ا.م.د علاء الطياوي

الية ارتباط الهيموجلوبين بالاكسجين

الهيموغلوبين (Hemoglobin) : هو البروتين الرئيس المسؤول عن نقل الأوكسجين في الدم. يتكون من أربع سلاسل بروتينية (غلوبين) مرتبطة بأربع مجموعات هيم(Heme) ، تحتوي كل منها على ذرة حديد (Fe^{2+}) قادرة على الارتباط بجزيء أوكسجين واحد .(O_2) وبذلك يمتلك جزيء الهيموغلوبين القدرة على حمل أربعة جزيئات من الأوكسجين.

يمتاز ارتباط الأوكسجين بالهيموغلوبين بظاهرة **التعاون(Cooperativity)** ، حيث يؤدي ارتباط جزيء أوكسجين واحد إلى زيادة الألفة (Affinity) لبقية المواقع للارتباط بالأوكسجين، مما يفسر الشكل السيغمويدي لمنحنى التشبع بالأوكسجين.(Oxyhemoglobin Dissociation Curve)

عندما يرتبط الأوكسجين بالهيموغلوبين يتكوّن مركب **أوكسي هيموغلوبين (Oxyhemoglobin)**، وهي عملية عكسية:

- في الحويصلات الهوائية(Alveoli) ،حيث يكون الضغط الجزئي للأوكسجين مرتفعًا(104 ملم زئبق) يزداد ارتباط الأوكسجين بالهيموغلوبين.
- في الأنسجة الطرفية، حيث ينخفض الضغط الجزئي للأوكسجين (40ملم زئبق أو أقل) يحرر الهيموغلوبين الأوكسجين لتستخدمه الخلايا في العمليات الأيضية الهوائية
- إضافةً إلى دوره في النقل، يُعد الهيموغلوبين مسؤولًا عن إعطاء الدم لونه الأحمر المميز بسبب وجود عنصر الحديد. وتؤثر عوامل مثل الـ **pHتأثير بور (Bohr effect)** ودرجة الحرارة وتركيز ثاني أوكسيد الكربون على قدرة الهيموغلوبين على الارتباط بالأوكسجين أو تحرره، وهو ما يشكل أساس التكيف الفسيولوجي أثناء الجهد البدني.

ا.م.د علاء الطياوي

المعادلة:

$$Hb + O_2 \rightleftharpoons HbO_2$$

هيموجلوبين + أوكسجين ⇌ أوكسي هيموجلوبين

جزيئات الدم المكونة للهيموجلوبين

الهيموجلوبين: هو بروتين يقع داخل خلايا الدم الحمراء
البنية الرباعية: يتكون الهيموجلوبين من أربع وحدات فرعية، كل واحدة تحتوي على مجموعة هيم.
الهيم: هي حلقة كيميائية في كل وحدة فرعية من الهيموجلوبين تحتوي على ذرة حديد في مركزها
جزيئات الأكسجين: يرتبط جزيء الأكسجين بذرة الحديد في مجموع الهيم

عدد ذرات الحديد ودورها
أربع ذرات حديد: يحتوي كل جزيء هيموجلوبين على أربع مجموعات هيم، وبالتالي يحتوي على أربع ذرات حديد.
الحالة الأكسدية: يجب أن تكون ذرة الحديد في حالة الأكسدة الثنائية لكي تتمكن من الارتباط بالأكسجين.

الارتباط التعاوني: عند ارتباط أول جزيء أكسجين بذرة حديد واحدة، يحدث تغيير في تكوين الهيموجلوبين يسمح للذرة الثانية بالارتباط بسهولة أكبر. تزداد هذه الألفة مع ارتباط كل جزيء أكسجين إضافي، مما يسهل على الهيموجلوبين حمل أربع جزيئات من الأكسجين .

آلية الارتباط:
في الرئتين: في المناطق ذات الضغط الجزئي العالي للأكسجين مثل الرئتين، يزداد ارتباط الاكسجين بالهيموجلوبين
شغل المواقع: يشغل جزيء الأكسجين مواقع ارتباطه في مجموعات الهيم الأربع

تشبع الهيموجلوبين: عندما ترتبط جميع المواقع الأربعة، يُقال أن الهيموجلوبين مُشبع
التفكك في الأنسجة: في المناطق ذات الضغط الجزئي المنخفض للأكسجين (الأنسجة)، يحدث العكس، حيث يسهل تفكك جزيئات الأكسجين من الهيموجلوبين ليتم توفيرها للأنسجة.

العجز والدين الاوكيسجيني

في بداية لا يمكننا الفصل بين مصطلحين مهمين هما العجز الاكسوجيني و الدين الاكسوجيني فكل منهما مرتبط بالاخر ارتباط وثيق، حيث لا يمكن ان يحدث الدين الاكسوجيني الا بعد مرحلة العجزالاكسوجيني ان الجهد البدني يكون فيه استهلاك الاكسوجين من قبل الجسم في مستوى أقل مما تتطلبه العضلات من الاكسوجين بغرض إنتاج الطاقة اللازمة للجهد البدني، أي أن ما يستطيع الجسم توفيره من الاكسوجين للعضلات العاملة أقل من احتياجها الفعلي له، الأمر الذي يولد ما يسمى بالعجز الاكسوجين والملاحظ عندما تكون شدة الجهد البدني عالية، وبالتالي كان الطلب على الاكسوجين من قبل العضلات العاملة عاليا كان العجز الاكسوجين أشد وعند تمعننا في منحنى استهلاك الاكسوجين اثناء الجهد البدني المعتدل الشدة.

