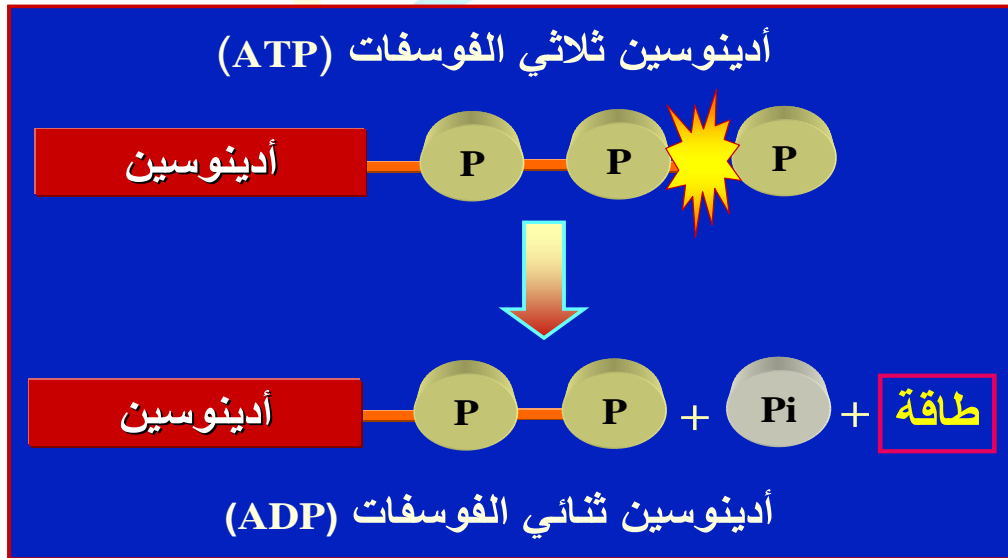


الطاقة اللاهوائية والهوائية المستخدمة أثناء الجهد البدني

الطاقة اللازمة للانقباض العضلي

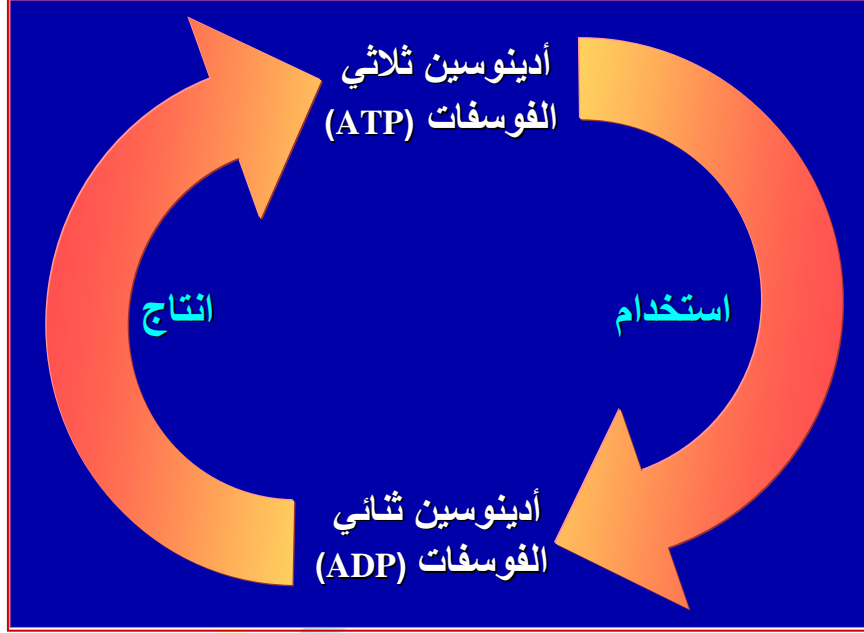
من المعروف أنه لا يمكن للانقباض العضلي أن يحدث بدون توفر عدة عناصر تتمثل في وجود آكتين (الخيوط البروتينية الدقيقة)، وميوسين (الخيوط البروتينية الغليظة) الموجودة في الليفيات العضلية، وآيونات الكالسيوم، ومركب أدينوسين ثلاثي الفوسفات (ATP)، وأنزيم أدينوسين ثلاثي الفوسفاتيز (ATPase). في ظل وجود هذه العناصر، فإن السيل العصبي يمكن أن يقود إلى تنبيه العضلات وبالتالي حدوث الانقباض العضلي. إن عملية انزلاق خيوط الميوسين نحو الأكتين لا يمكن أن تتم بدون وجود أدينوسين ثلاثي الفوسفات بالقرب من خيوط الميوسين، وبحوث الانقباض العضلي فإن الأدينوسين ثلاثي الفوسفات، وهو المركب الغني بالطاقة، يتحول بعد تحريره للطاقة إلى أدينوسين ثنائي الفوسفات (ADP)، كما هو موضحاً في الشكل البياني رقم (1).



شكل رقم (1): تحلل أدينوسين ثلاثي الفوسفات إلى أدينوسين ثنائي الفوسفات وفوسفات لا عضوي مع انطلاق طاقة تستخدم في الانقباض العضلي (P = فوسفات، Pi = فوسفات لا عضوي).

