

הפיזיולוגיה של המאמץ

מהלכה למעשה



— שחר ניס —

פרק 6.2

שינויים הסתגלותיים

(אפקט אימון) של מסלולי

אספקת האנרגיה כתגובה

לאימוני מהירות וסבולת

שינויים פיזיולוגיים המתרחשים בעקבות אימוני מהירות:

- שינויים קטנים ברמת האנזימים במסלול האנאירובי-אלקטי
- עלייה במאגרי הפוספט (ATP, קריאטין פוספט) שנובעת מהגדלת נפח ומסת השריר הכללית ואינה משקפת עלייה בריכוז.
- לא נמצא שינוי בפרופיל השרירי כתוצאה מאימון ספרינט.
- שינויים קלים בלבד נמצאו בפעילותם של מספר אנזימי מפתח במטבוליזם האנאירובי-לקטי

אימון מהירות גורם לשינויים קטנים יחסית מבחינה מטבולית ומבחינה

ביוכימית. ההשפעה העיקרית של אימוני מהירות מתבטאת בשיפור

בכוח השריר ובטכניקת הביצוע.

סבולת - היכולת להתמיד בפעילות גופנית שמפעילה קבוצות שרירים גדולות בקצב המהיר ביותר לפרק זמן נתון

מאפיין		סוגי סבולת	
מסלול אספקת אנרגיה עיקרי	משך המאמץ	מונחים מתחום הפיזיולוגיה של המאמץ	מונחים מתחום הכושר הגופני
אנאירובי-לקטי	10 - 180 שניות	סבולת אנאירובית	סבולת קצרה
אירובי	3 - 20 דקות	הספק אירובי מרבי - קיבולת אירובית	סבולת בינונית
אירובי	מעל 20 דקות	סבולת אירובית	סבולת ממושכת

אימון סבולת - פעילות גופנית דינמית שמערבת קבוצות שרירים גדולות ומשפרת את יכולתם להפיק הספקים אנרגטיים גבוהים לפרקי זמן נתונים.



מאפיין		סוגי סבולת	
מסלול אספקת אנרגיה עיקרי	משך המאמץ	מונחים מתחום הפיזיולוגיה של המאמץ	מונחים מתחום הכושר הגופני
אנאירובי-לקטי	10 - 180 שניות	סבולת אנאירובית	סבולת קצרה
אירובי	3 - 20 דקות	הספק אירובי מרבי - קיבולת אירובית	סבולת בינונית
אירובי	מעל 20 דקות	סבולת אירובית	סבולת ממושכת

אפקט האימון של אימוני סבולת קצרה (יכולת אנאירובית)



רמת לקטט בדם לאחר מאמץ מרבי לפני תהליך אימונים ואחריו



עלייה ביכולת הגליקוליטית (ייצור לקטט בעת מאמץ

מרבי) נובעת מ:

- עליה ברמת האנזימים הגליקוליטים (PFK - אנזים קובע הקצב)
- עלייה ביכולת השריר לסתור ("בופר") יוני מימן
- עליה ביכולת ל"סבול" רמות גבוהות יותר של חומציות וערכי pH

נמוכים

אפקט האימון של אימוני סבולת בינונית וסבולת ממושכת (יכולת אירובית)



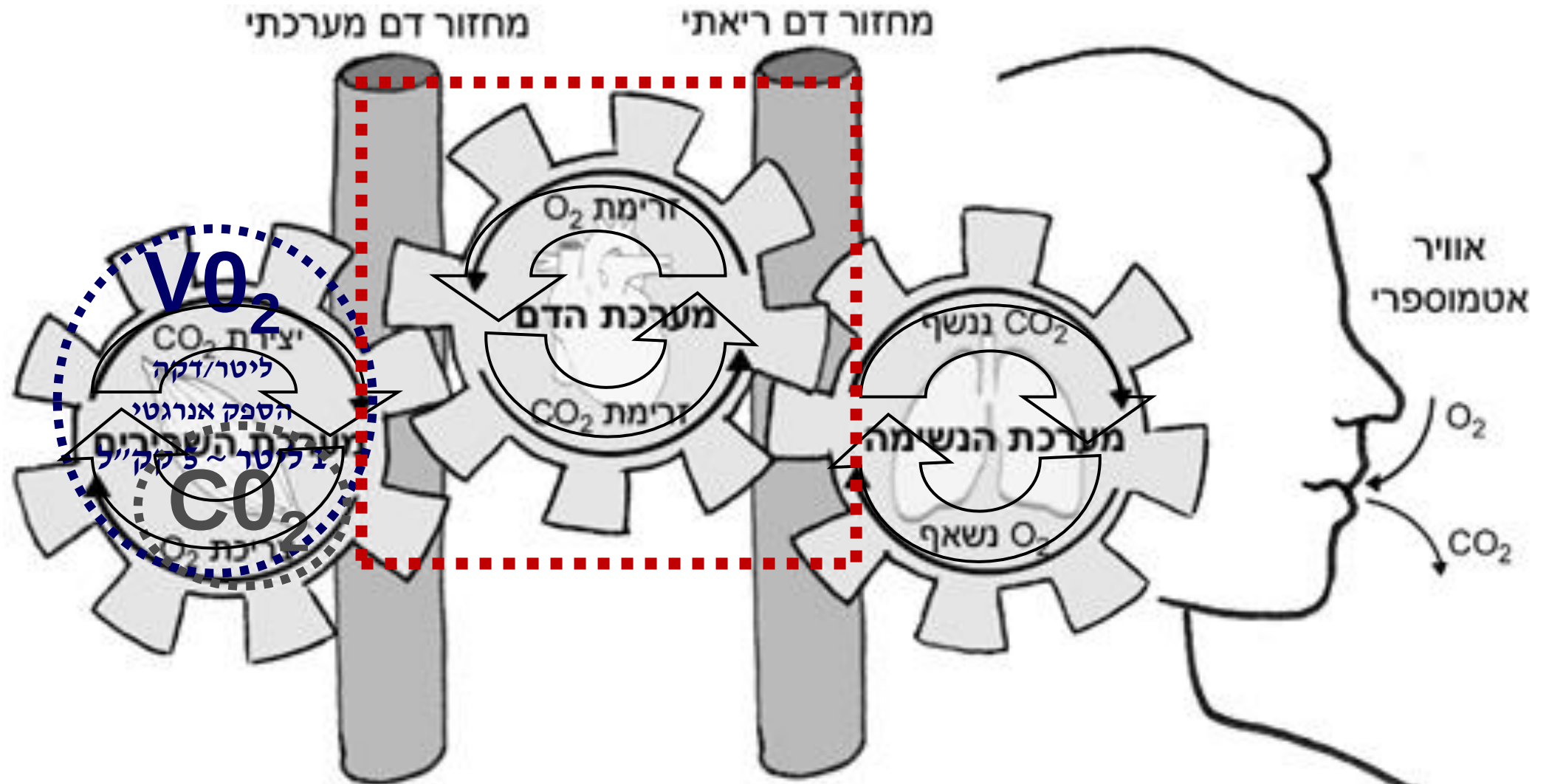
מטרות תהליך אימון לפיתוח יכולת אירובית



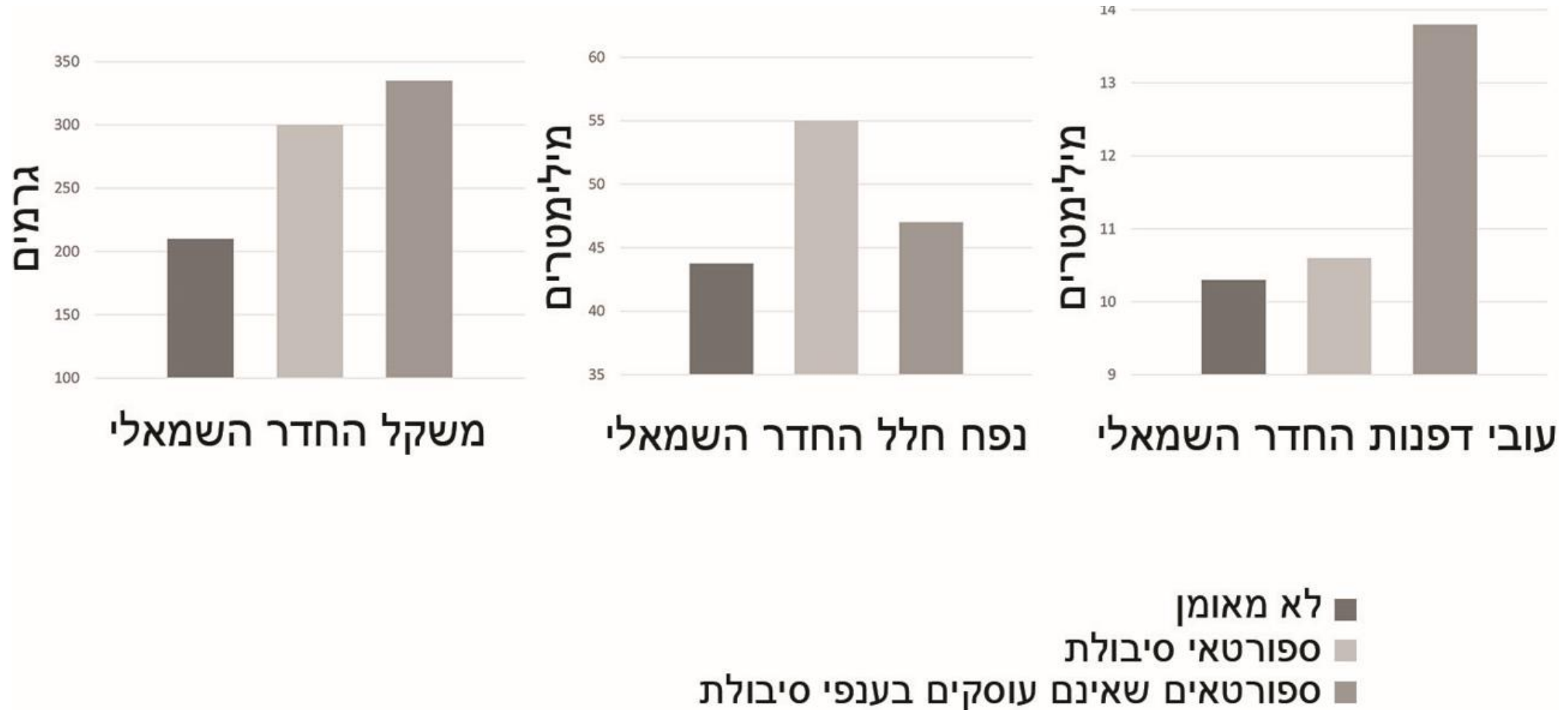
שיפור יכולתן של
המערכות המרכזיות
להעביר חמצן

שיפור יכולת השרירים להפיק אנרגיה
במסלול האירובי

אפקט אימון - שרשרת פיזיולוגית



עובי הדופן, גודל החלל ומשקל החדר השמאלי בלבם של ספורטאי סבולת, ספורטאים שאינם עוסקים בענפי סבולת ואנשים לא מאומנים