نلاحظ ان معدل استهلاك الاكسوجين يزداد بالتدريج حتى الوصول إلى مرحلة الاستقرار، عندها يكون معدل استهلاك الاكسوجين يوازي معدل استخدامه من قبل العضلات العاملة، وبالتالي نلاحظ تقلص العجز الاكسوجين شيئًا فشيئا أما عند القيام بجهد بدني مرتفع الشدة فوق مستوى العتبة اللاهوائية فالمشاهد أن استهلاك الاكسوجين يزداد بالتدريج أيضا حتى الوصول إلى التعب العضلي، بدون حدوث حالة استقرار لمعدل استهلاك الاكسوجين أما بعد التوقف عن الجهد البدني، فالملاحظ أيضا أن معدل استهلاك الاكسوجين لا يعود إلى مستوى الراحة مباشرة، بل يستغرق وقتا يقصر أو يطول حتى الوصول إلى مستواه في حالة الراحة.

ويعتمد ذلك الوقت على شدة الجهد البدني المبذول واللياقة البدنية للشخص إن مجموع حجم استهلاك الاكسوجين اثناء فترة الاسترداد من الجهد البدني الذي يزيد على معدل استهلاك الاكسوجين في الراحة يسمى بالدين الاكسوجيني، وهذه التسمية هي في الواقع تسمية قديمة، ويفضل بعض المختصين تسميته باستهلاك الاكسوجين في فترة الاسترداد الزائد عن مستوى

الاستهلاك في الراحة وعند القيام بجهد بدني مرتفع الشدة فإن مقدار الدين الاكسوجيني يصبح اكبر مما هو بعد الجهد البدني المعتدل الشدة.

مفهوم العجز الاكسوجيني

عرفنا مما سبق أن العجز الأكسجيني يمثل الفرق بين ما يتطلبه الجهد البدني من أكسجين وما يستطيع الجسم توفيره من الأكسجين، ويتم تغطية العجز الأكسجيني من عدة مصادر لا تعتمد على أخذ الأكسجين من قبل الرئتين ومن ثم نقله عبر الجهاز الدوري إلى العضلات العاملة، وتشمل تلك المصادر أنظمة الطاقة اللاهوائية والمخزون الأكسجيني في الدم والعضلات والمعروف أن العجز الأكسجيني يزداد كلما كان الجهد البدني عنيفا وقريبا من طاقة الفرد القصوى وتتمثل المصادر التي تشارك في تغطية العجز الأوكسجيني في التالي:

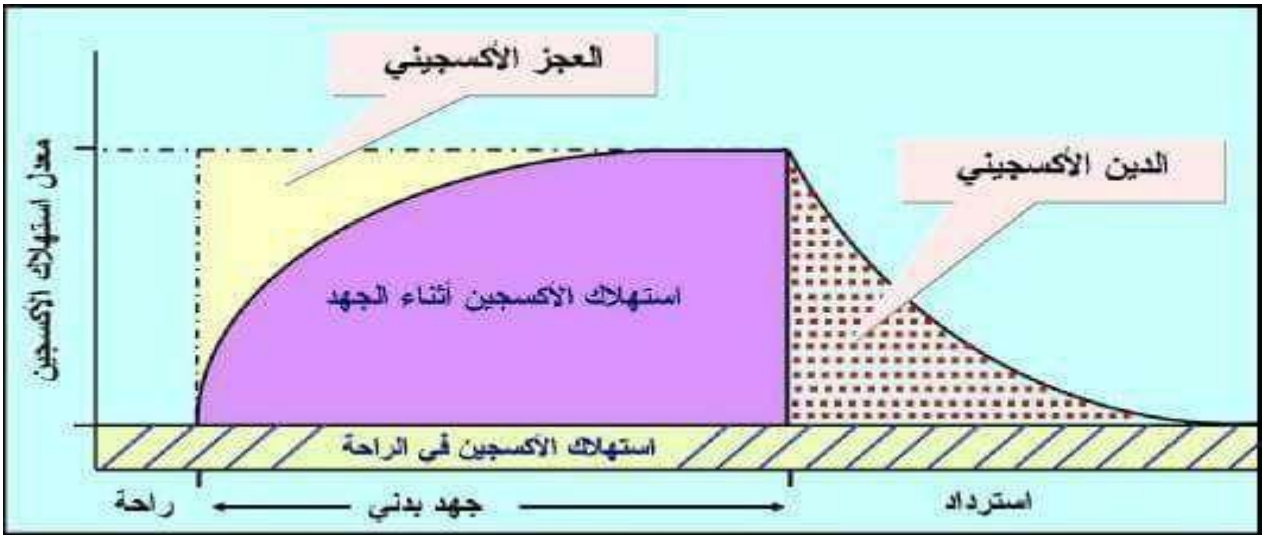
- أدينوسين ثلاثي الفوسفات المخزن في العضلات ATP
- فوسفات الكرياتين CP
- التحلل اللاهوائي للجليكوجين والجلوكوز المنتهيان بحمض اللاكتيك
- الأكسجين الملتصق بالميوجلوبين وهو يشبه الهيموجلوبين لكنه في العضلات بدلا من الدم
- الأكسجين الذائب في سوائل أنسجة الجسم

مفهوم الدين الاوكسجيني

الأكسوجين الإضافي الذي يجب أن يدخل إلى الجسم بعد أداء التمرينات القاسية لإعادة كافة أجهزة الجسم إلى حالتها الطبيعية يسمى " بالدين الأكسوجيني" والدين الأكسجيني يعني ايضا كمية الأكسجين المستهلكة أثناء فترة الاسترداد بما يزيد على معدل الاستهلاك في الراحة ومن الملاحظ أنه كلما كان الجهد البدني عنيفا كان كل من العجز الأكسجيني والدين الأكسجيني مرتفعا.يعزى وجود الدين الأكسجيني إلى الأسباب التالية :

-يستخدم بعض من الأكسجين الزائد عن مستوى الراحة في توفير طاقة لتعويض مستوى فوسفات الكرياتين الذي استخدم في فترة العجز.
-يستخدم بعض من الأكسجين الزائد عن مستوى الراحة في توفير طاقة لتحويل بعض من حمض اللاكتيت إلى جليكوجين في الكبد حيث ان تراكم حمض اللاكتيت في الدم كان نتيجة لاستخدام التحلل اللاهوائي للجليكوجين والجلوكوز الذي تم في فترة العجز.
-يستخدم بعض من الأكسجين الزائد عن مستوى الراحة في فترة الاسترداد لتعويض المخزون الأكسجيني الذي استخدم في فترة العجز الأكسجين الملتصق بميوجلوبين العضلات والذائب في سوائل أنسجة الجسم.