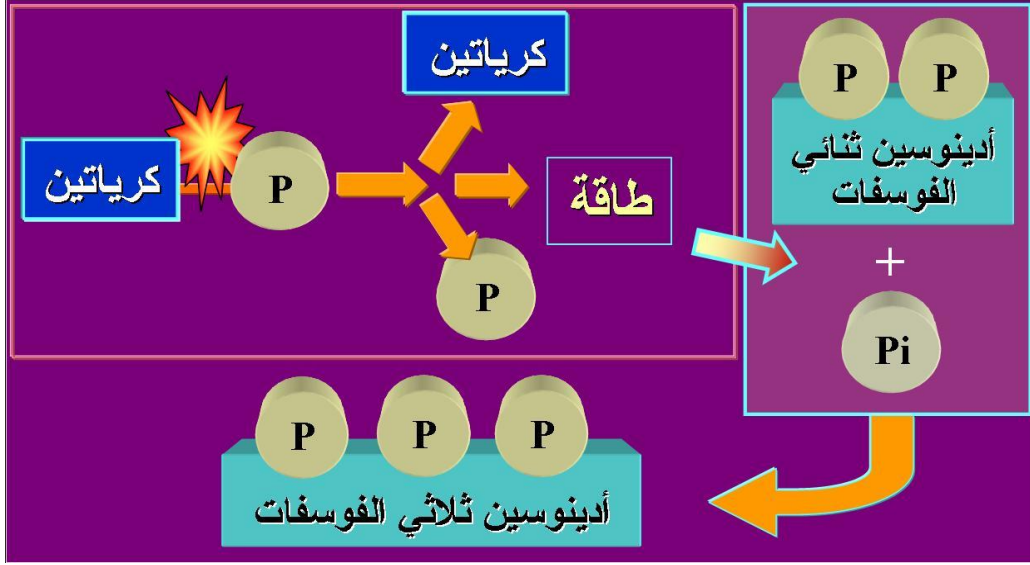
ولكي يستمر الانقباض العضلي، لا بد من إعادة شحن أدينوسين ثنائي الفوسفات (ADP) ليصبح مرة أخرى أدينوسين ثلاثي الفوسفات (ATP)، حيث أن عملية استخدام الأدينوسين ثلاثي الفوسفات ثم إنتاجه هي عملية مستمرة، كما هو مبيناً في الشكل رقم (2). غير أن الكمية

المخزنة (الجاهزة) من أدينوسين ثلاثي الفوسفات لا تكفي إلا لبضع انقباضات عضلية تدوم حوالي ثانية واحدة فقط، ولذا لا بد من إعادة شحنه باستمرار، وتتم عملية الشحن هذه من خلال مصادر لاهوائية وأخرى هوائية.



شكل رقم (2): عملية إنتاج واستخدام الطاقة. لا بد من إعادة شحن أدينوسين ثنائي الفوسفات إلى أدينوسين ثنائي الفوسفات لكي يتم توفير الطاقة اللازمة للانقباض العضلي.

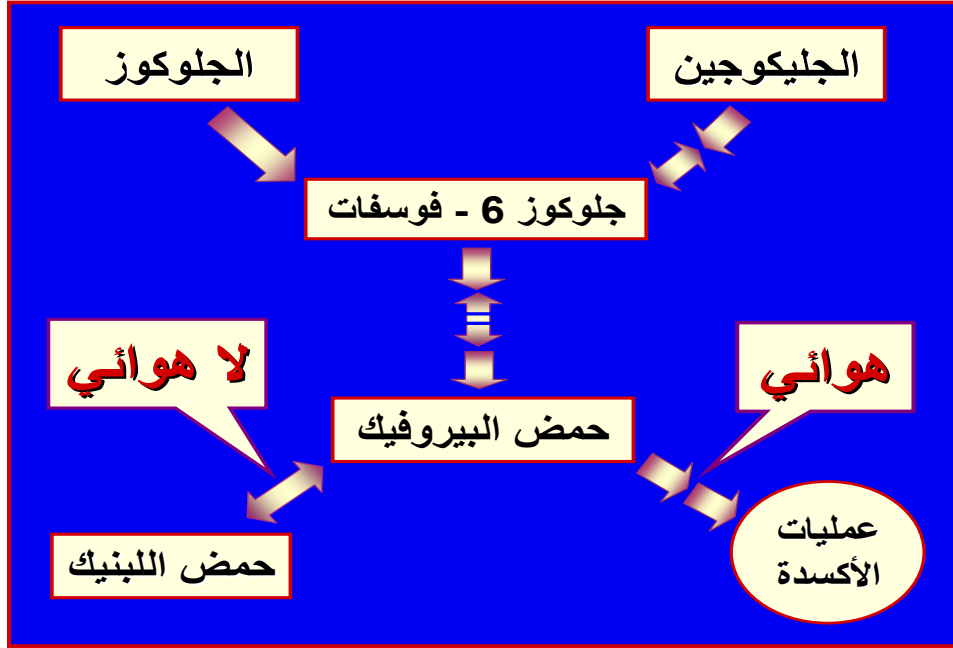
إن من أهم مصادر الطاقة اللاهوائية والقادرة على إعادة شحن أدينوسين ثنائي الفوسفات إلى أدينوسين ثلاثي الفوسفات لهو مركب فوسفات الكرياتين (PC)، حيث يتحلل فوسفات الكرياتين إلى مادتي كرياتين وفوسفات مع انطلاق طاقة من عملية التحلل تستخدم في دمج أدينوسين ثنائي الفوسفات مع الفوسفات اللاعضوي، كما هو موضحاً في الشكل البياني رقم (3). ومن المعروف أن مخزون فوسفات الكرياتين في العضلة يبلغ حوالي 5 أضعاف كمية الأدينوسين الثلاثي الفوسفات المخزن في العضلة. هذا ويصل معدل تحلل فوسفات الكرياتين أقصاه بعد ثانيتين من بدء الجهد البدني الأقصى، ثم ينخفض بعد ذلك بمقدار 50% عند 10 ثواني من الجهد البدني الأقصى، أما في الجهد البدني الأقصى الذي يدوم لمدة 30 ثانية، فيعتقد أن معدل تحلل فوسفات الكرياتين في العشر ثواني الأخيرة من الجهد ينخفض إلى حوالي 2% من معدل تحلله الأقصى في الثواني الأولى من الجهد.



