

עקרונות ושלבים בתהליך הפענוח של בדיקות מאמץ משולב לבריאה (CPET)

תקציר:

בדיקת מאמץ משולב לבריאה (CPET) היא בדיקה העוקבת אחר תפקודי הלב, מחזור הדם הגדול והקטן ("הריאתי"), הריאות והשרירים, בשעת ביצוע מאמץ גופני מדורג ועד מרבי (או מוגבל תסמינים). הבדיקה מאפשרת הערכת הכשירות הגופנית/פיזיולוגית ואבחנה לגבי מספר רב של מחלות ותסמינים במערכות לב, ריאות, כלי דם או שריר. היתרון של מבחן המאמץ המשולב הוא ביכולתו לבדוד את רמת התפקוד של מערכות שונות בתהליך אספקת האנרגיה הדרושה לביצוע המאמץ ולספק מידע על המשמעות של כל מערכת להבנת ההפרעה או מגבלת התפקוד. באופן כזה הוא מאפשר לכוון את תהליך האבחון והטיפול באופן מיטבי. ה-CPET היא בדיקה פשוטה לביצוע, אך פענוח הנתונים שלה מורכב. מטרת הסקירה שלפנינו היא להציג בפני הקורא את העקרונות והשלבים בפענוח הנתונים המתקבלים בבדיקת מאמץ משולב לבריאה עד לקבלת אבחנה מובדלת.

עמרי ענבר¹
אוריאל כ"ץ¹
גל דובנוב^{2,1}
יורם אפשטיין^{3,2}

¹בית חולים אדמונד וילי ספרא לילדים, מרכז רפואי שיבא, תל השומר, רמת גן
²הפקולטה לרפואה סאקלר, אוניברסיטת תל אביב, רמת אביב
³מכון הלב למחקר רפואי, מרכז רפואי שיבא, תל השומר, רמת גן

מילות מפתח: בדיקת מאמץ משולב לבריאה; שחלוף גזים; מאמץ גופני.

:KEY WORDS Cardiopulmonary exercise test; Physical exercise; Gas exchange

הקדמה

היכולת להתמיד בביצוע מאמץ גופני, החל מהליכה למרכול ועליה במדרגות הבית ועד לביצוע מאמצים ספורטיביים עצימים, מחייבת אספקה סדירה ומתואמת של חמצן לרקמת השריר במקביל לפינוי הפחמן הדו-חמצני הנוצר בפעילות המטבולית. לצורך כך, מתחייב תיאום בין מערכות הנשימה החיצונית והפנימית (הנשימה התאית) והמערכת הקרדיווסקולארית [1, 2, 3] (תרשים 1).

סיבה שכיחה להפניית נבדקים להערכה במכוני הלב, הריאה או הספורט היא קושי בביצוע מטלה גופנית, המוגדרת כאי סבילות למאמץ (exercise intolerance) ואשר מלווה לרוב בתחושה של חוסר אוויר, קושי בנשימה, כאבים בבית החזה או לאות ועייפות במאמץ [4, 5]. אותה תחושה של קושי בנשימה, לדוגמה, עשויה לנבוע ממגוון רחב של כשלים פיזיולוגיים במערכת הנשימה, בלב, במחזור הדם ההיקפי, במחזור הדם הריאתי, בתפקוד המערכת המטבולית התוך תאית בשריר, או לעיתים בליקוי משולב בכמה ממערכות אלה. לכן, ההערכה של אנשים הסובלים מקושי בביצוע מאמץ גופני מחייבת הבנה של המנגנון הפיזיולוגי המגביל העברת חמצן נאותה לשרירים וניצולו התקין בתאי השריר, ויכולת מדידה כמותית של צריכת החמצן (המשקפת את צריכת האנרגיה לפעילות השרירים) ומדדים נוספים.

בדיקת המאמץ המשולב לבריאה (Cardiopulmonary Exercise Test-CPET) מתבססת על ניתוח מדדי לבריאה המשקפים את המסלולים המטבוליים לצריכת האנרגיה. טכנולוגיית המחשוב הקיימת כיום מאפשרת איסוף נתונים רציף ומהיר לגבי תגובתן של מערכות הלב, כלי הדם, הנשימה ושיחלוף הגזים, בכל נשימה ונשימה. שיטה זו היא

בלתי פולשנית, פשוטה יחסית לביצוע, ועוקפת את הצורך במדידות פולשניות של נפח פעימת הלב, תפוקת הלב או מדידת מיצוי החמצן בתאי השריר. המעקב אחר השינויים הרגעיים במהלך בדיקת מאמץ מאפשר לבחון את תפקודן של כל אחת מהמערכות השותפות (תרשים 1). הבדיקה מאפשרת לזהות את הגורם המגביל את בצוע המאמץ הגופני, לסייע באבחון חומרת מחלת רקע של הלב, הריאה או מטבולית-שרירית, ומאפשרת מדידה של הכושר הגופני האירובי בחולים ובבריאים – כולל בספורטאים [6-8]. מדדים רבים נגזרים מהבדיקה, כפי שיפורט בהמשך, ודרכם מתאפשר לפיזיולוג המאמץ או לרופא המטפל לעמוד על סיבת אי-הסבילות למאמץ ומשמעותה הקלינית עבור המטופל. בנוסף, הבדיקה מאפשרת להנחות את איש השיקום, המאמן או הפיזיולוג המתווים את תכנית האימון/שיקום כיצד להתאים אותה אישית למטופל [4-6].

