


محاضرة في مادة الفسلجة لطلبة الدكتوراه 

الاستجابة التنفسية والتكيفات المزمنة

ا. د غصون فاضل هادي

ا. د اخلاص حسين دحام

يُعدّ الجهاز التنفسي حلقة أساسية في تلبية متطلبات الجسم الأيضية أثناء النشاط البدني، من خلال ضمان إمداد كافٍ من الأوكسجين وإزالة ثاني أكسيد الكربون. تختلف الاستجابات التنفسية الحادة أثناء التمرين عن التكيفات المزمنة الناتجة عن التدريب طويل الأمد. وفهم هذه الاستجابات يُعدّ ضرورياً لتفسير الأداء الرياضي وتصميم برامج التدريب الفعالة.

يبلغ معدل التنفس في الدقيقة الواحدة اثناء الراحة 12 مرة اذ (16- 18 مرة اذ دقيقة) وهذا المعدل ناتج من تكرار عمليتي الشهيق والزفير الذي يكفي لتجهيز الاوكسجين الضروري للقيام بالأفعال الحيوية اثناء الاداء الرياضي وذلك لزيادة غاز ثنائي اوكسيد الكربون كنتيجة لاستهلاك الاوكسجين . وان العامل المسيطر ليس الحاجة الى الاوكسجين ولكن زيادة تركيز ثنائي اوكسيد الكربون في الدم الذي يؤدي الى تنفس اعمق واسرع حيث يرتفع ضغط غاز ثنائي اوكسيد الكربون الى اكثر من 40 ملم.ز فيؤدي الى تنفس اسرع مما يؤدي الى جلب كمية اكبر من الاوكسجين ليغطي الحاجة .

الاستجابات التنفسية الحادة أثناء التمرين

1. التهوية الرئوية (VE)

- في الراحة: 6-8 لتر/دقيقة.
- في التمرين المتوسط: 60-80 لتر/دقيقة.
- في التمرين الأقصى (لدى الرياضيين): قد تصل إلى 120-200 لتر/دقيقة.

الآلية:

- زيادة الحجم الجاري (VT) (هو حجم الهواء الداخل والخارج من الرئتين بدون جهد إضافي) ، وزيادة في معدل التنفس (f) (عدد مرات التنفس في الدقيقة الواحدة).
- في بداية التمرين: استجابة عصبية سريعة من القشرة الحركية والمستقبلات الحسية.
- في حالة الاستقرار: يتحكم فيها الجهاز الكيميائي (مستقبلات CO_2 , O_2 , pH).

2. استهلاك الأوكسجين (VO_2)

- يزداد بشكل خطي مع شدة التمرين حتى الوصول إلى VO_2max .
- يرافقه زيادة في الفرق الشرياني-الوريدي للأوكسجين ($a-vO_2$ diff).

3. إنتاج ثاني أكسيد الكربون (VCO_2)

- يزداد بما يتناسب مع معدل الأيض.
- في الشدة العالية، يزداد CO_2 بشكل إضافي نتيجة معادلة حامض اللاكتيك بالبيكربونات.

4. العتبة التهوية (Ventilatory Threshold)

- هي النقطة التي يبدأ فيها الجسم بالاعتماد بشكل أكبر على التنفس اللاهوائي أثناء التمرين التصاعدي حيث تزداد التهوية بشكل غير متناسب مع VO_2 .
- ترتبط ببداية تراكم اللاكتات (العتبة اللاهوائية).

وقد لوحظ ان ممارسة النشاط الرياضي بصورة منتظمة تؤدي الى حدوث تغيرات وظيفية ايجابية في الجهاز التنفسي وهذه التغيرات هي :

- 1- نمو في عضلات الصدر
- 2- زيادة في اسطح الرئتين
- 3- تطوير حجم الرئتين مما يؤدي الى عمق في التنفس
- 4- كفاءة في عضلات الصدر مما يؤدي الى اتساع القفص الصدري فيحسن ويزيد من عملية تبادل الغازات بين الدم والحويصلات الهوائية .
- 5- الاقتصاد في حركات التنفس بسبب زيادة السعة الحيوية مما يؤدي الى زيادة القدرة الجسم على التهوية الرئوية القصوى الناتجة عن كبر حجم هواء التنفس في المرة الواحدة وزيادة معدل التنفس .