شكل رقم (3): تحلل فوسفات الكرياتين يعطي طاقة لإعادة شحن أدينوسين ثلاثي الفوسفات على أدينوسين ثلاثي الفوسفات (P = فوسفات، Pi = فوسفات لا عضوي).

وإذا كان للانقباض العضلي من أن يستمر لفترة أطول بوتيرة عالية (أي أن شدة الجهد البدني مرتفعة)، فلا بد من مشاركة مصادر أخرى غير فوسفات الكرياتين، ومن تلك المصادر مشاركة جليكوجين العضلة، أو سكر الجلوكوز الموجود في الدم الذي يدخل بدوره إلى العضلة، حيث يتحلل أي منهما من مركب ذي 6 ذرات كربون إلى مركب آخر هو حمض البيروفيك ذي الثلاث ذرات من الكربون. وتحلل أي من الجليكوجين أو الجلوكوز إلى حمض البيروفيك ليس هو نهاية المطاف، حيث أن حمض البيروفيك ما هو إلا خطوة يتم بعدها اتجاهه إلى تحلل لاهوائي ينتهي بحمض اللبنيك ويطلق عدد محدود من أدينوسين ثلاثي الفوسفات بشكل سريع جداً، أو يتجه إلى التحلل الهوائي ليعطي عدداً أكبر من أدينوسين ثلاثي الفوسفات، كما هو موضحاً في الشكل رقم (4).

لكن ما الذي يحدد اتجاه حمض البيروفيك إلى التحلل اللاهوائي أو الهوائي؟ إن الذي يحدد ذلك هو في الواقع شدة الطلب على الطاقة، أي شدة الاحتياج للأدينوسين ثلاثي الفوسفات، والذي يرتبط بشدة الجهد البدني، فإن كان الطلب على الطاقة عالياً جداً كما في الجهد البدني المرتفع الشدة، فإن معظم حمض البيروفيك لزاماً أن يتحول إلى حمض اللبنيك ويُنتج بذلك ثلاثة من أدينوسين ثلاثي الفوسفات (في حالة البدء بالجلوكوز نحصل على اثنين من أدينوسين ثلاثي الفوسفات، نظراً لأنه يتم فقدان أدينوسين ثلاثي الفوسفات واحد أثناء خطوات تحلل الجلوكوز، وهي خطوة تحويل فركتوز 6- فوسفات إلى فركتوز 1، 6- ثنائي الفوسفات).



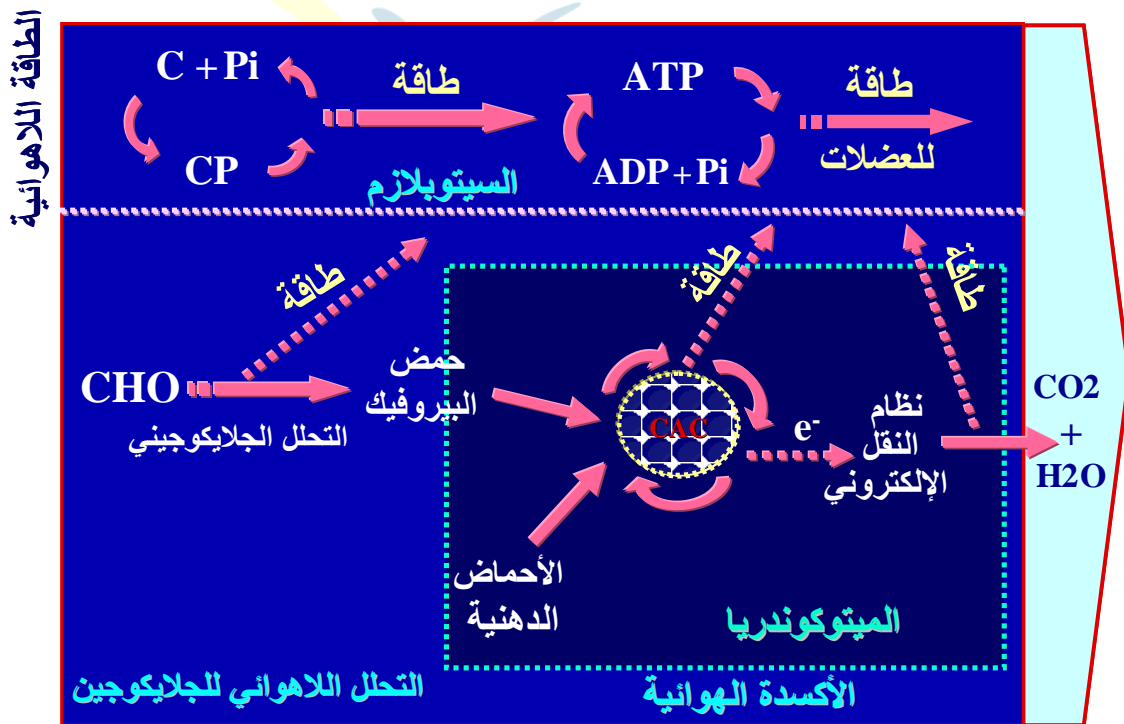
شكل رقم (10-4): تحلل الجليكوجين والجلوكوز بغرض إنتاج الطاقة.

