . فلا يستطيع جليكوجين الخلايا بسبب تركيبه وحجمه ، أن يتركها ويدخل إلى مجرى الدم . حيث مواقع التخزين الأساسية للجليكوجين هي داخل الكبد والعضلة .

## تحويل الغذاء إلى طاقة نافعة للجهد البدني
## The Conversion of Food into Useful Energy for Exercise

تُنتج الانقباضات العضلية فقط عن طريق استعمال ثلاثي فوسفات الأدينوسين . بسبب وجود كمية قليلة من ثلاثي فوسفات الأدينوسين داخل العضلة فإنه يستهلك بسرعة أثناء الجهد البدني ( في الواقع خلال واحد أو اثنين من الانقباضات العضلية ) وللاستمرار في العمل فعلى العضلة أن تجدد بدرجة ثابتة ثلاثي فوسفات الأدينوسين عن طريق فسفرة Phosphorylating ثنائي فوسفات الأدينوسين لضمان إنتاج ثابت للطاقة . تتحقق فسفرة ثنائي فوسفات الأدينوسين عن طريق العديد من العمليات الكيميائية الحيوية أو مسارات الطاقة داخل الخلية العضلية . وجميعها تحتاج المواد الغذائية أو الوقود . لننظر إلى ذلك بإحدى الطرق وهي أن نفكر بالفرق بين الكهرباء والغاز وهما شكلان مختلفان للطاقة أو الوقود . فيمكن أن تنتج الكهرباء من محطة توليد توربين Turbine الغاز ، لكننا نستطيع فقط أن نضيء مصباح كهربائي باستخدام الكهرباء وليس الغاز . ثلاثي فوسفات الأدينوسين هو بمثابة

الكهرباء ، بينما الغاز بمثابة جميع أنواع الوقود الأخرى مثل الجلوكوز ، الجليكوجين والدهن . لك أن تتعجب لماذا لا تستطيع ببساطة أن نضيف الفوسفات إلى ثنائي فوسفات الأدينوسين لينتج ثلاثي فوسفات الأدينوسين . لكي تفعل ذلك يكون مشابها لمحاولة جعل التفاعل في مرتقى Uphill ضد تدرج الطاقة : إذا كان من الممكن أن نعيد تدوير ثلاثي فوسفات الأدينوسين بهذه الطريقة فليست هناك حاجة أن نحصل على الطاقة من غذائنا ويمكن أن يستمر الجهد البدني بغير حدود . ليس إعادة التدوير Recycling البسيط خياراً ، وإذا أردنا ألا نستنفد مخازننا من ثلاثي فوسفات الأدينوسين فيجب علينا أن نستخدم إمدادات من الوقود . مثاليا ، لابد من التوجيه إلى تجديد ثلاثي فوسفات الأدينوسين على وجه السرعة كلما استهلك بسبب الانقباضات العضلية . كلما كانت حركة الحيوان سريعة كلما كان معدل استهلاك ثلاثي فوسفات الأدينوسين كثيراً بواسطة العضلات وكلما احتاج أن يجدد ثلاثي فوسفات الأدينوسين بسرعة أكبر من ثنائي فوسفات الأدينوسين ليقابل طلب الإمداد منه . بينما يكون تجديد ثلاثي فوسفات الأدينوسين من ثنائي فوسفات الأدينوسين هاماً لكي نحافظ على تركيز عالٍ من ثلاثي فوسفات الأدينوسين ، فمن الأهمية أن نحافظ على تركيز ثنائي فوسفات الأدينوسين منخفضاً ؛ لأن زيادة ثنائي فوسفات الأدينوسين الحر ربما تساهم في إعياء العضلية .

تستطيع متطلبات الطاقة لنوبة واحدة من الجهد البدني أن تستنفد معنوياً مخازن الوقود عند الحصان ، ومع ذلك ، على أساس يوم إلى آخر ، يحافظ الغذاء المقدم في عليقة الحصان على امتلاء المخازن الأساسية من الكربوهيدرات والدهون . تخزن الكربوهيدرات والدهون داخل الكبد ،العضلة الهيكلية والنسيج الدهني . يُخزن الجلوكوز( من الكربوهيدرات ) على صورة جليكوجين داخل الكبد والعضلة

الهيكلية ، بينما تُخزن الخموض الدهنية ( الدهون ) كجلسريدات ثلاثية Triglycerides داخل الكبد ، والعضلة والنسيج الدهني ، كما هو الحال حول الغارب Withers أو الحارك ( أعلى الكتف ) ، القفا Crest ، والخاصرة Loins وحول الأعضاء الداخلية . تتوفر كمية محددة من الطاقة في مجرى الدم ، على شكل جلوكوز وحموض دهنية . إن الإمدادات الأساسية للطاقة لأي جزء معين من الجهد البدني تُزَود عادة عن طريق الجيكوجين داخل العضلة والحموض الدهنية الحرة من مجرى الدم . تستعمل مخازن الوقود في الكبد والنسيج الدهني للوصول بمخازن العضلات إلى الذروة عندما يزداد الطلب جوهريا على الطاقة كنتيجة للجهد البدني الضعيف أو لفترات طويلة .

## مسارات الطاقة
## Energy Pathways

يوجد العديد من الطرق الكيميائية الحيوية لفسفرة ثنائي فوسفات الأدينوسين ، المعروفة بطريقة أخرى "مسارات الطاقة" ، حيث يتم ذاتياً اختيار واحداً أو أكثر من تلك المسارات أثناء أي فترة خاصة من الجهد البدني . ومع ذلك ، فمن الأهمية بمكان أن نفهم أن المسارات المتوفرة لا تُستعمل على أساس قاعدة الكل أو لا شيء All or nothing وأنه ربما يُستعمل عدد من المسارات المختلفة في وقت واحد لتوليد الطاقة . تختلف المسارات المختلفة من حيث توفير الوقود ، بمعنى آخر ، ما هي كمية ثلاثي فوسفات الأدينوسين المحررة لكل جرام من الوقود المستهلك ، وكذلك في " نوعية الأداء " ، بمعنى آخر ، ما هي السرعة التي يتكون عندها ثلاثي فوسفات الأدينوسين المتوفر للانقباض . ليس هناك مسار واحد للطاقة يمتلك كلاً من إنتاج عالي من ثلاثي فوسفات الأدينوسين كأن يكون اقتصادياً مع أداء مرتفع ، ومعدل عالٍ من إنتاج ثلاثي فوسفات الأدينوسين بمعنى آخر . لذلك يختار جسم الحصان مجموعة مؤلفة

من مسارات الطاقة اعتماداً على طبيعة الجهد البدني وعلى حالة مخازنة من الوقود . يوجد أربعة مسارات أساسية للطاقة ، اثنان منها تحتاج إلى الأكسجين (مسارات الطاقة الهوائية) واثنان لا تحتاج إلى الأكسيجين ( مسارات الطاقة اللاهوائية ) . من الأهمية أن نفهم أن مساري الطاقة اللاهوائية لا تُستعمل فقط في المواقف التي لا يتوفر فيها الأكسجين . وهي تدعى لا هوائية ليس لأنها لا تحتاج إلى الأكسجين ، ولكنها ربما تُستعمل عندما يكون هناك إمداد وفير من الأكسجين إلى العضلة .

**المسار ١ : الفسفره اللاهوائية لثنائي فوسفات الأدينوسين باستعمال مخازن الفوسفات ذات الطاقة العالية في العضلة**

**Pathway (1) : Anaerobic Phosphorylation of ADP Using High Energy Phosphate Stores in Muscle**

يتضمن الفوسفات عالي الطاقة جزيئات مثل الكريتين المفسفر Phosphocreatine (PCr) والتي تمتلك روابط فوسفاتية ذات طاقة عالية . وهذا يعني أن الطاقة مرتبطة في تركيبها . تتوفر الطاقة المخزنة في روابطها إذا ما تحللت تلك الجزيئات لتجديد ثلاثي فوسفات الأدينوسين من ثنائي فوسفات الأدينوسين . يحفز إنزيم فوسفوكيناز الكرياتين Creatine phosphoKinase (CPKأوCK) إنتاج ثلاثي فوسفات الأدينوسين من ثنائي فوسفات الأدينوسين باستعمال الكريتين المفسفر ، تبعاً للمعادلة الكيميائية

ATP + كرياتين (Cr) ⟵ ADP + فوسفوكرياتين (PCr)

وهكذا يوفر الكريتين المفسفر طريقة سريعة لتجديد ثلاثي فوسفات الأدينوسين لتستعمله العضلة . يُجدد ثلاثي فوسفات الأدينوسين بسرعة عالية جداً داخل الخلية العضلية عن طريق "سلب" فوسفات من الكريتين المفسفر . يمكن أن تُستعمل مخازن

الكريتين المفسفر بهذه الطريقة لتجديد ثلاثي فوسفات الأدينوسين بسرعة ، ولكن يوجد فقط مخزون كاف من الكريتين المفسفر لجهد بدني يستمر لعدة ثواني . ولقد عرفنا سابقاً أن تركيز ثلاثي فوسفات الأدينوسين في عضلة الحصان يقدر بحوالي ٦ مللي مول/ كجم عضلة رطبة ( طازجة ) ، ولكن بلغت كمية الكريتين المفسفر المخزن حوالي ١٥- ٢٠ مللي مول/ كجم عضلة طازجة . ومع ذلك ، من المهم أن نؤكد مرة أخرى أن الخلايا العضلية لا تستطيع أن تستعمل الطاقة المرتبطة في رابطة الفوسفات في الكريتين المفسفر مباشرة ، ولكن فقط بعد نقلها إلى ثلاثي فوسفات الأدينوسين .