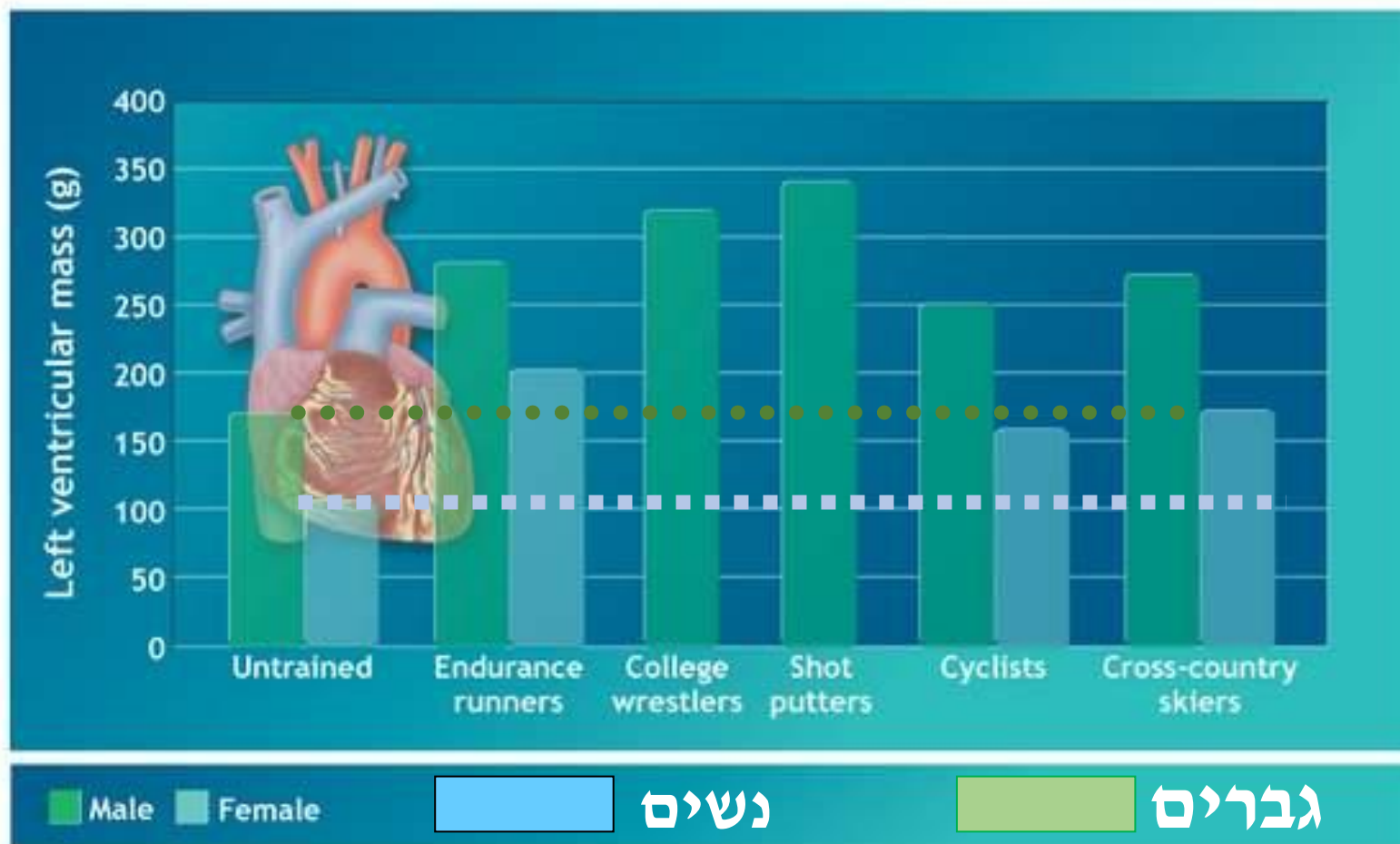
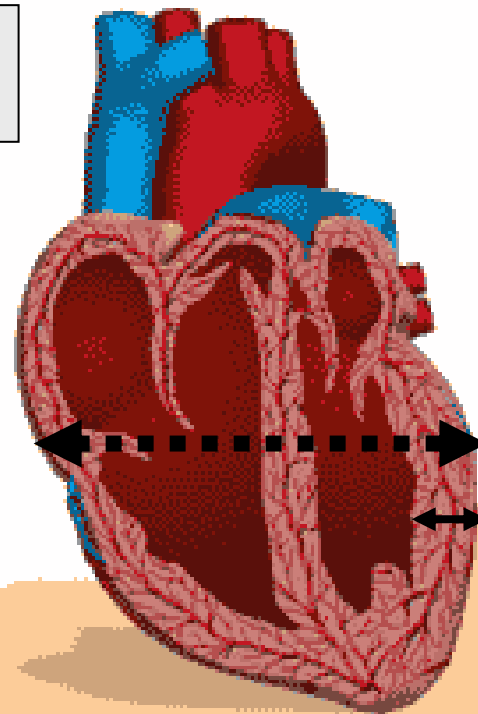


Figure 21.7. General trend toward cardiac enlargement (left ventricular mass) among the untrained and various groups of male and (where applicable) female athletes.

Copyright © 2001 Lippincott Williams & Wilkins

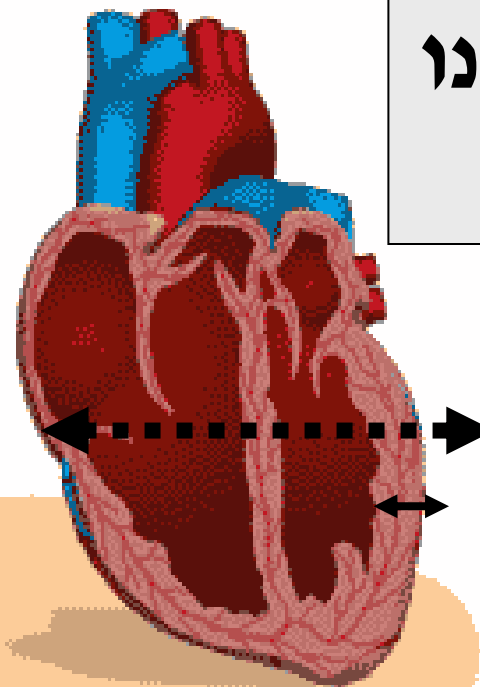
**משקל החדר השמאלי בלבם של אנשים
שאינם ספורטאים ובלבם של ספורטאים**

אדם מאומן



ליבו של אדם
שעוסק בפעילות גופנית

**אדם שאינו
מאומן**

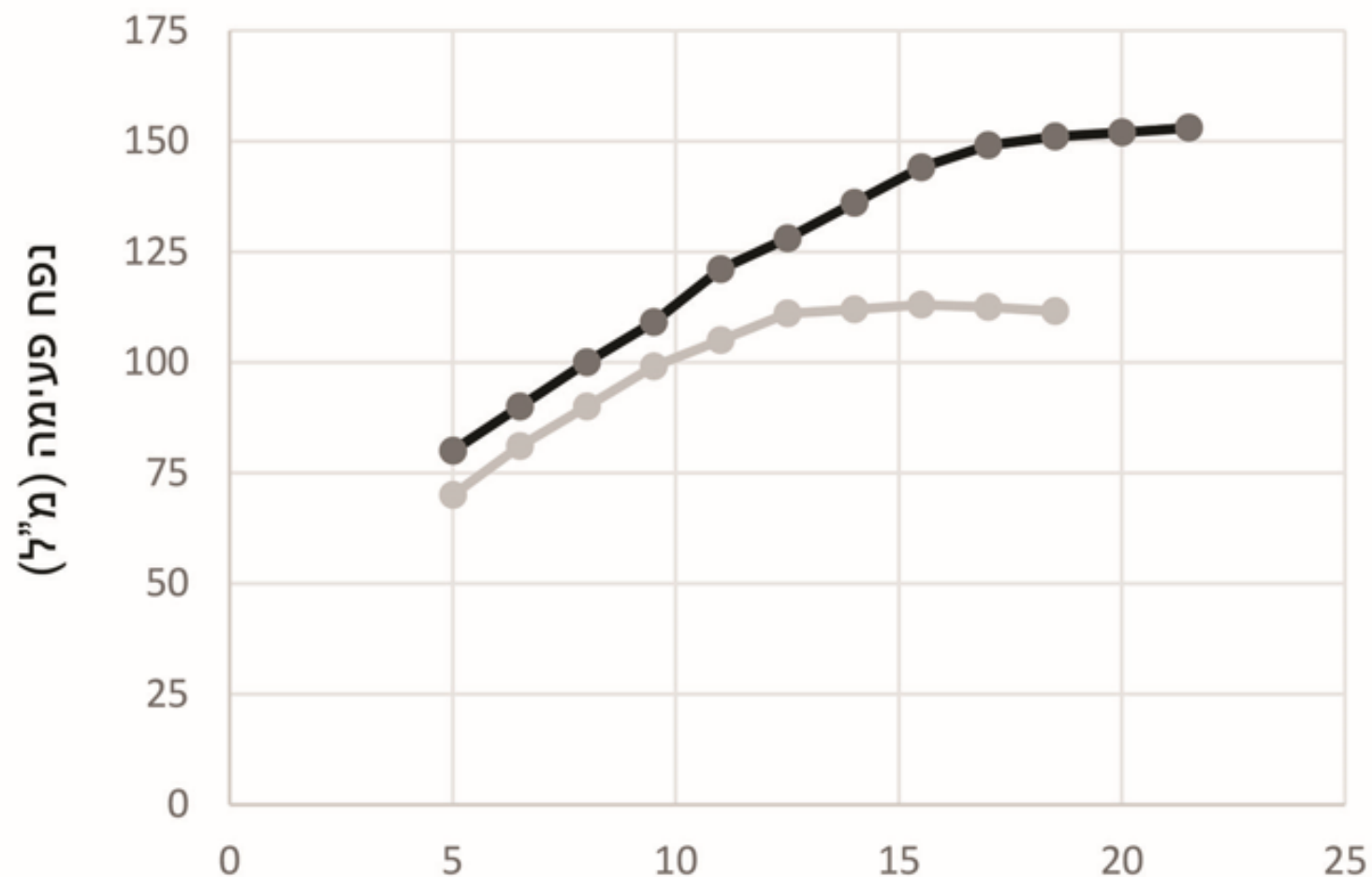


ליבו של אדם שאינו
עוסק בפעילות גופנית

**נפח חדרי הלב ועובי הדופן של שריר הלב
אצל אדם מאומן ושאינו מאומן**

לב ספורטאי (Athletic Heart)

- הגדלת חדרי הלב והתעבות שריר הלב
- קצב לב איטי
- הגדלה ניכרת בקוטר העורקים הכליליים
- הופעת אֻושות בעת התכווצות החדרים
- תרשימי א-ק-ג הזהים לאלו המופיעים במחלות לב