. وهذا تتكون التكيفات التنفسية المزمنة مع التدريب وهي :

1. التغيرات البنيوية

- أحجام الرئة: زيادة طفيفة في السعة الحيوية (VC) والسعة الكلية (TLC) عند الرياضيين.
- قدرة الانتشار: تحسن في كفاءة استخدام السطح السنخي-الشعيري.

2. التغيرات الوظيفية

- في الراحة: انخفاض معدل التنفس وزيادة الحجم الجاري → تنفس أكثر كفاءة.
- في الجهد دون الأقصى: انخفاض التهوية عند شدة معينة (انخفاض كلفة التنفس).
- في الجهد الأقصى: ارتفاع VE_{max} التهوية القصوى (هو أقصى كمية من الهواء يمكن للشخص استنشاقه واستخراجه في دقيقة واحدة بجهد قصوي) بشكل بسيط متوافق مع زيادة VO_{2max} .

3. تحسين تبادل الغازات

- زيادة كفاءة انتشار الأوكسجين بفضل زيادة التوسع الشعيري الرئوي.
- تحسن نقل الأوكسجين عبر الهيموغلوبين (مع انزياح منحنى تفكك الأوكسيهيموغلوبين).

4. تكيف عضلات التنفس

- تقوية الحجاب الحاجز والعضلات الوربية.
- التدريب التنفسي يقلل من التعب ويؤخر محدودية التنفس عند رياضيي التحمل.

5. تنظيم التوازن الحمضي-القاعدي

- تحسن قدرة الجسم على معادلة حامض اللاكتيك.
- تأخر وصول العتبة التهوية وزيادة تحمل الجهد العالي.

. مقارنة الاستجابات الحادة والمزمنة

جدول (1): مقارنة الاستجابات التنفسية الحادة والتكيفات المزمنة

المتغير	الاستجابة الحادة (أثناء الجهد)	التكيف المزمن (مع التدريب)
التهوية (VE)	↑ سريع مع زيادة الشدة	↓ عند نفس الشدة، ↑ بالكفاءة
الحجم الجاري (VT)	↑ مع الجهد	↑ في الراحة والجهد
معدل التنفس (f)	↑ ملحوظ	↓ في الراحة، ↑ معتدل في التمرين
قدرة الانتشار	↑ فوري	↑ بسبب التوسع الشعيري
عضلات التنفس	↑ الجهد والتعب	↑ القوة ومقاومة التعب
VO ₂ max	يصل للحد الأقصى	↑ تدريجي مع التدريب

ان القيام باي مجهود عضلي مهما كانت درجته سيؤدي الى زيادة معدل التنفس لدى الشخص , فاذا كان هذا المجهود متوسط الشدة فان معدل التنفس سيرتفع في البداية ثم يقل . بعدها يستمر بانتظام ولفترة معينة لذلك فان التبادل الغازي سيكون منتظما داخل الجسم وعند قيام الشخص برفع الشدة لمجهود فان معدل التنفس سيرتفع مرة اخرى ثم يعود الى انظام ايضا هذا الانتظام يسمى (الحالة الثابتة) او المنتظمة وان سرعة بلوغ هذه الحالة تدل على كفاءة الجهاز التنفسي لدى الرياضي وقدرة جسمه على التكيف الوظيفي حيث تقل عندئذ سرعة التنفس وتنظم ضربات القلب ويكون التنفس سهلا بسبب استهلاك العضلات القليل للأوكسجين

عند اداء الجهد الرياضي تزداد سرعه التنفس , ولكن هذه الزيادة تختلف من فردالى اخر وتختلف ايضا حسب نوع النشاط الممارس ومدته ادائه , حيث يرافق ذلكعدة تغييرات في وظائف الجهاز التنفسي اهمها :.

التغيرات التي تحدث في الجهاز التنفسي عند القيام بمجهود متوسط الشدة ولمده طويله

في حاله النشاط البدني المتوسط الشده كالمشي السريع لمده طويله تزداد سرعهالتنفس ثم يقل معدله وينتظم لفته معينه تسمى الفترة الثابتة , ويصل الفرد اليهذه الحالة بعد مرور 4-5 دقائق والفترة الثابتة هي الفترة الزمنية اللازمة لتكيفالجهازين الدوري والتنفسي (اي تنظيم عمليه تبادل الغازات في الرئتين وتزويدالعضلات العامله بما تحتاجه من الاوكسجين) .