أما إذا كان الطلب على الطاقة ليس عالياً، كما هو الحال في الجهد البدني الخفيف إلى المعتدل الشدة، فإن معظم حمض البيروفيك سيذهب إلى الميتوكوندريا (بيت الطاقة) ويدخل في سلسلة من التفاعلات الكيميائية، بما فيها دورة كريس (Krebs cycle) ونظام النقل الإلكتروني، وينتهي بماء وثاني أكسيد الكربون يخرج مع هواء الزفير، مع الحصول على طاقة أكبر من التحلل اللاهوائي تقدر بـ 39 أدينوسين ثلاثي الفوسفات (في حالة الجلوكوز نحصل على 38 ATP)، ويوضح الشكل البياني رقم (5) ملخصاً لعمليات إنتاج الطاقة من النظامين الهوائي واللاهوائي داخل العضلة، علماً بأن التفاعلات اللاهوائية تتم داخل سيتوبلازم الخلية، أما التفاعلات الهوائية (التي يُستخدم فيها الأوكسجين) فتتم داخل الميتوكوندريا.

والجدير بالذكر أن من المفاهيم المهمة في الطاقة والتي ينبغي الإلمام بها هو أن جميع التفاعلات داخل جسم الإنسان يحدث فيها تغير في الطاقة من مستوى لآخر، وأن التحكم في هذه التفاعلات يتم بواسطة إنزيمات. إن بعض من الطاقة المتحررة (المنطلقة) من هذه التفاعلات الكيميائية يمكن استخدامها لإحداث شغل عضلي، غير أن معظم الطاقة يتم فقدها على هيئة حرارة. ولا بد من أن ندرك أيضاً أن التفاعلات التي تنتج عنها طاقة متحررة تحدث تلقائياً، لكن التفاعلات التي تتطلب طاقة لا يمكن أن تحدث تلقائياً، بل يجب أن يتم توفير الطاقة لها عن طريق تزامنها مع تفاعلات تحدث تلقائياً، فمثلاً: لا يمكن للانقباض العضلي من أن يحدث بدون تزامنه مع تحلل أدينوسين ثلاثي الفوسفات (ATP hydrolysis). كذلك لا

يمكن أن يتم دمج حمضين أميين من أجل تصنيع ببتيد (Peptide) إلا تزامناً مع تحلل مركب جوانوسين ثلاثي الفوسفات (Guanosine triphosphate) والذي يكتب اختصاراً هكذا (GTP)، كما لا يمكن دمج جزيئات الجلوكوز لتكوين مركب الجليكوجين بدون تحلل مركب يوريدين ثلاثي الفوسفات (Uridine triphosphate)، والذي يكتب اختصاراً هكذا (UTP). وعموماً يمكن تقسيم التفاعلات المتعلقة بالطاقة إلى قسمين رئيسيين، هما:

- تفاعلات كيميائية مُحررة (مُطلقة) للطاقة (Exergonic reaction): مثل تحلل أدينوسين ثلاثي الفوسفات (ATP)، وتحلل الجلوكوز وتحلل الجليكوجين وأكسدة الدهون، وما شابه ذلك.
- تفاعلات كيميائية مُستخدمة للطاقة (Endergonic reaction): مثل انقباض العضلات، وبناء البروتينات، وتخزين الوقود، أو بناء جزيئات كبيرة من جزيئات صغيرة.



شكل رقم (5): ملخص لعمليات إنتاج الطاقة عبر النظامين الهوائي واللاهوائي داخل العضلة، وتتم جميع العمليات الهوائية داخل الميتوكوندريا (ATP = أدينوسين ثلاثي الفوسفات، ADP = أدينوسين ثنائي الفوسفات، C = كرياتين، CP = فوسفات الكرياتين، Pi = فوسفات لا عضوي، CHO = كربوهيدرات، CO₂ = ثاني أكسيد الكربون، H₂O = ماء، e⁻ = إلكترون، CAC = دورة حمض الستريك).

المشاركة النسبية لأنظمة الطاقة تبعاً لشدة الجهد البدني

يوضح الجدول رقم (1) ملخصاً لقدرات أنظمة الطاقة وسعاتها، ويجدر في هذا المقام أن نشير إلى أن القدرة تعني أقصى معدل لتزويد العضلة بالطاقة، وهي مرتبطة بالزمن، أما السعة فتعني أقصى كمية متوفرة من الطاقة عن طريق ذلك المصدر أو النظام بغض النظر عن معدل تزويد العضلة بالطاقة (أي بغض النظر عن الزمن). ويتضح من الجدول رقم (1) أن المصدر السريع، المتمثل بالأدينوسين ثلاثي الفوسفات المخزن بالقرب من خيوط الميوسين وفوسفات الكرياتين، يملك أعلى قدرة لكن سعته محدودة (أي المخزون منه قليل) حيث لا تتعدى المدة التي يمكنه فيها من تزويد العضلة بالطاقة أثناء الجهد البدني العنيف أكثر من 20 ثانية، بينما نجد أن المصدر القصير الأمد، المتمثل بالتحلل اللاهوائي للجليكوجين والجلوكوز والذي ينتهي بحمض اللبنيك، يملك قدرة متوسطة وسعة متوسطة تصل إلى دقيقة أو تزيد قليلاً، أما المصدر الطويل الأمد (الهوائي) والذي يتمثل بالتحلل الهوائي للجليكوجين والجلوكوز وأكسدة الدهون فيمتلك قدرة منخفضة وسعة عالية (أي معدل تزويد العضلة بالأدينوسين ثلاثي الفوسفات يعد منخفض، بينما كمية المخزون تعد مرتفعة).