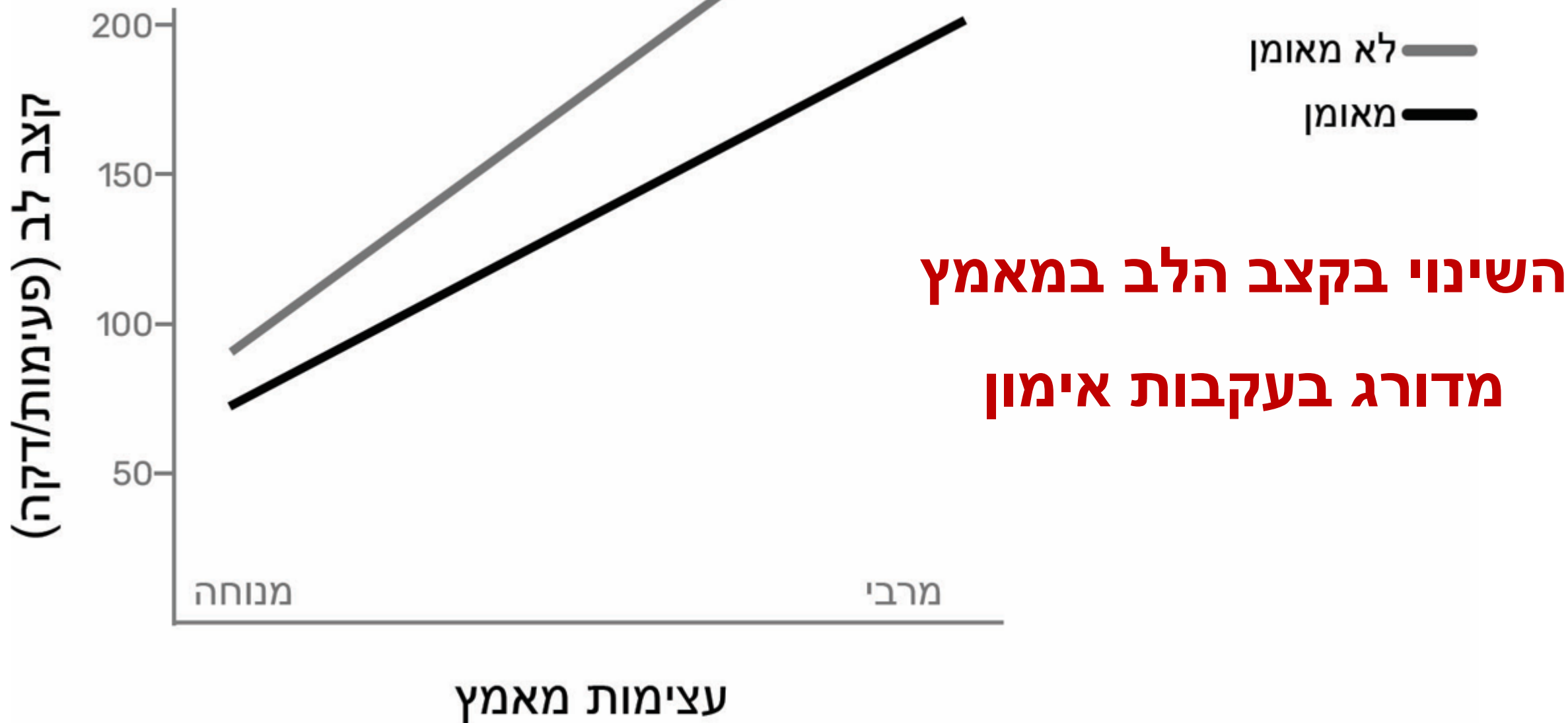


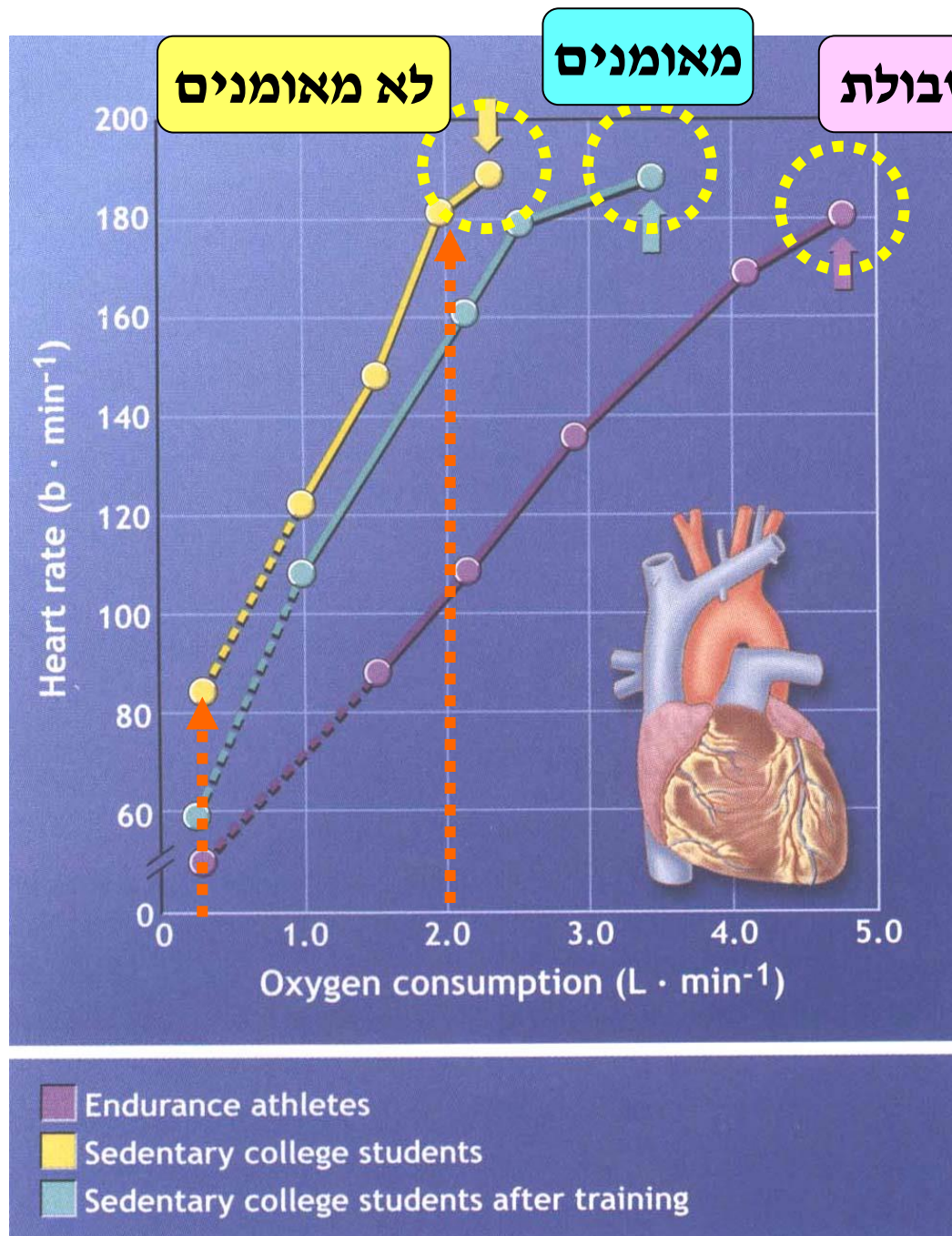
**השינוי בנפח הפעימה
בעקבות אימון**

● אחרי תהליך אימון ● לפני תהליך אימון

Table 9.1**Stroke Volumes (SV) for Different States of Training**

	Subjects	SVrest (ml)	SVmax (ml)
	Untrained	50-70	80-110
	Trained	70-90	110-150
	Highly trained	90-110	150->220

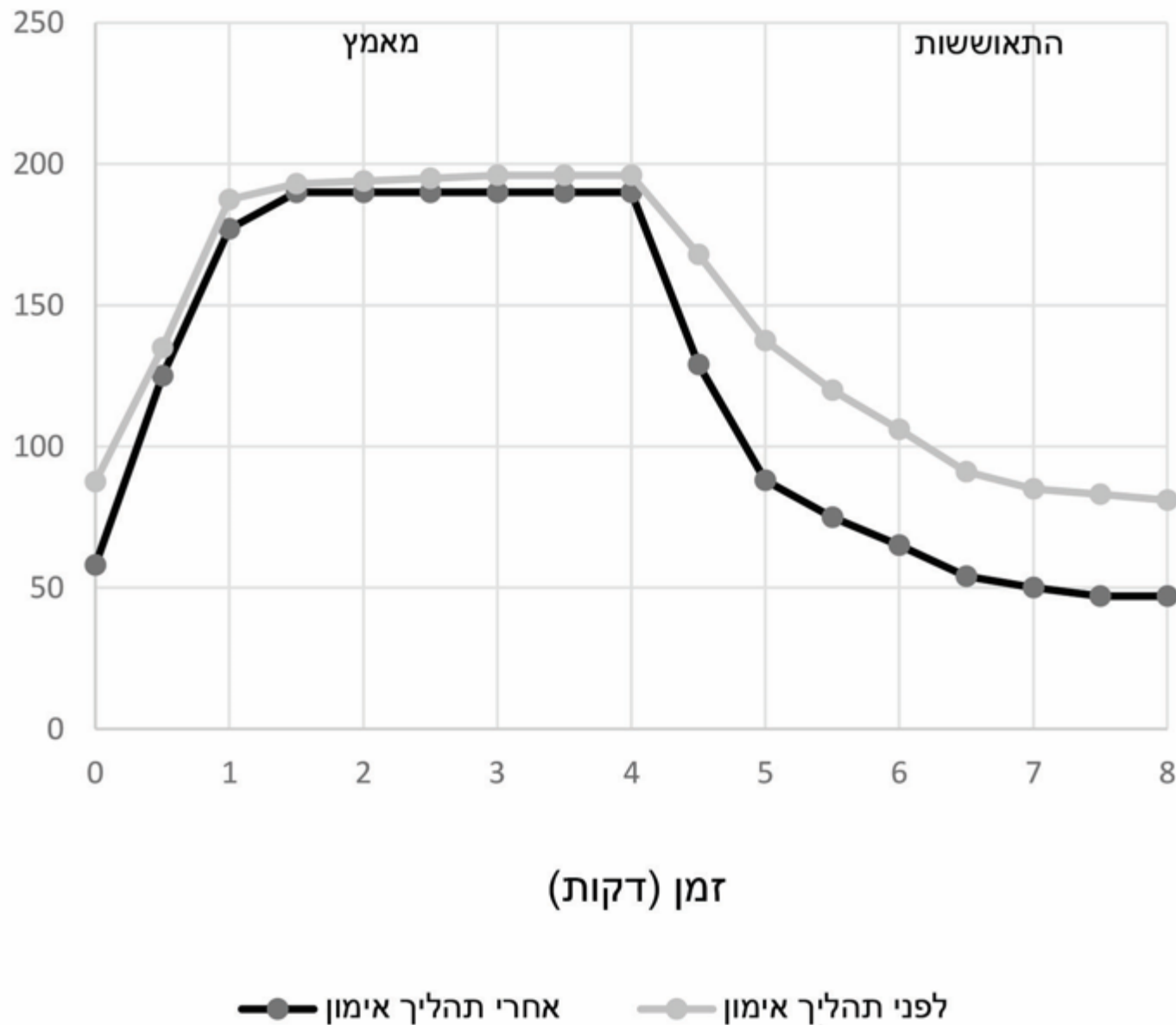


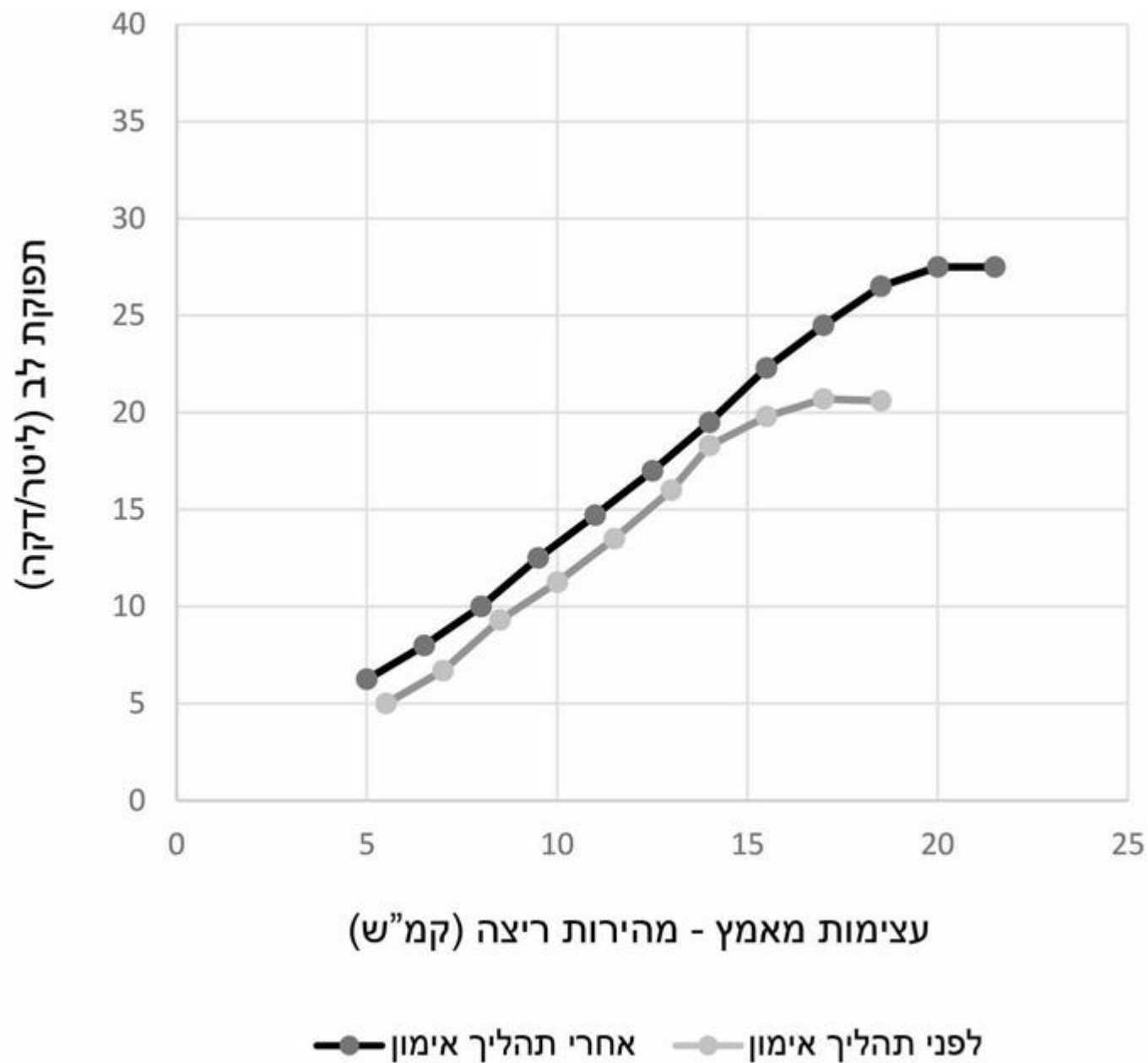


השינוי בקצב הלב במאמץ מדורג

דופק במנוחה, במאמץ תת
מרבי נתון, במאמץ מרבי

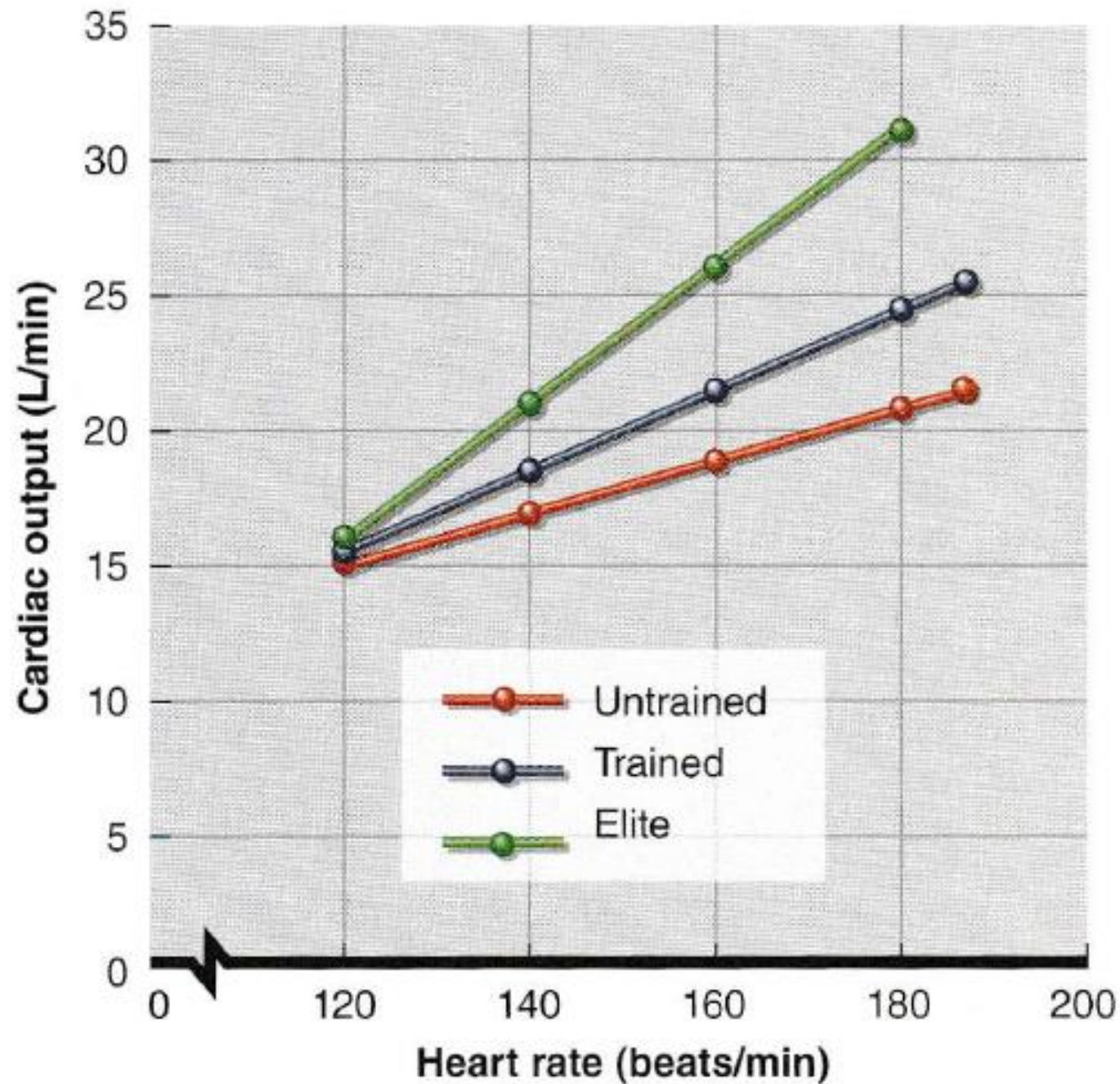
**קצב הלב במהלך
ההתאוששות ממאמץ
נתון לפני תהליך אימון
ולאחריו**