حيث تثبت في الفترة الثابتة :

- سرعه الدورة الدمويه ,

- درجه تركيز حامض اللبنيك في الدم ,

- درجه حراره الجسم ,

يبقى الجسم في هذه الحالة (الثابتة تقريبا) طوال فتره النشاط مع ملاحظه تكويندين اوكسيجيني قليل, وبعد انتهاء النشاط وعوده الجسم الى حالة الراحة يعوضهذا الدين حيث في هذه الفترة تزداد سرعه التنفس .

ان ثبات كميهِ الاوكسجين خلال الدقيقه لا تعنى وصول اللاعب الى الوضع الثابت, فقد يكون ثبات كميهِ الاوكسجين دليل عدم قدره اللاعب على استخلاص كميهِ اكبرمن الاوكسجين, ويمكن التأكد من ذلك بزياده شدة المجهود فاذا ازداد معدل التنفسليتناسب مع احتياجات النشاط الجديد هذا يدل على وصول الفرد الى الحالة الثابتة, واذا ما بقيت كميهِ الاوكسجين كما هي دل ذلك على ان اللاعب قد وصل الناقصى كميهِ من الاوكسجين(VO_2max) يمكنه الحصول عليها, وان هذه الحالة لاينطبق عليها ما يعرف بالحالة الثابتة , حيث لا يزداد معدل التنفس مع زياده الجهدالرياضي وهذا يدل على ان هذا اقصى معدل لا داء مثل هذا المجهود .

ولكي يصل الفرد الى الفترة الثابتة او الفترة المنتظمة يجب ان يحدث تكيف فسيولوجي لأجهزة الجسم المختلفه , والتي تعمل كوحده واحده تستطيع أداء النشاط الرياضي وسرعه الوصول الى الفترة الثابتة تتوقف الى حد كبير على كفاءة الرياضي الوظيفية والتدريب المنتظم .

ان الحد الاقصى لاستهلاك الاوكسجين Vo_2max كما ذكره كوستيل " انه اكبر كميهِ من الاوكسجين يستطيع الفرد استهلاكه عند قيامه بجهد بدني حركي يستلزم نسبة كبيرة من الكتلة العضلية الكلية " ويذكر استراند و رودولف " بانه اكبر كميهِ من الاوكسجين المستهلك من قبل الفرد خلال الجهد البدني القصوي مقاسا عن مستوى سطح البحر " .

الاستهلاك القصوى للاوكسجين (VO_2max)

يعد القدرة الهوائية القصوى هي الحد الاقصى لاستهلاك الاوكسجين الذي ينقل للجسم ويتم استهلاكه والذي ينقل للجسم استهلاكه والذي يحصل عليه الجسم من خلال الهواء الخارجي , ويوجه العضلات التي تقوم باستهلاكه ويعد عنه الحجم الاقصى للاوكسجين الذي يمكن ان يستهلكه الجسم في وحده زمنية معينه , ويعتبر الحد الاقصى لاستهلاك الاوكسجين (VO_2max) مؤشر لكثير من العمليات الفسيولوجية منها كفاءة الجهاز الدوري التنفسي في توصيل هواء الشهيق الى الدم

وكذلك كفاءة عمليات توصيل الاوكسجين الى الانسجة ويرتبط ذلك بعدد كريات الدم الحمراء وتركيز الهيموكوبين وكذلك مقدرة الاوعية الدموية على نقل الاوكسجين الى العضلات العاملة بالاضافة الى كفاءة العضلات في استهلاك الاوكسجين .

أهمية اختبار الحد الأقصى لاستهلاك الاوكسجين (VO_2max):

يعد اقصى استهلاك للاوكسجين من أهم الاختبارات الوظيفية التي يعتمد عليها في اللياقة البدنية ويعد كمؤشر مهم لتحديد الكفاءة البدنية لان عملية استهلاك الاوكسجين من قبل انسجة الجسم تتم من خلال عملية أكسدة للغذاء وبوجود الاوكسجين فكلما كان الجسم اقل حركة كانت عملية حرق الغذاء بوجود ال O_2 قليلة وكلما ازدادت الحركة الى مستوى التدريب الذي يؤدي الى أكسدة كمية كبيرة من الطاقة تزداد عملية استهلاك O_2 واختبار VO_2max هو اقصى استهلاك للاوكسجين بالنسبة للجسم يتم أخباره بطريقتين المباشرة والطريقة غير المباشرة وهذه الطريقة تتم بمعادلة عن طريق أستخراج قيمة (PWC_{170}) كما ويعتبر VO_2max مؤشر لكثير من العمليات الفسيولوجية ومنها كفاءة الجهاز الدوري التنفسي .