جدول رقم (1): قدرات أنظمة الطاقة وسعاتها، مركز أبحاث

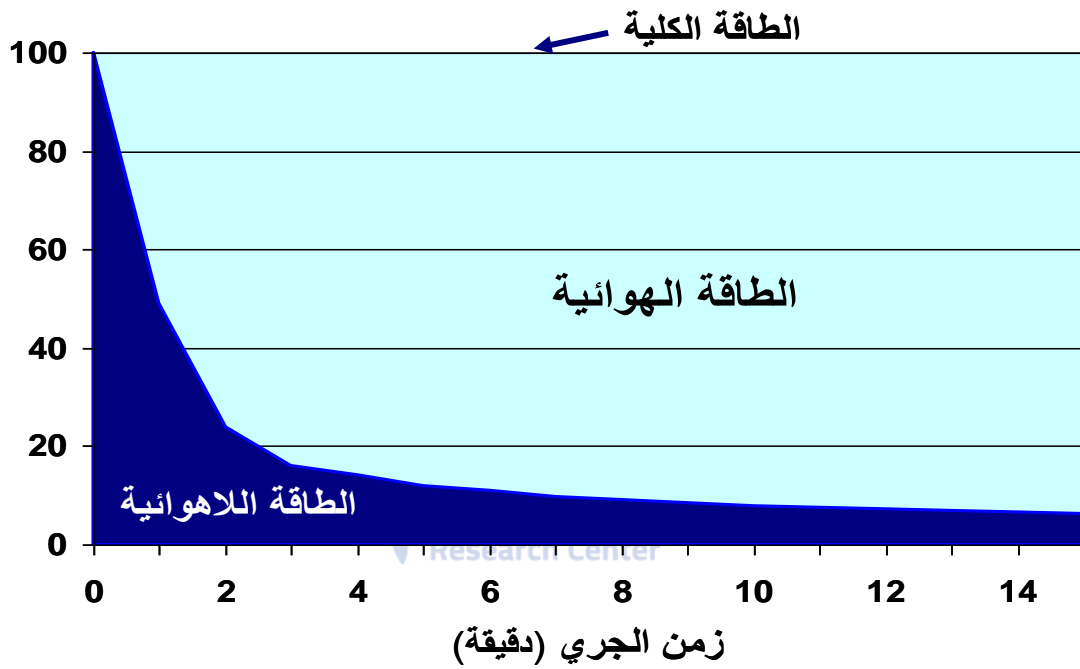
السعة القصوى		القدرة القصوى		نظام الطاقة
المدة حتى النفاذ	كمية ATP المتوفرة	بالشمعة / كجم	معدل ATP بالمول/ دقيقة	
20 ثانية	0.7	800	3.6	المصدر السريع (ATP-PC)
60 ثانية	1.2	325	1.6	المصدر القصير الأمد (التحلل اللاهوائي للجليكوجين)
* = 60 دقيقة ** = 6 ساعات	90	* = 150 ** = 75	1	المصدر الطويل الأمد (المصدر الهوائي)

* تحلل الجليكوجين والجلوكوز، ** تحلل الأحماض الدهنية

المصدر: Fox, et al. 1988; Knuttgen, *Phys Sportsmed*, 2003, 31(3): 35

ويستعرض الشكل البياني رقم (6) نسبة مشاركة كل من الطاقة الهوائية واللاهوائية أثناء الجهد البدني تبعاً لمدته، ويتضح من الشكل أنه كلما ازداد زمن الجري انخفضت مساهمة النظام الهوائي في تزويد العضلات بالطاقة (أي كلما انخفضت شدة الجهد البدني كما في سباق الماراثون ازداد الاعتماد أكثر على الطاقة الهوائية)، والعكس صحيح، كلما أصبح زمن الجهد

البدني قصير ازدادت نسبة مشاركة النظام اللاهوائي (أي كلما ازدادت شدة الجهد البدني كما في سباق 100 متر أو 200 متر عدو اإعتماد على الطاقة من المصدر اللاهوائي). ويبين الجدول رقم (2) المساهمة النسبية في مقدار الطاقة المصروفة بالكيلو سعر حراري لكل من نظامي الطاقة الهوائي واللاهوائي أثناء الجهد البدني الذي تتراوح مدته من 10 ثواني حتى 60 دقيقة، ويتضح من الجدول أنه كلما ازدادت مدة الجهد البدني (أي أصبح الجهد البدني يتطلب شدة أقل) ازدادت مشاركة الطاقة القادمة من المصدر الهوائي وانخفضت مساهمة الطاقة القادمة من المصدر اللاهوائي.



شكل رقم (6): نسبة (%) مشاركة الطاقة الهوائية واللاهوائية تبعاً للزمن المستغرق في الجهد البدني (المصدر: (From Howley & Frank, 2003, based on Balke, 1963).

ويتناول الشكل البياني رقم (7) المشاركة النسبية لأنظمة الطاقة أثناء الجهد البدني بالتفصيل. ويتبين من الشكل أن المصدر السريع يشارك بنسبة عالية أثناء الجهد البدني الذي تتراوح مدته من ثانية إلى أقل من 30 ثانية، أما المصدر القصير الأمد فتزداد مساهمته كمصدر رئيسي في تزويد العضلات بالطاقة أثناء الجهد البدني الذي تزيد مدته على 30 ثانية إلى حوالي دقيقة ونصف، بعد تلك المدة فإن مشاركة المصدر الطويل الأمد تصبح هي السائدة، وكلما ازدادت المدة كلما ازدادت المشاركة النسبية للمصدر الهوائي، حتى تبلغ في سباق كالمارثون حوالي 98% من مجمل الطاقة الكلية المستخدمة من قبل العضلات.