إن العوامل السابقة التي تؤدي إلى ارتفاع معدل استهلاك الأكسجين في فترة الاسترداد فوق مستوى الراحة كانت مصادر قامت بالمشاركة في تغطية العجز الأكسجيني، إلا أن العلماء لاحظوا بعد فترة من التجارب العلمية أن مقدار الأكسجين الزائد عن استهلاك الراحة في فترة الاسترداد اكبر حجما من الأكسجين المطلوب لتوفير طاقة لتلك العوامل التي شاركت في سد العجز الأكسجيني، واعتقدوا في بداية الأمر أن على الجسم أن يدفع طاقة تزيد على ما مقدار الطاقة التي استلفها عند حدوث العجز أي أكثر من الطاقة التي قامت بسد العجز لكن أتضح فيما بعد أن الاستهلاك الزائد من الأكسجين في فترة الاسترداد ليس كله في الواقع لتعويض الطاقة التي قامت بسد العجز فقط، بل أن جزء منه هو من أجل إعادة الاتزان الفسيولوجي للجسم من جراء هذا الجهد البدني العنيف، والدليل على ذلك أن الدين الأكسجيني يزداد مع زيادة شدة الجهد البدني المبذول لكن قد يتساءل البعض لماذا على الجسم أن يعيد اتزانه.



شكل أعلاه يوضح معدل استهلاك الأكسجين أثناء الجهد البدني المعتدل الشدة المستقر (Steady state) ويظهر العجز الأكسجيني في بداية الجهد البدني والدين الأكسجيني بعد الانتهاء منه(فترة الاسترداد)

ما هي العوامل التي تجعل استهلاك الأكسجين في فترة الاسترداد مرتفعا بشكل أكبر من الحاجة لتعويض العناصر التي قامت بسد العجز؟

الجواب على ذلك: بعد الجهد البدني لا تعود الوظائف الفسيولوجية مباشرة إلى مستواها ما قبل الجهد، مما يتطلب الأمر استهلاكا من الأكسجين أعلى من مستوى الراحة، وهذه العوامل أو الأسباب تتمثل في مايلي:

– ارتفاع مستوى استهلاك الأكسجين في فترة الاسترداد فوق ما يتطلبه الجسم في الراحة إلى ارتفاع درجة حرارة الجسم من جراء الجهد البدني، ومع ارتفاع درجة حرارة الجسم الداخلية فإن معدل الأيض في الجسم يرتفع مما يعني زيادة في استهلاك الأكسجين خلال فترة الاسترداد.

من الملاحظ أيضا أن معدل ضربات القلب وكذلك نتاج القلب لا يعودان إلى مستواهما في الراحة بعد التوقف من الجهد البدني مباشرة، مما يعني الحاجة للأكسجين لتوفير الطاقة اللازمة لعضلة القلب أثناء عملها في فترة الاسترداد.

- معدل التنفس وحجم التهوية الرئوية يبقيان مرتفعين لفترة من الوقت بعد التوقف من الجهد البدني، مما يعني أن العضلات التنفسية تعمل فوق مستوى الراحة، وبالتالي سوف تحتاج طاقة تأتي من استهلاك الأكسجين أثناء فترة الاسترداد.

- استمرار معدل الكاتوكولامين هرموني الإبينيفرين والنور إبينيفرين فوق مستواه في الراحة يقود إلى ارتفاع معدل الأيض في الجسم، وبالتالي إلى زيادة استهلاك الأكسجين فوق مستوى الراحة خلال فترة الاسترداد إن عمليات إعادة توازن أيونات الكالسيوم والبوتاسيوم والصوديوم بعد القيام بجهد بدني عنيف تحتاج إلى طاقة يتم توفيرها عن طريق الأكسجين، مما يجعل مستواه يزيد عن مستوى الراحة خلال فترة الاسترداد.

أنواع الدين إلاوكسجيني:

ينقسم الدين إلاوكسجيني إلى قسمين:

1-الدين إلاوكسجيني بدون اللاكتيك (Alactaicid Oxygen Debt)،يتم فيه استعادة تكوين مصادر للطاقة الفوسفاتية التي استنفدت.

2-الدين الأكسيجين لحامض اللاكتيك (Alactaicid oxygen Debt) يتم فيه التخلص من حامض اللاكتيك

ويلاحظ إن سرعة استهلاك الأوكسيجين خلال مدة الاستشفاء لا تبقى على مستوى ثابت، إذ أنها خلال أول دقيقتين إلى ثلاث دقائق تنخفض بدرجة كبيرة جدا ثم تنخفض تدريجيا بعد ذلك حتى تصل إلى المستوى الثابت .ويسمى الجزء الأول سريع الانخفاض في الاستهلاك الأوكسيجين في الدين إلاوكسجيني بدون حامض اللاكتيك ، بينما يكون الجزء الابطأ هو الدين إلاوكسجيني لحامض اللاكتيك، وقد أطاقت هذه التسمية لان الجزء الأول يمكن أن يتم بدون وجود حامض اللاكتيك ويكون الهدف منه تعويض مصادر الطاقة الفوسفاتية، بينما يكون الجزء الثاني أطول مدة ويرتبط بوجود حامض اللاكتيك نتيجة الجلكزة اللاهوائية.

