

مقرر ٥٥٣ ترض

الجهاز الدوري - التنفسي والجهد البدني

## العبء اللاهوائية

المصدر:

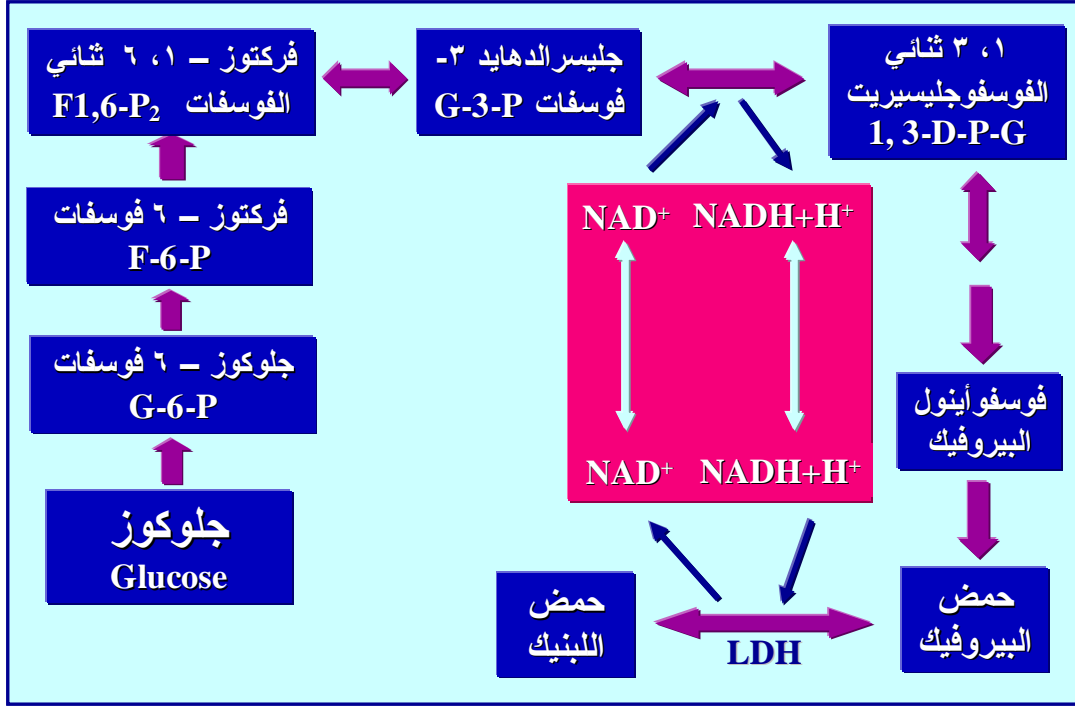
كتاب فسيولوجيا الجهد البدني: الأسس النظرية والإجراءات المعملية للقياسات  
الفسولوجية. هزاع بن محمد الهزاع، تحت الطبع.

## تعريف العتبة اللاهوائية (Anaerobic Threshold)

تعني مقدار شدة الجهد البدني (القدرة بالشمعة أو سرعة السير المتحرك) أو مقدار استهلاك الأكسجين عند المستوى الذي يسبق حدوث ارتفاع ملحوظ في تركيز حمض اللبنيك (أي ما قبل حدوث حالة التحمض اللبني Lactic acidosis)، وما يعقبه من تغيرات في عملية التبادل الغازي. وهي باختصار تعني المرحلة التي يتم فيها الاعتماد وباطراد على العمليات الأيضية اللاهوائية، وما يعقب ذلك من زيادة في إنتاج حمض اللبنيك بصورة تفوق معدل إزالته.

### لماذا يتم إنتاج حمض اللبنيك؟

عرفنا فيما سبق أن الجسم يقوم بتوفير الطاقة الحيوية اللازمة لعمل العضلات عن طريق العمليات الأيضية الهوائية واللاهوائية، حيث تستخدم الطاقة الهوائية بدرجة أكبر خلال الراحة وأثناء الجهد البدني المنخفض إلى المعتدل الشدة. أما عندما ترتفع شدة الجهد البدني فإن مشاركة الطاقة اللاهوائية تزداد وتصبح الطاقة اللازمة لانقباض العضلات قادمة من كلا الطائفتين الهوائية واللاهوائية، وبنسب تعتمد إلى حد كبير على شدة الجهد البدني، فكلما ارتفعت شدة الجهد البدني ازداد الاعتماد أكثر على الطاقة اللاهوائية. والمعروف أن التحلل الجليكوجيني أو الجلوكوزي أثناء الجهد البدني المعتدل الشدة ينتهي معظمه بحمض البيروفيك ذي الجزيئات الكربونية الثلاثة (التحلل الجلوكوزي أو الجليكوجيني يعني تحلل الجليكوجين أو الجلوكوز من جزيئات ذات ٦ ذرات كربون إلى جزيئات ذات ثلاث ذرات كربون). ينتقل حمض البيروفيك بدوره من السيتوبلازم إلى الميتوكوندريا، ليتم هناك استخدامه من خلال سلسلة من العمليات الكيموحيوية (في دورة كريس) لإنتاج أدينوسين ثلاثي الفوسفات. لكن عندما ترتفع شدة الجهد البدني ويصبح الطلب على الطاقة (أي على الأدينوسين ثلاثي الفوسفات) عالياً، بل أعلى من معدل توفيره عن طريق التحلل الهوائي، فإن حمض البيروفيك لزاماً عليه أن يقبل أيون الهيدروجين وبالتالي يتم اختزاله إلى حمض اللبنيك، لكي يتم توفير  $(NAD^+)$  الضروري لتحويل مركب جليسيرالدهايد ٣ فوسفات إلى ١،٣ ثنائي الفوسفوجليسيريت. هذه الخطوة تعد ضرورية من أجل تجنب إيقاف عملية التحلل الجلوكوزي (Glycolysis)، كما هو موضحاً في الشكل رقم (١). وعليه فإن المحصلة هي ارتفاع تركيز حمض اللبنيك في العضلات أولاً، ثم في الدم وذلك نتيجة لزيادة معدل إنتاج حمض اللبنيك بشكل يفوق معدل استخدامه، مما يقود إلى زيادة أيونات الهيدروجين وارتفاع الحموضة في العضلات وبدرجة أقل في الدم.



شكل رقم (١): أهمية عملية إنتاج حمض اللبنيك لاستمرار التحلل الجلوكوزي لا هوائياً.