وهناك علاقة طردية بين الاستهلاك القصوي للاوكسجين وعدد ضربات القلب ويتم تطوير هذا المؤشر من خلال اداء مجهود بدني لمدة اطول للاوكسجين من 3-5 دقائق وبشدة 80-90% وتصل معدل ضربات القلب الى 180ض/د .

ان هذا الاختبار مؤشر لكثير من العمليات الفسيولوجية منها كفاءة الجهاز الدوري والتنفسي في توصيل هواء الشهيق الى الدم بعدد كريات الدم الحمراء وكذلك تركيز الهيموكلوبين ومقدرة الاوعية الدموية على نقل الاوكسجين الى العضلات العاملة فضلا عن كفاءة العضلات في استهلاك الاوكسجين .

تعتبر القدرة الهوائية القصوى هي الحد الاقصى لاستهلاك الاوكسجين الذي يمكنالجسم استهلاكه والذي يحصل عليه الجسم من خلال الهواء الخارجي ويوجه للعضلات التي تقوم بأستهلاكه ويعبر عنه بالحجم الاقصى للاوكسجين ويستهلكه الجسم في وحده زمنية معينة ويعتبر vo_2max مؤشر لكثير من العمليات الفسيولوجية منها كفاءة الجهاز الدوري و التنفسي .

طرق القياس

يمكن قياس الحد الاقصى لاستهلاك الاوكسجين بطريقتين

1- الطريقة المباشرة :

يعد قياس الحد الاقصى لاستهلاك الاوكسجين (vo_2max) أهم المقاييس المقننة لتحديد مقدار العبء الفسيولوجي للحمل البدني إلا أن قياسه يتطلب ضرورة استخدام المعمل

(المختبر) لقياس الحد الاقصى لاستهلاك الاوكسجين (vo_2max) .

2- الطريقة غير المباشرة:

نظرا لصعوبة تنفيذ الطريقة المباشرة لاختبار الحد الاقصى لاستهلاك الاوكسجين هناك عدة انواع لقياس (vo_2max) حيث يتم استخدام اختبار الخطوة ($step test$) وذلك لسهولة أداءه من قبل الرياضي وهناك علاقة ارتباط بين مؤشر الكفاءة الوظيفية (pwe_{170}) وقيمة الحد الاقصى لاستهلاك الاوكسجين (vo_2max) باستخدام المعادلات الإحصائية حيث وضع العالم الروسي (karpman) معادلة لاستخراج قيمة الحد الاقصى لاستهلاك الاوكسجين (VO_{2MAX}).

يتضح مما سبق أن تأثير التدريب الرياضي على الجهاز التنفسي يكمن في :

- زيادة السعة الحيوية وخاصة في الألعاب التي تتطلب كفاءة الجهاز الدوري التنفسي كما في السباحة والعدو لمسافات طويلة وكرة القدم وتزداد السعة الحيوية حسب أنواع النشاط الرياضي في التدريب المنتظم .

- الاقتصادية في عملية التنفس وزيادة في امتصاص الأوكسجين من قبل جدران الحويصلات الهوائية وإن معدل سرعة التنفس الرياضيين الممارسين وخاصة رياضات المطاولة يتصف ببطء التنفس مقارنةً بغير الرياضيين .

- تحسن القابلية القصوى لإستهلاك الأوكسجين .

أما التغيرات الدائمة في الجهاز التنفسي فهي :

أ) زيادة مساحة السطح التنفسي الرئتين وهذا يعني زيادة مساحة منطقة التقابل بين الحويصلات الرئوية والدم .

ب) زيادة قوة عضلات التنفس الداخلية والخارجية الموجودة بين أضلاع القفص الصدري مما يؤدي إلى توسيع القفص الصدري للخارج لإتاحة الفرصة للرئتين بالتمدد لاستقبال أكبر كمية من الهواء والضغط عليه للداخل لترح أكبر كمية من الهواء للخارج .

ج) تحسن مرونة نسيج الرئة حيث كلما كانت مرونة نسيج الرئة و خاصة الامتداد عالية كلما استوعبت الرئتان كمية أكبر من الهواء وزادت كمية الهواء المطروح للخارج.

د) زيادة مساحة شبكة الشعيرات الدموية في الرئتين .