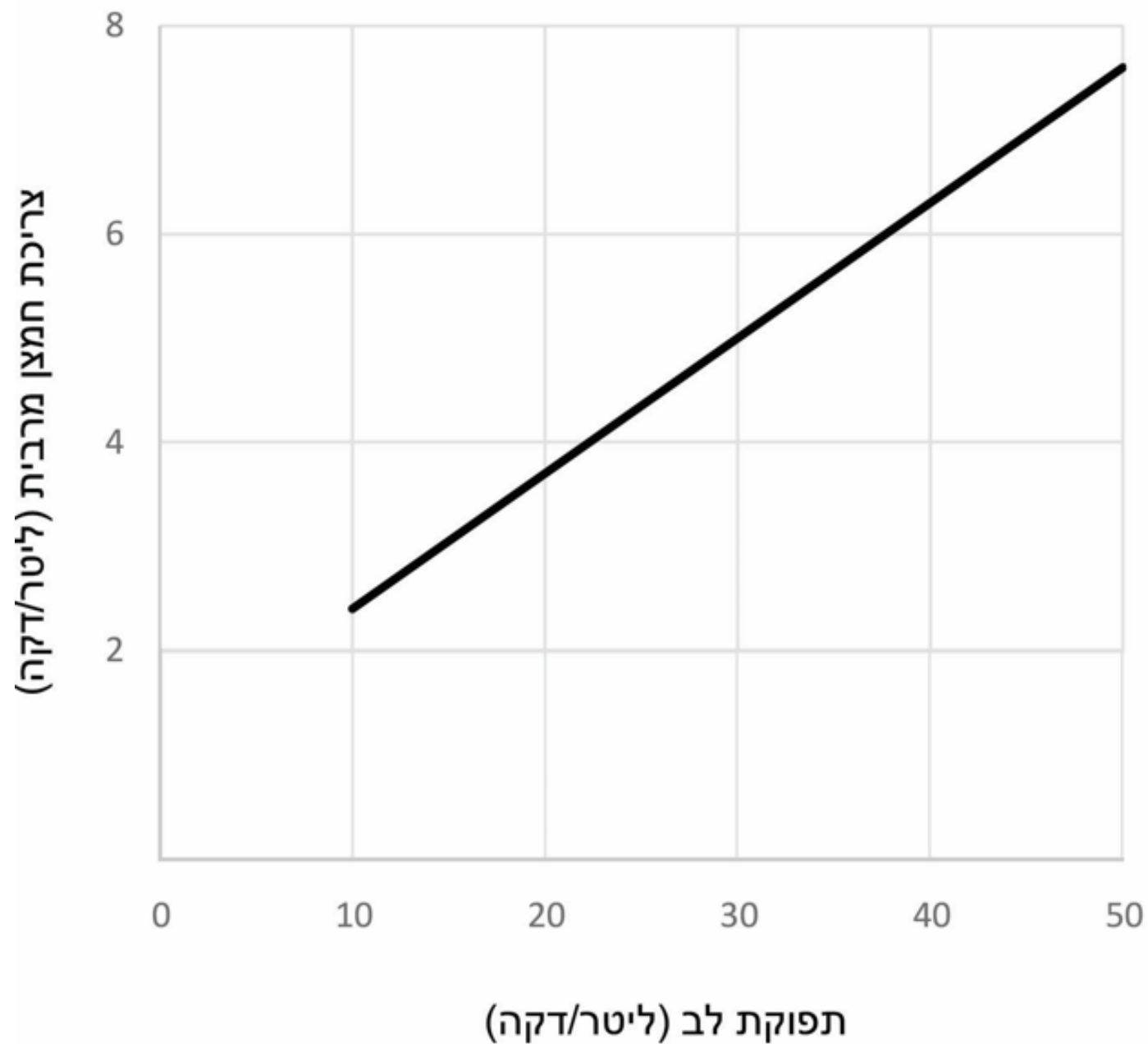




**השינוי בתפוקת הלב
בעקבות תהליך אימון**

קצב לב / תפוקת לב במאמץ מדורג





**העלייה בצח"מ עם
העלייה בתפוקת הלב
המרבית**



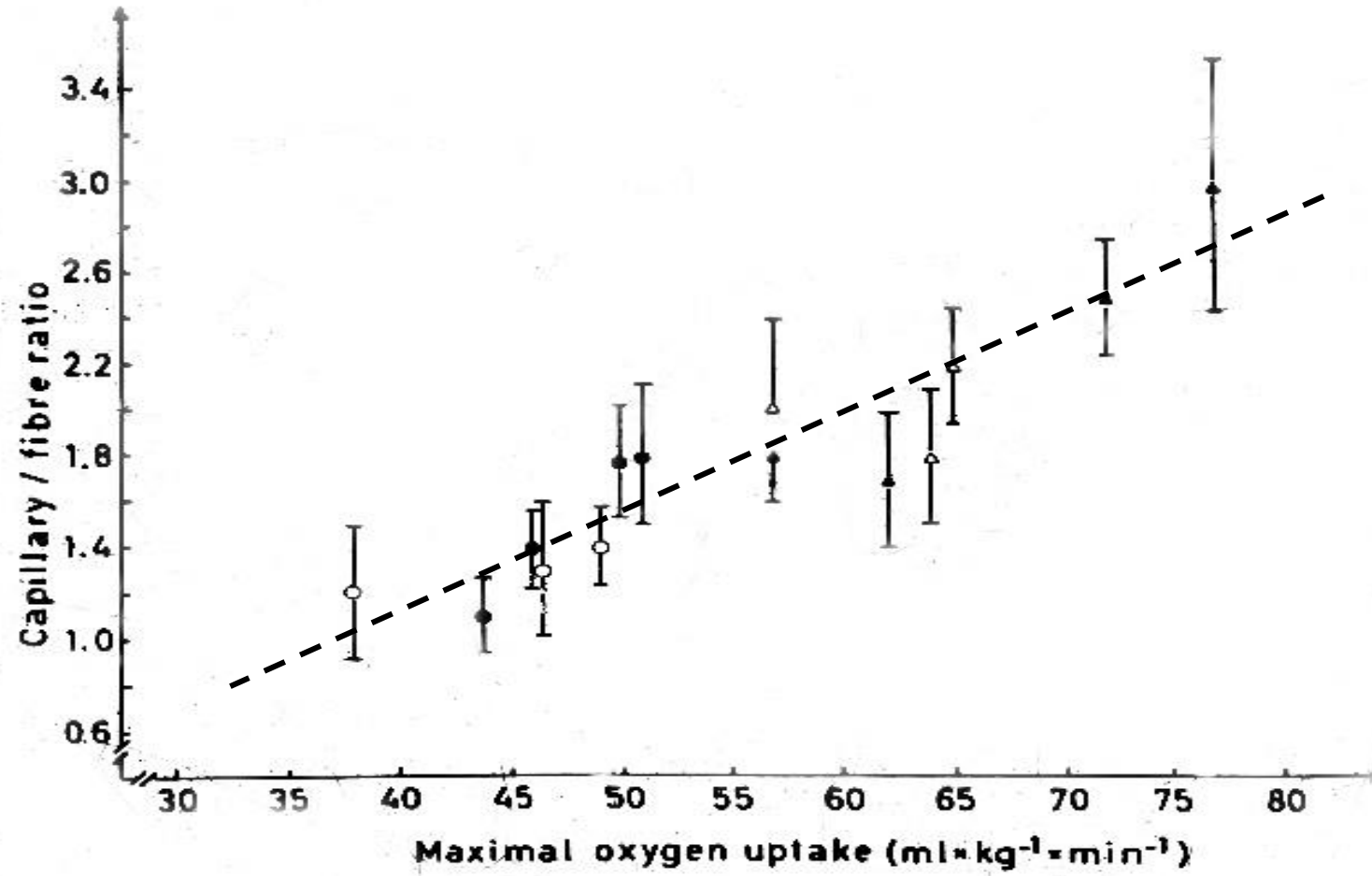
**תפוקת הלב המרבית של רוכב האופניים הספרדי מיגיל
אינדוריאן (מנצח הטור-דה-פרנס 5 פעמים 1991-1995) הייתה
50 ליטר/דקה**

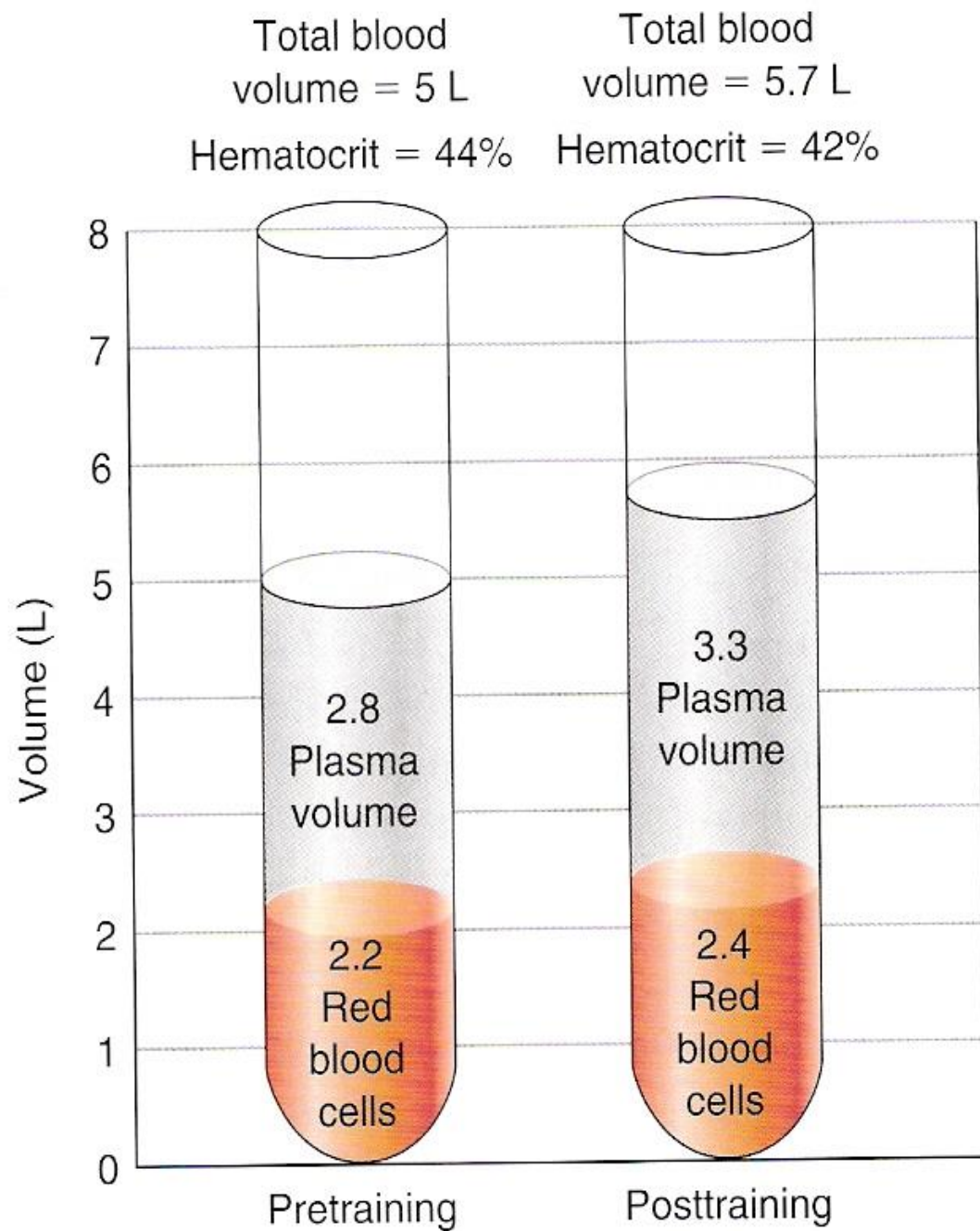
4 שינויים שמתרחשים, בנוסף לעלייה בתפוקת הלב, ומסייעים בהגדלת

זרימת הדם לשרירים שתביא עימה דלקים מטבוליים וחמצן:

- עליה של יותר מ - 15% במספר נימי הדם שמקיפים כל סיב שריר.
- פתיחת נימי דם נוספים שקיימים בשרירים, שאצל הלא מאומן נשארים סגורים ואינם שמישים.
- חלוקה יעילה יותר של זרם הדם כך שהשרירים הפעילים יקבלו יותר דם והשרירים שאינם פעילים ואברים שאינם נחוצים למאמץ יקבלו פחות דם.
- עלייה של נפח הדם הכולל שנובעת מעלייה בנפח הפלסמה ובנפח תאי הדם האדומים.