قد يحدث في ظروف معينة ، تفاعل آخر يُعرف بتفاعل الميوكينيز Myokinase ( سُمي باسم الأنزيم الذي يُحفز التفاعل ) . يحدث هذا التفاعل عندما يكون معدل تحليل ثلاثي فوسفات الأدينوسين سريعاً للغاية ، مثلما يحدث أثناء التسارع أو العدو بسرعة Galloping ، ويبدأ تركيز ثنائي فوسفات الأدينوسين الحر داخل الألياف ( الخلايا ) العضلية في الزيادة . في مثل هذه الحالة ، فإن ثنائي فوسفات الأدينوسين هو مصدر الفوسفات عالي الطاقة ، ولكن كما هو حال الكريتين المفسفر ، فلا يمكن أن يُستعمل مباشرة بواسطة الخلايا العضلية ، ومع ذلك ، عندما تتحد جزيئات من ثنائي فوسفات الأدينوسين معاً فإن أحدهما يفقد الفوسفات بفاعلية ( ينتج جزيء من أدينوسين أحادي الفوسفات ، AMP ) ، بينما ثنائي فوسفات الأدينوسين الآخر يكتسب الفوسفات مكوناً ثلاثي فوسفات الأدينوسين . المعادلة الكيميائية لهذا التفاعل هي :

$$ADP + ADP \longrightarrow ATP + AMP$$

يحدث تفاعل الميوكيناز طبيعياً فقط أثناء الكثافة العالية للجهد البدني ، وفي تلك الألياف العضلية التي جُندت أساساً أثناء الجهد البدني ذي السرعة العالية ،

والتسارع والقفز . هذه التفاعلات محدده ذاتياً self-limiting بحيث إذا كان هنالك تراكماً من أدينوسين أحادي الفوسفات ، في هذه الحالة ، يسير التفاعل ببطء من اليسار إلى اليمين . لأن الزيادة في ثنائي فوسفات الأدينوسين ربما يكون لها علاقة بعملية الإعياء في الجهد البدني عالي الشدة ، فيكون الهدف إبقاء ثنائي فوسفات الأدينوسين منخفضاً بإزالته بسرعة كلما تكون . لتفعل ذلك ، فتحتاج العضلة أيضاً إلى طريقة لتزيل أدينوسين أحادي الفوسفات : يتم تنفيذ ذلك بواسطة انزيم نازع أمين أدينوسين أحادي الفوسفات AMP deaminase. يحول إنزيم نازع مجموعة الأمين من المركب أدينوسين أحادي الفوسفات إلى أدينوسين أحادي الفوسفات والأمونيا .

تجدد هذه التفاعلات مجتمعة ثلاثي فوسفات الأدينوسين بسرعة وبدون استعمال الأكسجين . يُستعمل الفوسفات عالي الطاقة مثل الكريتين المفسفر عند بداية الجهد البدني أو في الجهد العنيف مثل القفز ، أو حينما تكون سرعة تجديد ثلاثي فوسفات الأدينوسين هي المتطلب الأساسي . إن مخازن ثلاثي فوسفات الأدينوسين والكريتين المفسفر صغيرة ، وليستديم الجهد البدني لأكثر من بضع ثواني فحسب ، فيجب على الجسم أن يتحول إلى مسارات طاقة أخرى ليجدد ثلاثي فوسفات الأدينوسين لغرض الانقباض العضلي . بمجرد أن تتولى الأشكال الأخرى الأمر لإنتاج الطاقة ، ستُملأ ثانية نفس مخازن الفوسفات ذات الطاقة العالية إذا كان الجهد البدني ما بين منخفض إلى متوسط الشدة . ربما تنخفض أثناء الجهد البدني عالي الشدة تركيزات ثلاثي فوسفات الأدينوسين ، الكريتين المفسفر بمقدار ٥٠—٧٠ ٪ عند نهاية نوبة الجهد البدني كنتيجة للنقص في درجة الأس الهيدروجيني pH للعضلات الناشئ عن إنتاج حمض اللبن (انظر لاحقاً) .

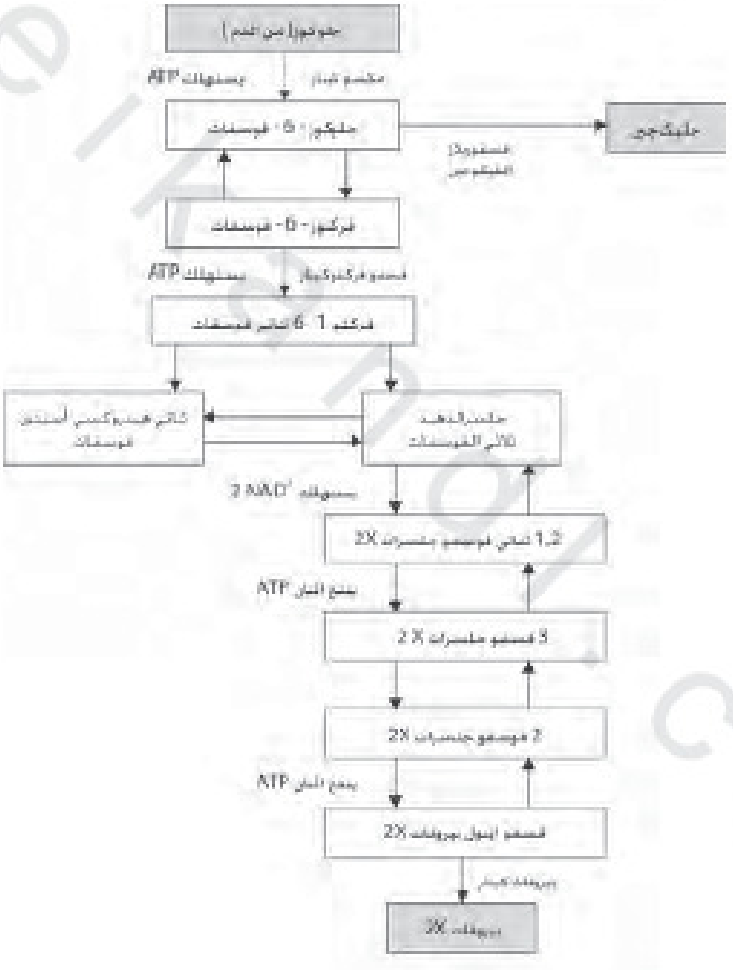
يتضمن مساري الطاقة التاليين ( انظر مساري ٢، ٣ ) تحليل مخازن الوقود لتدعيم الجهد البدني الذي يستغرق عدة دقائق إلى ساعات كثيرة . يمكن أن يتحلل الوقود المُخزن في صورة دهن وكربوهيدرات هوائياً ، بمعنى آخر في وجود الحاجة إلى الأكسجين ، ليُنتج كميات معنوية من الطاقة في شكل ثلاثي فوسفات الأدينوسين . الجليكوجين ( كربوهيدرات ) هو بوليمر Polymer كبير للغاية من الجلوكوز المتبقي ( سلاسل عديدة من جزيئات الجلوكوز ) وهو مخزون الخلية الحيوانية للجلوكوز ( مكافئ للنشا في النباتات ) . تتوافر الطاقة من الجلوكوز عن طريق تخزين الجلوكوز في صورة جليكوجين بين الوجبات الغذائية . وتختلف جزيئات الجليكوجين في الحجم اختلافاً هائلاً ، فتتواجد في الخلايا في شكل حبيبات لا تستطيع المرور من الخلية إلى مجرى الدم .

**المسار٢ : فسفرة أدينوسين ثنائي الفوسفات هوائياً ( تأكسدياً ) باستعمال مخازن الكربوهيدرات**

**Pathway (2) : Aerobic (Oxidative) Phosphorylation of ADP Using Carbohydrate stores**

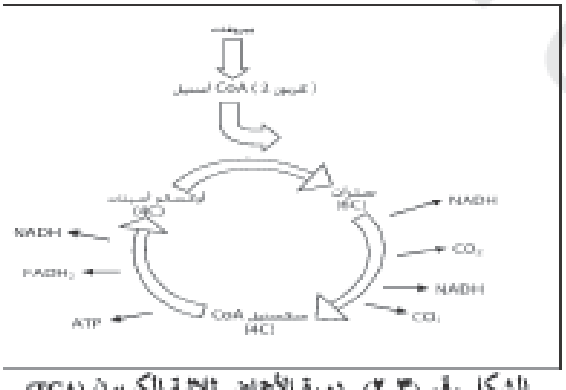
يشمل تحلل الجليكوجين داخل العضلة باستخدام الأكسجين عدة مراحل ، حيث يلعب الأكسجين دوره في المرحلة النهائية فقط . تتضمن المرحلة الأولى من التحلل تحويل الجليكوجين إلى بيرو فات Pyruvate ، والتي تحدث في سيتوبلازم الخلية العضلية وبدون تدخل الأكسجين . يتضمن تحويل الجليكوجين إلى بيروفات سلسلة خاصة من تفاعلات الفسفرة التي تعرف بالتحلل السكري Glycolysis ( انظر الشكل رقم ٢،٢ ) . تحدث عملية التحلل السكري نفسها بسرعة ولكنها تنتج فقط كمية صغيرة من ثلاثي فوسفات الأدينوسين مباشرة ( ثلاثة جزيئات ثلاثي فوسفات الأدينوسين لكل وحدة جلوكوز تم تحليلها من الكربوهيدرات المخزنة داخل العضلة ،

بمعنى آخر من الجليكوجين ) . ومع ذلك ، فالأكثر أهمية ، هو إنتاج عملية التحلل السكري جزيئان من البيروفات والتي تستعمل في تغذية المرحلة التالية من مسار الطاقة الهوائي . وفي النهاية تُنتج ثلاثي فوسفات الأدينوسين أكثر إلى حد بعيد . تحدث حتى هذه المرحلة جميع التفاعلات في سيتوبلازم الخلية العضلية .