### أهمية العتبة اللاهوائية

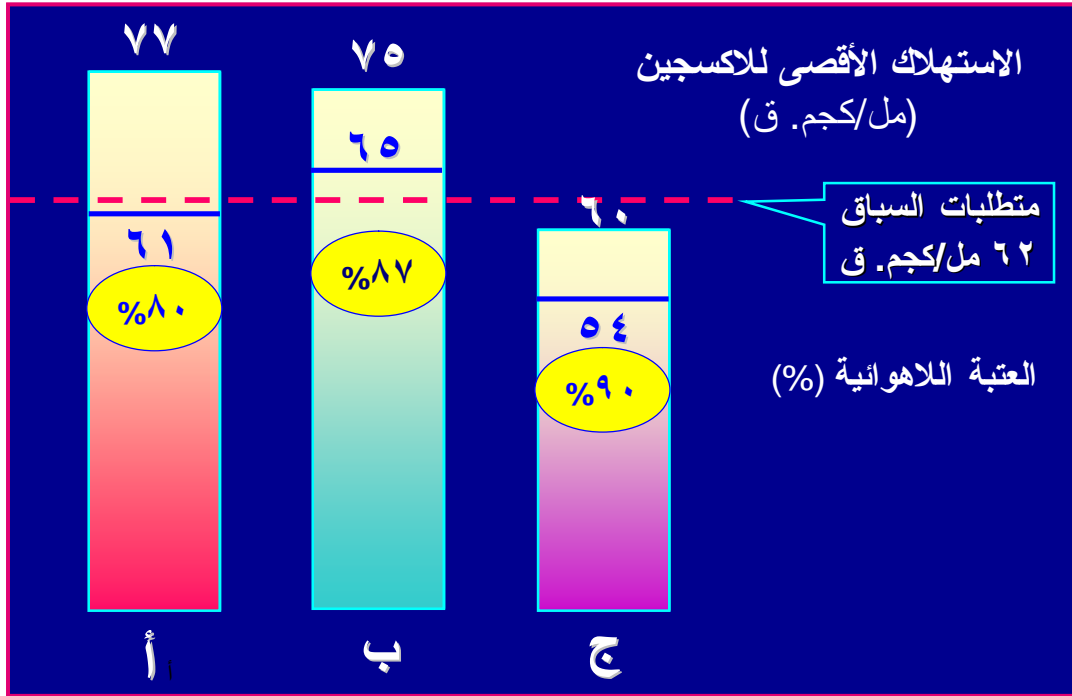
على الرغم من أهمية الاستهلاك الأقصى للأكسجين كعامل محدد للأداء البدني التحملي، إلا أن العتبة اللاهوائية ترتبط مع الأداء البدني بشكل أكبر من ارتباط الاستهلاك الأقصى للأكسجين به، وهذا يعني أنه في حالة وجود متسابقين في سباق تحملي يمتلكان نفس الحجم من الاستهلاك الأقصى للأكسجين، لكن أحدهما يمتلك عتبة لا هوائية أعلى من الآخر كنسبة من الاستهلاك الأقصى للأكسجين، فإن حظوظه في الفوز ستكون أكبر من زميله الذي يمتلك عتبة لا هوائية منخفضة (أنظر الفقرة اللاحقة). ويمكن تلخيص الأهمية النسبية للعتبة اللاهوائية في النقاط الثلاثة التالية:

١- إن العلاقة الارتباطية بين العتبة اللاهوائية والأداء البدني التحملي تُعد أعلى من تلك التي بين الاستهلاك الأقصى للأكسجين والأداء البدني، فلقد وجدنا من خلال البحوث التي قمنا بإجرائها على رياضيي المسافات الطويلة السعوديين أن معامل الارتباط بين الاستهلاك الأقصى للأكسجين وزمن الأداء البدني في سباق جري ١٥ كم كان (-٠,٦٩)، بينما بلغ معامل الارتباط بين العتبة اللاهوائية وزمن الأداء في نفس السباق (-٠,٨٢).

٢- إن العتبة اللاهوائية قابلة للتحسن من جراء التدريب البدني بصورة أكبر من التحسن الحاصل للاستهلاك الأقصى للأكسجين، وهذه النقطة مهمة على وجه الخصوص للرياضيين الذين يكون الاستهلاك الأقصى للأكسجين لديهم قد وصل إلى مستوى عال جداً.

٣- إن العتبة اللاهوائية ذات فائدة كبيرة في وصفة التدريب البدني الملائم للرياضي. حيث يمكن عند معرفتها (وبالتالي معرفة السرعة المقابلة لها، أو ضربات القلب المقابلة لها، مثلاً) أن يتم وصف التدريب البدني عند الشدة التي تسبق قبل الوصول مباشرة إلى العتبة اللاهوائية وبالتالي الاستفادة القصوى من التدريب البدني بدون الدخول في التدريب اللاهوائي لدى رياضي التحمل.

وللتدليل على أهمية العتبة اللاهوائية ودورها في الأداء البدني التحملي، نضرب للقارئ المثال التالي الموضح في الشكل البياني رقم (٢): لنفترض أن لدينا ثلاثة عدائين يرغبون المشاركة في سباق تحملي، يبلغ الاستهلاك الأقصى للأكسجين لأول (أ) منهم ٧٧ ملي لتر/كجم في الدقيقة، وللثاني (ب) مقدار ٧٥ ملي لتر/كجم في الدقيقة، وللثالث (ج) مقدار ٦٠ ملي لتر/كجم في الدقيقة. أما العتبة اللاهوائية للمتسابق (أ) فتبلغ ٨٠% من استهلاكه الأقصى للأكسجين (أي ٦١ ملي لتر/كجم في الدقيقة)، وللمتسابق (ب) ٨٧% من استهلاكه الأقصى للأكسجين (أي ٦٥ ملي لتر/كجم في الدقيقة)، وللمتسابق (ج) ٩٠% من استهلاكه الأقصى للأكسجين (أي ٥٤ ملي لتر/كجم في الدقيقة). ولنفترض أن الفوز بالسباق يتطلب المحافظة على سرعة من الجري تتطلب ٦٢ ملي لتر من الأكسجين لكل كجم من وزن الجسم في الدقيقة، فبا تری من منهم يتوقع له الفوز بهذا السباق؟. سوف نجد كما يتضح من الشكل رقم (٢٢-٢) أنه على الرغم من ارتفاع العتبة اللاهوائية للمتسابق (ج) فلن يتمكن من مجاراة المتسابقين الآخرين، لأن متطلبات السباق ليست أعلى من معدل عتبه اللاهوائية فحسب بل هي أعلى حتى من مستوى استهلاكه الأقصى للأكسجين، وبالتالي فلن يصمد في المحافظة على السرعة المطلوبة أكثر من بضع دقائق فقط. أما المتسابقين (أ) و (ب) فكلا استهلاكيهما الأقصى من الأكسجين يعد مرتفع، لكن المتسابق (ب) يمتلك عتبة لا هوائية أعلى من الآخر، مما يجعله يجري طوال فترة السباق وهو عند مستوى دون مستوى عتبه اللاهوائية، وبالتالي فلن يلجأ إلى الطاقة اللاهوائية بشكل كبير، مما يعني عدم ارتفاع تركيز حمض اللبنيك لديه بشكل مطرد، مقارنة مع المتسابق (أ). وعليه فإن المتسابق (ب) هو المتوقع له الفوز بالسباق.



شكل رقم (٢): الاستهلاك الأقصى للأكسجين والعتبة اللاهوائية لدى ثلاثة من المتسابقين وتأثير ذلك على الأداء البدني (للتشرح أنظر المتن).

### قياس العتبة اللاهوائية

#### أ - عتبة حمض اللبنيك (Lactate threshold):

يتم معرفة عتبة حمض اللبنيك بطرق عديدة تعتمد جميعها على مستويات تركيز حمض اللبنيك في الدم. ولا نود الخوض في الاختلافات التقنية في قياس عتبة حمض اللبنيك (لمن يرغب المزيد حول الموضوع، يمكنه الرجوع إلى كتاب موضوعات معاصرة في الطب الرياضي)، لكننا سنستخدم عتبة حمض اللبنيك الموازية لمستوى ٤ ملي مول حيث يتم استنباط السرعة (في حالة استخدام السير المتحرك) أو العبء الجهدى (في حالة استخدام الدراجة) أو استهلاك الأكسجين المقابل لتركيز ٤ ملي مول من حمض اللبنيك في الدم.