هـ) زيادة قدرة الحويصلات الرئوية على استيعاب أكبر كمية من الأوكسجين في الرئتين ونقله إلى الدم مما يؤدي ذلك إلى سرعة تبادل الأوكسجين و ثاني أكسيد الكربون من الرئتين إلى الدم ومن الدم إلى الرئتين لترحها خارجاً .

و- تحسن كفاءة أنسجة الخلايا العضلية في امتصاص الأوكسجين من الدم وبالتالي تحسن عمليات التمثيل الغذائي داخل العضلات وسرعة إنتاج الطاقة نتيجة لزيادة فعالية الأنزيمات المؤكسدة المواد الغذائية المخزنة في الخلايا العضلية .

التغيرات التي تحدث في الجهاز التنفسي عند القيام بمجهود مرتفع الشدة

يحدث هذا في سباق الجري لمسافات قصيرة وفي السباحة لمسافة قصيرة , وان معدل التنفس يزداد ولا يعود الى معدله الطبيعي , الا بعد فتره من الزمن في نهاية النشاط , وذلك بسبب الزيادة الكبيرة في معدل التنفس لكي تمد العضلات بالأوكسجين اللازم للقيام بمثل هذا المجهود في فتره زمنية قصيره , ولكن الجسم لكي يسد النقص الأوكسجين الحاصل عن طريق استهلاك جزء من اوكسجين العضلات الموجودة في هيوجلوبيين العضلات (المايوكلوبين) ونتيجة ذلك النقص الذي يحدث في المايوكلوبين يتجمع حامض اللبنيك في تلك العضلات والتي تحتاج بعد الانتهاء من المجهود الى الاوكسجين للتخلص من الحامض المتجمع فيها.

ان كميته الاوكسجين اللازمة للنشاط-العنيف-السريع-اكثر مما يمكن ان يحصل عليها الفرد خلال الفترة الزمنية التي يستغرقها النشاط , والفرق في كميته الاوكسجين المطلوبة للمجهود البدني وكميته الاوكسجين التي يتم الحصول عليها عن

طريق التنفس أثناء النشاط تسمى بالدين الأوكسجين وتعوض هذه الكمية في البداية من المايوكلوبين في العضلات , وبعد انتهاء المجهود تعوض عن طريق التنفس , وهذا ما يفسر استمرار زيادة سرعة التنفس لفترة طويلة بعد الانتهاء من القيام بالمجهود الرياضي.

ان قابلية الرياضي على اداء هذه النشاطات يتوقف على عاملين هما :-

- اقصى كمية اوكسجين يتمكن الفرد استخلاصها من الرنتين الى الدم في الدقيقة وهذا يتوقف على كفاءة الجهاز التنفسي وجهاز الدوران والدم .