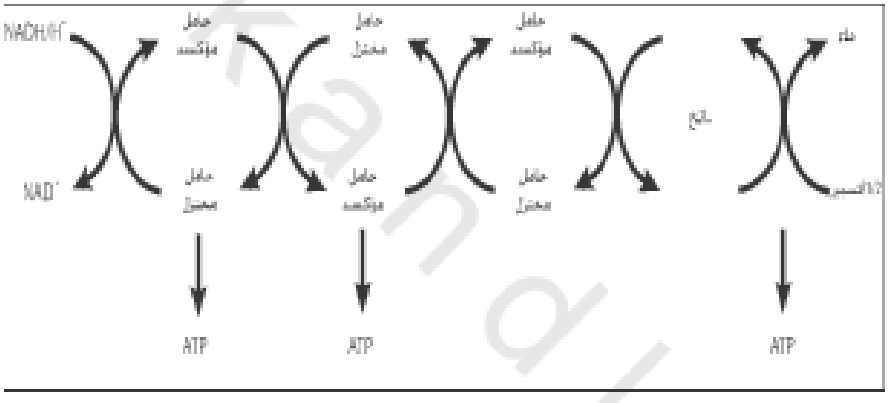

الشكل رقم (٢,٢). عملية التحلل السكري.

المرحلة التالية في التحليل الهوائي للجليكوجين هي تحويل البيروفات إلى تركيب آخر ثلاثي الكربون يعرف بـ أستيل كو إنزيم A (acetyl co A) . يحدث هذا التفاعل فقط داخل الأجسام السبحية ( الميتوكندريا Mitochondria ) داخل الخلية العضلية ، ولكن على وجه الخصوص حول الليفات العضلية ويُحفز بواسطة إنزيم يُدعى نازع هيدروجين البيروفات Pyruvate dehydrogenase (PDH) . توجد الميتوكوندريا داخل الخلية العضلية ، ولكن على وجه الخصوص حول الليفات العضلية Myofibrils ( انظر الفصل الثالث ) . الميتوكندريا هي تراكيب خاصة ذات غلاف خارجي وغلاف داخلي ذو ثنايات حيث توجد إنزيمات الفسفرة التأكسدية Oxidative phosphorylation . يُزيد انثناء الغلاف المساحة السطحية المتوفرة لحدوث التفاعلات . عدد الميتوكندريا داخل الخلية أو النسيج دليل على نشاطها . ومن ثم فإن كثافة الميتوكندريا عالية في كل من العضلة المتحركة والخلايا العضلية القلبية . يدخل أستيل كو إنزيم A بعد ذلك المرحلة الثالثة من التحلل الهوائي للجليكوجين والتي تحدث داخل الميتوكندريا . يبدأ أستيل كو إنزيم A سلسلة من التفاعلات تعرف بدورة الأحماض ثلاثية الكربوكسيل Tricarboxylic acid cycle (TCA) ( انظر الشكل رقم ٢,٣ ) ، ويطلق عليها أحياناً دورة كريس Krebs cycle .




الشكل رقم (٢,٣). دورة الأحماض ثلاثية الكربون (TCA) .

النتيجة النهائية لدورة TCA هو إنتاج جزيئان من ثلاثي فوسفات الأدينوسين واثنان من أيونات الهيدروجين . وينتج اثنان من ايونات الهيدروجين أيضا من عملية التحلل السكري وترتبط الأيونات مع المرافقات الأنزيمية نيكوتين أميد أدنين ثنائي النيكلوتيد Nicotinamide adenine dinucleotide (NAD) وفلافين أدنين ثنائي النيكلوتيد Flavin adenine dinucleotide (FAD) لتنتج NADH و $FADH_2$ . يدخل كل من NADH و$FADH_2$ "سلسلة النقل الإلكتروني" "Electron transport chain" (انظر الشكل رقم ٢,٤ ) على غلاف الميتوكوندريا الداخلي .




الشكل رقم (٢,٤). سلسلة النقل الإلكتروني.

تنفصل أيونات الهيدروجين بعد ذلك إلى إلكترونات وبروتونات حيث يتجدد ثنائي فوسفات الأدينوسين خلال سلسلة من التفاعلات الكيميائية (النقل الالكتروني ) لينتج ٣٤ جزيء من ثلاثي فوسفات الأدينوسين وفي النهاية ترتبط أيونات الهيدروجين مع الأكسجين لتنتج ماء . بسبب حاجة هذه العملية إلى الأكسجين فيمكن أن يطلق عليها الفسفرة التأكسدية أو الهوائية . إن إنتاج الماء في نهاية السلسلة له ميزة في " إزالة " أيونات الهيدروجين من الخلية حيث إنها تجعل الوسط داخل الخلية حامضي . يمكن أن يستخدم كلاً من الجليكوجين والجلوكوز في عملية التحلل السكري . يمكن الحصول

على الجليكوجين من مخازن الجليكوجين الخاصة بالعضلات وعلى الجلوكوز من مجرى الدم . تُعرف عملية تكسير الجلكوجين بتحلل الجليكوجين Glycogenolysis وينتج عنها تكوين جلوكوز-١- فوسفات Glucose-1-phosphate . يتحكم في تحلل الجليكوجين إنزيم يُدعى فوسفوريلاز الجليكوجين Glycogen phsphorylase وله شكل غير نشط وآخر نشط يطلق عليهما a , b . بينما تنتهي وحدات الجلوكوز من تحلل الجليكوجين إلى جلوكوز -١- فوسفات وبعد التحويل إلى جلوكوز -٦- فوسفات يمكن أن يدخل مباشرة إلى مسار التحلل السكري . لابد أن تحدث أولاً عملية فسفرة للجلوكوز المأخوذ إلى العضلة من مجرى الدم ، وهذا يعني ، أن يضاف إلية الفوسفات ليتحول إلى جلوكوز-٦- فوسفات . يُحفز هذا التفاعل بواسطة إنزيم يدعى هكسوكيناز Hexokinase ويحتاج إلى جزيء ثلاثي فوسفات الأدينوسين لكي " يعطي" donate الفوسفات . يوفر إنتاج جلوكوز-١- فوسفات مباشرة من تحلل الجليكوجين ثلاثي فوسفات الأدينوسين الذي يستهلك في المراحل الأولية من عملية التحليل السكري كما يمنع التسرب خارج الخلية العضلية ، حيث لا تستطيع عادة المركبات المفسفرة ، بما فيها كل من ATP ، ADP ، AMP ، أن تعبر أغلفة الخلايا ما لم تكن هذه الأغلفة قد تلفت . تعتبر المرحلة الأولى لعملية التحلل السكري هي إنتاج جلوكوز-٦- فوسفات سواء كان مصدر وحدات الجلوكوز من جلوكوز الدم أو جليكوجين العضلات .

ينتج الأيض ( التحلل ) الهوائي التام لوحدة جلوكوز واحدة من الجليكوجين إلى ماء وثاني أكسيد الكربون ( المتكون من دورة TCA ) ٣٩ جزيء من ATP ( ثلاثة ATP من التحلل السكري ، أثنان ATP من دورة TCA ، و ٣٤ جزيء ATP من سلسلة النقل الإلكتروني ) . يُنتج التحلل الهوائي الكامل للجلوكوز المأخوذ عن طريق الخلية العضلية من مجرى الدم واحد ATP أقل ؛ لأنه يلزم جزئ

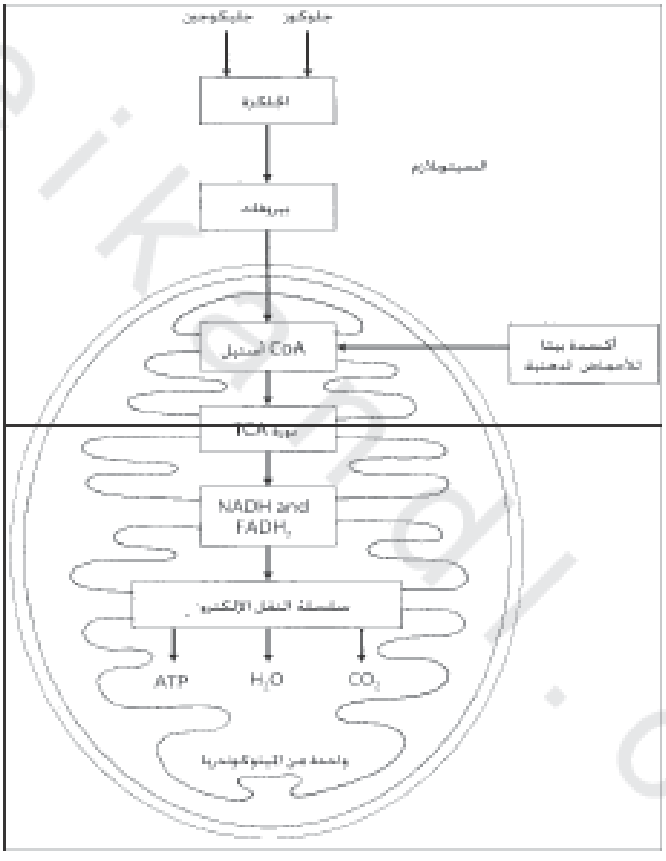
واحد ATP لتحول الجلوكوز إلى جلوكوز-٦- فوسفات في المرحلة الأولى من عملية التحلل السكري . لذلك فإن الناتج الصافي من جزيئات ATP من التحلل الهوائي للجلوكوز هو ٣٩- ١ = ٣٨ جزيء .