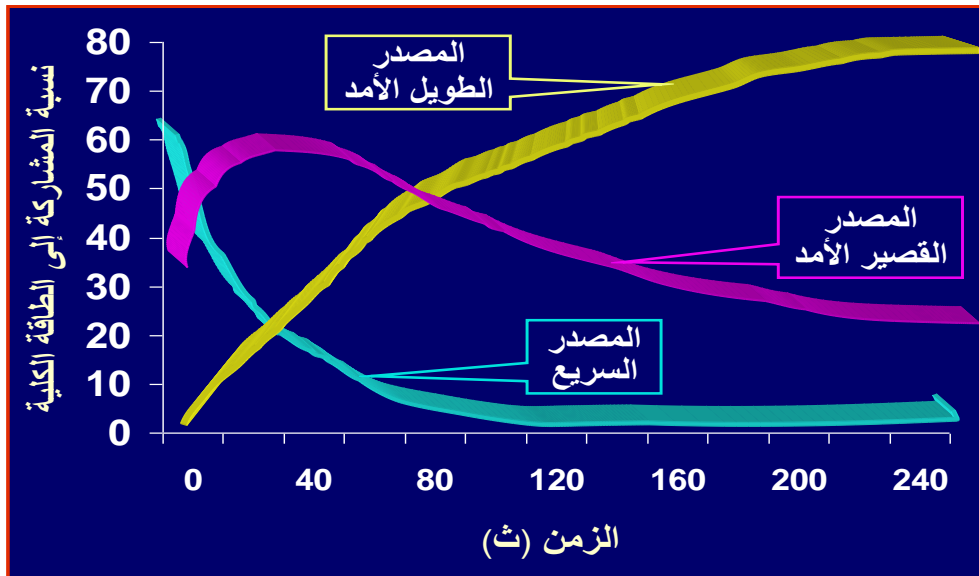
جدول رقم (2): المساهمة النسبية لكل من الطاقة الهوائية واللاهوائية أثناء جهد بدني أقصى لفترات مختلفة.

مقدار الطاقة المصروفة (كيلو سعر حراري)			مدة الشغل (جهد أقصى)
المجموع	الطاقة الهوائية	الطاقة اللاهوائية	
24	4	20	10 ثواني
50	20	30	دقيقة
75	45	30	دقيقتان
150	120	30	5 دقائق
270	245	25	10 دقائق
695	675	20	30 دقيقة
1215	1200	15	60 دقيقة

المصدر: Gollnick & Hermansen, ESSR, 1973

القدرة اللاهوائية والإمكانية اللاهوائية

أن قدرة الفرد اللاهوائية هي في الواقع قدرته على استخدام الطاقة اللاهوائية القادمة من نظام الطاقة السريع (الذي يتمثل في أدينوسين ثلاثي الفوسفات (ATP) المخزن وفوسفات الكرياتين)، وغالباً ما يكون ذلك عند أداء جهد بدني أقصى في فترة زمنية قصيرة جداً لا تتجاوز بضع ثواني (غالباً أقل من 10 ثواني). والمعروف أن الكمية المخزنة من الأدينوسين الثلاثي الفوسفات (ATP) تعد محدودة، كما أشرنا إلى ذلك سابقاً.



شكل رقم (7): نسبة (%) مشاركة أنظمة الطاقة إلى الطاقة الكلية أثناء الجهد البدني.

والسؤال الذي قد يتبادر إلى الذهن هو كم مقدار الطاقة الفوسفاتية في الجسم؟ وكم تكفي من وقت أثناء الجهد البدني؟ والإجابة على ذلك هي أن في كل كيلو جرام من العضلات هناك مخزون من أدينوسين ثلاثي الفوسفات (ATP) يقدر بما يعادل 5 ملي مول، وكذلك كمية من فوسفات الكرياتين (CP) تساوي 15 ملي مول. أي أن هناك حوالي 570 - 690 ملي مول لدى شخص وزنه 75 كجم وتبلغ كتلة عضلاته حوالي 30 كجم، فإذا افترضنا أن حوالي 20 كجم من العضلات يستخدم في المجهود البدني، فيصبح هناك طاقة فوسفاتية تكفي لحوالي دقيقة واحدة من المشي، أو هرولة لمدة 20-30 ثانية، أو جري بأقصى سرعة لمدة 6 ثواني.

أما عند أداء جهد بدني أقصى لفترة من 5 - 10 ثواني، فإن الجسم يبدأ في الاعتماد المطرد على الطاقة القادمة من نظام الطاقة قصير الأمد (والمتمثل في التحلل اللاهوائي للجليكوجين والجلوكوز). وبالتالي فإن مشاركة فوسفات الكرياتين كمصدر للطاقة تبدأ في الانخفاض، وفي إحدى الدراسات تم تقدير مشاركة فوسفات الكرياتين بنحو (23%)، والتحلل اللاهوائي للجليكوجين والجلوكوز بنحو (49%) من الطاقة الكلية المستخدمة في اختبار القدرة اللاهوائية باستخدام الدراجة لمدة 30 ثانية (والمعروف باسم Wingate test).

أما الإمكانية اللاهوائية فتعني معرفة السعة (أو الإمكانية) القصوى للنظام اللاهوائي القصير الأمد، ولهذا فإننا نجد أن اختبارات القدرة اللاهوائية تتطلب أداء جهداً بديناً أقصى لفترة قصيرة تتراوح بين ثانية واحدة وحوالي 10 ثواني. بينما تتطلب اختبارات الإمكانية اللاهوائية زمناً أطول من ذلك حتى يمكن إجهاد المخزون اللاهوائي قصير الأمد لدى الفرد. وعلى الرغم من عدم الاتفاق على الزمن اللازم لقياس الإمكانية اللاهوائية للفرد، إلا أن معظم الاختبارات المتوافرة حالياً تتراوح من 60 ثانية إلى 120 ثانية.