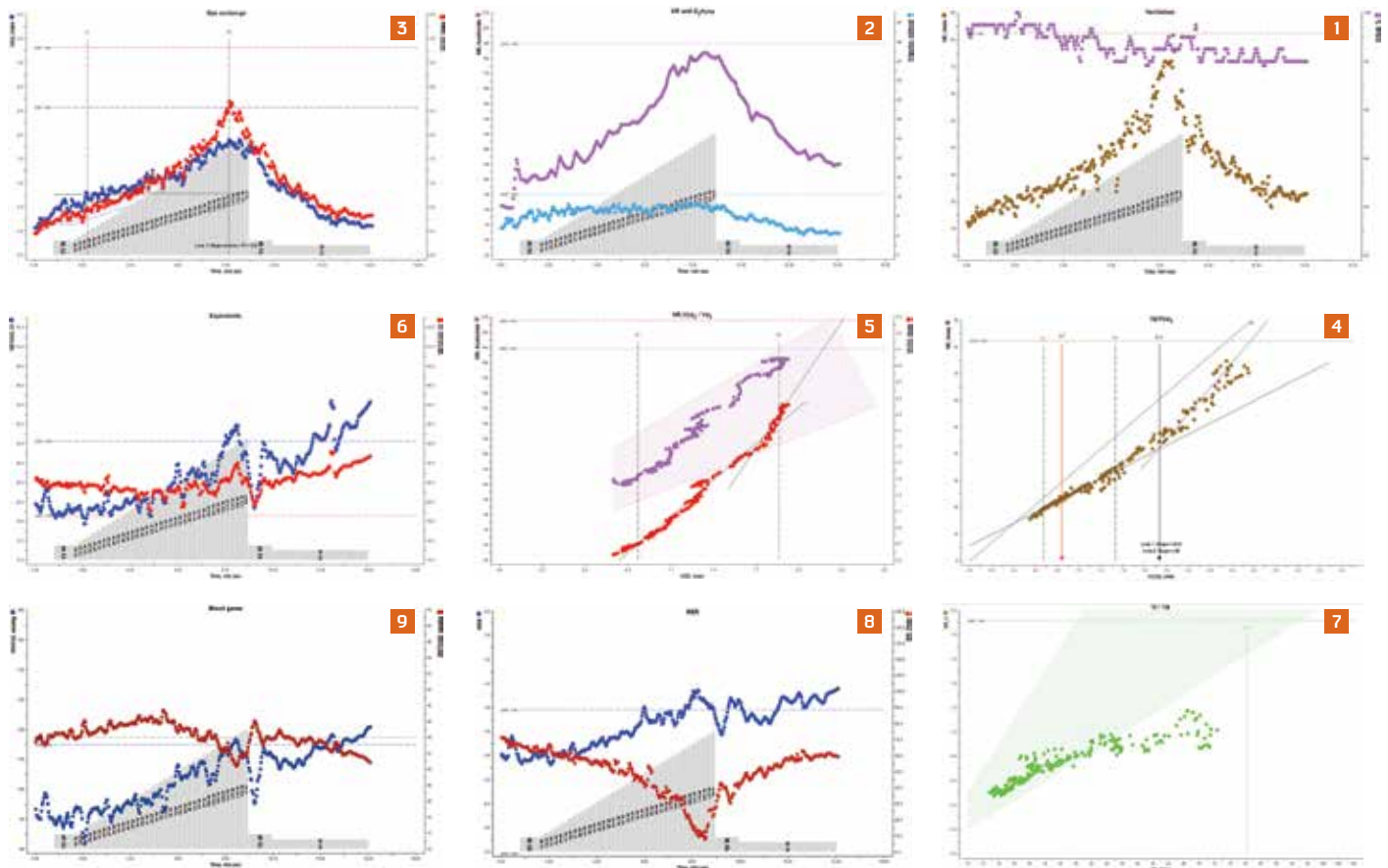
תרשים 1:

מסלול מעבר החמצן מאוויר הנשימה ועד לרמת המיטוכונדריה בתא



תרשים 2:

הדינאמיקה של תגובות מדדי ה-CPET במהלך ובתום (התאוששות) בדיקת המאמץ המשולב. הנתונים בתרשים 2 נלקחו מבדיקת ה-CPET של הנערה בטבלה 2



הגומלין שבין הגורמים הפיזיולוגיים השונים השותפים לתהליך הפקת האנרגיה. פענוח הבדיקה מתבצע בשמונה שלבים. בטבלה 1 מסוכמים שלבי הפענוח השונים לפי סדר ההתייחסות, תוך ציון המדדים הפיזיולוגיים הרלוונטיים בכל אחד משלבי הפענוח.