وسيتم استخدام بروتوكول متدرج لكل من دراجة الجهد والسير المتحرك تبعاً لمستوى الاستهلاك الأقصى للأكسجين لدى المفحوص، كما هو موضحاً في الجدولين رقم (١) ورقم (٢). ويتكون كل بروتوكول من أربع مراحل مدة كل مرحلة أربع دقائق، يتم في نهاية كل مرحلة أخذ عينة من الدم الشعري وقياس تركيز حمض اللبنيك فيها، ثم رسم العلاقة بين

تركيز حمض اللبنيك والعبء الجهدى (أو سرعة السير المتحرك)، أو بين تركيز حمض اللبنيك ومعدل استهلاك الأوكسجين، وفي كل الأحوال ينبغي بالإضافة إلى قياس تركيز حمض اللبنيك إجراء قياس لكل من تركيز الأوكسجين، والتهوية الرئوية، ومعامل التبادل التنفسي (RER) وضربات القلب، وحساب مكافئ التهوية الرئوية الأوكسجيني ( $VE/VO_2$ )، ومكافئ التهوية الرئوية لثاني أكسيد الكربون ( $VE/VO_2$ ).

جدول رقم (١): بروتوكول دراجة الجهد الذي يتم فيه قياس عتبة حمض اللبنيك، وقد تم ترتيب العبء الجهدى على ٤ مراحل تبعاً لاستهلاك الأقصى للأوكسجين لدى المفحوص.

القدرة (بالشمعة)				الاستهلاك الأقصى للأوكسجين (لتر/ دقيقة)
المرحلة الأولى	المرحلة الثانية	المرحلة الثالثة	المرحلة الرابعة	
٣٠	٦٠	٩٠	١٢٠	أقل من ٢,٠
٦٠	٩٠	١٢٠	١٥٠	٢,٠ - ٢,٥
٩٠	١٢٠	١٥٠	١٨٠	٢,٥ - ٣,٠
١٢٠	١٥٠	١٨٠	٢١٠	٣,٠ - ٣,٥
١٥٠	١٨٠	٢١٠	٢٤٠	٣,٥ - ٤,٠
١٨٠	٢١٠	٢٤٠	٢٧٠	٤,٠ فأكثر

\* معدل دوران العجل يساوي ٦٠ دورة في الدقيقة.

\* مدة كل مرحلة ٤ دقائق، علماً بأنه لا يوجد توقف بين المراحل.

\* يمكن اختصار مدة المرحلة إلى ٣ دقائق في حالة اختبار الناشئين من ١١-١٥ سنة.

المصدر (بعد التعديل): British Association of Sports Sciences. Position Statement on the Physiological Assessment of the Elite Competitor. 1988.

## ب - عتبة التهوية الرئوية (Ventilatory threshold):

يتطلب تحديد العتبة اللاهوائية بواسطة قياس تركيز حمض اللبنيك في الدم أخذ عينات دم متكررة من المفحوص، وهذا الإجراء يعد إجراءً توسعياً (invasive)، مما حدا بالعديد من المختصين إلى التفكير في طريقة غير مباشرة لقياس العتبة اللاهوائية بواسطة متغيرات التبادل الغازي. وهذا ما يستخدم حالياً تحت مسمى عتبة التهوية الرئوية، وينبع الأساس

النظري لهذا المفهوم من أن زيادة تركيز حمض اللبنيك في الدم وبالتالي الاعتماد أكثر على الطاقة اللاهوائية يقود إلى زيادة إنتاج حمض اللبنيك، الأمر الذي يؤدي إلى حالة تسمى التحمض اللبني (Lactic Acidosis)، وبالتالي تطلق أيونات الهيدروجين، مما يزيد من معدل الأس الهيدروجيني (أي زيادة الحموضة)، لذا يقوم الجسم بمحاولة صد هذه الحموضة (أي مكافحتها) عن طريق اتحاد أيونات البيكربونات مع أيونات الهيدروجين، مما ينتج عنه حمض البيكربونيك الذي سرعان ما يتحول إلى ثاني أكسيد الكربون وماء، كما هو موضحاً في الشكل التوضيحي رقم (٣).

جدول رقم (٢): بروتوكول السير المتحرك الذي يتم فيه قياس عتبة حمض اللبنيك، وقد تم ترتيب العبء الجهدى على ٤ مراحل تبعاً للاستهلاك الأقصى للأكسجين لدى المفحوص.

سرعة السير المتحرك (كم/ ساعة)				الاستهلاك الأقصى للأكسجين (ملم/ كم. دقيقة)
المرحلة الرابعة	المرحلة الثالثة	المرحلة الثانية	المرحلة الأولى	
١٣,٠	١١,٢	٩,٦	٨,٠	٤٥ أو أقل
١٤,٥	١٣,٠	١١,٢	٩,٦	٤٦ - ٥٠
١٦,١	١٤,٥	١٣,٠	١١,٢	٥٠ - ٥٥
١٧,٨	١٦,١	١٤,٥	١٣,٠	٥٦ - ٦٠
١٩,٤	١٧,٨	١٦,١	١٤,٥	٦١ - ٦٥
٢٠,٨	١٩,٤	١٧,٨	١٦,١	٦٦ فأكثر

\* مدة كل مرحلة ٤ دقائق، علماً بأنه لا يوجد توقف بين المراحل.

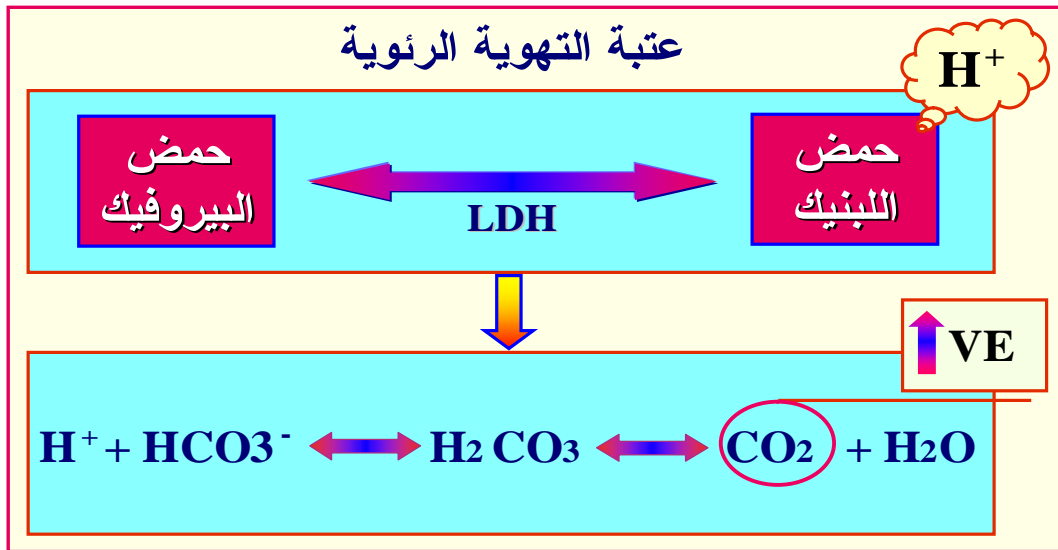
\* يمكن اختصار مدة المرحلة إلى ٣ دقائق في حالة اختبار الناشئين بين ١١-١٥ سنة.