ويبلغ الحد الأقصى للدين إلاوكسجيني بدون اللاكتيك ما بين ٢-٤ لترات للذكور غير المدربين بينما يزيد عن ذلك بالنسبة للاعبين المدربين، وعلى سبيل المثال فقد سجل لاعبو التجديف دينا اوكسيجينيا بدون اللاكتيك مقداره ٦ لترات ، ومما لاشك فيه إن لاعبي السرعة يحتاجون إلى

تنمية القدرة اللاهوائية المرتبطة بالدين إلاوكسجيني بدون اللاكتيك أكثر من غيرهم ، ويمكن للمدرب قياس كفاءتهم في ذلك باستخدام احد الاختبارات البسيطة كاختبار الوثب العمودي.
إما بالنسبة إلى الدين إلاوكسجيني لحامض اللاكتيك فانه يختلف في حجمه لدى اللاعبين تبعا لشدة أداء التدريبات المستخدمة، فنجد انه كلما زادت شدة الأداء زاد حجم الدين إلاوكسجيني اللاكتيكي والعكس صحيح، ويبلغ مقدار الحد الأقصى له ما بين ٥-١٠ لترات ، وهذا معناه زيادة مقدار الدين إلاوكسجيني اللاكتيكي عن غير اللاكتيكي حيث ان سرعة التخلص من حمض اللاكتيك بعد اداء جهد بدني عنيف تزداد عندما يستمر الفرد في اداء الجهد البدني عند شدة منخفضة بدلا من التوقف التام، حيث يعتقد ان سبب ذلك هو استخدام حمض اللاكتيك كوقود عند تلك الشدة المنخفضة من قبل عضلة القلب والألياف العضلية بطيئة الانقباض ، وبالتالي ينخفض تركيزه في العضلات والدم ، ولهذا ينصح بأداء جهد بدني منخفض الشدة (٤٠-٣٠% من الشدة القصوى) في فترة الاسترداد بدلا من التوقف التام، حيث يمكنه من التخلص من حمض اللاكتيك بسرعة اكبر

علاقة الدين إلاوكسجيني بالقدرة اللاهوائية القصوى:

تقاس القدرة اللاهوائية القصوى عادة بقدرة الجسم على العمل مع عدم كفاية الأوكسيجين كما تقاس بمقدار الحد الأقصى للدين إلاوكسجيني، وتتم هذه القياسات في الملاعب الرياضية وفي حمامات السباحة بان يطلب من اللاعب تكرار أداء مسافات قصيرة بأقصى سرعة مع تقليل أوقات الراحة البينية في كل مرة، وكمثال على ذلك بالنسبة للسباحين، يقوم السباح بقطع مسافة ٤x٥٠ مترا بأقصى سرعة وبراحة بينية مقدارها ٤٥-٣٠-١٥ ثانية على التوالي ، ويجمع هواء الزفير بعد أخر ٥٠ متر ويتم تحليله لتحديد كمية الأوكسيجين المستهلكة إثناء مدة استعادة الاستشفاء فيكون الناتج هو مقدار الدين إلاوكسجيني ، ومن ذلك يتضح إن الدين إلاوكسجيني يعد مقياسا لمستوى القدرة اللاهوائية القصوى للفرد.

وترتبط القدرة اللاهوائية القصوى بنتيجة قطع المسافات القصيرة بأسرع ما يمكن إذ يبلغ مقدار الدين إلاوكسجيني لمسافة ٥٠ متر سباحة ٧١ ،٨% و ٢٠٠ متر سباحة ٤٠٠ ،٦٣.٣% متر سباحة ٤٩.١%، وهذا يلاحظ إن مساهمة الدين إلاوكسجيني تقل مع زيادة القدرة اللاهوائية القصوى.ويتضح ذلك من المثال التالي: لكي يعدو لاعب مسافة ٤٠٠ متر بزمن مقداره ٤٤ ثانية فان سرعته يجب إن تكون بمعدل ٩ أمتار / ثانية، وحتى يتحقق ذلك فانه يحتاج إلى حجم أوكسجين مقداره ٣٧ لترا / دقيقة، وبما إن زمن العدو ٤٠٠ متر اقل من دقيقة إذن فالاستهلاك الكلي للأوكسجين المطلوب لقطع هذه المسافة يبلغ ٢٨ لترا خلال ٤٤ ثانية، ولا يستطيع اللاعب خلال هذه المدة الزمنية القصيرة استهلاك أكثر من ٣ لترات / ٤٤ ثانية، لذلك فان عجز الأوكسجين ٢٨-٣=٢٥ لترات، ونظرا لعدم قدرة اللاعب على توفير هذه الكمية من الأوكسجين للعضلات العاملة فانه يلجا إلى استخدام العمليات اللاهوائية لإنتاج الطاقة، وبذلك فان حجم الدين إلاوكسجيني الذي يقوم هذا اللاعب بتعويضه بعد عدو مسافة ٤٠٠ متر بزمن مقداره ٤٤ ثانية يبلغ ٢٥ لترا.وفي ضوء ما سبق يمكن تنظيم تدريبات السرعة وتشكيل ألاحمال فيها بناء على التحديد الدقيق للمدة الزمنية اللازمة لتعويض الدين إلاوكسجيني ومخزون الفوسفات، وتخلص الجسم من حامض اللاكتيك وتعويضه لمخزون الأوكسجين الذي استهلك إثناء الأداء.

أنواع الألياف العضلية

تنقسم الألياف العضلية إلى نوعين رئيسيين، مع وجود نوع ثالث يُعتبر خليطًا بينهما:

1. **الألياف العضلية بطيئة الانقباض(Type I – Slow-Twitch Fibers)**
2. **الألياف العضلية سريعة الانقباض(Type II – Fast-Twitch Fibers)** ، والتي تنقسم إلى :
   - **Type IIa (Fast Oxidative-Glycolytic Fibers – FOG)**
   - **Type IIx (Fast Glycolytic Fibers – FG)**

1.الألياف العضلية بطيئة الانقباض(Type I)

- تُعرف أيضًا باسم **الألياف الحمراء** بسبب احتوائها على كمية عالية من الميوغلوبين والميتوكندريا.
- تعتمد بشكل أساسي على **الأيض الهوائي (Aerobic metabolism)** في إنتاج الطاقة.
- **الميتوكندريا** فيها كثيرة، مما يسمح لها بإنتاج ATP بكفاءة عبر دورة كريبس والفسفرة التأكسدية.
- مقاومة للتعب وقادرة على العمل لفترات طويلة كما في رياضات **التحمل مثل الماراثون.**
- سرعة انقباضها بطيئة ولكنها تنتج **قوة منخفضة** نسبيًا مقارنةً بالألياف السريعة.