שלב 1: תקינות הבדיקה בהיבט הטכני – ראשית, כדי לוודא את אמינות הנתונים שהתקבלו, יש לוודא תקינות טכנית של מערכת הבדיקה. יש לוודא ערכים בסיסיים תקינים במנוחה של צריכת חמצן ופליטת פחמן דו-חמצני, כדי לוודא כי אין דליפה מהמסכה, תקלה בכיול המערכת או תקלה טכנית בחיישנים. גם במהלך הבדיקה, וכמובן בסיומה, יש לוודא כי ערכי צריכת החמצן, פליטת הפחמן הדו-חמצני והיחס ביניהם (המכונה מנת הנשימה, Respiratory exchange ratio – RER) עולים בהדרגה עם עליית העומס המכאני ותואמים את עומס העבודה המכאנית שבוצעה (פאנל 3 בתרשים 2).

שלב 2: סיום הבדיקה במאמץ מרבי – מסקנות אמינות וישימות מתוצאות הבדיקה ניתן להפיק רק במידה והנבדק ביצע מאמץ מרבי. יש לכן לוודא כי הנבדק הגיע בסיום הבדיקה לאפיסת כוחות, המגובה בתגובות פיזיולוגיות מוסכמות או שהבדיקה הופסקה עקב תסמינים

[8] וספרם על יסודות הבדיקה של לב-ריאה (Cardiopulmonary) במאמץ, כי "ההבנה הפיזיולוגית מרחיבה את תחום הפיזיולוגיה של המאמץ מלימוד של מדע בסיסי, ומנגישה אותו לרופא הלב ורופאי הריאות במונחים רפואיים משמעותיים". בעוד שהביצוע הטכני של בדיקת ה-CPET הוא פשוט וזול יחסית, הרי שפענוח תוצאות הבדיקה מורכב ומסורבל, ולו רק מעצם העובדה שבמהלך הבדיקה נאספים נתונים על למעלה מ-30 מדדים שונים [9–11]. את תוצאות ה-CPET ניתן לפענח בדרכים שונות, ולאורך השנים פורסמו אלגוריתמים ותרשימי זרימה שונים בניסיון להקל ולעזור בפענוח אובייקטיבי של הבדיקות [2, 12]. המטרה במאמר זה היא להציג בקצרה את העקרונות והשלבים בניתוח בדיקת ה-CPET עד לקבלת אבחנה מבלדת, וזאת בהתבסס על משנתם של Wasserman וחב' [8], שהיא אחת הדרכים המקובלות ביותר לפענוח הבדיקה.

השלבים המוצעים לפענוח ממצאי בדיקת מאמץ משולב לב-ריאה

פענוח ממצאי הבדיקה מתבסס על ניתוח של תשעה גרפים (תרשים 2) אשר מסכמים את התגובות ויחסי

טבלה 1:

השלבים המומלצים לפענוח ממצאי בדיקת מאמץ משולב לבריאה

השלב	המטרה	המדדים הרלבנטיים	ערכי השיא	התגובה	אופי התגובה הצפוי	המשמעות
1	בדיקת תקינותה הטכנית של הבדיקה	זמן RER VO ₂	זמן RER VO ₂	-	-	אשרור תקינות המערכת וביצוע הבדיקה
2	האם המאמץ מרבי	VO ₂ RER PETCO ₂ HR	VO ₂ RER HR	PETCO ₂	PETCO ₂ שיפוע יורד בשלבי המאמץ האחרונים	אשרור/שלייה לביצוע מאמץ מרבי
3	הסיבה/ות להפסקת הבדיקה	כאבים בחזה כאב רגליים קושי נשימה סחרחורת עייפות כללית	-	-	-	חיזוק או ניגוד לממצאי הבדיקה
4	רמת הכשירות האירובית	VO ₂ max WRmax VAT	VO ₂ max WRmax VAT	-	-	רמת הכשירות התפקודית (הספק וסבולת אירוביים)
5	המערכת הקרדיוסקולרית	ECG HR BP O ₂ pulse VAT	HR BP O ₂ pulse VAT	O ₂ pulse, VO ₂ /WR HR	-O ₂ pulse, HR שיפוע עולה לכל אורך הבדיקה	אשרור/שלייה לתגובה קרדיוסקולרית תקינה
6	מערכת הנשימה (מכאנית)	PFT VE Vt Bf BR VE/VCO ₂ Dynamic loops	PFT VE Vt Bf BR	VE-VCO ₂ Dynamic loops	VE-VCO ₂ -45° -Dynamic loops בגבולות מעטפת הנשימה המרבית (PFT)	אשרור/שלייה של ליקוי/מגבלה נשימתית מכאנית
7	הליכי שחלוף הגזים	VE/VCO ₂ PETO ₂ VE/VCO ₂ Vd/Vt SaO ₂	VE/VCO ₂ PETO ₂ VE/VCO ₂ Vd/Vt SaO ₂	PETCO ₂ VE/VCO ₂ slo	PETCO ₂ ירידה בשלבי המאמץ האחרונים 30° - VE/VCO ₂ slo	אשרור/שלייה של ליקוי בתהליכי שחלוף הגזים בין הבועיות הריאה למחזור הדם הריאתי
8	המערכת השרירית/מטבולית	VO ₂ /WR O ₂ pulse VAT [La]	VO ₂ /WR O ₂ pulse VAT [La]	VO ₂ /WR O ₂ pulse	VO ₂ /WR רדוד O ₂ pulse שיפוע רדוד ו/או יורד	אשרור/שלייה לליקוי מטבולי (שרירי)