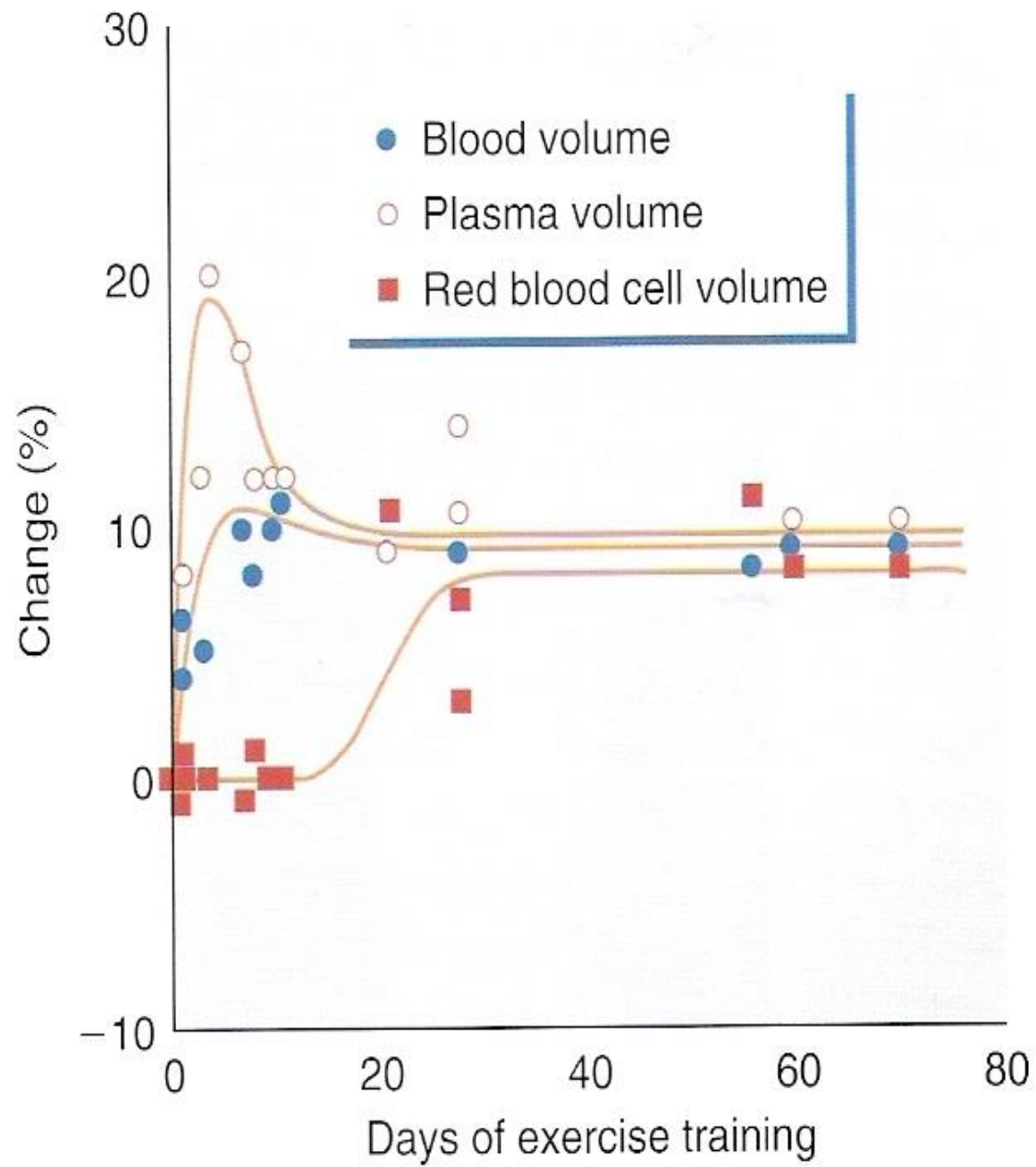
יחס נימי דם/סיבי שריר כתלות בצח"מ





השינוי בנפח והרכב הדם

בעקבות אימון

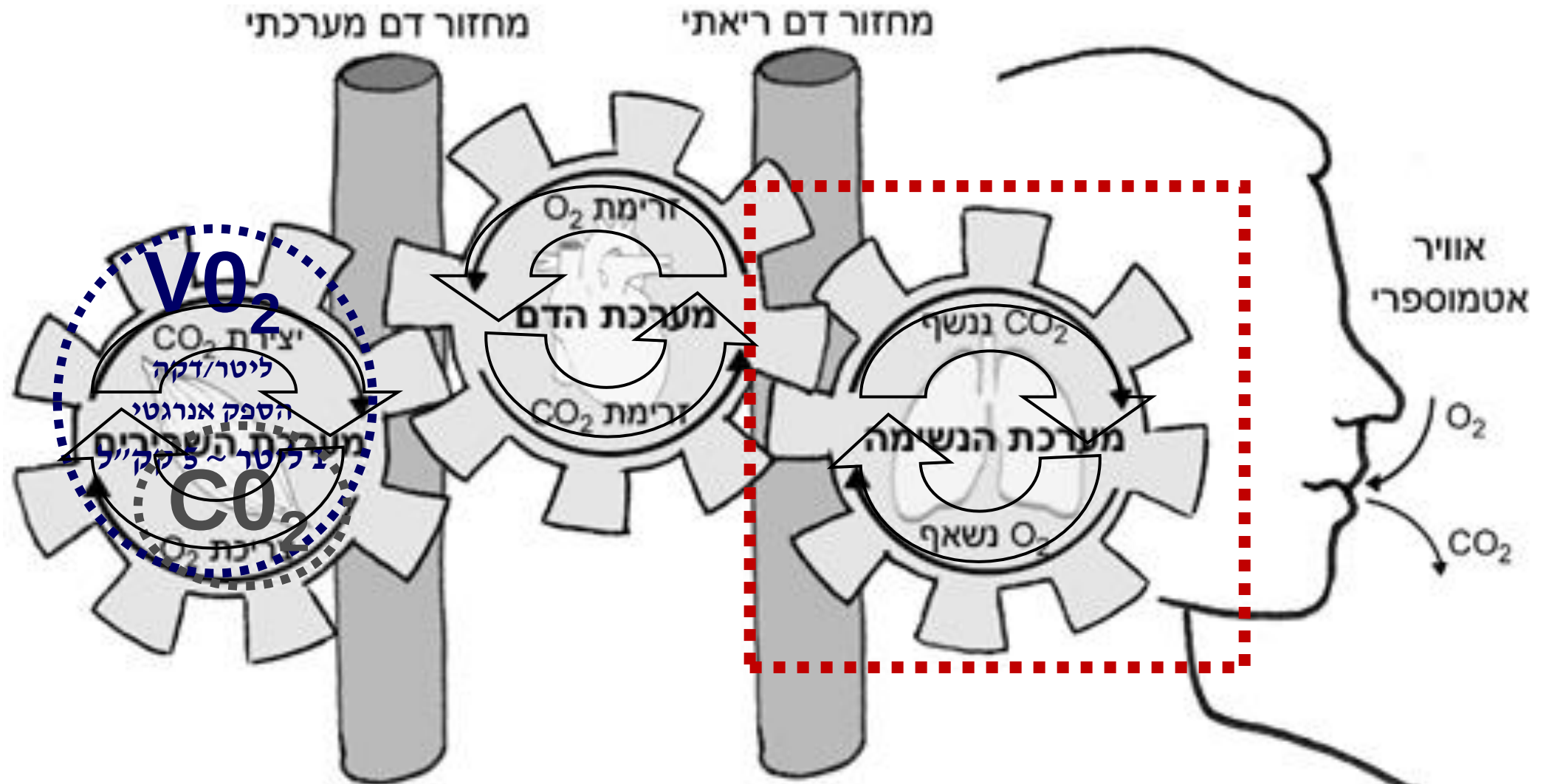


שינוי בנפח הדם

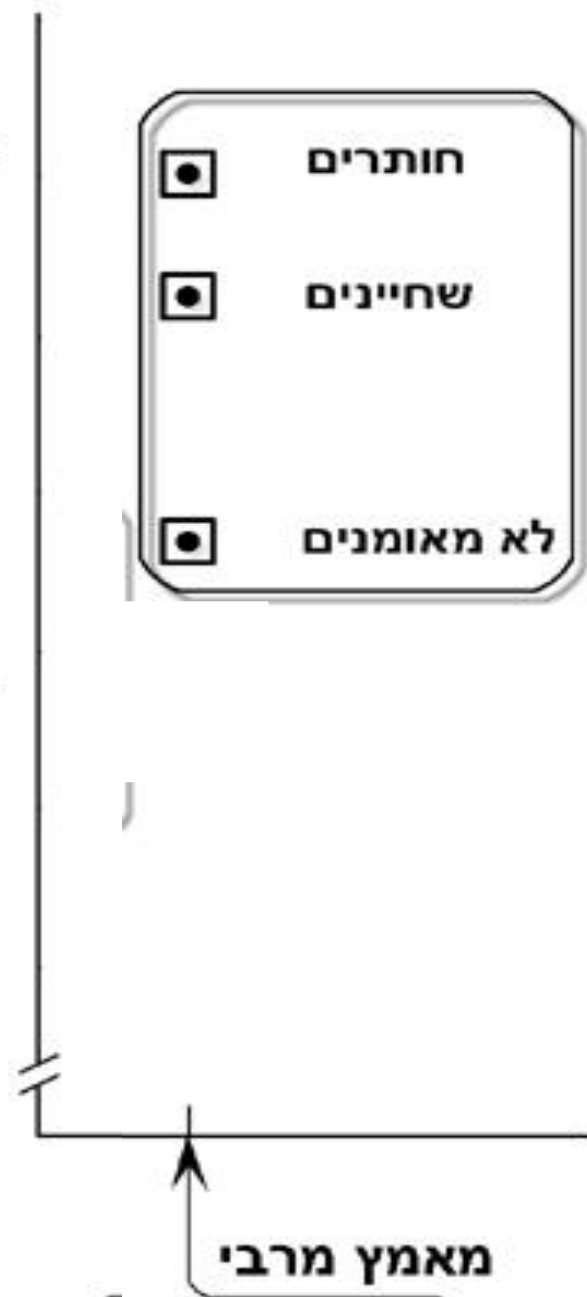
תגובת לחץ דם

- ירידה בלח"ד העורקי בעת מאמץ תת מרבי נתון (ירידה בתנגודת לזרימה)
- עליה בלח"ד סיסטולי וירידה בלח"ד דיאסטולי במאמץ מרבי (עליה בתפוקת לב מרבית וירידה בתנגודת לזרימה)
- לח"ד סיסטולי ודיאסטולי במנוחה יורדים בדר"כ אצל אנשים שלחץ הדם שלהם היה גבולי או מעט גבוה לפני האימון. ירידה של כ- 10 מ"מ בסיסטולי וכ- 8 מ"מ בדיאסטולי נצפתה אצל אנשים עם יתר לחץ דם.