المصدر (بعد التعديل): British Association of Sports Sciences. Position Statement on the Physiological Assessment of the Elite Competitor. 1988.

إن النتيجة هي بالطبع زيادة معدل إنتاج ثاني أكسيد الكربون (من مصدر ليس له علاقة بالتنفس الخلوي، أي ليس له علاقة بعمليات إنتاج الطاقة في الخلية، التي يتم خلالها استخدام الأكسجين بغرض الحصول على الطاقة، وإنتاج ثاني أكسيد الكربون كمحصلة لعملية التنفس الخلوي). إن زيادة معدل إنتاج ثاني أكسيد الكربون بفعل محاولة الجسم صد الحموضة تؤدي إلى ارتفاع ضغط ثاني أكسيد الكربون في الدم، مما ينبه مركز التحكم في التنفس في المخ، الذي بدوره يحفز عملية التنفس فيزداد حجم التهوية الرئوية (من أجل طرد الكمية الزائدة من

(CO<sub>2</sub>)، لذا نلاحظ في تلك اللحظات زيادة غير خطية (أي متصاعدة) لحجم التهوية الرئوية، الأمر الذي يستدل من خلالها على حدوث العتبة اللاهوائية. وتعد مؤشرات التبادل الغازي التالية الأكثر شيوعاً في الاستدلال على حدوث عتبة التهوية الرئوية:

- ١- الزيادة غير الخطية في حجم التهوية الرئوية (VE).
- ٢- الزيادة غير الخطية في حجم ثاني أكسيد الكربون المنتج.
- ٣- زيادة مكافئ التهوية الرئوية الأوكسجيني (VE/VO<sub>2</sub>) بدون زيادة مكافئ التهوية الرئوية لثاني أكسيد الكربون (VE/VCO<sub>2</sub>).
- ٤- البعض قد يستخدم تجاوز معامل التبادل التنفسي للرقم ١,٠.

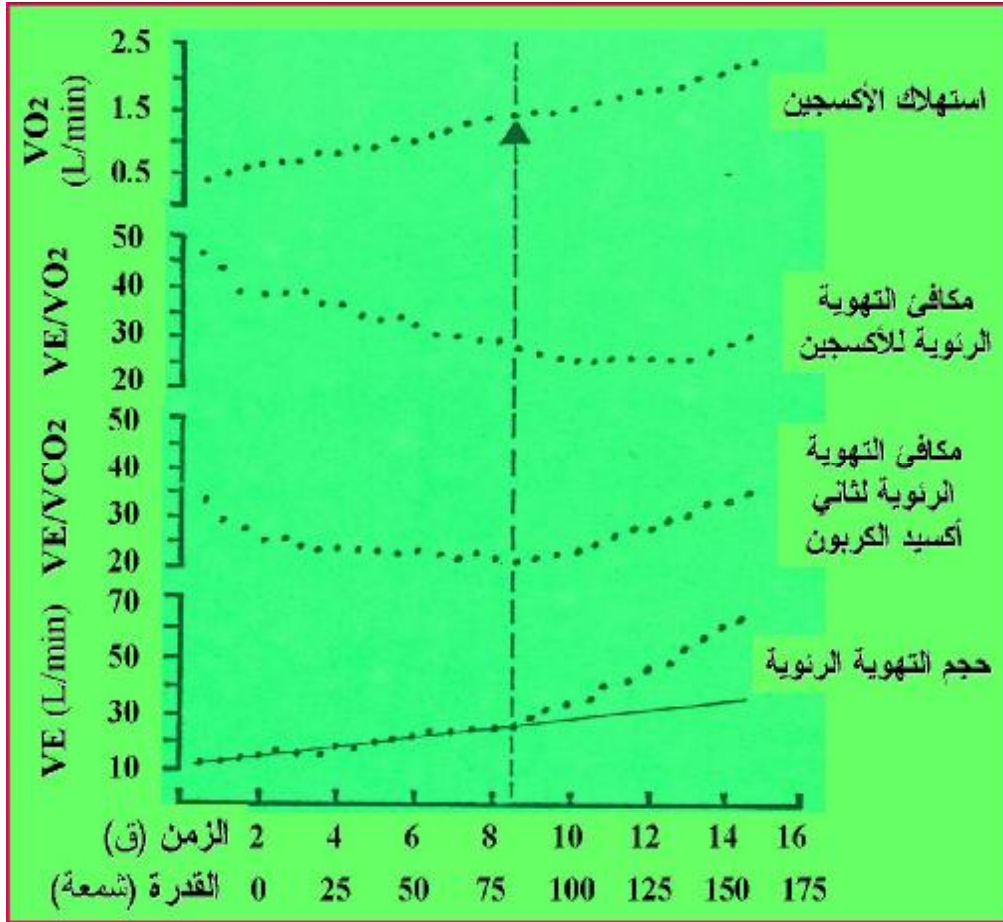


شكل رقم (٣): عتبة التهوية الرئوية: زيادة أيونات الهيدروجين (H<sup>+</sup>) بفعل ارتفاع تركيز حمض اللبنيك تؤدي إلى قيام الجسم بمحاولة صد الحموضة، الأمر الذي ينتج عنه زيادة إنتاج ثاني أكسيد الكربون ومن ثم زيادة حجم التهوية الرئوية (VE).

ويبين الشكل رقم (٤) رسماً توضيحياً لكيفية تحديد مستوى عتبة التهوية الرئوية بواسطة متغيرات التبادل الغازي، ويلاحظ حدوث العتبة اللاهوائية عند النقطة التي يغادر فيها منحنى حجم التهوية الرئوية الشكل الخطي، وفي الوقت نفسه يمكن مشاهدة ارتفاع منحنى مكافئ التهوية الرئوية لثاني أكسيد الكربون (VE/VCO<sub>2</sub>) لكن ما يزال مكافئ التهوية الرئوية للأوكسجين (VE/VO<sub>2</sub>) ينخفض. عند حدوث تلك التغيرات في مؤشرات التبادل الغازي يمكن تحديد العتبة اللاهوائية بناءً على معدل استهلاك الأوكسجين أو معدل القدرة بالشمعة، ومن ثم



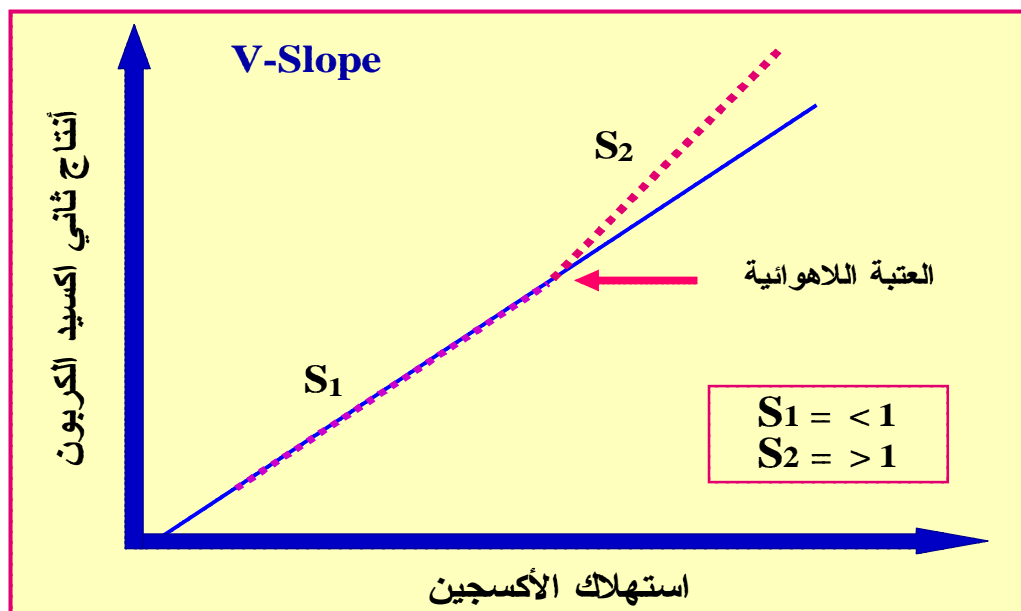
نسبة استهلاك الأوكسجين إلى الاستهلاك الأقصى للأوكسجين أو نسبة معدل القدرة إلى مستوى القدرة القصوى لنحصل بذلك على مستوى العتبة اللاهوائية كنسبة من الجهد الأقصى.