**المسار(٣) : فسفرة ثنائي فوسفات الأدينوسين هوائياً باستعمال الأحماض الدهنية**

**Pathway (3) : Acrobic Phosphorylation of ADP Using Fatty Acids**

يبدأ التحلل الهوائي للدهن في شكل حموض دهنية بتحويل اثنان من القطع الكربونية للحمض الدهني إلى أستيل Co A عن طريق عملية تدعى أكسدة – بيتا Beta oxidation . لذلك لا ينتج أستيل Co A عند تحلل الدهن ، بواسطة التحلل السكري ولكن عن طريق أكسدة – بيتا . تكون مراحل تحلل الدهون في الميتوكوندريا ، بمعنى آخر ، دورة TCA ( كربس ) وسلسلة النقل الإلكتروني ، متطابقة لتلك في حالة الجليكوجين ، ولكن تختلف الخطوات المؤدية لتكون أستيلCo A . يوضح الشكل رقم (٢.٥) منظر عام تخطيطي لمراحل الجليكوجين والدهن . تُعَرف المراحل الفردية المتضمنة في التحلل الهوائي للدهن ( كما للكربوهيدرات) إجمالاً بالفسفرة التأكسدية . إنتاج ثلاثي فوسفات الأدينوسين من الدهن دائماً أعلى لنفس الكتلة من الكربوهيدرات (سواء الجلوكوز أو الجليكوجين ) ولكن تختلف أيضا بين الأنواع المختلفة تبعاً لمصدر الدهن . تخزن الدهون داخل الجسم في شكل يُعرف بالجلسريدات الثلاثية Triglycerides والتي تتكون من جزيء جلسرول Glycerol وثلاثة جزيئات من الحموض الدهنية . تُحلل الدهون بواسطة أنزيمات تعرف بالليبازات Lipases ويُطلق على تحلل الدهون Lipolysis . بمجرد أن تنفصل الحموض الدهنية عن جلسرولها ( العمود الفقري ) تصبح حرة لتتحرك في مجرى الدم إلى العضلة . تعرف في هذه الحالة بالحموض الدهنية الحرة Free fatty acids . تحتوي العضلة نفسها أيضاً على مخازن صغيرة من الجلسريدات الثلاثية والتي يمكن أيضاً أن تتحلل وتطلق الحموض الدهنية الحرة والتي يمكن استثمارها داخل الخلية العضلية . يوجد عدد من الحموض الدهنية الحرة المختلفة الموجودة في الجسم التي تختلف أساساً في محتواها من حيث عدد ذرات الكربون . الحموض الدهنية الطيارة Volatile fatty acids

هي مصدر هام آخر للوقود والتي تنتج من تخمر الكربوهيدرات في الأمعاء الغليظة . بمجرد أن تكون الحموض الدهنية الطيارة في الدم فيمكن أن تؤخذ وتستعمل في الحال بعد التحول إلى ثلاثي فوسفات الأدينوسين كوقود لانقباض العضلة ، وإلا فإنها تخزن في النسيج الدهني كجلسريدات ثلاثية .




الشكل رقم (٢,٥). منظر تخطيطي عام لمراحل تحلل الجليكوجين والدهن.

ينتج الأيض الهوائي التام لحمض البالمتيك Palmitic acid ( حمض دهني نموذجي ١٦– كربون ) بالصيغة الجزيئية ($C_{16}H_{32}O_2$) ١٢٩ جزيء من ثلاثي فوسفات الأدينوسين صافية لكل جزيء حمض دهني . الإنتاج الكلي هو ١٣١ جزيء من ثلاثي فوسفات الأدينوسين ، لكن يستخدم اثنان من ثلاثي فوسفات الأدينوسين

"لتنشيط" ( لتحضير ) الحموض الدهنية الحرة قبل أن تدخل إلى دورة الحموض ثلاثية الكربوكسيل . يحدث تنشيط الحموض الدهنية الحرة على الغلاف الخارجي للميتوكوندريا قبل الفسفرة التأكسدية داخل الميتوكندريا والتي تنتج ما مجموعه ٣٥ جزيء من ثلاثي فوسفات الأدينوسين . في كل وقت تُقصر فيه سلسلة الحمض الدهني باثنان من الكربون ، يتكون جزيء واحد من كل من $FADH_2$ و NADH مؤدياً إلى إنتاج خمسة جزيئات من ثلاثي فوسفات الأدينوسين عن طريق الفسفرة التأكسدية . فيتم تقصير السلسلة في الحمض الدهني ذو ١٦ كربون ، باثنان من الكربون سبع مرات ليترك ثمان قطع لكل منها ذرتي كربون ، ومن ثم فإن ٧×٥ = ٣٥ من ثلاثي فوسفات الأدينوسين . تنتج دورة الحموض ثلاثية الكربوكسيل ثمانية جزيئات من ثلاثي فوسفات الأدينوسين مباشرة و ٨٨ عن طريق الفسفرة التأكسدية ، في المجموع ١٣١ ثلاثي فوسفات الأدينوسين منقوصاً منها اثنان من ثلاثي فوسفات الأدينوسين لتنشيط الحمض الدهني فيعطي ١٢٩ من ثلاثي فوسفات الأدينوسين .

تنتج الفسفرة التأكسدية للدهن حوالي ثلاث مرات من ثلاثي فوسفات الأدينوسين أكثر من الفسفرة التأكسدية للكربوهيدرات ، وهذا يفسر سبب اعتبار الدهن مصدر الغذاء " الكثيف بالطاقة "" "Energy-dense" . ينتج جزيء واحد من الدهن ثلاثة أضعاف ما ينتجه جزيء الكربوهيدرات من الطاقة ، تستطيع أن تدرك لماذا يُفقد الدهن غالباً مع استمرارية الجهد البدني وهذا يبدو كالسعي إلى المرتقى Uphill كما لو كنت تستنفد كميات معتبرة من الطاقة على شدة منخفضة نسبياً ، بمعنى آخر ، التمرين ( الجهد الجسماني ) لوقت أطول يحلل الزائد من النسيج الدهني . وعلى الجانب الايجابي ، فحقيقة أن الدهن مكتنز بالطاقة فهي أخبار عظيمة للرياضيين ذوي الاحتمال ، حيث ينصرف قليل من الدهن لطريق أطول . وحتى الحصان النحيف يستعمل فقط نسبة ضئيلة من دهن الجسم المخزن ليستكمل سباق تحمل لمسافة ١٠٠ميل .

على أساس كتلة لكتلة ، فإن ١ جرام دهن أفضل من ١ جرام كربوهيدرات من حيث إنتاج ثلاثي فوسفات الأدينوسين ، لكن هنالك عيوب لاستخدام الدهن كوقود أولها ، أنه يحتاج لأكسجين أكثر لحد بعيد ليحلل جزيء واحد من الحمض

الذهني كما لو كان يحلل جزيء واحد من الجليكوجين . وثانياً ، فإن سرعة ( معدل ) انطلاق الطاقة من الدهن أبطأ بكثير من الكربوهيدرات ( انظر الجدول رقم ٢,١ ) . لذا فإن الجهد البدني الذي يستخدم الدهن كمصدر أساسي للطاقة يكون محدداً للهرولة Trotting وللسرعة البطيئة- المتوسطة لخبب الفرس Cantering . عند سرعات أعلى من تلك ، فعلى الجسم أن يتحول تدريجياً إلى استعمال كربوهيدرات أكثر وأكثر ليقابل المعدل المتزايد من استعمال ثلاثي فوسفات الأدينوسين عن طريق العضلات مع معدل إعادة فسفرة ثنائي فوسفات الأدينوسين . كلما يجري الحصان أسرع ، كلما انخفضت قدرته على استعمال الدهن كمصدر للطاقة .