2.الألياف العضلية سريعة الانقباض(Type II)

- تُعرف أيضًا باسم **الألياف البيضاء** بسبب قلة محتواها من الميوغلوبين.
- تعتمد على **الأيض اللاهوائي (Anaerobic metabolism)** في إنتاج الطاقة، خاصة التحلل السكري.(Glycolysis)
- تحتوي على كمية أقل من الميتوكندريا مقارنةً بالألياف البطيئة.
- تقسم إلى نوعين رئيسيين:

أ. ألياف Type IIa سريعة التأكسد – السكرية

- مزيج بين الألياف البطيئة والسريعة، حيث تستخدم الأيضين الهوائي واللاهوائي لإنتاج ATP.

- توفر قدرة جيدة على التحمل مقارنةً بـType IIx ، لكنها لا تزال أسرع وأقوى من Type I.
- تُستخدم في رياضات السرعة والتحمل مثل سباق 800 متر.

ب.اليف سريعة السكرية Type IIa

- تتميز بأسرع معدل انقباض ولكنها أيضًا الأكثر عرضة للتعب.
- تعتمد بشكل أساسي على التحلل السكري اللاهوائي لإنتاج.ATP
- تنتج كميات كبيرة من حمض اللاكتيك، مما يؤدي إلى تعب سريع.
- مثالية للأنشطة التي تتطلب قوة عالية وسرعة قصيرة المدى مثل رفع الأثقال والعدو السريع (100 متر).

على ماذا تعتمد الألياف العضلية سريعة الانقباض في تحرير الطاقة؟

1. **التحلل السكري اللاهوائي:(Anaerobic Glycolysis)**

❖ المصدر الأساسي لإنتاج ATP في هذه الألياف.

❖ يتم فيه تفكيك الجلوكوز إلى بيروفيت، والذي يتحول إلى حمض اللاكتيك في غياب الأوكسجين.

❖ ينتج عن ذلك كمية سريعة ولكن قليلة منATP

2. **فسفرة الكرياتين:(Phosphocreatine System – PCr)**

❖ تستخدم الكرياتين فوسفات لتوليد ATP بسرعة عبر تفاعل فوسفات الكرياتين.

- ❖ يعتبر المصدر الرئيسي للطاقة خلال الثواني الأولى من الجهد عالي الشدة مثل رفع الأثقال أو العدو السريع.
- ❖ مخزونه محدود جدًا، لذلك لا يستمر لأكثر من 15–10ثانية.

3. **دور مخازن الجليكوجين:**

- ❖ تحتوي هذه الألياف على كميات عالية من الجليكوجين، مما يجعلها قادرة على إنتاج الطاقة بسرعة عند الحاجة.
- ❖ عند الاستمرار في الأداء، يتم استخدام الجليكوجين المخزن في العضلات لتحرير الطاقة بسرعة عبر التحلل السكري.

لماذا يكون الدين الأوكسجيني أعلى في الألياف العضلية سريعة الانقباض؟

1. الاستهلاك السريع للطاقة:

- ➢ الألياف السريعة تحتاج إلى طاقة كبيرة جدًا في فترة قصيرة، مما يؤدي إلى استنزاف مخزون ATP و PCr بسرعة كبيرة، مما يفرض حاجة ملحة لتعويض هذا الاستنزاف بعد التمرين.

2. الإنتاج العالي لحمض اللاكتيك:

- ➢ التحلل الجليكوليتيكي في الألياف السريعة يؤدي إلى تراكم حمض اللاكتيك بمعدلات كبيرة، ويجب التخلص منه بسرعة عبر تحويله إلى بيروفات أو جليكوجين أو طاقة في الكبد.

3. انخفاض قدرة الألياف السريعة على استخدام الأكسجين أثناء النشاط:

- الألياف السريعة تمتلك عددًا أقل من الميتوكوندريا وكثافة منخفضة من الشعيرات الدموية مقارنة بالألياف البطيئة، مما يجعلها تعتمد أكثر على الأيض اللاهوائي وتحتاج إلى تعويض سريع بعد النشاط.

4. ارتفاع معدل التحلل الجليكوليتيكي:

- التحلل الجليكوليتيكي في الألياف السريعة يحدث بمعدل أسرع 10 مرات من الألياف البطيئة، مما يزيد من الحاجة إلى الأكسجين بعد التمرين.

❖ ماذا يحدث خلال فترة التعافي؟

بعد انتهاء التمرين، تحدث عدة عمليات لاستعادة الألياف السريعة:

1. المرحلة السريعة للدين الأكسجيني (Fast Phase of EPOC – Excess Post-exercise Oxygen Consumption)
   - إعادة تخزين الفوسفوكرياتين (PCr).
   - إعادة أكسدة الميوجلوبين.
   - إزالة ثاني أكسيد الكربون الزائد.
2. المرحلة البطيئة للدين الأكسجيني (Slow Phase of EPOC)
   - تحويل حمض اللاكتيك إلى جلوكوز (دورة كوري).
   - استعادة توازن الحرارة داخل العضلة.
   - إعادة توازن الأيونات وإصلاح الأضرار الخلوية الطفيفة.

ويمكن تلخيص ما سبق بمجموعة من النقاط أهمها:

- الدين الأكسجيني يحدث أسرع في الألياف السريعة بسبب اعتمادها الكبير على الأيض اللاهوائي، مما يؤدي إلى استنزاف الفوسفوكرياتين وإنتاج حمض اللاكتيك بكميات كبيرة.