מקרא: כל קיצורי המדדים מצוינים בטקסט

- פענוח בדיקת מאמץ משולב לבריאה (CPET) הוא תהליך מורכב ומסורבל.**
- עקב מגוון הנתונים הגדול המתקבל בבדיקה, יש להיצמד להליך סדור ומובנה אשר יאפשר לאבחן את סוג המגבלה (לב, ריאה או חילוף חומרים) וחומרתה, ביכולת לבצע מאמץ גופני.**
- בניתוח נתוני הבדיקה יש להתייחס הן לערכים המרביים והן לאלו המוצגים לאורך המאמץ (ותתימריים), ולהשוותם לערכי תקן המתאימים לאוכלוסייה הנבדקת.**
- שבמקרים של אי השגת VO₂max (קרי, התיישרות ערכי VO₂ בשלבי המאמץ האחרונים), תיחשב השגת לפחות 2 מתוך שלושת המדדים הפיזיולוגיים הנוספים כאישור לביצוע מאמץ מרבי. במקרים אלה נהוג להתייחס לכשירות האירובית של הנבדק במונחים של VO₂peak במובחן מ-VO₂max.
- שלב 3: הסיבה להפסקת המאמץ** – בסיום הבדיקה נשאל הנבדק "מה גרם לך להפסיק את הבדיקה?". כאב בבית החזה, כאבי שרירים או קושי בנשימה הן אפשרויות נפוצות. שילוב תשובה זו עם הממצאים האובייקטיביים בבדיקה מסייע בפענוח. לדוגמא, ממצאים בבדיקה המעידים על מגבלה נשימתית יקבלו חיזוק כאשר

סובייקטיביים או תגובות קליניות שמחייבות את הפסקת הבדיקה (בקשת הנבדק, ממצאים חריגים באק"ג, שינויים חריגים בלחץ דם או בריווי החמצן בדם, אשר מנוטרים באופן רציף במהלך הבדיקה). התייחסות לערכים בסיומה של בדיקה שאיננה מרבית כאילו הם ערכים מרביים אמיתיים, תביא להסקת מסקנות שאינן תקפות. ארבעה מדדים מאפשרים אימות (או שלייה) של ביצוע מאמץ מרבי: (1) עקומת צריכת החמצן (VO₂) (פאנל 3 בתרשים 2) אשר מתיישרת ואינה עולה יותר בשלבי המאמץ האחרונים למרות העלייה בעומס העבודה [צריכת חמצן מרבית - צח"מ (VO₂max) [4]; (2) מנת נשימה (RER) מעל 1.10 (פאנל 8); (3) מגמת ירידה בלחץ החלקי של הפחמן הדו-חמצני בסוף כל נשיפה (PETCO₂), עקב חמצת ונשמת, מערכים יציבים שבין 38-42 מ"מ"כ לאורך כל שלבי הבדיקה, לערכים של 25-38 מ"מ"כ בשלבי הבדיקה האחרונים (מאמץ קשה מאוד) (פאנל 9) [3, 8]. (4) קצב הלב המרבי אליו הגיע הנבדק בהשוואה לקצב לב חזוי על פי גיל (פאנל 2). מדד זה אמין פחות משלושת המדדים האחרים מאחר ונוסחאות החיזוי לקצב הלב המרבי אינן מדויקות [13, 14]. לכן מקובל

וקרוב יותר לצח"מ, כך הסבולת האווירנית גבוהה יותר. VAT נמוך מ-40% מצריכת החמצן המרבית החזויה לנבדק מעיד על כושר אירובי נמוך, אך בשילוב עם מדדים נוספים כגון דופק חמצני נמוך או שינויים איסכמיים באק"ג, מחשידה לתפקוד לקוי של הלב ומחייבת בירור [6, 8].