وفيما يتعلق بمصدر الطاقة الرئيسي في اختبارات القدرة اللاهوائية، فتشير نتائج البحوث التي تم خلالها تقدير مشاركة كل من الطاقتين الهوائية واللاهوائية أثناء جهد بدني عنيف لمدة دقيقتين عند شدة تعادل 130% من الاستهلاك الأقصى للأكسجين إلى أن نسبة المشاركة كانت على النحو الموضح في الجدول رقم (3). والمعروف أيضاً أنه كلما ازدادت مدة الجهد البدني انخفضت نسبة مشاركة المصادر اللاهوائية وارتفعت نسبة مشاركة المصادر الهوائية، حيث تقدر مشاركة المصادر الهوائية إجمالاً في اختبار الجهد البدني الأقصى لمدة 30 ثانية بحوالي 15-28%.

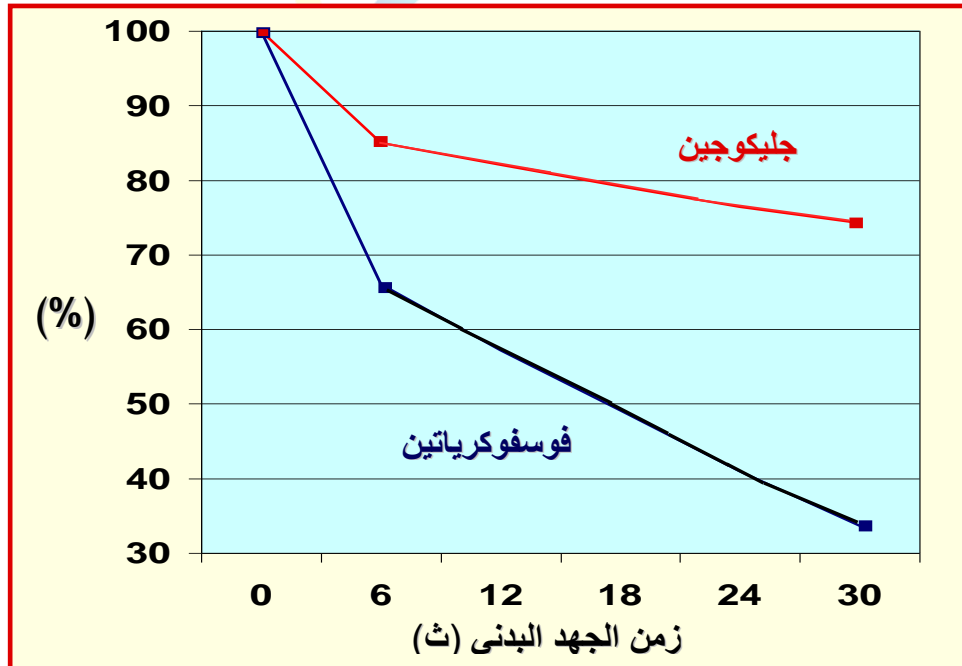
وعلى عكس ما كان يعتقد سابقاً، فإن المصدر القصير الأمد المتمثل بالتحلل اللاهوائي للجليكوجين والجلوكوز يشارك بنسب متفاوتة في تزويد العضلات بالطاقة أثناء اختبارات القدرة اللاهوائية التي لا تزيد مدتها عن 30 ثانية، حيث تشير نتائج دراسة تم فيها أخذ عينة من العضلات العاملة وتحليلها كيميائياً إلى أن هناك انخفاض ملحوظ في تركيز كل من فوسفات

الكرياتين وكذلك جليكوجين العضلات بعد 6 ثواني فقط من بدء الجهد البدني العنيف، وأن مساهمة المصدر القصير الأمد تزداد مع مرور الوقت، كما هو موضحاً في الشكل رقم (8).

جدول رقم (3): نسبة مشاركة كل من الطائقتين الهوائية واللاهوائية في الجهد البدني العنيف والقصير الأمد.

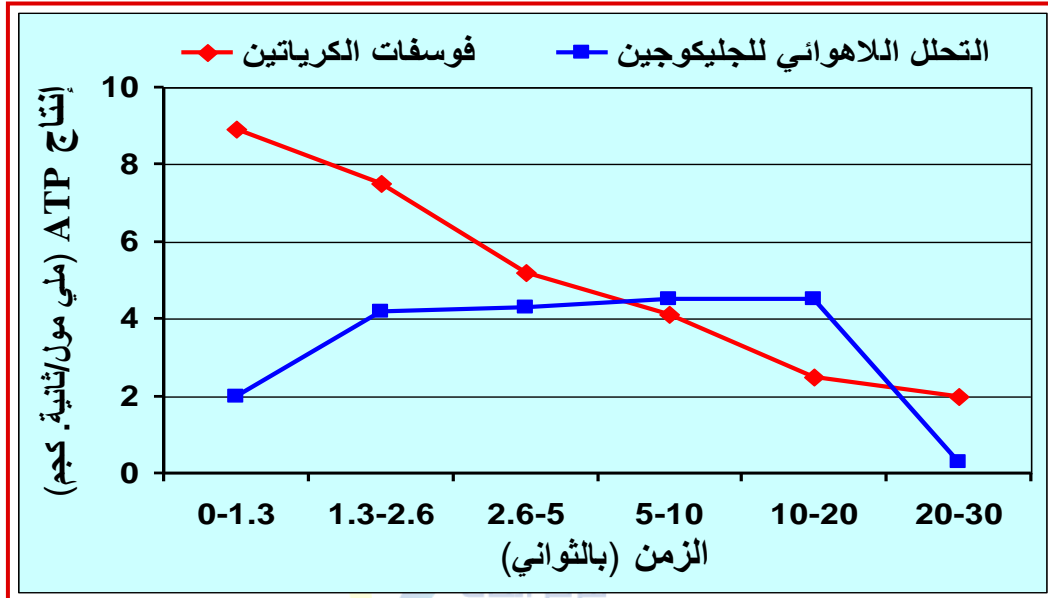
مشاركة الطاقة		الزمن
الهوائية	اللاهوائية	
20 %	80 %	صفر - 30 ثانية
40 %	60 %	30 - 60 ثانية
60 %	40 %	60 - 90 ثانية
65 %	35 %	90 - 120 ثانية
70 %	30 %	120 ثانية حتى التعب