- الألياف البطيئة أقل عرضة للدين الأكسجيني لأنها تعتمد على الأيض الهوائي، مما يقلل من تراكم المخلفات الأيضية مثل حمض اللاكتيك.
- الرياضيون الذين يعتمدون على الألياف السريعة مثل عدائي السرعة ورافعي الأثقال يعانون من زيادة سريعة في الدين الأكسجيني مقارنة برياضيي التحمل مثل الماراثونيين.

هذا يوضح لماذا يحتاج الرياضيون الذين يعتمدون على الألياف السريعة إلى فترات استرداد أطول وأكبر استهلاك للأكسجين بعد التمرين مقارنة بالرياضيين الذين يعتمدون على الألياف البطيئة

مما سبق يمكن القول بانها تعتمد على عدة عوامل اهمها:

1. **اعتمادها على الأيض اللاهوائي:**

- ✓ تستخدم هذه الألياف التحلل السكري اللاهوائي لإنتاجATP ، مما يؤدي إلى تراكم حمض اللاكتيك.
- ✓ عند التوقف عن التمرين، يحتاج الجسم إلى إعادة التوازن الأيضي وإزالة حمض اللاكتيك وتحويله إلى جلوكوز أو بيروفيت داخل الكبد (دورة كوري).
- ✓ تتطلب هذه العمليات استهلاك كميات كبيرة من الأوكسجين بعد التمرين، مما يؤدي إلى دين أوكسجيني مرتفع.

2. **انخفاض كفاءة إنتاج:ATP**

- ✓ التحلل السكري اللاهوائي ينتج ATP بسرعة، لكنه أقل كفاءة مقارنةً بالأيض الهوائي.

- ✓ بعد التمرين، يحتاج الجسم إلى إعادة تخزين الجليكوجين والفوسفات الكرياتيني، مما يستلزم استهلاك المزيد من الأوكسجين.

3. **إعادة توازن الفسفرة التأكسدية:**

- ✓ بعد التمرين، تستمر الميتوكندريا في العمل لإعادة تكوين مخزون الطاقة، مما يزيد الحاجة إلى الأوكسجين.

الحد الاقصى لاستهلاك الاوكسجين (VO2MAX) :

ان معظم اراء العلماء تؤكد على ان الحد الاقصى لاستهلاك الاوكسجين يعتبر افضل مؤشر فسيولوجي للإمكانيات القصوى لعمل الجهاز الدوري التنفسي ودليل جيد على مقدار اللياقة البدنية , ويعبر عنه بالقدرة الهوائية القصوى . ويعرف الحد الاقصى لاستهلاك الاوكسجين بانه اقصى حجم من الاوكسجين المستهلك في الدقيقة لتر / ق عند اداء جهد بدني , وتستخدم لذلك اكثر من 50% من عضلات الجسم . ويمثل استهلاك الاوكسجين الذي يرمز له VO2 حجم الاوكسجين الذي تستخلصه انسجة الجسم من هواء الشهيق وفي حالة استهلاك الاوكسجين للاعب اثناء اقصى جهد بدني يمكنه القيام به فنحصل على استهلاك الاعب الاقصى للاوكسجين (VO2MAX).وتوجد هناك وسائل افضل لتقويم الوظائف الدورية التنفسية(التحمل الهوائي– والسعة الهوائية) هو قياس استطاعة الجسم على استهلاك الاوكسجين عند اقصى معدل للنبض ويطلق على الاختبارات التي تستخدم لهذا الغرض اسم : اختبارات الحد الاقصى لاستهلاك الاوكسجين ويعد استهلاك الحد الاقصى للأوكسجين افضل مؤشر فسيولوجي للإمكانية الوظيفية لدى الفرد دليلا جيدا على مقدار لياقته البدنية. ويمثل(VO2Max) اقصى قدرة للجسم على اخذ

ونقل الاوكسجين ومن ثم استخلاصه في الخلايا العاملة(العضلات). وهو يساوي اجرائيا حاصل ضرب اقصى انتاج للقلب(وهو كمية الدم التي يضخها القلب في الدقيقة) X حاصل ضرب اقصى فرق شرياني وريدي للأوكسجين وتشير الدلائل الى الحد الاقصى للاستهلاك الاوكسجين ما يأتي:

1-عدم زيادة استهلاك الاوكسجين عند زيادة شدة الحمل البدني.

2-زيادة معدل القلب من 180-185 ضربة/دقيقة.

3-زيادة نسبة التنفس(RQ) عن 101.

4-لا يقل تركيز حامض اللاكتيك في الدم من80-100 ملغرام.

يتم تسجيل الاستهلاك الاقصى للأوكسجين اما باللتر في الدقيقة وهذا ما يسمى بالاستهلاك المطلق او بالمليلتر لكل كغم من وزن الجسم في الدقيقة(مل, كغم, دقيقة) وهذا ما يسمى بالاستهلاك النسبي (نسبة الى وزن الجسم) والفرق بينهما ان الاستهلاك المطلق للأوكسجين هو مؤشر غير مباشر لحجم نتاج القلب او(حجم كمية الدم التي يضخها القلب في الدقيقة) وهو دليل جيد على قدرة الفرد على الاداء البدني عندما تكون القدرة القصوى لأعمال لا تتطلب حمل الجسم اما الاستهلاك النسبي فهو اكثر دقة في التعبير عن امكانية الفرد الهوائية وخاصة في الاعمال التي تتطلب حمل الجسم والجدير بالذكر ان الرجال اعلى من النساء في الاستهلاك الاقصى للأوكسجين ويعود ذلك الى امتلاك الرجال نسبة اعلى من العضلات وزيادة الكتلة الشحمية بالنسبة للنساء . ويتراوح معدل استهلاك الاوكسجين للشخص(2-3 لتر/دقيقة)حسب ما يذكره(بهاء الدين احمد سلامة ومحمد علي القط) ويصبح(3-6لتر/دقيقة) اثناء التمرينات ويتوقف ذلك على عدة عوامل منها(السن ,الجنس , مستوى اللياقة البدنية.....الخ)