- اقصى كمية دين وكسجيني يمكن الفرد ان يحصل عليه

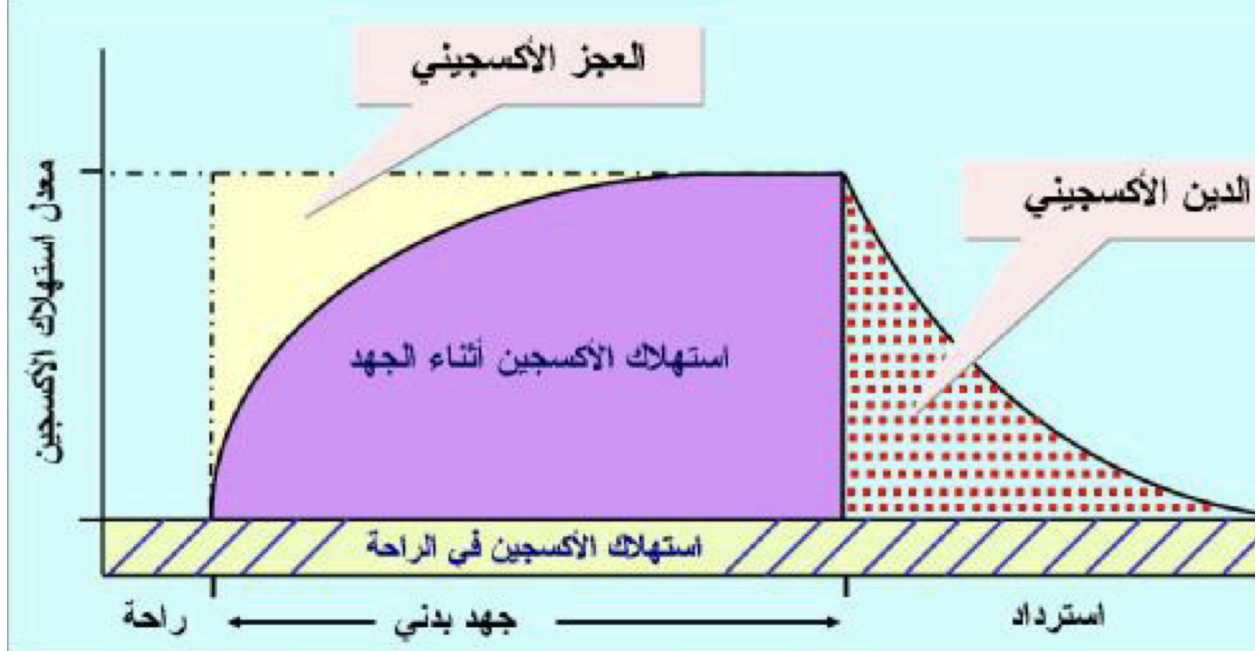
يزداد هذان العاملان بالتدريب المنتظم , ويمكن عن طريق معرفتهما تحديد مقدار الجهد الذي يستطيع الرياضي ان يقوم به , وكذلك تحديد الفترة الزمنية التي يستطيع الرياضي ان يستمر في هذا الأداء الرياضي. فإذا تمكن اللاعب استخلاص 4 لترات من الاوكسجين من الدم في الدقيقة الواحدة وفي نفس الوقت يمكن أن يحصل على دين اوكسجين قدره 10 لترات فانه اذا اشترك في سباق بسرعه تتطلب 5 لترات من الاوكسجين في الدقيقة , انه يجب ان يستدين لتر واحد من الاوكسجين في الدقيقة وبذلك يمكن ان يتحمل هذا المجهود لمدة عشر دقائق , فإذا زاد هذا اللاعب من سرعته بشكل مضاعف لما كانت عليه اصبح يحتاج الى 10 لترات في الدقيقة بدلا من 5 لترات اي انه يحتاج الى 6 لتر دين أوكسجين في الدقيقة وبذلك نجد ان أقصى مدة للقيام بهذا النشاط الجديد $10/6 = 2/3$, 1 دقيقة .

مفهوم العجز والدين الأوكسجيين

في بداية الجهد البدني يكون استهلاك الأوكسجين من قبل الجسم في مستوى أقل مما تتطلبه العضلات من أكسجين بغرض إنتاج الطاقة اللازمة للجهد البدني، أي أن مايستطيع الجسم توفيره من أكسجين للعضلات العاملة أقل من احتياجها الفعلي له، الأمر الذي يؤدي ما يسمى بالعجز الأوكسجيني. والملاحظ أنه كلما كانت شدة الجهد البدني عالية (وبالتالي كان الطلب على الأوكسجين من قبل العضلات العاملة عالياً) كان العجز الأوكسجيني أشد. وعند تمعنا في منحني استهلاك الأوكسجين أثناء الجهد البدني المعتدل الشدة كما هو موضحاً في الشكل البياني رقم (1)، نلاحظ أن معدل استهلاك الأوكسجين يزداد بالتدرج حتى الوصول إلى مرحلة الاستقرار، عندها يكون معدل استهلاك الأوكسجين يوازي معدل استخدامه من قبل العضلات العاملة، وبالتالي نلاحظ تقلص العجز الأوكسجيني شيئاً فشيئاً. أما عند القيام بجهد بدني مرتفع الشدة (فوق مستوى العتبة اللاهوائية)، فالمشاهد أن استهلاك الأوكسجين يزداد بالتدرج أيضاً حتى الوصول إلى التعب العضلي، بدون حدوث حالة استقرار معدل استهلاك الأوكسجين. أما بعد التوقف عن الجهد البدني، والملاحظ أيضاً أن معدل استهلاك الأوكسجين لايعود إلى مستوى الراحة مباشرة، بل يستغرق وقتاً يقصر أو يطول حتى الوصول إلى مستواه في حالة الراحة، ويعتمد ذلك الوقت على شدة الجهد البدني المبذول واللياقة البدنية للشخص.