المصدر: Bangsbo, et al, J Physiol, 1990, 422: 539



شكل رقم (8): نسبة (%) استخدام كل من فوسفات الكرياتين (PC) وجليكوجين العضلات كمصدرين للطاقة خلال جهد بدني أقصى لمدة 30 ثانية. مصدر البيانات: Boobis, et al, J Physiol, 1983

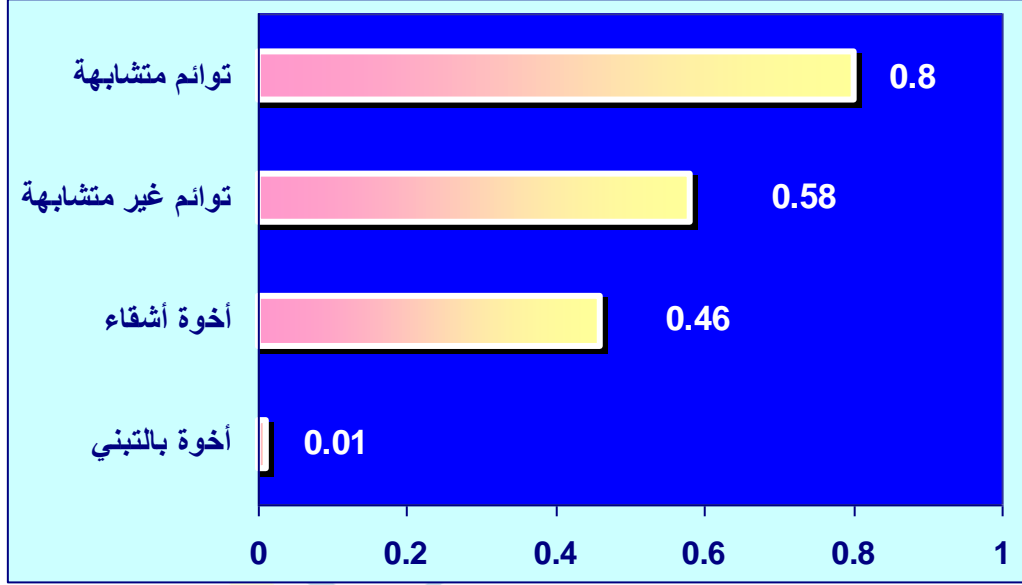
وفي بحث آخر تم فيه إحداث انقباض عضلي مكثف عن طريق التنبيه الكهربائي، أتضح من خلاله أن مشاركة فوسفات الكرياتين في الثواني الأولى من الانقباض كانت هي الأعلى، لكن تلك المساهمة بدأت في التضاؤل مع مرور الوقت، وفي الوقت نفسه ازدادت نسبة مشاركة التحلل الجليكوجيني، كما هو مبيناً في الشكل البياني رقم (9).



شكل رقم (9): مشاركة كل من فوسفات الكرياتين (PC) والتحلل اللاهوائي للجليكوجين في إنتاج أدينوسين ثلاثي الفوسفات (ملي مول في الثانية لكل كجم من وزن العضلة الجاف) خلال انقباض عضلي مكثف بواسطة تنبيه كهربائي (المصدر: Hultman, et al, *Biochem Soc Trans*, 1991).

ومن المعلوم أن الوراثة تسهم بدور ملحوظ في القدرة اللاهوائية للشخص، حيث يوضح الشكل البياني رقم (10) قيم العلاقات الارتباطية بين التوائم المتشابهة وغير المتشابهة في بعض مؤشرات القدرة اللاهوائية. ولقد بلغ معامل الارتباط بين التوائم المتشابهة وراثياً في تلك الدراسة قيمة 0.80، وهو أعلى من معامل الارتباط الذي بين التوائم غير المتشابهة (التي أتت من بويضتين مختلفتين)، الأمر الذي يعني أن مقدار التباين المشترك فيما بين التوائم المتشابهة (العوامل المشتركة المؤثرة على القدرة اللاهوائية لدى التوائم المتشابهة) يصل إلى 64% (0.80 × 0.80)، على أن هذا التباين المشترك يقل لدى التوائم غير المتشابهة ليصل إلى حوالي 34%، وينخفض إلى حوالي 20% لدى الأخوة الأشقاء. والجدير بالذكر أن مقدار التباين المشترك فيما بين التوائم المتشابهة في القدرة اللاهوائية يعد أكبر من التباين المشترك في القدرة الهوائية كما سيأتي ذلك لاحقاً في الفصل السابع عشر. ونتائج الدراسة السابقة تعزز من الاعتقاد

السائد الذي مفاده أن رياضيي القدرة والسرعة كما في عدو المسافات القصيرة أو في الوثب لا بد أن يكون لديهم الاستعداد الوراثي لكي يمكن لهم المنافسة على المستوى الدولي.



شكل رقم (10): العلاقات الارتباطية (ICC) بين التوائم المتشابهة وغير المتشابهة والأخوة الأشقاء والأخوة بالتبني في القدرة اللاهوائية على الدراجة لمدة 10 ثواني (المصدر: Simoneau, et al, 1986).

نمط الحياة والصحة
Lifestyle & Health
Research Center

المصدر: الهزاع، هزاع محمد. فسيولوجيا الجهد البدني: الأسس النظرية والإجراءات المعملية للقياسات الفسيولوجية. دار نشر جامعة الملك سعود: الرياض، 2009.