الجدول رقم (٢,١). القوة ، ازدياد السرعة ، احتياج الأكسجين والمقدرة لمصادر الطاقة المختلفة المتاحة للعضليات ( معدل عن Sahlin , 1985 ) .

| | الطاقة العظمى (ملي مول ATP / كجم / ثانية) | الوقت للوصول إلى الطاقة العظمى | احتياج الأكسجين ( ملي مول $(ATP/O_2)$ | وقت العمل حتى الإعياء |
|---|---|---|---|---|
| لا هوائياً | | | | |
| ATP[a] | ١١,٢ | أقل من ١ ثانية | صفر | ثواني |
| $PCr^b$ | ٨,٦ | أقل من ١ ثانية | صفر | ثواني |
| $CHO^c$ ← لاكتيت | ٥,٢ | أقل من ٥ ثانية | صفر | دقائق |
| هوائياً | | | | |
| $CHO^c$ $CO_2+H_2O$ | ٢,٧ | ٢-٣ دقيقة | ٠,١٦٧ | ساعات |
| $FFA^d$ $CO_2+H_2O$ | ١,٤ | ٣٠ دقيقة | ٠,١٧٧ | أيام !! |

a أدينوسين ثلاثي الفوسفات .

b الكريتين الفسفر .

c كربوهيدرات .

d حمض دهني حر .

**المسار (٤) : فسفرة ثنائي فوسفات الأدينوسين لا هوائياً باستعمال الكربوهيدرات**
**Pathway (4): Anaerobic Phosphorylation of ADP Using Carbohydrate**

من الناحية الفنية ، فإن تحويل ثنائي فوسفات الأدينوسين عودة إلى ثلاثي فوسفات الأدينوسين باستعمال الكريتين المفسفر ( المسار واحد ، وصف سابقاً ) هو مسار طاقة لا هوائي ، لكن المساهمة العامة لمسار الطاقة هذا بالنسبة لكلفة الطاقة الكلية لنوبة من الجهد البدني ليست عادة جوهرية ؛ لأن معظم نوبات الجهد البدني تستمر لأكثر من بضع ثواني . يتضمن مسار الطاقة اللاهوائية الأكثر أهمية تحويل الجليكوجين أو الجلوكوز إلى حمض لاكتيك ( لبنيك ) لإنتاج ثلاثي فوسفات الأدينوسين . يمكن أن يستعمل الجليكوجين أو الجلوكوز فقط لينتج الطاقة لا هوائيا خلال مسار التحلل السكري . يضمن مسار التحلل السكري إنتاج البيروفات من الجليكوجين أو الجلوكوز كما في إنتاج الطاقة هوائياً ، لكن هذه المرة ، بدلاً من تحويل البيروفات إلى أستيل CoA ودخوله إلى الميتوكندريا ، يتحول البيروفات إلى حمض لاكتيك عن طريق إنزيم نازع هيدروجين اللاكتات Lactate dehydrogenase الذي يرمز له بالرمز LDH . يتفكك حمض اللاكتيك في الحال إلى أيون هيدروجين حر ( ذو شحنة موجبة ) و أيون اللاكتيت ( ذو شحنة سالبة ) . يستعمل مصطلحي حمض لاكتيك واللاكتات غالباً بحيث يمكن استعمال أحدهما مكان الآخر ، حينما نشير إلى تركيزات الدم أو البلازما على سبيل المثال . وهكذا تكون التفاعلات المتضمنة في إنتاجات ثلاثي فوسفات الأدينوسين هوائياً ولا هوائياً متماثلة حتى النقطة التي يتكون عندها البيروفات . النتيجة النهائية للتحلل اللاهوائي للكربوهيدرات هي إنتاج كمية قليلة من ثلاثي فوسفات الأدينوسين ( ثلاثة جزيئات ثلاثي فوسفات الأدينوسين فقط إذا كان الجليكوجين هو مصدر الجلوكوز وجزيئين من ثلاثي فوسفات الأدينوسين فقط إذا استعمل جلوكوز الدم ) ويتحول NAD إلى NADH . يعتبر NADH وسيط هام في

عملية التحلل السكري وهو يتجدد طبيعياً بعد استكمال سلسلة النقل الإلكتروني في الفسفرة التأكسدية . حيث لا توجد سلسلة نقل إلكتروني في المسار اللاهوائي ، فالسبيل الوحيد لتجديد NAD من NADH للإنتاج المستمر لثلاثي فوسفات الأدينوسين عن طريق التحلل السكري هو كمنتج ثانوي من خلال تحويل البيروفات إلى حمض اللاكتيك . وتتوقف عملية التحلل السكري إذا تحول جميع الـ NAD في الخلية العضلية إلى NADH . يمكن إنتاج حمض اللاكتيك من تحويل الـ NADH إلى NAD ويسمح لعملية التحلل السكري بالتقدم لما بعد جلسرالدهيد – ثلاثي الفوسفات

$$\text{بيروفات} + \text{NADH} \longrightarrow \text{لاكتات} + \text{NAD} + \text{H}^+$$

يكون إنتاج الطاقة لا هوائياً من جزيء واحد من " جلوكوز" من الجليكوجين هو ثلاثة جزيئات ثلاثي فوسفات الأدينوسين ، بينما يتكون جزيئان من ثلاثي فوسفات الأدينوزين لجزيء جلوكوز واحد من الدم . يتكون جزيئان من اللاكتات أيضاً والتي يمكن أن تتحول رجوعاً إلى البيروفات ومن ثم إلى جلوكوز عن طريق عملية تُعرف بدورة كوري Cori cycle . يمكن أن نستنتج أنه من المستحيل أن يتحلل الدهن لا هوائياً ؛ لأن إنتاج الطاقة لا هوائياً يتضمن تحويل البيروفات إلى لاكتات .

**إنتاج الطاقة لا هوائياً غير فعال لكنه سريع**

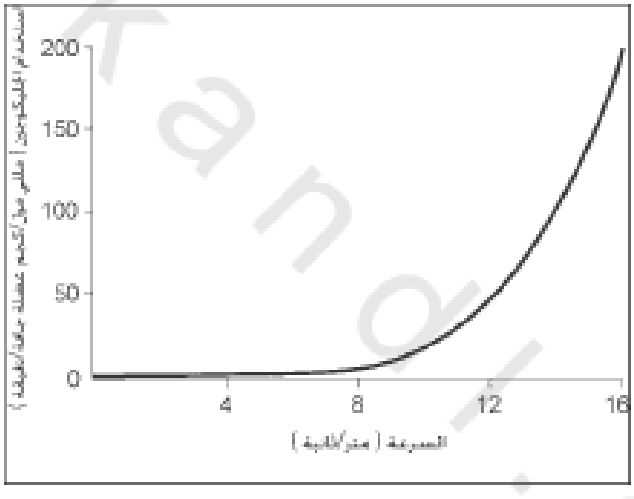
**Anaerobic Energy Production is Inefficient But Fast**

عندما نحتاج إلى الطاقة بسرعة ، مثلما يحدث أثناء تسارع الحركة ، عند العدو بسرعة ( الرمح ) أو القفز ، يتحلل الجليكوجين لا هوائياً إلى حمض لبنيك (لاكتيك) . العيب الأساسي في إنتاج الطاقة لا هوائياً هو إنتاج عدد قليل من ثلاثي فوسفات الأدينوسين لكل جزيء جليكوجين أو جلوكوز ، لذلك فإن الاعتماد بقوه على إنتاج الطاقة لا هوائياً يؤدي إلى استنفاد مخازن الجليكوجين في العضلة (الشكل رقم ٢,٦ ) . يبلغ تركيز جليكوجين العضلة الساكنة في الحصان في حدود ١٠٠ ملليمي

مول /كجم عضلة طازجة وتصل إلى حوالي ١٥٠ملي مول/ كجم عضلة طازجة ( ٦٠٠ ملي مول / كجم عضلة جافة ) أو أكثر في الخيول المدربة . يمكن أن تنخفض تركيزات جليكوجين العضلة إلى الثلث بعد مجرد نوبة واحدة من الجهد البدني ذي الشدة العالية ، إذا أردت أن تمضي سريعاً ، واستعمل كميات كبيرة من الجليكوجين ، وأن تفعل ذلك مرة أخرى في بضع ساعات من الوقت ، أو غداً ، و اليوم التالي واليوم الذي يليه فسوف تقع في حرج . تحتاج العضلة إلى كم معين من الوقت لتعيد مستويات الجليكوجين إلى ما كانت عليه قبل الجهد البدني . لقد اتضح أنه من الممكن زيادة مخزن الجليكوجين في الإنسان عن طريق تداول الغذاء قبل الجهد البدني ( تحميل الجليكوجين Glycogen loading) وأن نسرع تراكم الجليكوجين بعد الجهد البدني . لم ينجح حتى الآن أحد ليحقق ذلك في الخيول ولا يهم إذا قمت بعد الجهد بتغذية حصانك على دريس Hay ، أو دريس وحبوب أو حتى مسحوق جلوكوز نقي ، يبدو أن معدل تراكم الجليكوجين لا يتأثر هو نفسه .