شكل رقم (٤): كيفية تحديد عتبة التهوية الرئوية أثناء جهد بدني متدرج، وتبدو بوضوح الزيادة غير الخطية في حجم التهوية الرئوية، مع بداية ارتفاع مكافئ التهوية الرئوية لثاني أكسيد الكربون بدون زيادة في مكافئ التهوية الرئوية للأوكسجين (المصدر: الهزاع، ١٩٨٩).

وفي الآونة الأخيرة ازداد استخدام ما يسمى بطريقة منحني  $V$  (V-Slope) للاستدلال على حدوث العتبة اللاهوائية باستخدام مؤشرات التبادل الغازي، حيث يتم رسم العلاقة بين معدل إنتاج ثاني أكسيد الكربون ومعدل استهلاك الأوكسجين، كما هو موضحاً في الشكل البياني رقم (٥)، على أن يكون رسم العلاقة بين المتغيرين عن مقياس الرسم نفسه. ومن الملاحظ عند رسم تلك العلاقة أن يظهر لنا منحنيين أحدهما في البداية (S1) وتكون العلاقة فيه بين إنتاج ثاني أكسيد الكربون واستهلاك الأوكسجين أقل من ١ (أي أن معدل استهلاك الأوكسجين أكبر من معدل إنتاج ثاني أكسيد الكربون) ثم يتناقص التفاوت بين معدل استهلاك

الأكسجين وإنتاج ثاني أكسيد الكربون، حتى نقطة حدوث العتبة اللاهوائية، والتي عندها يبدأ المنحنى يأخذ شكلاً آخرًا (S2)، حيث يصبح معدل إنتاج ثاني أكسيد الكربون أعلى من معدل استهلاك الأكسجين (تصبح العلاقة أكبر من 1). وغني عن القول أن معامل التبادل التنفسي يكون فوق الواحد صحيح (أكبر من 1) في المنحنى رقم (S2)، وذلك لزيادة إنتاج ثاني أكسيد الكربون بسبب محاولة الجسم صد الحموضة الناجمة من زيادة إنتاج حمض اللبنيك في الجسم.



شكل رقم (5): كيفية تحديد عتبة التهوية الرئوية أثناء جهد بدني متدرج باستخدام منحنى V (V-Slope)، من خلال رسم العلاقة بين استهلاك الأكسجين وإنتاج ثاني أكسيد الكربون، وتحدث العتبة اللاهوائية عند مغادرة منحنى العلاقة بينهما الخط المستقيم، ونلاحظ حدوث العتبة اللاهوائية مع نهاية المنحنى 1 (S1) وبداية المنحنى 2 (S2) (المصدر: Wasserman, et al, 1999).

ولا يوجد بروتوكول موحد متفق عليه لقياس عتبة التهوية الرئوية، إلا أن المتبع هو استخدام اختبار الجهد البدني التدرجي، الذي يتم من خلاله زيادة المقاومة (أو العبء الجهدية) بالتدرج. وفي حالة استخدام دراجة الجهد فإن المعتاد هو أن البدء بمقاومة معينة تبعاً للياقة المفحوص البدنية، ثم زيادة العبء بمقدار يتراوح من 15 إلى 30 شمعة كل فترة زمنية تتراوح من دقيقة إلى ثلاث دقائق. ويوجد حالياً أنواع من دراجات الجهد يمكن فيها برمجة زيادة العبء بسلسلة بحيث تزداد المقاومة تدريجياً خلال كامل مدة كل مرحلة من مراحل الاختبار، بدلاً من حدوث الزيادة في العبء بعد نهاية كل مرحلة. ومن الجدير بالإشارة أن البروتوكول المستخدم في قياس عتبة التهوية الرئوية لا يصلح دائماً لقياس عتبة حمض

اللبنيك، حيث تكون مدة كل مرحلة من مراحل الاختبار في حالة قياس عتبة التهوية الرئوية أقصر مما هي في حالة قياس عتبة حمض اللبنيك.

### استجابة كل من VO<sub>2</sub> و VCO<sub>2</sub> فوق مستوى العتبة اللاهوائية

يوضح الشكل البياني رقم (٦) استجابة كل من استهلاك الأوكسجين وإنتاج ثاني أكسيد الكربون لجهد بدني متدرج مدته ثمان دقائق، ويظهر بوضوح اختلاف طبيعة الاستجابة بينهما عند مستوى تحت مستوى العتبة اللاهوائية مقارنة بما فوق مستوى العتبة اللاهوائية. فبالنسبة لاستهلاك الأوكسجين (الجزء الأيسر من الرسم) نلاحظ أن استجابته تحت مستوى العتبة اللاهوائية (الرقم ١ الذي يمثل المراحل الثلاث الأولى) تتسم بالاستقرار، بينما لا يوجد استقرار في استجابة استهلاك الأوكسجين لجهد بدني فوق مستوى العتبة اللاهوائية (الرقم ٢ الذي يمثل الأربع مراحل العليا من الاستجابة) ونلاحظ أيضاً أنه كلما كان الشغل المبذول يزيد بشكل أكبر عن مستوى العتبة اللاهوائية كلما كانت الاستجابة أكثر حدة. وعلى العكس من استجابة استهلاك الأوكسجين، فإنه لا يوجد اختلاف ملحوظ في نمط استجابة ثاني أكسيد الكربون المنتج فوق مستوى العتبة اللاهوائية مقارنة بما تحت مستواها. كما يلاحظ أن حجم إنتاج ثاني أكسيد الكربون تحت مستوى العتبة اللاهوائية أدنى من حجم استهلاك الأوكسجين، لكنه يصبح أكبر فوق مستوى العتبة اللاهوائية، وهذا يعزى لزيادة إنتاج ثاني أكسيد الكربون بفعل محاولة الجسم صد الحموضة الناتجة من ازدياد تركيز حمض اللبنيك (كما هو موضحاً في معادلة تفاعل البيكربونات)، أي أن ثاني أكسيد الكربون يُنتج من عمليات التنفس الخلوي فقط تحت مستوى العتبة اللاهوائية، لكنه يُنتج من عمليات التنفس الخلوي ومن عمليات صد الحموضة فوق مستوى العتبة اللاهوائية.