אפקט אימון - שרשרת פיזיולוגית

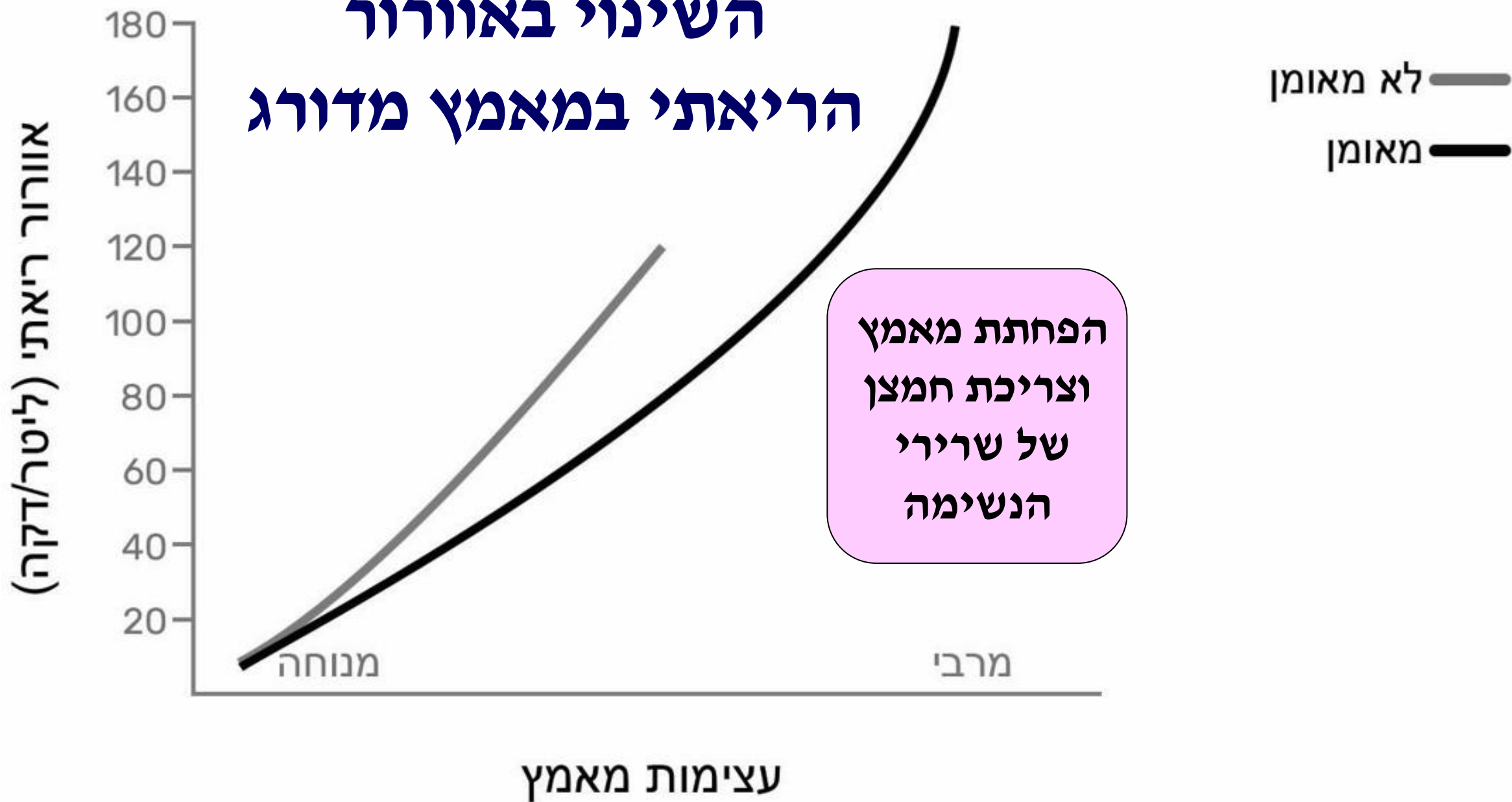


קצב דיפוזיית החמצן בריאות



קצב הדיפוזיה
במאמץ מרבי

השינוי באורור הריאתי במאמץ מדורג



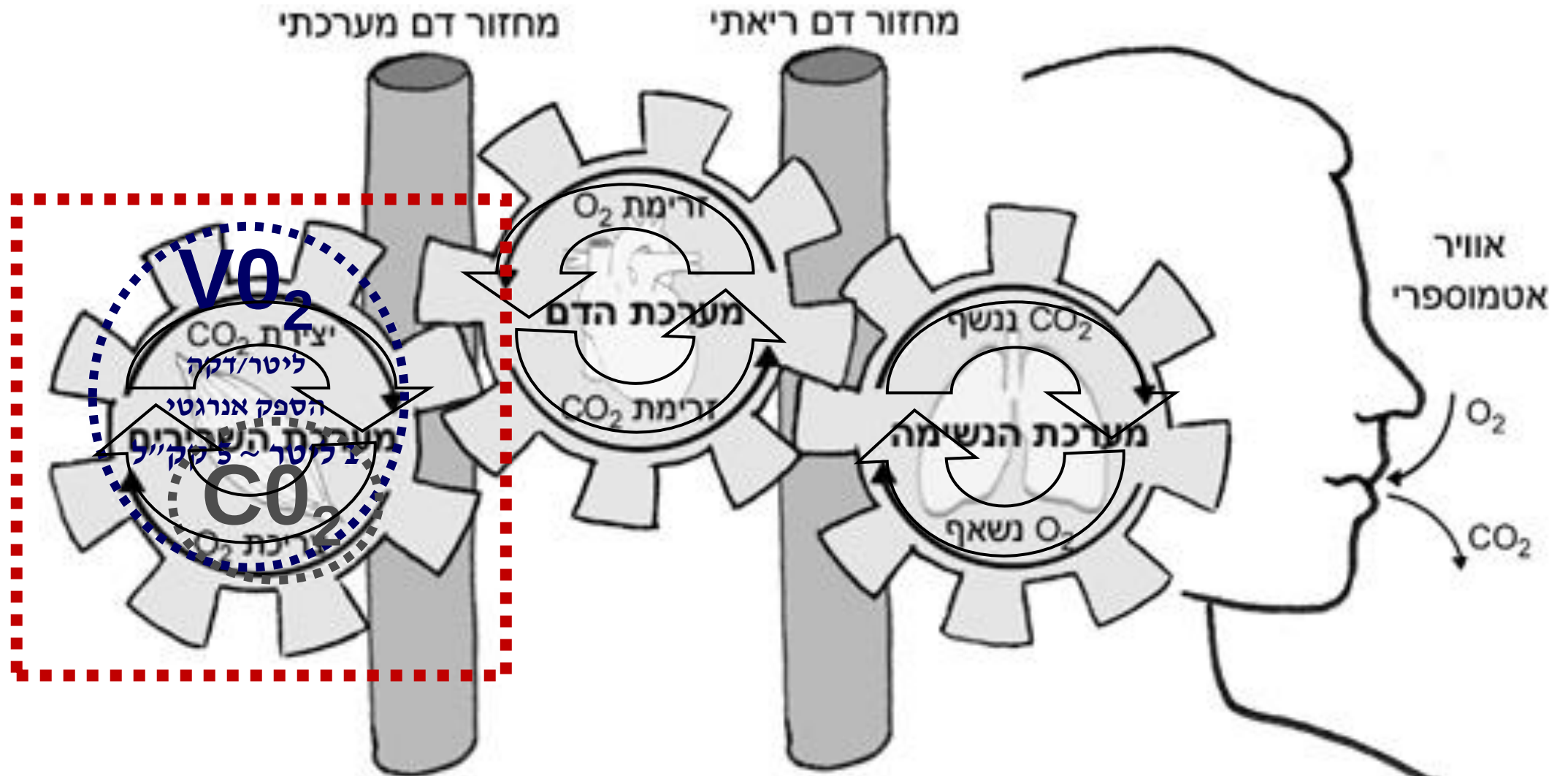
שיפור היכולת של שרירי הנשימה

אימון גורם לעלייה ברמת האנזימים האירוביים בשרירי הנשימה שמאפשרת להם לשמור על רמות גבוהות של אוורור תת-מרבי לפרקי זמן ממושכים.

שיפור בקיבולת החיונית

קיבולת חיונית היא נפח האוויר המרבי שניתן לנשוף מסוף שאיפה מרבית. זהו הנפח המרבי העומד ל"רשות" האדם. ערכיה: 4 - 4.5 ליטר. שחיה וצלילה גורמות להגדלת הקיבולת החיונית מעבר לנורמה. בפעילויות אלו שרירי השאיפה מתחזקים כתוצאה מעבודה כנגד ההתנגדות, שנגרמת מלחץ המים על כלוב בית החזה. נפחי הריאות של אנשים מאומנים, שאינם שחיינים או צוללנים, נמצאים בתוך הטווח הנורמלי של הערכים.

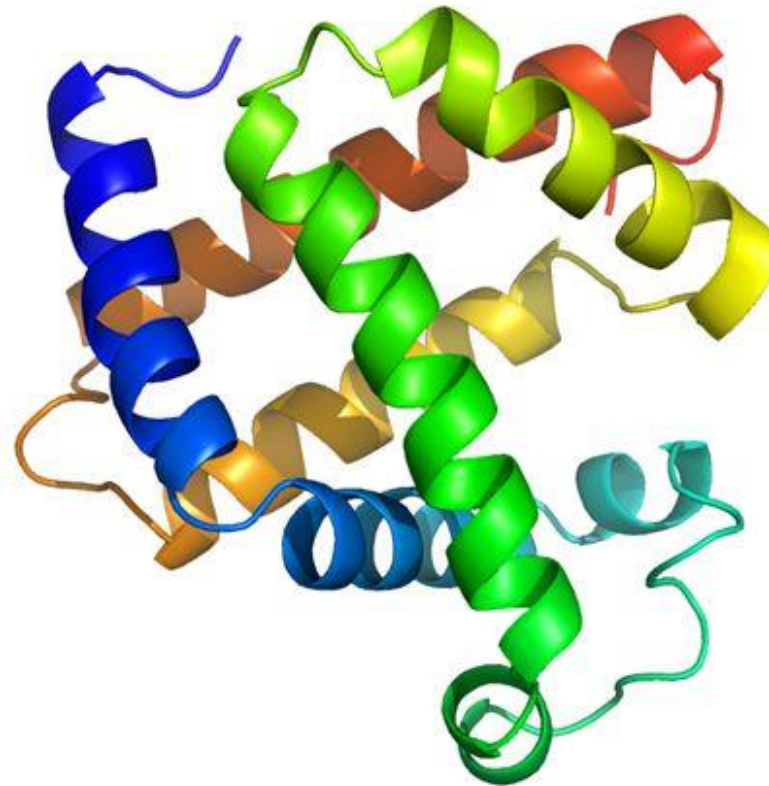
אפקט אימון - שרשרת פיזיולוגית



עלייה של 75-80% בתכולת המיוגלובין

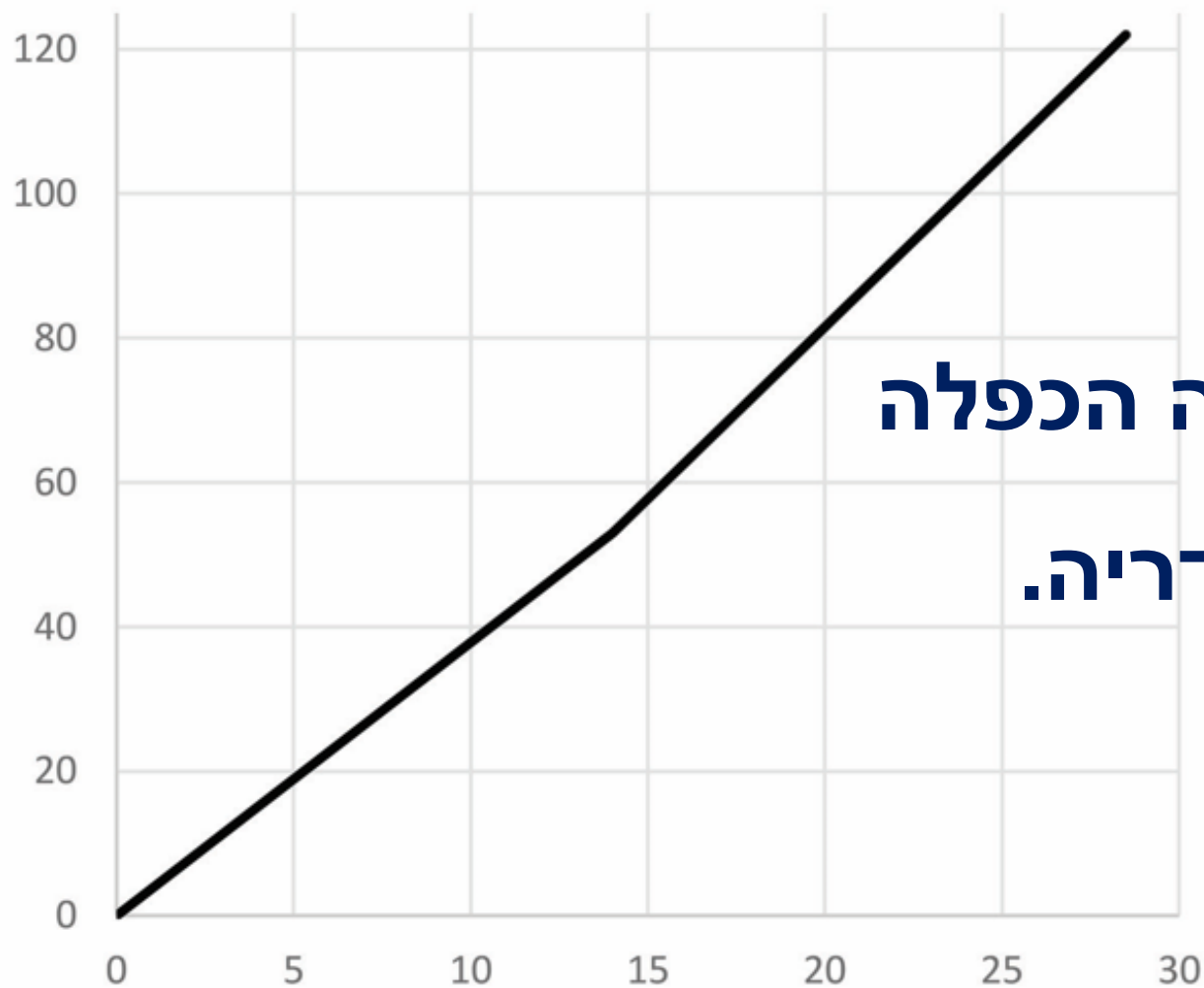
INCREASED MYOGLOBIN

- Muscles can store more Myoglobin as a result of regular exercise
- Binds to oxygen in muscles
- Improved Oxygen carrying capacity



השינוי במספר המיטוכונדריה בעת תהליך אימון

העלייה באחוזים (%) במספר המיטוכונדריה



לאחר 25 שבועות חלה הכפלה
במספר המיטוכונדריה.