يكون دوام الجهد البدني الذي يمكن أن تباشره محدوداً حينما تستعمل الجليوكوجين بمفرده كمصدر للطاقة ؛ لأن الإعياء يرتبط جزئيا بزيادة حموضة Acidification الخلايا العضلية عن طريق أيونات الهيدروجين الحرة الناتجة من تحويل البيروفات إلى حمض اللاكتيك . يمكن أن تنخفض مخازن جليكوجين العضلة في أنواع معدلات تحلل الجليكوجين التي تُرى أثناء العدو الشامل بأقصى سرعة ، بحوالي ٥٠ ٪ . حتى أنه يمكن أن يستعمل جليكوجين أكثر عن طريق تنفيذ نوبات متكررة من الجهد البدني السريع والقصير مع فترات استعادة بينها ( يطلق عليها غالباً جهد بدني عنيف متقطع أو أقصى جهد بدني متقطع ) . ومع ذلك ، كلما نتج حامض اللاكتيك أكثر وأكثر يصبح الرقم الهيدروجيني pH للعضلة منخفضاً ( أكثر حامضية ) ، وعندها

يتولى الأمر آلية التغذية الاسترجاعية Feedback mechanism لتمنع الإجهاد التام لمخازن الجليكوجين في العضلة . ينخفض معدل التحلل السكري ومعدل تحلل الجليكوجين وإنتاج حمض اللبن . في الواقع عملية الإعياء حمية . وعندما يُستهلك تماماً جميع جليكوجين العضلة في الخلايا المستخدمة بكثرة أثناء الجهد البدني العنيف ، فإنه من غير الممكن أن نستنفد كامل جليكوجين الخلايا في العضلة . قد يحدث أيضاً نضوب الجليكوجين في الجهد البدني المحتمل مؤثراً على تلك الخلايا المستعملة غالباً أثناء الجهد البدني المنخفض إلى العنيف ( أنظر الفصل الثالث ) .




الشكل رقم (٢,٦). استخدام الجليكوجين كدالة لسرعة الجري .

## تقسيم ( تجزئة ) الطاقة
## Energy Partitioning

يكون الطلب على الطاقة مرتفعاً عند بداية أقصى جهد بدني ، ولكن يوجد تباطؤ Lag time في الوصول إلى أقصى إنتاج للطاقة هوائيا. بمعنى آخر ، تكون المسارات اللاهوائية غالباً ضرورية لكي تمد بالطاقة لأجل المراحل المبكرة من الجهد

البدني ( بالرغم من عدم وجود نقص في الأكسجين بالعضلة ) بينما تتقدم المسارات الهوائية نحو السرعة إلى أقصى إنتاج للطاقة هوائياً عند بداية أقصى جهد بدني . وهكذا فإن شدة الجهد البدني وطبيعة بداية الجهد البدني العنيف ( زيادة تدريجية في السرعة إلى أقصى ما يمكن أو شدة الانخفاض من نقطة الانطلاق ) لديها تأثير على مدى مساهمة المسارات الهوائية واللاهوائية إلى الاحتياج العام للطاقة .

تزود الطاقة أساساً أثناء الجهد البدني منخفض الشدة ( القوة ) لدوام طويل ( الجهد البدني المنتج لمعدل ضربات القلب حتى حوالي ١٦٠ضربة/دقيقة ) ، عن طريق المسارات الهوائية ؛ لأنها تستطيع إنتاج ثلاثي فوسفات الأدينوسين بمعدل كافٍ وتقدم أكبر توفيرا للوقود . تُزود الطاقة أثناء الجهد البدني ذي الشدة العالية لدوام قصير ، عن طريق المسارات اللاهوائية منتجة ثلاثي فوسفات الأدينوسين بمعدلات عالية ولكن بتوفير منخفض للوقود . ومع ذلك ليست هناك نقطة يحدث عندها تحول مباشر من مصدر لآخر . تُوظف بعض الألياف العضلية عند أي نقطة من الوقت هوائياً والبعض الآخر لا هوائياً ، ولكن يوجد زيادة عامة في الاعتماد على المسارات اللاهوائية كلما ازدادت السرعة . عند سرعات أكبر من ٨ – ١٠ متر/ثانية ، بمعنى آخر ٥٠٠ – ٦٠٠ متر/ دقيقة ( حوالي ٢٠ ميل /ساعة ) ، تميل الميتوكندريا للتأخر في المادة الخاضعة ولا يوجد مساحة كافية من أغلفة الميتوكندريا ولا تتوفر الإنزيمات الهوائية لتنسجم مع الطلب . اعتقد حديثاً أن التحول يرجع إلى النقص في الأكسجين المتاح ، مع أن الأمر ليس ذلك . يكون تسليم الأكسجين إلى العضلة العاملة عادة كافياً ، فالدافع الأساسي للبدء في تعزيز المسارات اللاهوائية هو النقطة التي تعمل عندها مسارات الطاقة الهوائية بأقصى ما يمكن ، عند زيادة الطلب على ثلاثي فوسفات الأدينوسين ، كما هو الحال عندما يُطلب من الحصان أن يسير أسرع . يجب أن يُوجه

الانخفاض الناتج في إمداد ثلاثي فوسفات الأدينوسين إلى استعمال المسارات اللاهوائية مما يؤدي إلى زيادة في مستويات لاكتات الدم . يطلق على النقطة التي تبدأ عندها مستويات اللاكتات في الارتفاع " العتبة أو الحد اللاهوائي "Anaerobic threshold" (AT) . يستعمل هذا المصطلح على نطاق واسع بين الناس العاديين ليصف النقطة التي تبدأ عندها المسارات اللاهوائية المساهمة جوهرياً في احتياجات الطاقة الكلية ، لكنة مصطلح مضلل لحد ما حيث يفهم منه ضمنياً وجود تحول من شكل لآخر في مسار طاقة ، وهذا ليس حقيقياً ، كما سبق وصفه .

يُعرف مساهمة كل مسار للطاقة في الاحتياج الكلي لطاقة الجهد البدني بتجزئة الطاقة . لقد استطاع العلماء تقدير مساهمة كل مسار بالنسبة لاحتياجات الطاقة الكلية عن طريق قياس امتصاص الأكسجين وإنتاج ثاني أكسيد الكربون وحمض اللبن عند سرعات مختلفة من الجهد البدني . في المملكة المتحدة ، أقصر مسافة سرعة هي ٥ فورلنج أو ١٠٠٠ متر . في الولايات المتحدة الأمريكية ، تجري الخيول الربعية Quarter horses ، لمسافة ٢ فورلنج أو ٤٠٠ متر ، تلك هي العاديات Sprinters الحقيقية لأقصى سرعة في عالم الخيول ، والتي تصل إلى سرعات حوالي ٤٠ ميل/ساعة . يحصل الحصان أثناء هذا الجهد البدني على ٦٠ ٪ تقريباً من طاقته لا هوائياً و٤٠ ٪ هوائياً . وبمقارنة ذلك للعدائيين من البشر الذين يجرون ١٠٠ متر بحوالي ١٠٠ ٪ لا هوائياً يستنشقون مرة أو مرتين من النفس Breath في ١٠ ثواني . وعلى النقيض ، تعدو العاديات الحقيقية من الخيول الربعية عل الأقل ضعف هذا الوقت . في مسافة متوسطة من سباق الخيول الأصيلة Thoroughbred مثل دربي Derby فإن العدو لأكثر من ميل ونصف ( ٢,٤كم ) ، تكون تجزئة الطاقة ٨٠ ٪ هوائية تقريباً

و٢٠ ٪ لا هوائية . تحتاج إلى الجزء اللاهوائي أساساً للتسريع عند البداية وعند آخر فورلنج أو ما شابه ذلك .

تستطيع الخيول الرياضية ذات الاحتمال من عالم الخيول إكمال ١٠٠ ميل ( ١٦٠كم ) في اليوم ، والسير بسرعة ١٠ ميل / ساعة ( ١٦كم / ساعة ) . تعمل الخيول ذات الاحتمال الحقيقية بحوالي ٩٦ ٪ هوائياً عند هذه السرعة . حتى أن السرعة والمقدرة على التحمل ليوم من ثلاثة أيام تكون هوائية ( حوالي ٩٠ ٪ ) .

يبدأ إنتاج الطاقة لا هوائياً عادة عند معدل ضربات القلب بحوالي ١٥٠– ١٨٠ ضربة / دقيقة ، لكن هناك اختلافات فردية كبيرة . يكون معدل ضربات القلب١٥٠–١٨٠ ضربة/ دقيقة مكافئاً لـ "جيد" أو ثلاثة أرباع من سرعة خبب الحصان . بمعنى آخر وبمجرد أن يبدأ الحصان في الانطلاق من الخبب ، يحتمل حصوله على بعض من طاقته بوسائل لا هوائية مع ظهور حمض اللاكتيك الناتج في مجرى الدم .

بالرغم من إمكانية إعطاء أدلة عامة بخصوص بداية العمليات اللاهوائية في العضلة إلا أن هناك عدد من العوامل تؤثر على السرعة التي يبدأ عندها إنتاج الطاقة لا هوائياً . سيبدأ الحصان على سبيل المثال ، إنتاج الطاقة لا هوائياً عند سرعة أقل وعندما يُقارن غير الملائم بالملائم . تُنتج عضلات الحصان التي بها نسبة عالية من التحلل السكري العالي والتي تنخفض بسرعة Fasttwitch ( العدو بأقصى سرعة " Sprinting " أو ألياف من النوع II B ) لاكتات عند سرعة أقل من حصان به بضع من هذا النوع من الألياف العضلية . تميل المشاكل الصحية التي تتداخل مع نقل الأكسجين من الهواء الجوي إلى الميتوكندريا ، مثل انسداد منفذ الهواء العلوي ، مرض قلبي وعائي أو مرض بمنفذ الهواء السفلي إلى خفض السرعة التي يبدأ عندها إنتاج الطاقة لا هوائياً . تستطيع الإثارة أيضاً ، مثل الألم وكمية ونوع تمرين الإحماء Warm-up ،

وميعاد التغذية والظروف البيئية أن تؤثر على النقطة التي يصبح عندها الأيض اللاهوائي معنويا ويبدأ بالعمل على زيادة تركيز حمض اللاكتيك في الدم .