ويمكن تلخيص أهم التغيرات الفسيولوجية الناتجة عن القيام بجهد بدني فوق مستوى العتبة اللاهوائية على النحو التالي:

§ يزداد استخدام جليكوجين العضلات بصورة مطردة، نتيجة للاعتماد على العمليات الأيضية اللاهوائية كمصدر لإمداد العضلات بالطاقة.

§ تنخفض مدة الجهد البدني التي يمكن للشخص من القيام بها.

§ تحدث حالة التحمض اللبني (Lactate acidosis).

§ يزداد حجم إنتاج ثاني أكسيد الكربون نتيجة لعمليات صد الحموضة.

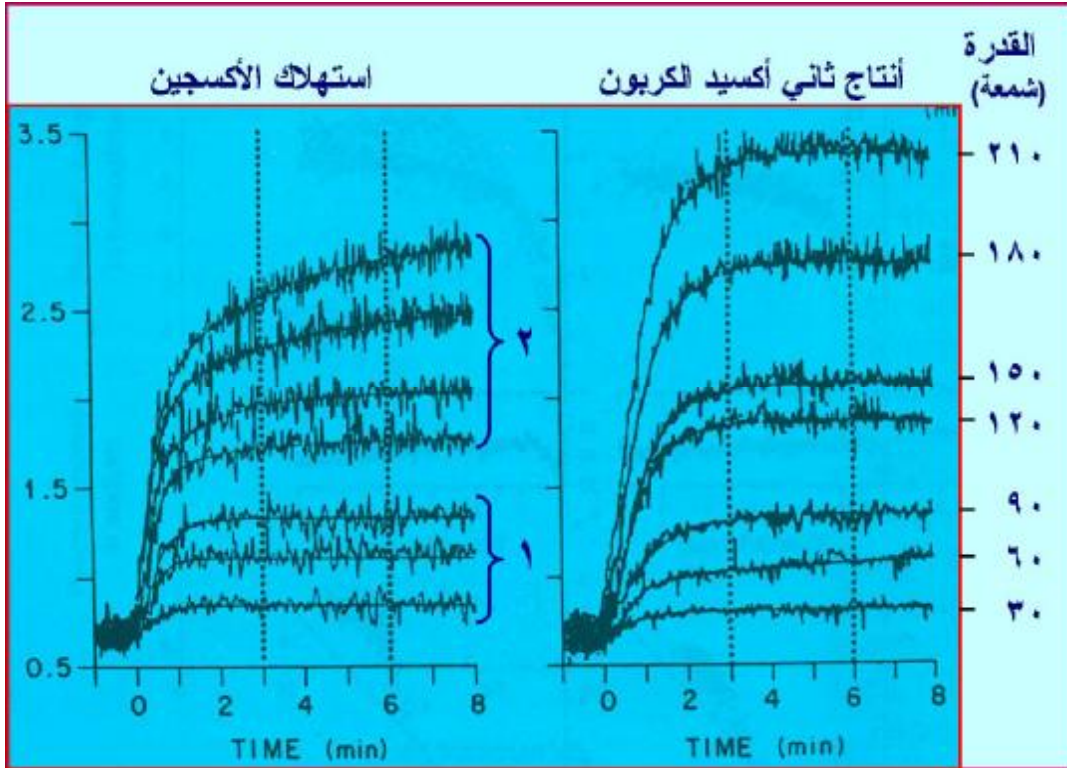
§ يزداد حجم التهوية الرئوية، نتيجة لزيادة حجم ثاني أكسيد الكربون.

§ تزيد العضلات من قدرتها على استخلاص الأوكسجين من الدم (نتيجة لتأثير بور).

§ يزداد تركيز المنحلات التالية في الدم  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ .

§ تزداد محصلة النبض والضغط.

§ يزداد تركيز هرمون الكاتوكولامين في الدم.

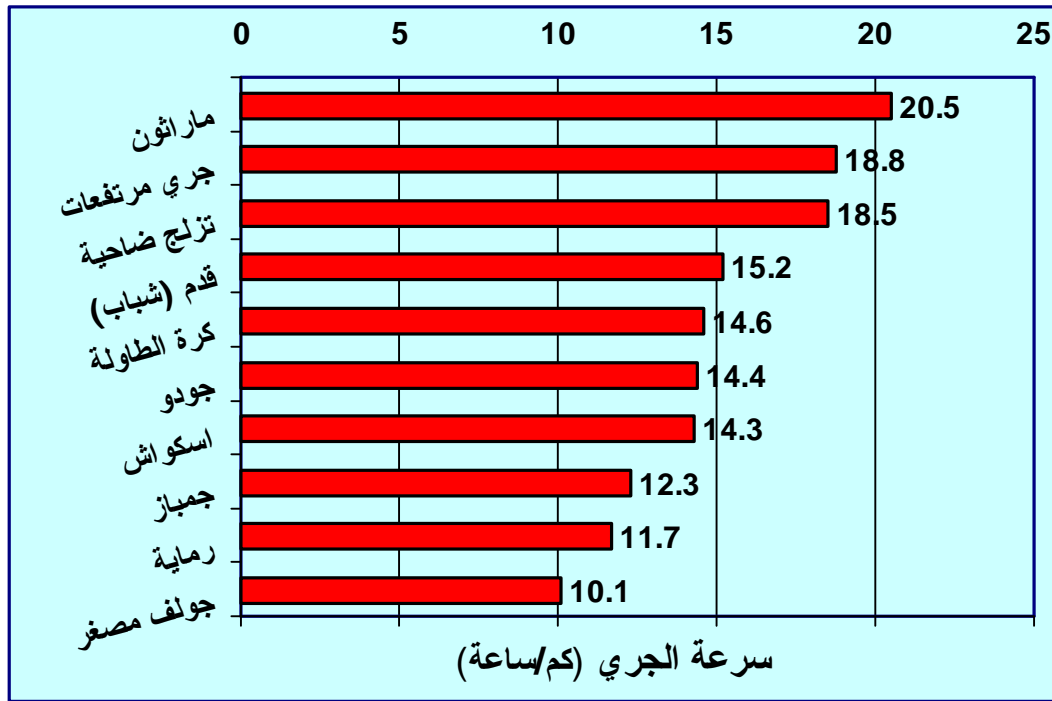


شكل رقم (٦): استجابة كل من استهلاك الأوكسجين وإنتاج ثاني أكسيد الكربون تحت (الرقم ١) وفوق (الرقم ٢) مستوى العتبة اللاهوائية. (مصدر الشكل من: Wassermann, et al. 1999, p. 38).

### الحدود الاعتيادية للعتبة اللاهوائية

تبلغ العتبة اللاهوائية كنسبة من الاستهلاك الأقصى للأوكسجين لدى الأفراد العاديين غير المتدربين من ٥٠-٦٠%، إلا أنها ترتفع بشكل أكبر لدى الرياضيين المتدربين خاصة رياضيي التحمل لتصل إلى ٨٥% من استهلاكهم الأقصى للأوكسجين، وهذا هو الذي يجعل متسابق الماراثون يستطيع أن يجري بمعدل سرعة يقارب ٢٠ كم في الساعة طوال فترة السباق التي تتجاوز الساعتين بدون وصول تركيز حمض اللبنيك لديه إلى مستوى مرتفع يجبره على خفض سرعته خلال السباق، ويوضح الشكل البياني رقم (٧) مستويات عتبة

حمض اللبنيك لفئات متعددة من الرياضيين، ومعدلات سرعة الجري التي حدثت عندها تلك العتبة، ويمكن بسهولة ملاحظة أن رياضيي التحمل (مثل الماراثون وجري المرتفعات وتزلج الضاحية) يمكنهم الجري عند سرعات عالية قبل حدوث العتبة اللاهوائية لديهم مقارنة برياضيي الرياضات الأخرى التي لا تعد هوائية، مثل الرماية والجمباز والجولف المصغر وما شابه ذلك. ولا شك أن ذلك التكيف لدى رياضيي التحمل يُعزى بشكل أساسي إلى التدريب البدني الهوائي عند الشدة القريبة من مستوى العتبة اللاهوائية.