שלב 6: תקינות תגובת מערכת הנשימה המכאנית – בדיקת תפקודי הריאות במנוחה היא חלק בלתי נפרד מבדיקת המאמץ המשולב לב-ריאה, בעזרתה ניתן לזהות הפרעה נשימתית כבר בשלב המנוחה. במהלך המאמץ, הנפח המתחלף (Tidal volume – Vt), תדירות הנשימה (Breathing frequency – Bf), אוורור הראות (VE), היחס בין האוורור הריאתי לצריכת החמצן ולפליטת פחמן דו-חמצני (VE/VO₂ ו-VE/VCO₂) והרזרבה הנשימתית (Breathing – BR reserve) מאפשרים לעקוב אחר תפקוד מערכת הנשימה במאמץ. שווי הערך הנשימתיים (ventilatory equivalents) לחמצן ולדו-תחמוצת הפחמן (VE/VO₂) ו-VE/VCO₂ (בהתאמה) בשיא המאמץ מבטאים את יעילותה "המכאנית" של מערכת הנשימה. ערכים גבוהים מהנורמה יצביעו על יעילות אוורור נמוכה. גם לשינוי בערכי המדדים האלה במהלך המאמץ, טרם ההגעה לשיא, יש משמעות אבחונית. שיפוע תלול (גדול מ-45° יכול להצביע על אוורור-יתר עקב הצורך לפצות על ליקוי באספקת החמצן לתאי השריר (מסיבות שונות), על רגישות-יתר לרמת CO₂ נתונה בדם, על אוורור-יתר בלתי רצוני (היפרוונטילציה, למשל עקב חרדה), על חמצת מטבולית כרונית, נפח מת גדול או על מחלת כלי דם היקפיים או ריאתיים. שיפוע רדוד (קטן מ-45°) מצביע על תת-אוורור, ומכוון לאפשרות של הפרעה בשינוע האוויר בדרכי הנשימה (עקב חסימה או מגבלה), או סף רגישות נשימתי נמוך יחסית לרמת CO₂ נתונה בדם. מצב זה אופייני לחולים במחלות ריאה עקב חסימה (כגון COPD) או מגבלה, וכן לספורטאי עילית בעלי סבולת אווירנית גבוהה [1, 8, 9].

הרזרבה הנשימתית (BR) היא הנפח שנותר בין האוורור המרבי של הנבדק שהושג בפועל לזה הפוטנציאלי (Maximal Voluntary Ventilation – MVV), אשר מחושב על בסיס בדיקת תפקודי הריאות במנוחה). רזרבה נשימתית קטנה מ-15% ליתר/דקה או מ-15% מה-MVV מגדירה מגבלה נשימתית למאמץ [1, 3, 5, 8]. רמז נוסף לקיומה של מגבלה נשימתית יכול להתבטא בנפח מתחלף נמוך (Vt), אשר יכול לנבוע מעודף משקל, חולשת שרירי הנשימה, מבנה בית חזה צר, עקמת בעמוד השדרה, או מצב לאחר ניתוח חזה בעבר. במקרים אלו לרוב, תהיה תדירות נשימה (Bf) גבוהה כפיצוי לשם שימור האוורור של הריאה (VE).

מרבית הסיבות למגבלה נשימתית נובעות ממגבלה הקשורה לנפח. בשנים האחרונות עלתה המודעות גם לחשיבות זרימת האוויר במאמץ כסוג נוסף של מגבלה נשימתית [18]. באמצעות בדיקת ספירומטריה אשר מבוצעת במהלך המאמץ ניתן ללמוד על הנשימה הדינמית במאמץ לעומת היכולת המרבית שנבדקה במנוחה טרם הבדיקה. חפיפה או חריגה של מעגל הנשימה הדינמי מעבר ל-40% משלב הנשיפה בעקומת זרימה-נפח המרבית במנוחה, מצביעה על מגבלה משמעותית בזרימת האוויר (flow limitation), העשויה להסביר תסמינים נשימתיים

הנבדק מדווח על הפסקת הבדיקה עקב קושי בנשימה. **שלב 4: הכשירות האווירנית (aerobic capacity)** – מעקב אחר התגובה של שלושה מדדים במהלך בדיקת המאמץ מאפשרת להגדיר את היכולת האירובית המרבית של הנבדק [1, 4, 5]. (1) הספק העבודה המרבי; (2) צריכת החמצן המרבית; (3) הסף האנאירובי הנשימתי (VAT), שהינו הערך המתייחס לדרגת המאמץ שבה ריכוז חומצת החלב בדם מתחיל לעלות. צריכת חמצן מרבית בשיעור שלמעלה מ-83% מהנורמה המתאימה לנבדק מקובלת ככשירות אווירנית תקינה [8, 12, 15]; סף אנאירובי נשימתי מעל 40% מצריכת החמצן המרבית החזויה מוגדר כתקין [1, 8, 13].