كيف يمكننا أن نقرر تحديد الوقود المستعمل لتوليد الطاقة ؟ تختلف كميات الأكسجين المستهلكة وثاني أكسيد الكربون المنتج تبعاً للمواد الخاضعة للطاقة والتي تستعمل في أي وقت . النسبة التبادلية التنفسية Respiratory exchange ratio (RER) هي نسبة إنتاج ثاني أكسيد الكربون (لتر/ دقيقة ، $V_{CO_2}$) إلى استهلاك الأكسجين (لتر/ دقيقة ، $V_{O_2}$) والتي قيست عند المنخر Nostril . نسبة إنتاج ثاني أكسيد الكربون إلى استهلاك الأكسجين أو النسبة التبادلية التنفسية هي ١,٠ حينما تكون الكربوهيدرات هي الوقود المستخدم فقط وبعد أكسدته كلية . مع ذلك ، حينما يكون الدهن هو المصدر الأوحد للوقود فنحتاج إلى كميات أكبر من الأكسجين ويكون مقدار النسبة التبادلية التنفسية ٠,٧ . لذا تدل قيمة النسبة التبادلية التنفسية ما بين ٠,٧ – ١,٠ سواء عند الراحة أو الجهد البدني على أن كلاً من الدهن والكربوهيدرات قد استخدما متزامنين ( انظر الجدول رقم ٢,٢ ) . يسبب إنتاج حمض اللاكتيك داخل العضلات أثناء الجهد البدني المعتدل إلى الكثيف ، زيادة في تركيز إيون الهيدروجين بالدم (تنخفض الرقم الهيدروجيني للدم) . كنتيجة لآلية تنظيم Buffering أيونات الهيدروجين في الدم ، فتحدث زيادة كمية ثاني أكسيد الكربون في هواء الزفير . وهكذا تدل النسبة التبادلية التنفسية أعلى من ١ أن بعض الطاقة مصدرها من إنتاج حمض اللاكتيك لا هوائياً . كلما كانت النسبة التبادلية التنفسية أعلى كلما كانت المساهمة أكبر من حمض اللاكتيك بالنسبة لإنتاج الطاقة الكلي ، تتوصل إلى قيم عالية حتى ١,٤ في الجهد البدني الكثيف . وبمجرد ارتفاع النسبة التبادلية التنفسية عن واحد فليس من الممكن أن نقدر المساهمات النسبية للدهن وأيض الكربوهيدرات الهوائي واللاهوائي .

يمكن أن تستخدم النسبة التبادلية التنفسية لتحدد الاستجابات للتداول الغذائي ، الجهد البدني والتدريب وربما تعكس أيضا تركيب نوع الليفة العضلية في الخيول ذات أنواع العضلات المختلفة جداً . تتراوح قيمة النسبة التبادلية التنفسية في

الإنسان حوالي ٠,٧ – ٠,٨ عند الراحة بينما في الخيل حوالي ٠,٩ بصفة عامة . في دراسة غُذيت فيها سلالات الخيول القياسية Standard-bred بعلائق مختلفة لمدة أربعة أسابيع لكل منها ، كانت عندها قيمة النسبة التبادلية التنفسية ٠,٩ لعليقه غطية من الدريس والمركزات ، وحوالي ٠,٧٥ لعليقه مرتفعة في الدهن ( محتوية على ١٥ ٪ زيت فول الصويا )، ويوضح ذلك أن الخيول تستخدم فعلياً دهن أكثر للطاقة عند الراحة مقارنة مع العليقة المحتوية على دهن عالٍ بتلك من الدريس والمركزات ( Pagan *et al.*, 1987 ) .

الجدول رقم (٢,٢). نسبة المساهمة التقريبية للطاقة من الدهن والكربوهيدرات أثناء الجهد البدني وعلاقتها بالنسبة التبادلية التنفسية .

| النسبة التبادلية التنفسية | الطاقة من الكربوهيدرات (٪) | الطاقة من الدهن (٪) |
|---|---|---|
| ٠,٧٠٠ | صفر | ١٠٠ |
| ٠,٨٠ | ٣٣ | ٦٦ |
| ٠,٩٠ | ٦٦ | ٣٣ |
| ١,٠ | ١٠٠ | صفر |
| ١< | ١٠٠ | صفر |

## حجم مخازن الوقود

**Size of the Fuel Stores**

ما هي كمية الطاقة التي يستطيع أن يختزنها حصان وزنه ٥٠٠ كجم ؟ يصل مجموع الدهن و العضلات والكبد لأكثر من ٢٣٠ كجم حيث يشكل وزن العضلات حوالي ٢٠٠كجم ، الكبد حوالي ٦,٥ كجم والدهون حوالي ٢٥ كجم .

حوالي ٩٥ ٪ من الجليكوجين الكلي بجسم الحصان مخزن في العضلات و ٥ ٪ في الكبد ( مع أن التركيز الفعلي للجليكوجين في الكبد أكبر منه في العضلة ) . وعلى النقيض ، يُخزن حوالي ٩٥ ٪ من دهن الجسم في النسيج الدهني ، وحوالي ٥ ٪ فقط داخل العضلات .

هناك تقريباً طاقة أكثر من عشر مرات ( سواء بوحدات كيلو جول أو كيلو كالوري ) مخزنة كدهن بالمقارنة مع الجليكوجين ( انظر الجدول رقم ٢,٣ ) . يعني هذا أنه إذا أردت أن تؤكسد أو ببساطة تحرق ( بموضوعية تجعله مضطرما ) جميع الوقود المتاح في جسم الحصان ، لزم أن تقوم مخازن الدهن بإطلاق طاقة حرارية أكثر من عشر مرات عنه في الجلوكوجين ، ولو أنه إذا تم حرق جميع الوقود المتاح أثناء التنفس هوائياً ، وإنتاج ثلاثي فوسفات الأدينوسين أكثر بـ ٣٠ مرة من الفسفرة التأكسدية للدهن بالمقارنة بالفسفرة التأكسدية للجليكوجين . تذكر أن إنتاج ثلاثي فوسفات الأدينوسين من الدهن أفضل من الجليكوجين ، حيث ينتج ثلاثي فوسفات الأدينوسين أكثر من ثلاث مرات لكل جرام من الدهن مقارنة بجرام من الكربوهيدرات . يعتبر الدهن في الواقع مصدر كثيف للطاقة ، قليل من الدهن يكفي لطريق طويل . إذا شرعت في المشي أو رحلة يومية ذات مشقة وكنت مضطراً لحمل طعام ليوم كامل ، عليك بحمل تلك الأغذية التي تعطيك كميات كبيرة من الطاقة ، لكنها قليلة الوزن ، بمعنى آخر ، عليك اختيار الأغذية غنية الطاقة . لو كنت تعد الحصان في ركوب احتمال لـ١٠٠ميل ، سوف يدفعك لتستعمل الدهن كمصدر لوقودك بقدر ما كان ممكنا ؛ لأنة غني جداً بالطاقة . من النادر أن يتوقف الجهد البدني ، بواسطة نفاد الدهن .

الجدول رقم ( ٢,٣ ). الأوقات المقدرة لاستنزاف مخازن الطاقة الأساسية بالجسم لشخص وزنه ٥٠٠ كجم في حال استخدم كل وقود على انه مصدر الطاقة فقط عند ٦٠ ٪ ( احتمال ) و ٩٠ ٪ سرعة سباق الخيل عبر الحقول لمدة ثلاثة أيام – أربع غروم و ١٢٠ ٪ $\dot{V}O_{2max}$ ( سباق متوسط ١ ميل = ١,٦ كم ) .

| | مخازن الجسم الكلية *( كيلو جول ) | وقت الجهد البدني | | |
|---|---|---|---|---|
| | | ٦٠ ٪ $VO_{2max}$ | ٩٠ ٪ $VO_{2max}$ | ١٢٠ ٪ $VO_{2max}$ |
| أدينوسين ثلاثي الفوسفات | ٣٨ | ٣,٣ ثانية | ١,٨ ثانية | ١,١ ثانية |
| الكريتين المفسفر | ١٨٨ | ١٦,٣ ثانية | ٩,٠ ثانية | ٥,٧ ثانية |
| جليكوجين | ٧٥٣٠٠ | ١٠٩ ثانية | ٦٠ دقيقة | ٣٨ دقيقة |
| دهن | ٦٤٠٠٠٠ | ١٥,٤ ساعة | ٨,٥ ساعة | b – |

a = من ( ١٩٨٣ ) Memiken

b = لم يحسب رقم لـ ١٢٠ ٪ $VO_{2max}$ لأنه لا يستعمل دهن عند هذه الشدة .