ان مجموع حجم استهلاك الأوكسجين أثناء فترة الاسترداد من الجهد البدني الذي يزيد على معدل استهلاك الأوكسجين في الراحة يسمى بالدين الأوكسجيني، ويفضل بعض المختصين تسميته باستهلاك الأوكسجين في فترة الاسترداد الزائد عن والذي يرمز له (Excess post-exercise O2 consumption) مستوى الاستهلاك في الراحة

وعند القيام بجهد بدني مرتفع الشدة فإن مقدار الدين الأوكسجيني يصبح (EPOC) اختصاراً. أكبر مما هو بعد الجهد البدني المعتدل الشدة.



شكل رقم (١): معدل استهلاك الأوكسجين أثناء الجهد البدني المعتدل الشدة المستقر

ويظهر العجز الأوكسجيني في بداية الجهد البدني والدين الأوكسجيني بعد الانتهاء منه (يوضح الشكل ما يلي)

1. الراحة (Rest):
يكون استهلاك الأوكسجين في المستوى الأساسي المطلوب للوظائف الحيوية فقط.
2. بداية الجهد البدني (Exercise Onset):
عند بدء التمرين، يحتاج الجسم مباشرةً إلى طاقة عالية، لكن أجهزة النقل والاستهلاك الأوكسجيني (الرئة، القلب، العضلات) لا تستطيع أن تُلبي هذا الطلب فوراً.
→ هنا يظهر العجز الأوكسجيني (المساحة الصفراء) أي الفرق بين حاجة الجسم للأوكسجين وما هو مستهلك فعلياً.
3. أثناء الجهد (During Exercise):
يرتفع استهلاك الأوكسجين تدريجياً حتى يصل إلى مستوى ثابت يتناسب مع شدة الجهد.
إذا كان الجهد دون العتبة القصوى (submaximal) يصل الجسم إلى حالة الاستقرار.
4. بعد التوقف (Recovery):
يستمر استهلاك الأوكسجين أعلى من المستوى الطبيعي لفترة زمنية بعد انتهاء الجهد، بهدف:
 - إعادة تخزين الفوسفات (ATP-CP).
 - إزالة حمض اللاكتيك (جزئياً بالأوكسدة).
 - إعادة التوازن الأيوني ودرجة الحرارة.
→ هذه الزيادة في الاستهلاك تسمى الدين الأوكسجيني (المساحة الحمراء).

- الرسم يوضّح بشكل صحيح المفاهيم التالية:
- العجز الأوكسجيني = بداية التمرين (عجز لحظي).
- الدين الأوكسجيني = مرحلة الاستشفاء (استهلاك زائد لتعويض العجز وإعادةه)

ويعزى وجود الدين الأوكسجيني إلى الأسباب التالية:

- 1_ يستخدم بعض من الأوكسجين الزائد عن مستوى الراحة في توفير طاقة لتعويض مستوى فوسفات الكرياتين الذي استخدم في فترة العجز.
- 2 يستخدم بعض من الأوكسجين الزائد عن مستوى الراحة في توفير طاقة لتحويل بعض من حمض اللبنيك إلى كليكوجين في الكبد (تراكم حمض اللبنيك في الدم كان نتيجة لاستخدام التحلل اللاهوائي للكليكوجين والكلوكوز الذي تم في فترة العجز) .
- 3_ يستخدم بعض من الأوكسجين الزائد عن مستوى الراحة في فترة الاسترداد لتعويض المخزون الأوكسجيني الذي استخدم في فترة العجز (الأوكسجين الملتصق ميوكلوبين) العضلات والذائب في سوائل وأنسجة الجسم.

أثناء الاختبارات الوظيفية للجهاز التنفسي (Respiratory Functional Tests) نستخدم مجموعة من المؤشرات (Functional Indicators) حتى نقيّم كفاءة الجهاز التنفسي وقدرته على تلبية متطلبات الجهد البدني. هذه المؤشرات تنقسم إلى مؤشرات حجمية، تهوية، غازية، وكفاءة انتقالية:

1) المؤشرات الحجمية (Lung Volumes & Capacities)

- VC – Vital Capacity السعة الحيوية:

أقصى كمية هواء يمكن إخراجها بعد شهيق عميق.

- TLC – Total Lung Capacity السعة الرئوية الكلية:

مجموع جميع أحجام الرئة (VC + RV).

- TV – Tidal Volume حجم التنفس الاعتيادي:

كمية الهواء الداخلة أو الخارجة في التنفس العادي (حوالي 500 مل).

• IRV & ERV – الاحتياطي الشهيقى والزفيرى:

الهواء الممكن إدخاله أو إخراجة فوق الحجم الاعتيادي.