شكل رقم (٢٢-٧): سرعة الجري عند مستوى يعادل ٤ ملي مول من حمض اللبنيك لدى مجموعات متنوعة من الرياضيين يمارسون رياضات هوائية ولا هوائية (المصدر: Held & Grossenbacher, Accusport Workshop, Zurich, 1995).

وتشير نتائج الدراسات عموماً إلى أن مستوى العتبة اللاهوائية لدى الأفراد الأصحاء غير الرياضيين يحدث عند معدل من استهلاك الأوكسجين يتراوح ما بين ١,٢ لتر في الدقيقة لدى الذكور وحوالي ٠,٨ لتر في الدقيقة لدى الإناث، بينما يتراوح مستوى استهلاك الأوكسجين عند مستوى العتبة اللاهوائية لدى مرضى القلب والرئتين من ٠,٢ إلى ٠,٥ لتر في الدقيقة. ولقد أشار واسرمن وزملاؤه في كتابهما القيم حول "أسس اختبارات الجهد البدني وتفسير نتائجها" إلى مستويات تقديرية لعتبة التهوية الرئوية كنسبة من حجم الاستهلاك الأقصى للأوكسجين لدى الرجال الأصحاء غير المتدربين تتراوح ما بين ٥٣% في العشرين من العمر

إلى ٥٨% في السبعين من العمر، كما هو موضحاً في الجدول رقم (٣)، ويظهر في الخانة اليسرى من الجدول حدود الثقة الدنيا عند ٩٥%، أي أن الحد الأدنى المتوقع لمستوى العتبة اللاهوائية في سن العشرين من العمر هو ٤٢% (في سن العشرين من العمر حدود الثقة الدنيا والعليا = ١٠% فوق أو تحت معدل العتبة اللاهوائية).

**جدول رقم (٣): مستويات العتبة اللاهوائية كنسبة من قيمة الاستهلاك الأقصى للأكسجين لدى الأشخاص الأصحاء.**

العمر بالسنوات	معدل العتبة اللاهوائية (%)	حد الثقة الأدنى عند ٩٥%
٢٠	٥٣	٤٢
٣٠	٥٤	٤٣
٤٠	٥٥	٤٤
٥٠	٥٦	٤٥
٦٠	٥٧	٤٦
٧٠	٥٨	٤٧

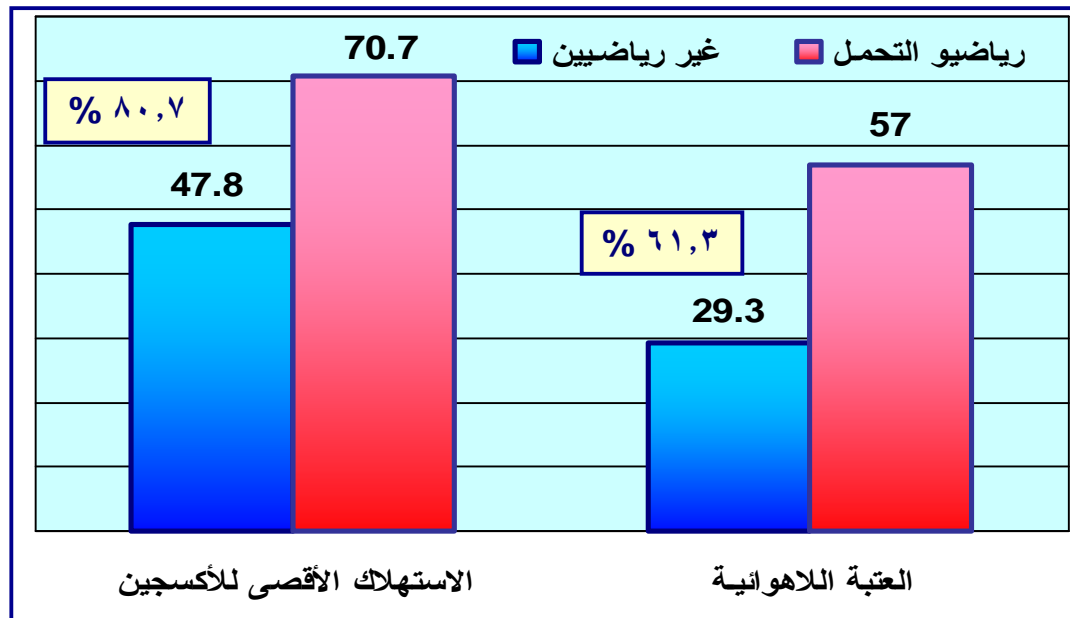
المصدر: Wassermann, et al. 1999, p. 154

وبالنسبة لمستويات العتبة اللاهوائية لدى الرياضيين السعوديين وأقرانهم غير الرياضيين، فيوضحها الجدول رقم (٤)، حيث تظهر لنا تلك المستويات بالمللي لتر لكل كجم من وزن الجسم في الدقيقة وكذلك نسبة إلى الاستهلاك الأقصى للأكسجين. ويتبين من الجدول ارتفاع العتبة اللاهوائية لدى عدائي التحمل السعوديين مقارنة بالفئات الأخرى. ومن الملاحظ أيضاً أن العتبة اللاهوائية لدى الصغار تعد أعلى مما هي لدى الكبار كنسبة من الاستهلاك الأقصى للأكسجين، سواء كانوا رياضيين أم غير رياضيين، وهذا يتفق مع نتائج البحوث الأخرى التي أجريت في أماكن عدة من العالم. أما الشكل البياني رقم (٨) فيبين لنا مستوى العتبة اللاهوائية كنسبة من الاستهلاك الأقصى للأكسجين لدى مجموعة من عدائي التحمل السعوديين مقارنة بمجموعة من غير الرياضيين، ويظهر بوضوح أن الاستهلاك الأقصى للأكسجين لدى رياضيي التحمل السعوديين ليس أعلى من غيرهم فحسب بل يمكنهم تجاوز ٨٠% من هذا الاستهلاك (مقارنة مع ٦١% لدى غير الرياضيين) أثناء الجري بدون الدخول الملحوظ في العمليات الأيضية اللاهوائية.

جدول رقم (٤): عتبة التهوية الرئوية لدى بعض الفئات من السعوديين.