שלב 5: תפקוד המערכת הקרדיווסקולארית: המדדים העיקריים המושפעים מתפקוד המערכת הקרדיווסקולארית הם: היחס שבין השינוי בצריכת החמצן לשינוי בעומס העבודה ($\Delta VO_2/\Delta WR$), הדופק החמצני (O_2 pulse – היחס בין צריכת החמצן לקצב הלב), לחץ הדם, קצב הלב, הסף האנאירובי הנשימתי ותרשים האק"ג (פאנלים 2 ו-5 ורישום האק"ג הרציף הנרשם במהלך המאמץ) [4, 6, 8]. תבנית התגובה במהלך הבדיקה והערכים המרביים של מדדים אלה נבחנים למול הערכים המקובלים כתקינים.

שיפוע עקום היחס שבין ΔVO_2 לבין $WR\Delta$ הוא ליניארי ושיעורו הממוצע $1.5 \pm 10\%$ מ"ל חמצן/דקה/לוואט [8]. שיפוע שטוח יותר (קטן מ-8° מ"ל חמצן/דקה/לוואט) משקף מצב של מגבלה בהובלת החמצן לתאי השריר (שהגורם לה מקורו בלב או בריאה), או ליקוי בניצולת החמצן בתאי השריר [8]. שיפוע תלול (גדול מ-11.5°) נצפה לעיתים קרובות במקרים של עבודה בלתי יעילה (תנועות גוף "מיותרות", חוסר קואורדינציה וכדומה), שהיא "בזבזנית" בהיבט האנרגטי, ואופיינית גם במקרים של השמנת-יתר או בספורטאי סבולת ברמה גבוהה [3, 8].

תגובה תקינה של ערכי הדופק החמצני (O_2 pulse) במהלך המאמץ מאופיינת בעליה רציפה מתחילת הבדיקה ועד לסופה. באדם בריא, מדד זה מבטא תגובה משולבת של שני תפקודים פיסיוולוגיים – נפח פעימת הלב וקצב מיצוי החמצן בשרירים [1, 6, 8]. באוכלוסייה הבריאה השונות הבין-והתוך-אישית בקצב מיצוי החמצן בשריר הוא קטן יחסית [6, 8, 12]; לכן מקובל להתייחס לתגובת הדופק החמצני כאל השינוי היחסי בנפח הפעימה [1, 6, 8]. התייצבות או ירידה בערכי הדופק החמצני בשלבי הבדיקה המאוחרים (במאמץ גופני קשה) מצביעה על חשד לליקוי בתפקוד הלבבי וירידה ביעילות ההזרקה של הלב (fraction ejection) [1, 6, 7, 16].

קצב הלב עולה במקביל לעלייה בעומס במהלך הבדיקה. חריגה משמעותית מדפוס התגובה התקין, כולל אי הגעה לטווח דופק מרבי חזוי, עלולה לשקף ליקוי במנגנון ויסות קצב הלב (chronotropic insufficiency), נטילת תרופות חוסמות קולטני ביתא או אף מגבלה בנשימה [8, 10, 11]. תגובת לחץ הדם חשובה גם היא. עלייה גבוהה מדי בלחץ הדם יכולה לציין מצב טרום יתר לחץ-דם [17] ותגובה נמוכה או ירידה בלחץ הדם במהלך הבדיקה יכולות להצביע על הפרעה משמעותית בתפקוד הלב [6, 8].

לסף האנאירובי חשיבות בהערכת כשירות אירובית ותפקוד הלב במאמץ [1, 3, 8, 16]. ככל שערך זה גבוה יותר

טבלה 2:

דוגמה לסבלת סיכום מומלצת לנתוני בדיקת המאמץ המשולב וללא נתוני הספירומטריה/נערה בת 16 עם עקמת ואנמנזה של גנחת סימפונות וקושי בנשימה במאמץ

המדד	היחידות	הערך המרבי המדוד	הערך המרבי החזוי	% מהחזוי	סטטוס
Time	min:sec	8:07-8:39	7-11	94	תקין
מדדים מטבוליים					
Load	W	124	204	61	נמוך
VCO ₂	l/min	2.41	3.45	70	נמוך
VO ₂	l/min	1.87	2.46	76	נמוך
VO ₂ /kg	ml (kg*min)	33.9	41.7	81	נמוך
VO ₂ AT/kg	ml (kg*min)	20.5	23.5	87	תקין
RER	(l/min)/(l/min)	1.28	≥1.1	106	תקין
VO ₂ AT/VO ₂	%	67	58	115	גבוה
RCP/VO ₂	%	85	90	94	תקין
מדדים קרדיווסקולריים					
O ₂ Pulse	100ml/(beat*kg)	18.6	21.5	87	תקין
VO ₂ /WR	ml/watt/min	11.1	10	111	תקין
HR	beats/min	182	190	96	תקין
HRR	beats/min	7	12≥	95	תקין
SBP	mmHg	169	170	100	תקין
DBP	mmHg	86	74	116	תקין
מדדים נשימתיים-מכאניים					
VE	l/min	72	82	88	תקין
VT	l	1.00	1.92	52	נמוך
Bf	min/l	74	42	177	גבוה
BR	l/min	10.1	≥15	67	נמוך
מדדי שחלוף גזים					
VE/VO ₂	l/l	36.5	32.3	113	תקין
VE/VCO ₂	l/l	28.6	28.0	102	תקין
VE/VCO ₂ _slope	l/l	24.4	24.9	98	תקין
PETO ₂	mmHg	115	115	100	תקין
PETCO ₂	mmHg	33	38	85	תקין
VD/VT	%	28	25	112	תקין

מקרא: קיצורי המדדים מצוינים בטקסט. הנתונים המתייחסים לסף האנאירובי (VO₂AT/kg, VO₂AT/VO₂) ולנקודת הפיזי הנשימתי (RCP/VO₂) אינם מרביים אלא תת-מרביים.