والحد الاقصى لاستهلاك الاوكسجين للنساء يبلغ(3لتر/دقيقة) ويصل اعلى استهلاك في سن 14-17 سنة لهن بينما يصل الاستهلاك الى(4لتر/دقيقة)عند الرجال في سن (18-20 سنة)

ويعد تحديد مقدار الحد الاقصى لاستهلاك الاوكسجين مهما لكونه نتاجا لعدة عمليات فسيولوجية مهمة في الجسم منها عملية توصيل الاوكسجين الى العضلات ويشترك في هذه العملية كل من الجهاز التنفسي والجهاز الدوري والدم والعملية الثانية هي عملية استهلاك الاوكسجين بالعضلات

وهي العملية الاكثر اهمية وتعتمد على ما يحدثه التدريب في تركيب العضلة لكي تستطيع ان تمتص كمية اكبر من الاوكسجين وتستهلكها نتيجة زيادة ما بها من الهيموكلوبين والميتوكوندريا والشعيرات الدموية والانزيمات لذلك يعد مقياسا متكاملا لاهم اربعة اجهزة حيوية اثناء الاداء هي الجهاز التنفسي والدوري والدم والعضلات

الحد الاقصى والتدريب الرياضي :

وفي التدريب الرياضي يستعمل الحد الاقصى لاستهلاك الاوكسجين بالإضافة الى ما سبق في تحديد مستوى التدريب البدني المناسب للاعب ذلك ان قياسه يساعد على تحديد الشدة التدريبية المناسبة لما يمثله من ردود افعال لبعض اجهزة اللاعب الوظيفية

ويبين(حسين علي حسين) امكانية تحديد الشدة التدريبية من خلال نسبة استهلاك الاوكسجين ومعدل نبضات القلب في الدقيقة الواحدة وكما في الجدول(1) .

جدول (1)

يبين امكانية تحديد الشدة التدريبية طبقا لمعدل النبض ونسبة الحد الاقصى لاستهلاك الاوكسجين Vo2 Max

درجات شدة الحمل	معدل نبضات القلب في الدقيقة	نسبة استهلاك الاوكسجين Vo2 Max
الاقصى	اكثر من 190	%100
الاقل من الاقصى	180-190	%90
عالي	165	%75
خفيف	150	%60
قليل	130	%50

ويمكن قياس الحد الاقصى لاستهلاك الاوكسجين Vo2 Max بصورة مباشرة وفيها تستخدم اجهزة مكلفة الثمن ومعقدة او بصورة غير مباشرة من خلال استخدام اختبارات على اجهزة الدراجة الثابتة او حزام السير المتحرك او اختبار الخطوة للحصول على نتائج ومقارنتها بجداول او معادلات اعدت لهذا الغرض . كما ان الحد الاقصى لاستهلاك الاوكسجين مؤشر لكثير من الوظائف الفسيولوجية التي تتلخص في ما يلي :

1-كفاءة الجهاز الدوري والتنفسي في توصيل هواء الشهيق الى الدم

2-كفاءة عملية توصيل الاوكسجين الى الانسجة او يرتبط ذلك بحجم وعدد الكرات الحمراء وتركيز الهيموجلوبين وقدرة الاوعية الدموية على تحويل سريان الدم من الانسجة غير العاملة الى العضلات العاملة .

3-كفاءة العضلات في استهلاك الاوكسجين الى كفاءة عمليات التمثيل الغذائي وانتاج الطاقة .

ويمكن الاستفادة من العلاقة بين معدل سرعة القلب والحد الاقصى لاستهلاك الاوكسجين بمدى كفاءة عمليات نقل الاوكسجين الى الانسجة المتمثلة في الجهاز التنفسي والدم والجهاز الدوري , ويرتبط ايضا بعمليات استهلاك الاوكسجين في العضلات الهيكلية وكذلك عضلات التنفس وعضلة القلب .

العتبة اللاهوائية وحامض اللبنيك

تعنى مقدار شدة الجهد البدني (القدرة بالشمعة أو سرعة السير المتحرك) أو مقدار استهلاك الأكسجين عند المستوى الذي يسبق حدوث ارتفاع ملحو في تركيز حمض اللبنيك ، 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 ، 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.

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.

٢. إن العتبة اللاهوائية قابلة للتحسن من جراء التدريب البدني بصورة أكبر من التحسن الحاصل للاستهلاك الأقصى للأكسجين.

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، مثلا) 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.

العتبة اللاهوائية وحامض اللبنيك

تعنى 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 ، 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 ، 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.

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.

٢. إن العتبة اللاهوائية قابلة للتحسن من جراء التدريب البدني بصورة أكبر من التحسن الحاصل للاستهلاك الأقصى للأكسجين.

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، مثلا) 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.

قياس العتبة اللاهوائية

أولاً: عن طريق عتبة حمض اللبنيك ((Lactate threshold

يتم معرفة عتبة حمض اللبنيك بطرق عديدة تعتمد جميعها على مستويات تركيز حمض اللبنيك في الدم، وتستخدم عتبة حمض اللبنيك الموازنة لمستوى 4 ملي مول حيث يتم استبطاط السرعة (في حالة استخدام السير المتحرك) أو العبء الجهدي (في حالة استخدام الدراجة) أو استهلاك الأكسجين المقابل لتركيز 4 ملي مول من حمض اللبنيك في الدم ،وسيتم استخدام بروتوكول متدرج لكل من دراجة الجهد والسير المتحرك تبعاً لمستوى الاستهلاك الأقصى للأكسجين لدى المفحوص، ويتكون كل بروتوكول من أربع مراحل، كل مرحلة مدتها أربع دقائق، ويتم في نهاية كل مرحلة أخذ عينة من الدم الشعيري وقياس تركيز حمض اللبنيك فيها، وتركيز حمض اللبنيك