• RV – Residual Volume الحجم المتبقى:

الهواء الباقي بالرئة بعد الزفير الأقصى.

2 المؤشرات التهوية (Ventilatory Indicators)

• VE – Minute Ventilation التهوية الدقيقة:

حجم الهواء المستنشق بالدقيقة = $TV \times$ معدل التنفس.

• MVV – Maximum Voluntary Ventilation التهوية الإرادية القصوى:

أقصى تهوية يمكن للفرد إجراؤها خلال فترة قصيرة (12–15 ثانية).

• Ventilatory Equivalent (VE/VO_2 و VE/VCO_2):

نسبة التهوية إلى استهلاك الأوكسجين أو إنتاج ثاني أوكسيد الكربون.

3 المؤشرات الغازية (Gas Exchange Indicators)

• VO_2max – أقصى استهلاك للأوكسجين:

أهم مؤشر على كفاءة الجهازين التنفسي والقلبي العضلي.

• VCO_2 – إنتاج ثاني أوكسيد الكربون:

يقاس مع VO_2 لتحديد الكفاءة الاستقلابية.

• RER – Respiratory Exchange Ratio (نسبة المبادلة التنفسية):

VCO_2 / VO_2 → تحدد نوع الوقود (دهون/كربوهيدرات).

4 مؤشرات كفاءة الانتقال (Diffusion & Oxygenation)

• SaO_2 – إشباع الدم الشرياني بالأوكسجين (Arterial O_2 Saturation).

• PaO_2 & $PaCO_2$ – الضغط الجزئي للأوكسجين وثاني أوكسيد الكربون في الدم.

• DLCO – قدرة الانتشار الرئوي (Diffusing Capacity for CO).

5 مؤشرات الأداء أثناء الجهد (Exercise-Specific Indicators)

• معدل التنفس (Respiratory Rate, f):

يزداد تدريجيًا مع شدة التمرين.

• عمق التنفس (Tidal Volume Adaptation):

يزداد أولاً ثم يستقر، وبعدها الزيادة تكون عبر معدل التنفس أكثر من الحجم.

• عتبة التهوية (Ventilatory Threshold):

النقطة التي يبدأ فيها VE بالارتفاع أسرع من VO_2 → مؤشر مهم لتحمل الجهد.

• (Oxygen Pulse (VO_2/HR):

كمية الأكسجين المستهلكة لكل نبضة قلب → يعكس الكفاءة التنفسية القلبية.

المؤشرات الوظيفية للجهاز التنفسي أثناء الاختبارات تشمل الأحجام الرئوية، التهوية، المبادلة الغازية، كفاءة الانتشار، وعلامات خاصة بالتمرين مثل VO_{2max} والعتبة التهوية. هذه المؤشرات تُستخدم في تقييم الرياضيين، والكشف عن كفاءة الجهاز التنفسي واللياقة الهوائية.

قائمة المراجع (APA Style)

1. Powers, S. K., & Howley, E. T. (2018). Exercise physiology: Theory and application to fitness and performance (10th ed.). McGraw-Hill Education.
2. American College of Sports Medicine. (2021). ACSM's guidelines for exercise testing and prescription (11th ed.). Wolters Kluwer.
3. West, J. B. (2012). Respiratory physiology: The essentials (9th ed.). Lippincott Williams & Wilkins.
4. Broaddus, V. C., Mason, R. J., Ernst, J. D., King, T. E., Lazarus, S. C., Murray, J. F., & Nadel, J. A. (2016). Murray & Nadel's textbook of respiratory medicine (6th ed.). Elsevier.

5. Sheel, A. W., Romer, L. M., & Pegelow, D. F. (2019). Respiratory limitations to exercise in health: A brief review. *Respiratory Physiology & Neurobiology*, 265, 103–111. <https://doi.org/10.1016/j.resp.2019.05.004>
 6. McKenzie, D. C. (2012). Respiratory physiology: Adaptations to high-level exercise. *British Journal of Sports Medicine*, 46(6), 381–384. <https://doi.org/10.1136/bjsports-2011-090824>
 7. National Strength and Conditioning Association. (2020). Respiratory adaptations to aerobic endurance training. NSCA Kinetic Select. Retrieved from <https://www.nscs.com>
 8. Poole, D. C., & Jones, A. M. (2017). Measurement of the maximum oxygen uptake VO_2max : VO_2peak is no longer acceptable. *Journal of Applied Physiology*, 122(4), 997–1002. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.01063.2016>
-