יכולה להתבצע במרפאות ספורט או במכוני לב או ריאות, על הפיזיולוג/קלינאי לבצע ניתוח של הממצאים לנוכח מחלת או מחלות הרקע ותלונות הנבדק. בסקירה זו הוצגו השלבים המומלצים בניית הבדיקה, עד לקבלת אבחנות אפשריות היכולות להסביר את המצאה. ראוי להדגיש את החשיבות של ערכי תקן (נורמות) מתאימים בהליך פענוח הבדיקה [22,13]. התבססות על ערכי תקן שאינם תואמים את האדם הנבדק עלולה לעוות את פענוח הבדיקה ולהביא

במאמץ וכשירות אירובית נמוכה [19]. בדיקה זו יכולה להסביר מקרים רבים של קושי נשימה במאמצים למרות מבחן מאמץ ריאתי תקין.

שלב 7: שחלוף הגזים של הריאה ("הריאתי") - ריווי

החמצן, שווי הערך הנשימתיים (VE/VO₂, VE/VCO₂), הלחצים החלקיים של החמצן והפחמן הדו-חמצני בסוף כל נשיפה (PETO₂ ו-PETCO₂), והיחס שבין הנפח המת הפיזיולוגי לנפח המתחלף (Vd/Vt) (פאנלים 6 ו-9) משמשים מדדים להערכת תקינות תהליך שחלוף הגזים בריאה ("ריאתי"). חריגה משמעותית מדפוסי התגובה או הערכים המרביים התקינים במדדים אלה תחשיד לליקוי אפשרי בתהליכי שחלוף הגזים כתוצאה ישירה או עקיפה משיבוש בזרימת הדם לריאה (כגון יתר-לחץ דם ריאתי), מסיבה שמקורה בלב (כגון תת-תפקוד של חדר ימין), או הפרעה בתפקוד רקמת הריאה (כגון מחלה ברקמת הריאה) [20,8,7].

דגש מיוחד ניתן לשיפוע היחס VE/VCO₂, שהוא מדד חשוב להערכת התיאום שבין זרימת הדם הריאתית לאוורור (היחס V/Q) [1,3,8]. ערכים הגבוהים מ-30 מחשידים לליקוי קל-בינוני בתהליכי שחלוף הגזים, בעוד שערכי שיפוע שווים או גבוהים מ-34 מצביעים על ליקוי חמור בתהליכים אלה [8,21]. שיפוע גבוה עלול להופיע במחלות לב שונות (כגון איספיקת לב, מומי לב מולדים עם הפרעה בתפקוד חדר ימין, יתר לחץ דם ריאתי) [1,2,8], במחלות ריאה (כגון COPD), או בפגם ברקמת הריאה. למדד זה יש אף יכולת חיזוי מוכחת בהערכת השרידות ותוחלת החיים של חולים במחלות אלה [2,9,12,21].

שלב 8: תגובת המערכת המטבולית/שרירית - לחלק

מהמדדים שנידונו לעיל נמצא גם קשר ישיר או עקיף לתפקוד המערכת המטבולית השרירית. שיפועים או ערכי שיא נמוכים או גבוהים משמעותית מערכי התקן של המדדים O₂ pulse, WR, VO₂ והסף האנאירובי מעלים חשד לליקוי בתפקוד המטבולי-שרירי. לדוגמה, תגובה שטוחה של היחס ΔVO₂/ΔWR (8 > מ"ל/ק"ג/דקה) מעידה על ליקוי באספקת החמצן לתאי השריר או על ניצול בלתי יעיל של החמצן בתוך תאי השריר. במקרים של תפקוד לב תקין עם סף אנאירובי (VAT) נמוך, לחץ דם גבוה במאמץ ותלונות הנבדק על כאב רגליים בעת המאמץ, המגבלה למאמץ קשורה קרוב לוודאי לאספקת דם לקויה לשרירים או לבעיית שרירים מטבולית [2,9,8].

סיכום הבדיקה:

במהלך בדיקת CPET נאספים נתונים לגבי למעלה מ-30 מדדים שונים. על מנת להקל בניתוח הנתונים, נהוג לסכמם בטבלה המאורגנת לפי המערכות והתהליכים הפיזיולוגיים השותפים במסלול הפקת האנרגיה, תוך התמקדות בהשוואת הנתונים המדודים לאלה החזויים והצגתם כאחוז מהצפוי לאותו הנבדק (טבלה 2).