عتبة التهوية الرئوية		الفئة
نسبة إلى الاستهلاك الأقصى للأكسجين	مل لتر / كجم . دقيقة	
$80.7 \pm 2.4\%$	$4.4 \pm 56.9$	عداء مسافات طويلة
$74.7 \pm 4.6\%$	$4.6 \pm 43.1$	لاعب كرة القدم (منتخب)
$61.6 \pm 3.5\%$	$5.7 \pm 29.4$	طلاب جامعيون
$79.7 \pm 2.1\%$	$4.6 \pm 44.2$	ناشئون (كرة قدم)
$75.1 \pm 2.4\%$	$5.2 \pm 36.2$	ناشئون (سباحة)
$69.0 \pm 7.4\%$	$6.2 \pm 34.4$	أطفال (غير رياضيين)

بيانات عدائي المسافات الطويلة من: Al-Hazzaa, Saudi Med J, 1995 ؛ بيانات منتخب كرة القدم من: Al-Hazzaa, In: Hazzaa, et al. J Sports Med & Phys Fitness, 2001 ؛ بيانات الطلاب الجامعيين من: Al-Hazzaa, et al. Pediatr Sports Medicine & Health, 1990 ؛ بيانات الناشئين (كرة القدم والسباحة) من: Al-Hazzaa, Saudi Med J, 2001 ؛ بيانات الأطفال غير الرياضيين من: Exerc Sci, 1998



شكل رقم (٨): عتبة التهوية الرئوية والاستهلاك الأقصى للأكسجين لدى رياضيي التحمل (جري مسافات طويلة) السعوديين مقارنة بغير الرياضيين، ويظهر في المستطيل الأصفر داخل الشكل نسبة عتبة التهوية الرئوية إلى الاستهلاك الأقصى للأكسجين (المصدر: Al-Hazzaa, Saudi Med J, 1995; Al-Hazzaa, In: Sports Medicine & Health, 1990).

## العوامل المؤثرة على العتبة اللاهوائية

هناك جملة من العوامل التي تؤثر على مستوى العتبة اللاهوائية، ومن أهم تلك العوامل، التدريب البدني، والتغذية، ونوع الألياف العضلية التي يمتلكها الرياضي وسوف نتطرق باختصار إلى تلك العوامل، كل على حده.

### التدريب البدني والعتبة اللاهوائية:

تعد العتبة اللاهوائية كما عرفنا سابقاً أكثر استجابة للتدريب البدني من استجابة الاستهلاك الأقصى للأكسجين له. كما أن العتبة اللاهوائية تُعد أقل تأثراً بالعوامل الوراثية من تأثر الاستهلاك الأقصى للأكسجين بها. ويقدر تأثير الوراثة على مقدار الاستهلاك الأقصى للأكسجين بحوالي ٤٠-٥٠%، بينما تتأثر العتبة اللاهوائية بالعوامل الوراثية بنسبة تصل إلى حدود ٢٥%. وتشير نتائج البحوث إلى أن التدريب البدني يقود إلى ارتفاع ملحوظ في العتبة اللاهوائية، ويتراوح هذا الارتفاع من ١٠% إلى ٧٠%، تبعاً للعديد من العوامل مثل مدة التدريب البدني وشدته ومستوى العتبة اللاهوائية قبل التدريب، وعوامل أخرى، ويعزى تحسن العتبة اللاهوائية من جراء التدريب البدني إلى زيادة معدل تدفق الدم في العضلات بعد التدريب، كما يعتقد أن التدريب البدني يؤدي إلى زيادة معدل إزالة حمض اللبنيك أو تحسين القدرة على التخلص منه (عن طريق زيادة معدل استخدامه من قبل العضلات الهيكلية البطيئة الخلجة والعضلة القلبية)، وكذلك زيادة إمكانية العضلات على أكسدة حمض البيروفيك (أي دخوله إلى العمليات الأيضية الهوائية بغرض إنتاج الطاقة). بالإضافة إلى ما سبق، فإن التدريب البدني يزيد من نسبة توظيف (مشاركة) الألياف العضلية البطيئة الخلجة ويؤخر عملية توظيف الألياف العضلية السريعة الخلجة. وتشير البحوث المخبرية إلى أن التدريب البدني يزيد من نشاط إنزيم آلانين ترانس أمينيز (Alanine transaminase)، وهو الإنزيم المسئول عن تحويل حمض البيروفيك إلى آلانين.

ومن المعروف أن الأفراد المتدربين يقل مستوى تركيز حمض اللبنيك أثناء الجهد البدني دون الأقصى لديهم مقارنة مع غير المتدربين عند القيام بنفس الشدة من الجهد البدني. ولقد قام عالم فسيولوجيا الجهد البدني الدنماركي سالتن وزملاؤه بإجراء تجربة علمية تم خلالها تدريب إحدى الساقين تدريباً تحملياً دون الساق الأخرى، وأظهرت نتائج التجربة أن إنتاج حمض اللبنيك في الساق المتدربة كان أقل مما هو في الساق غير المتدربة، على الرغم من أن تدفق الدم واستهلاك الأكسجين كان متساوياً في كلا الساقين.



## التغذية والعتبة اللاهوائية:

تؤثر التغذية على مستوى العتبة اللاهوائية بالزيادة أو بالنقصان، ويعتقد أن مرد ذلك هو التغير الذي يحدث في حجم إنتاج ثاني أكسيد الكربون من جراء التغير في نوعية الغذاء. فزيادة تناول المواد الكربوهيدراتية الذي يؤثر بدوره على مستوى سكر الجلوكوز في الدم يؤدي إلى ارتفاع مستوى العتبة اللاهوائية، بينما خفض معدل تناول المواد الكربوهيدراتية يقود إلى خفض مستوى العتبة اللاهوائية. والمعروف أن زيادة مستوى سكر الجلوكوز في الدم يؤدي إلى تحفيز عملية التحلل اللاهوائي للجلوكوز مما يؤدي في النهاية إلى ارتفاع تركيز حمض اللبنيك في الدم، بينما يقود استنفاد محتوى جليكوجين العضلات إلى خفض تركيز حمض اللبنيك في الدم. ويظهر أيضاً أن تركيز الأحماض الدهنية في الدم يخفض من مستوى العتبة اللاهوائية، عندما يتم قياسها بواسطة تركيز حمض اللبنيك في الدم، ويعتقد أن مرد ذلك إلى أن ارتفاع تركيز الأحماض الدهنية في الدم أثناء الجهد البدني يؤدي إلى زيادة الاعتماد على أكسدة الدهون وبالتالي انخفاض الاعتماد على الكربوهيدرات كوقود، مما يقلل من تركيز حمض اللبنيك في الدم .

## نوع الألياف العضلية والعتبة اللاهوائية:

تشير العديد من الدلائل العلمية إلى أن الارتفاع في تركيز حمض اللبنيك في الدم ناتج من زيادة توظيف (مشاركة) الألياف العضلية السريعة الخلجة، ومن المعروف أن الألياف العضلية البطيئة الخلجة تمتلك قدرة عالية على الأكسدة الهوائية مقارنة بالألياف العضلية السريعة الخلجة. ويبدو أن هناك ارتباط وثيق بين نوع الألياف العضلية ونشاط إنزيم لاکتیک دي هیدروجینیز (LDH)، وهذا الإنزيم هو المسئول عن تحويل حمض البيروفيك إلى حمض اللبنيك. ومن المعلوم أن إنزيم لاکتیک دي هیدروجینیز يوجد في صورتين، أحدهما (H-LDH) تساعد على أكسدة حمض اللبنيك إلى حمض البيروفيك، والأخرى (M-LDH) تساعد على اختزال حمض البيروفيك إلى حمض اللبنيك، ولقد وجد أن الألياف العضلية البطيئة الخلجة تمتلك نشاط عال من صورة الحمض (H-LDH)، بينما تمتلك الألياف العضلية السريعة الخلجة نشاطاً عال من الصورة الأخرى (M-LDH) للحمض.