שבועות אימון

נפח המיטוכונדיה (אחוז מנפח התא) כתלות בצח"מ (יותר מאומן... יותר מיטוכונדריה)

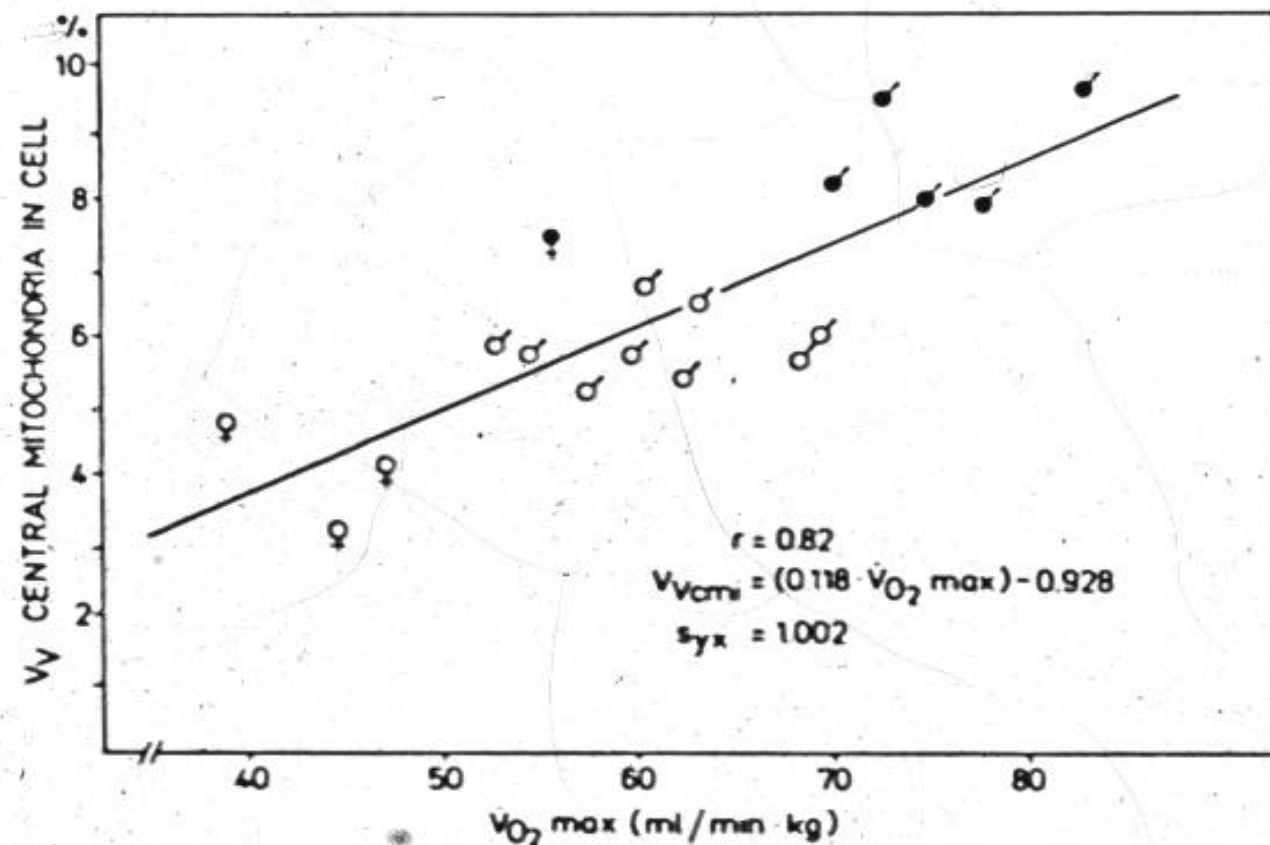
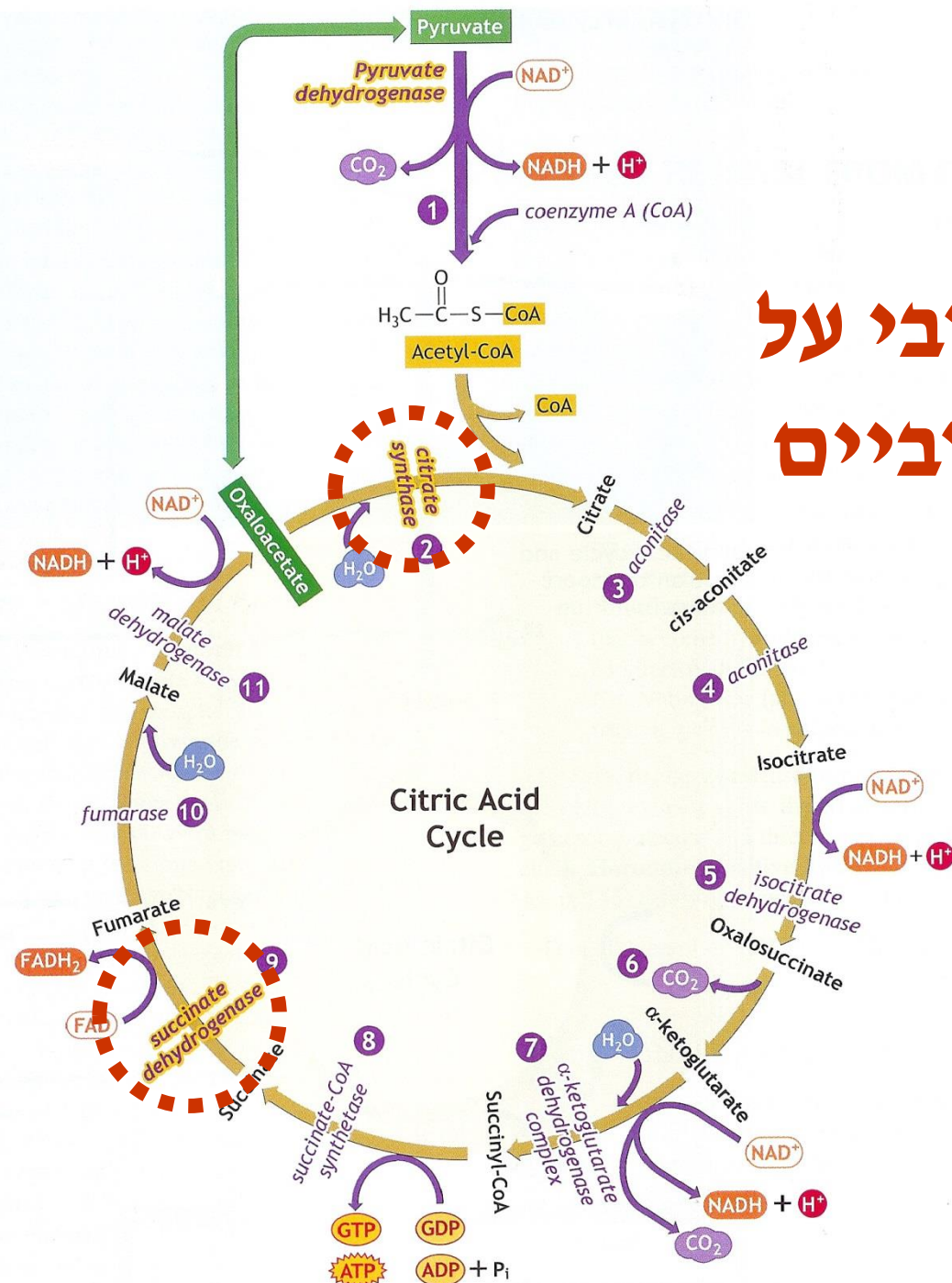


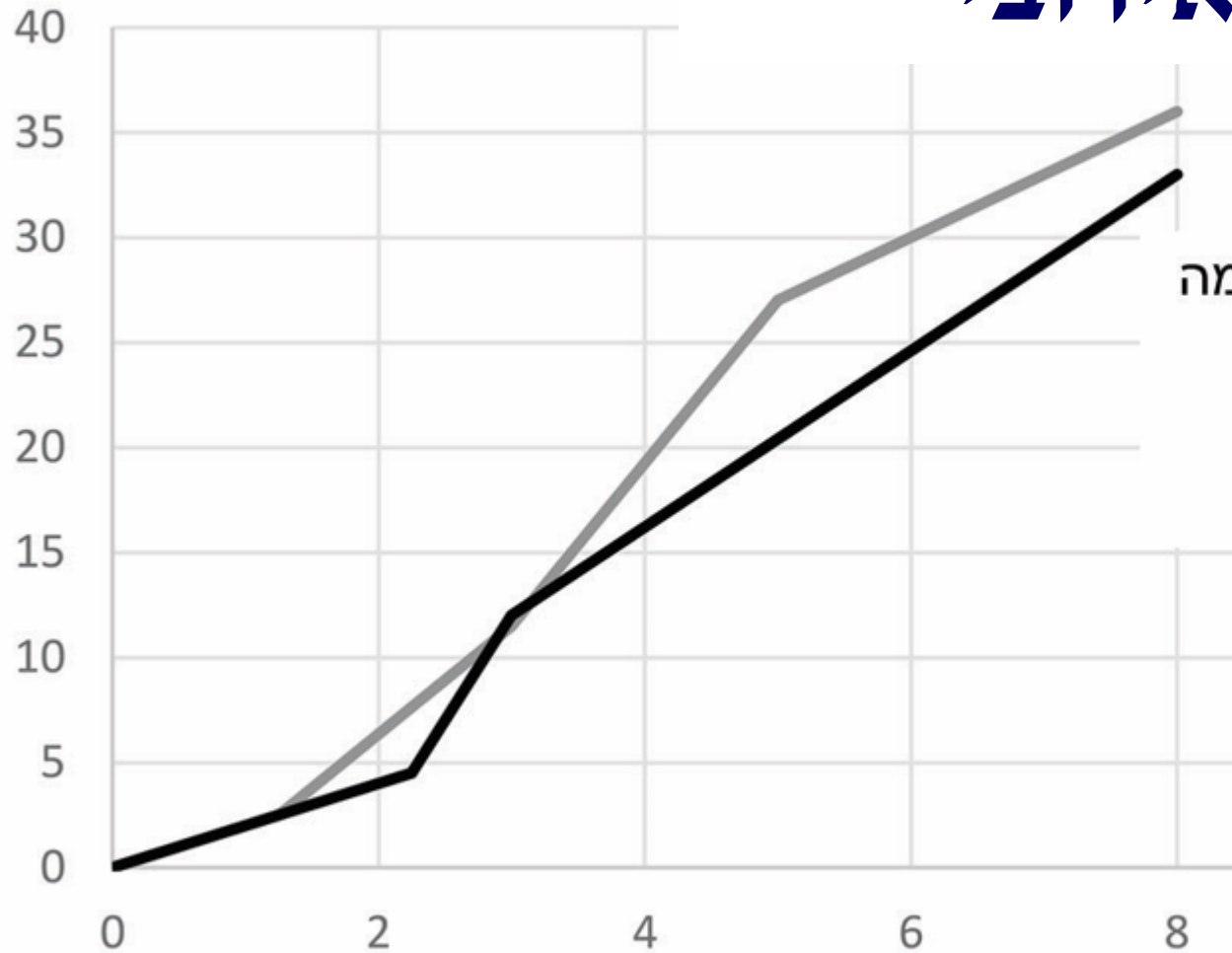
Fig. 5.11 The volume density of mitochondria in leg muscle cells is proportional to $\dot{V}O_2 \text{ max}$ in a population of untrained (open circles) and trained (full circles) humans. (From Hoppeler et al., 1973.)