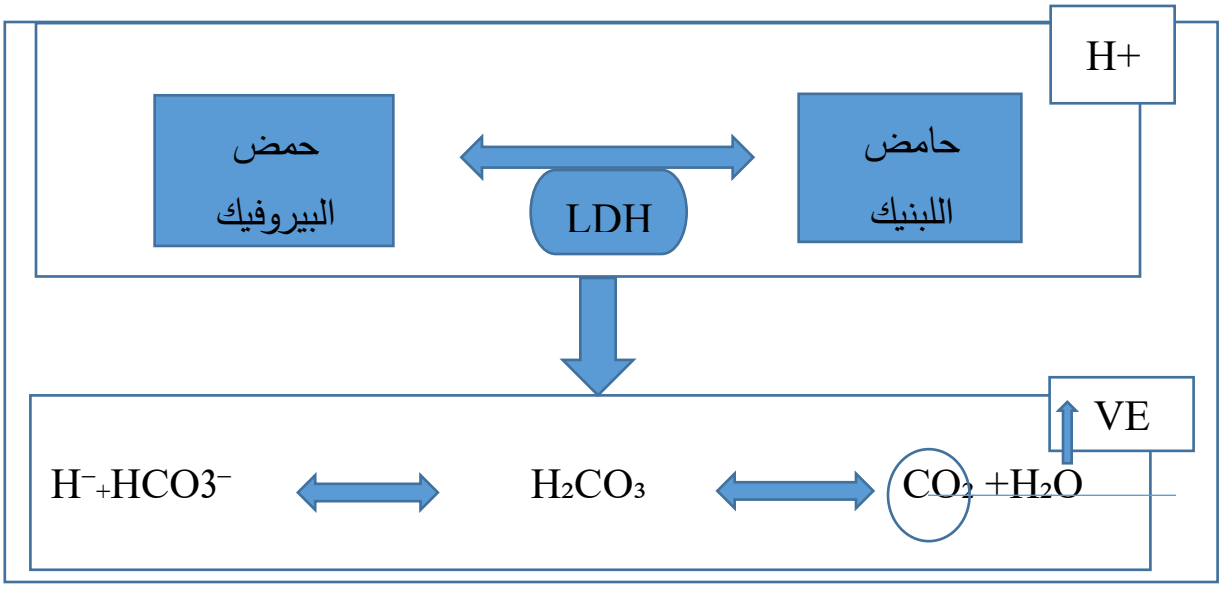
والعبء الجهدي (أو سرعة السير المتحرك) أو بين تركيز حمض اللبنيك ومعدل استهلاك الأكسجين

ثانياً: عن طريق عتبة التهوية الرئوية

وهي طريقة مباشرة لقياس العتبة اللاهوائية بواسطة متغيرات التبادل الغازي ،وهذا ما يُستخدم 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 يؤدي إلى زيادة إنتاج حمض اللبنيك، الأمر الذي يؤدي إلى ما يسمى التخمر اللبني(Lactic Acidosis).

وبالتالي تطلق أيونات الهيدروجين مما يؤدي الى زيادة من معدل الأس الهيدروجيني (اي زيادة الحموضة) (+ Hتؤدي إلى ارتفاع معدل الـ pH)أي زيادة الحموضة)، لذا فإن الجسم بمواجهة ضد هذه الحموضة (أي مكافحتها) عن طريق اتحاد أيونات البيكربونات مع أيونات الهيدروجين (+ H)فينتج عنه حمض الكربونيك الذي سرعان ما يتحول إلى ثاني أكسيد الكربون وماء.

(عتبة التهوية الرئوية)



الشكل اعلى: عتبة التهوية الرئوية زيادة أيونات الهيدروجين (+ H)بفعل ارتفاع تركيز حمض اللبنيك تؤدي إلى قيام الجسم بمحاولة ضد الحموضة، الأمر الذي ينتج عنه زيادة إنتاج ثاني أكسيد الكربون ومن ثم زيادة حجم التهوية الرئوية (VE)

أن النتيجة هي بالطبع زيادة معدل إنتاج ثاني أكسيد الكربون (من مصدر ليس له علاقة بالتنفس الخلوي ، أي ليس، له علاقه ب عمليات إنتاج الطاقة في الخلية، التي يتم خلالها استخدام الاوكسجين بغرض الحصول على الطاقة ، وإنتاج ثاني اكسيد الكربون كمحصلة لعملية التنفس الخلوي).
إن زيادة معدل إنتاج ثاني أكسرد الكربون بفعل محاولة الجسم صد الحموضة تودي إلى ارتفاع ضغط ثاني اكسيد الكربون في الدم، مما ينبه مركز التحكم فى التنفس في المخ، الذي بدورة يحفز عملية التنفس فيزداد حجم التهوية الرئوية (من أجل طرد الكمية الزائدة من CO_2) الأمر الذي يستدل من خلالها على حدوث العتبة اللاهوائية

الحدود الأعتيادية للعتبة اللاهوائية

وتشير نتائج الدراسات عموما إلى أن مستوى العتبة اللاهوائية لدى الأفراد الأصحاء غير لرياضيين يحدث عند معدل من استهلاك الأكسجين يتراوح ما بين ١.٢ لتر في الدقيقة لدى الذكور وحوالي ٠٠٨ لتر في الدقيقة لدى الإناث ، بينما يتراوح مستوى استهلاك الأكسجين 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 للأكسجين لدى الرجال الأصحاء غير المتدربين تتراوح ما بين ٥٣ % في العشرين من العمر إلى ٥٨ % في السبعين من العمر.
ومن الملاحظ أيضاً أن العتبة اللاهوائية لدى الصغار تعد أعلى مما هي لدى الكباركنسبة من الاستهلاك الأقصى للأكسجين، سواء كانوا رياضيين أم غير رياضيين