לסיכום

בדיקת המאמץ המשולב לבריאה היא בדיקת הבחירה לבירור קושי או תלונת במאמץ. לאחר ביצוע הבדיקה, אשר

מחבר מכותב: עמרי ענבר

בית חולים אדמונד ולילי ספרא לילדים
מרכז רפואי שיבא, תל השומר, רמת גן
דוא"ל: inbar@wincol.ac.il

לאבחון, או חלילה לטיפול, שגויים. עוד ראוי לציין את החשיבות של ביצוע בדיקה איכותית, עם פרוטוקול מתאים ועד מאמץ מרבי ככל האפשר, לשם קבלת ערכים מרביים אמיתיים. ●

ביבליוגרפיה

1. American Thoracic Society. ATS/ACCP statement on cardiopulmonary exercise testing. American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine, 2003;167(2): 211-217.
2. Balady GJ, Arena R, Sietsema K & al, Clinician's guide to cardiopulmonary exercise testing in adults a scientific statement from the American heart, 2010;122(2):191-225.
3. Inbar O, Carel R & Gefen Y, The cardiopulmonary exercise test - rational, characteristics and applications. Medicine (Harefuah), 1987; Vol. CXII: 232-8. (Hebrew).
4. Man A, Keren G & Topilsky Y, Cardiopulmonary stress test - physiological basis and key variables. Harefuah, 2013;152(12):725-8.
5. Ben-Dov I & Oren A, Integrative cardiorespiratory exercise test. Harefuah, 1989;116:517-22.
6. Belardinelli R, Lacalaprice F, Tiano L & al, Cardiopulmonary exercise testing is more accurate than ECG-stress testing in diagnosing myocardial ischemia in subjects with chest pain. International journal of cardiology, 2014;174(2): 337-42.
7. Oren A & Ben-Dov I, Integrative cardiorespiratory exercise test:2. Response to maximal exercise in heart and lung disease. Harefuah, 1989;116:561-9.
8. Wasserman K, Hansen JE, Sue DY & al, (Eds). Principles of exercise testing and interpretation: including pathophysiology and clinical applications. Fourth edition. Lippincott Williams & Wilkins: Philadelphia. 2005.
9. Man A, Keren G & Topilsky Y, Cardiopulmonary stress test - interpretation and clinical indications. Harefuah, 2014 Feb;153(2):92-6, 126.
10. Forman DE, Myers J, Lavie CJ & al, Cardiopulmonary exercise testing: relevant but underused. Postgrad med, 1984;122(6):68-86.
11. Chacey M, Goodman LF, Kynnyk JA & al, Analysis Of Interpretation Practices of Cardiopulmonary Exercise Tests: A Quality Initiative. Am J Respir Crit Care Med, 2012;185:A5772.
12. Weisman IM & Zeballos RJ, An integrated approach to the interpretation of cardiopulmonary exercise testing. Clin Chest Med, 1994;15:421-45.
13. Tanaka H, Monahan KD & Seals DR, Age-predicted maximal heart rate revisited. J Am Coll Cardiol, 2001;37:153-6.
14. Gelbart M, Ziv-Baran T, Williams CA & al, Prediction of maximal heart rate in children and adolescents. Clin J Sport Med, 2017 Mar;27(2):139-144
15. Inbar O, Oren A, Scheinovitz M & al, Normal cardiopulmonary responses during incremental exercise in 20-to 70-yr-old men. Medicine and science in sports and exercise, 1994;26:538-45.
16. Inbar O, Elian D, Bar-Rtzon & al, Including Cardiopulmonary Measurements Improves Diagnostic Accuracy of CAD During Exercise Testing. Adv. Exerc. Sports Physiol, 2005;11(1):1-8.
17. Martin GS & James ES, Exercise Hypertension. Pulse, 2014;1(3-4):161-76.
18. Johnson BD, Weisman IM, Zeballos RJ & Beck KC, Emerging concepts in the evaluation of ventilatory limitation during exercise: the exercise tidal flow-volume loop. Chest, 1999;116 (2):488-503.
19. Babb TG, Exercise Ventilatory Limitation: The Role of Expiratory Flow Limitation. Exerc Sport Sci Rev, 2013;41(1):11-18.
20. Inbar O, Dlin RA, Sheinberg A & al, Response to progressive exercise in patients with cystic fibrosis and asthma. Med Exerc Nutri and Health, 93;2:56-62.
21. Arena R, Myers J, Aslam SS & al, Peak VO₂ and VE/VCO₂ slope in patients with heart failure: a prognostic comparison. Am Heart J, 2004;147:354-60.
22. Hansen JE, Sue DY & Wasserman K, Predicted Values for Clinical Exercise Testing. Am Rev Respir Dis, 1984; 129 (2P2):S49-S55.