يعتبر الدهن مثالياً للجهد البدني عندما يحتاج الجسم إلى :

- إنطلاق بطيء للطاقة ، كما في حالة الجهد البدني أو السرعة المنخفضة .
- إدخار طاقة كبيرة ، كما في حالة الجهد البدني لمسافة أو مدة طويلة .

يُزيد التدريب ذو السرعة المنخفضة ولمدة طويلة عدد الإنزيمات المتضمنة في الفسفرة التأكسدية ، حتى يصبح الجسم أفضل استخداماً للدهن ويميل الاعتماد أكثر على الدهن كمصدر للطاقة . هذه أخبار جيده لأولئك الذين يفكرون في التدريب للتخلص

من الدهن غير المرغوب . كلما تتدرب أكثر ، كلما كان أفضل في حرق الدهن ، ولكن عليك أن تحافظ على خفض سرعة وشدة جلسات التدريب . إذا كنت كراكب وتود أن تفقد وزناً ، بمعنى آخر ، أن يخفض كتلة جسمك ، ليس هناك طريق أفضل من البدء بالمشي بمقدار وافر والعدو ببطء . إبدأ في الجري سريعاً فسوف تبدأ باستعمال كربوهيدرات أكثر وأكثر حتى تصل عند نقطة لا تستطيع معها إستعمال أية دهون . يمكن أن تكون لائقاً جسمانياً دون اللجوء لخفض الوزن . إنه لأمر يبعث على الحذر بسبب عدد الناس الذين مازالوا يفكرون أن أفضل طريقة لخفض خط وسط الحصان Horse's waistline لجعله يعدو بسرعة " ويتصبب عرقاً " . إذا أردت جعل حصاناً سميناً يعدو بسرعة ، فكل ما تفعله هو :

١- أن تخاطر بتحلل التراكيب العضلية الهيكلية .

٢- تجعله يعرق ويفقد كتلة الجسم ( بسبب فقد السوائل ) على المدى القصير والذي يمكنه أن يسترده بمجرد أن يشرب .

٣- أن تجعله يستهلك جليكوجين العضلة .

٤- أن تفتح شهيته .

فأنت بذلك لا تشجع على استخدام مخازن الدهن . وجدير عليك أيضاً أن تدرك عندما تدرب حصانك ، مما قد يغير شكله ومظهره ، دون أن تتغير كتلة الجسم بدرجة كبيرة . وهذا لا يعني أنك لا تجعله يعمل بقدر كاف من الاحتمال . الدهن أقل كثافة من العضلات . كثافة الدهن ٠,٩٠٠٧ جم/ سم$^{٣}$ ( ١سم$^{٣}$ = ١مل ) ، بينما كثافة العضلات ١,٠٦٥ جم/سم$^{٣}$ ، وأنها أكثر كثافة من الدهن بمعدل ٢٠ ٪ . ويعني ذلك أن نفس الحجم من الدهن يكون أقل وزنا من نفس الحجم من العضلة . فإذا استبدلت ١ كجم من دهن الجسم بـ ١ كجم عضلة ، فسوف تملأ مكاناً أقل ولكنك

تحصل على نفس كتلة الجسم . يبين هذا أن تناول الغذاء المرتبط بالجهد البدني قد يعني تغير بشكلك كلما فقدت دهنا لكن سوف تبقى كتلة جسمك كما هي أو حتى قد تزيد كنتيجة لتنمية العضلة من الجهد البدني .

## نضوب الطاقة

### Running out of Energy

لا يحدث الإعياء تقريباً أثناء الجهد البدني أبداً عن طريق نفاد الدهن ؛ لأن مخازن الدهن وفيرة خلال الجسم ، لكنه عموماً يرجع إلى نفاد جليكوجين العضلة أو الكبد أو الاثنان معاً . يؤدي نضوب جليكوجين العضلات إلى الإعياء العضلي. استنفاد جليكوجين الكبد وكنتيجة انخفاض جلوكوز الدم يجعلك تشعر بأنك ذو رأس خفيف ومُتعب . يستعمل الرياضيون من البشر الذين يتنافسون في أحداث لفترات طويلة تقنية تسمى تحميل الجليكوجين Glycogen loading أو تحميل الكربوهيدرات لإحداث توازن مع الإعياء . ويتضمن ذلك إما التمرين ( بذل الجهد الجسماني ) حتى الإعياء أو الصيام حتى تستنفد مخازن الجليكوجين الموجودة ، ومن ثم تتناول كميات كبيرة من وجبة غنية بالكربوهيدرات . يبدو أن النضوب قبل التحميل يزيد من كمية الجليكوجين التي يمكن تخزينها . لا يوصى بتحميل الجليكوجين في الخيول ؛ لأنها تحتاج إلى تغذية على وجبات كبيرة وغنية بالكربوهيدرات ، إذا ما عرفنا أن الأغذية ذات الطاقة العالية يجب أن تتجزأ إلى وجبات صغيرة عديدة لتجنب حالات مثل المغص Colic أو فرط المواد النيتروجينية في البول Azoturia ( حالة خاصة ) .

بينما لا يجب أن نحاول استراتيجيا تحميل خيولنا بالجليكوجين ، فمن المحتمل أن الحصان في العمل المنتظم الشاق الذي لا يُزود بطاقة كافية في غذائه سيكون في وضع سيء . ينخفض جليكوجين العضلات جوهرياً بعد أداء عمل شاق مثل العدو

السريع لفترة قصيرة ، وسوف يستغرق الحصان يومين لكي يعيد امتلاء مخازن الجليكوجين . يجب تذكر ذلك عندما نخطط برنامج تدريب يتضمن عمل سريع . لا تستطيع توقع أن يؤدي الحصان عمل مكثف ، مثل العدو بأقصى سرعة أو فترة عمل جيدة لأكثر من مرتين أو ثلاثة في الأسبوع أو لأيام متتالية ؛ وذلك لأنه لم يتم امتلاء مخازن الجليكوجين تماماً من جديد قبل النوبة التالية من العمل المكثف . إضافة إلى أن معدل تحلل الجليكوجين في عملية التحلل السكري لينتج ثلاثي فوسفات الأدينوسين يعتمد على تركيزه ، إذا كان التركيز عالياً فإن معدل التحلل يكون عالياً والعكس صحيح . من المحتمل أن يكون ذلك ميزة في العدو المكثف لأقصى سرعة أو في أحداث القفز .

**نقاط مفتاحيه** **KEY POINTS**

- يجب أن يحل محل الطاقة المستخدمة كل يوم للجهد البدني طاقة ويتم الحصول عليها من الغذاء .
- يمثل الجليكوجين (الشكل الحيواني للنشا) والدهن المصدران الأساسيان لمخازن الجسم للطاقة .
- لا يمكن للخلايا أن تستعمل الجلوكوز والجليكوجين أو الدهن مباشرة وإنما فقط الطاقة المحررة من تحلل ثلاثي فوسفات الأدينوسين إلى ثنائي فوسفات الأدينوسين .
- يتحول الغذاء عند الراحة ، من خلال الهضم إلى الجليكوجين في الكبد والعضلة والدهن في النسيج الدهني .
- الطاقة لا تُبنى ولا تزول ولكنها فقط تتغير من شكل إلى آخر .

**تابع نقاط مفتاحية**

- الكفاءة التحويلية للطاقة إلى عمل ميكانيكي مفيد هي حوالي ٢٠ ٪ فقط .
- تكون مخازن ثلاثي فوسفات الأدينوسين داخل الجسم كافية لعدة ثواني فقط من الجهد البدني ، و للاستمرارية في الجهد البدني يجب أن يتجدد ثنائي فوسفات الأدينوسين إلى ثلاثي فوسفات الأدينوسين عن طريق مساران لا هوائيان (الكريتين المفسفر و التحلل السكري إلى حمض لاكتيك ) أو مسارات هوائية (الفسفرة التأكسدية للجلوكوز أو الجليكوجين أو الحموض الدهنية ) .
- يجدد كل من الكريتين المفسفر وأيض الجلوكوز أو الجليكوجين إلى حمض لاكتيك وإنتاج ثنائي فوسفات الأدينوسين بسرعة دون الحاجة للأكسجين ولكن بغير فاعلية ، وهذا يعني إنتاج كمية قليلة فقط من ثلاثي فوسفات الأدينوسين .
- تحتاج الأكسدة الهوائية للكربوهيدرات والدهن إلى الأكسجين وهي أكثر فاعلية ولكنها تحول ثنائي فوسفات الأدينوسين إلى ثلاثي فوسفات الأدينوسين ببطء أكثر .
- توصف تجزئة الطاقة المساهمة النسبية للمسارات المختلفة على أنها تجديد ثنائي فوسفات الأدينوسين عند مراحل مختلفة من الجهد البدني و أثناء أنواع مختلفة من النشاط .
- تدل النسبة التبادلية التنفسية (RER) على نوعية الوقود الذي يمكن استخدامه في أي وقت .
- لا تحدد مخازن الدهن بالمطلق مقدرة الجهد البدني ، ولكن يمكن أن تصبح مخازن الكربوهيدرات ( الجليكوجين ) مُستنزفة جوهرياً عن طريق نوبات الجهد البدني لسرعات مرتفعة أو الجهد البدني ذو الاحتمال المطول .