השפעת אימון אירובי על רמת אנזימים אירוביים



עלייה ברמת הפעילות של אנזימי מפתח בתהליך האירובי

העלייה (%) ברמת הפעילות



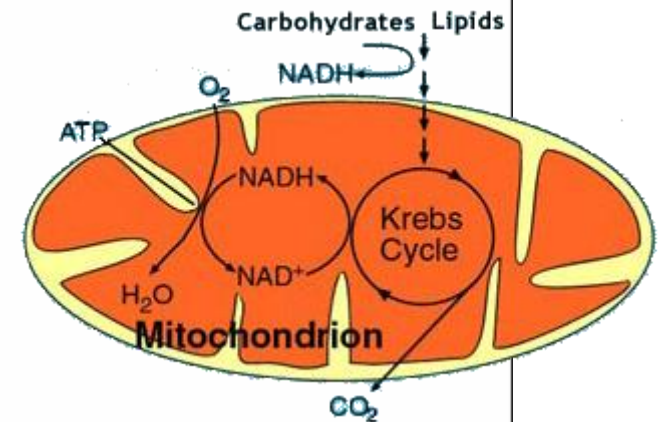
שבועות של אימון

אנזים מפתח בשרשרת הנשימה

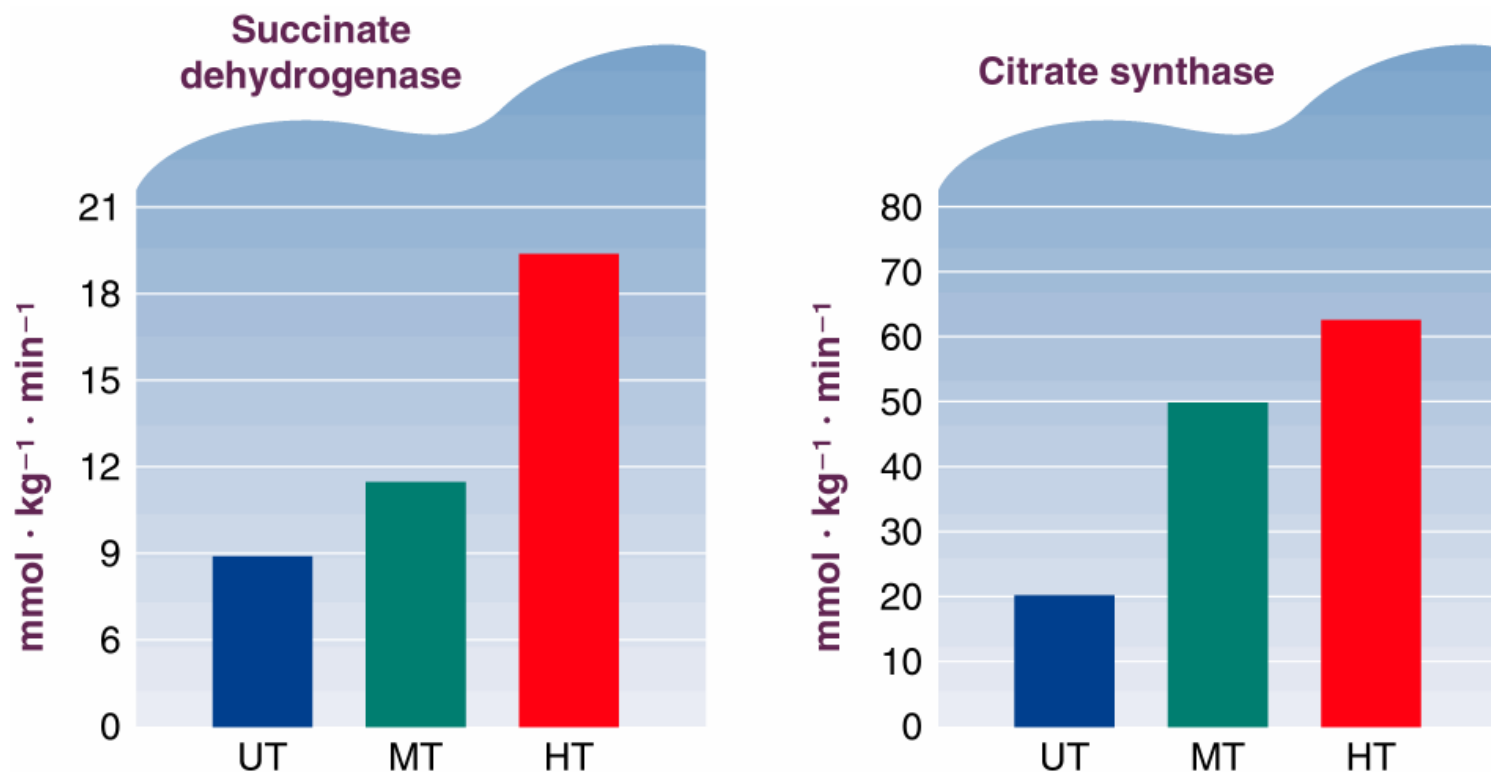
Cytochrome Oxidase

אנזים מפתח במעגל

קרבס (SDH)



LEG MUSCLE ENZYME ACTIVITIES



רמת שני אנזימים אירוביים (מעגל קרבס) אצל
אנשים עם רמת אימון שונה

UT - לא מאומנים, MT - מאומנים באופן מתון, HT - רצי מרתון מאומנים

Selected Muscle Enzyme Activities (mmol · g⁻¹ · min⁻¹) for Untrained and Aerobically Trained

	Untrained	Aerobically trained
Aerobic enzymes		
<i>Oxidative system</i>		
Succinate dehydrogenase	8.1	20.8 ^a
Malate dehydrogenase	45.5	65.5 ^a
Carnitine palmityl transferase	1.5	2.3 ^a
Anaerobic enzymes		
<i>ATP-PCr system</i>		
Creatine kinase	609.0	589.0
Myokinase	309.0	297.0
<i>Glycolytic system</i>		
Phosphorylase	5.3	3.7 ^a
Phosphofructokinase	19.9	18.9
Lactate dehydrogenase	766.0	621.0

מעגל קרבס

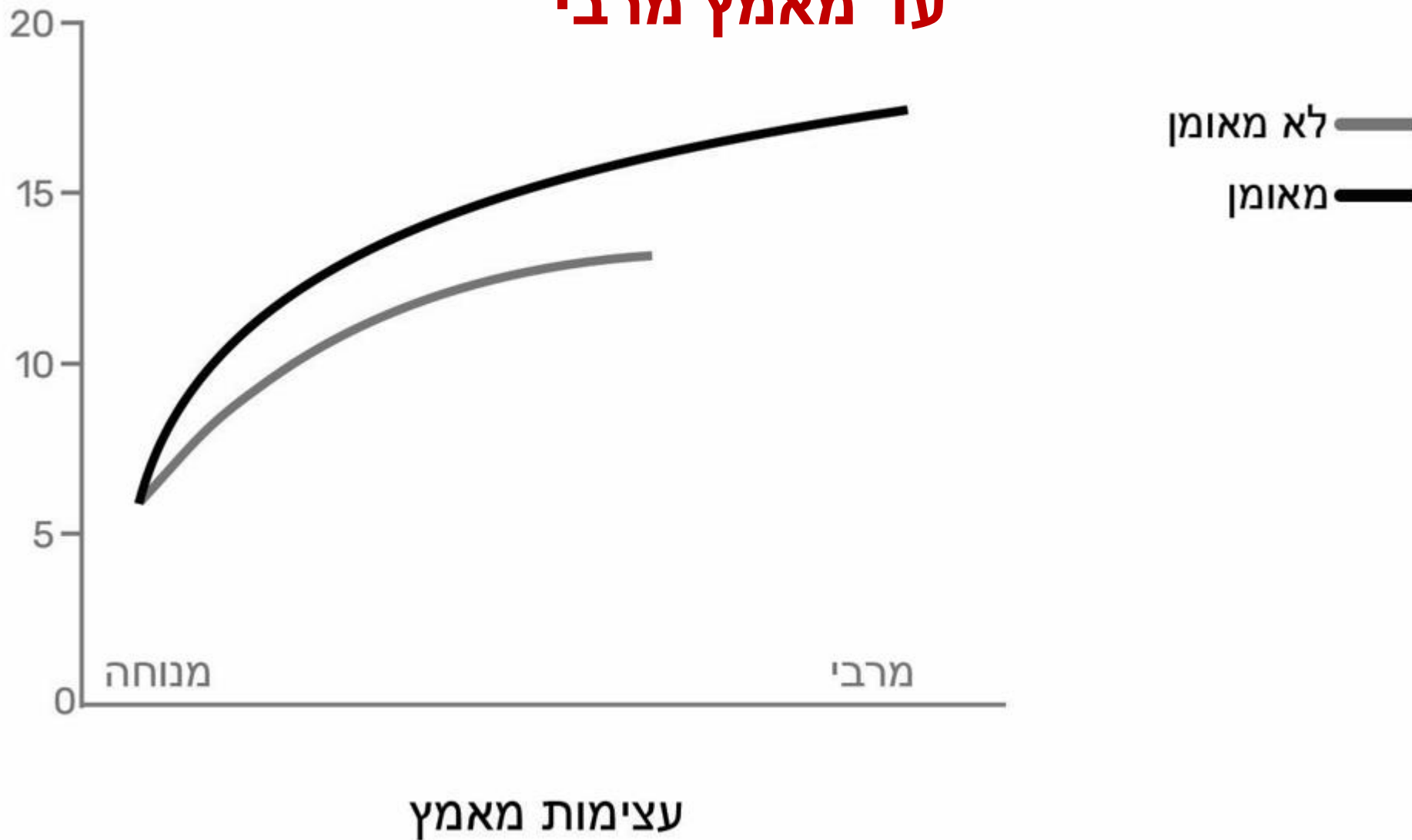
מטבוליזם של חומצות שומן

^a Denotes a significant difference from the untrained value.

ההפרש בתכולת החמצן בין העורק לווריד במנוחה ובמאמץ מדורג

עד מאמץ מרבי

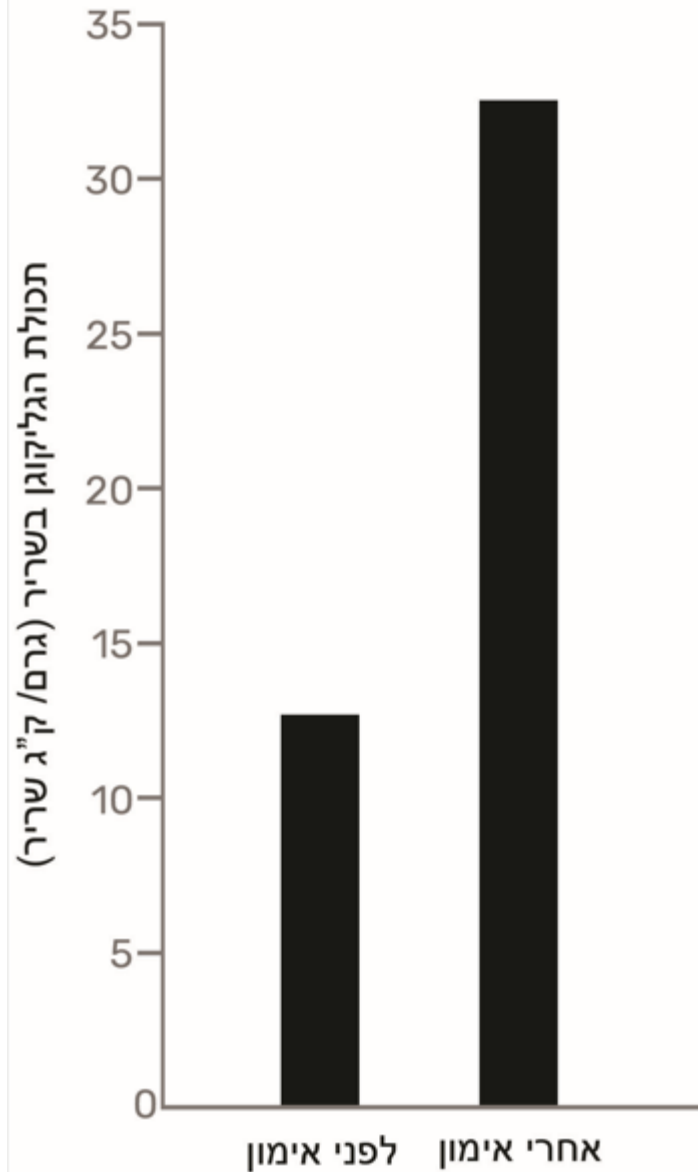
ההפרש בתכולת החמצן שבין
העורק לווריד (מ"ל חמצן / 100 מ"ל דם)



הגברת היכולת להפיק אנרגיה במסלול האירובי

השינויים שתוארו קודם (עלייה בכמות המיטוכונדריה ובגודלם, עלייה ברמת הפעילות של האנזימים האירוביים, עלייה בריכוז המיוגלובין ועלייה בצפיפות נימי הדם מסביב לתאי השריר) גורמים לכך שהמסלול האירובי מסוגל להפיק אנרגיה בהספק גבוה יותר. כתוצאה מכך פוחתת תרומתו של המטבוליזם האנאירובי-לקטי בהפקת האנרגיה ואתה רמת הלקטט ויוני המימן בעת מאמץ תת-מרבי נתון.

עלייה ביכולת לאגור גליקוגן



הגדלת מאגרי הטריגליצרידים בשריר

מאגרי הטריגליצרידים בשריר אצל אנשים שהשתתפו באימוני סבולת גדולים פי שניים ויותר מאשר אצל אנשים לא מאומנים. הגדלת מאגרי הטריגליצרידים, שמתאפסנים בעיקר בקרבת המיטוכונדריה, מגבירה את הזמינות המיידית של חומצות השומן לצורך הפקת אנרגיה.

שינוי הרכב הדלק המטבולי במאמץ נתון

•הגברת פעילות האנזימים המעורבים בפרוק חומצות שומן

•הגדלת צפיפות נימי הדם - האצת קצב המעבר של חומצות שומן מהדם

לתאי השריר

•הגדלת מאגרי הטריגליצרידים התוך-שריריים

•הפחתה בחומציות (מעכבת ניווד ח. שומן) במאמץ בעצימות נתונה

שינוי הרכב הדלק המטבולי במאמץ נתון - סיכום

• עלייה בשימוש בחומצות שומן כדלק מטבולי במאמץ נתון

• ירידה מקבילה בשימוש בפחמימות כדלק מטבולי (חיסכון בגליקוגן)

• עלייה בצריכת החמצן במאמץ נתון (בכדי להפיק הספק אנרגטי נתון

יש צורך ביותר חמצן כאשר הרכב הדלק מכיל יותר חומצות שומן -

שווי הערך הקלורי: 4.69 קלוריות לעומת 5.05 קלוריות).

עלות אנרגטית
(קלוריות)



Figure 21.5C. Aerobic exercise training enhances capacity to catabolize fat in exercise. During constant-load, prolonged exercise, total energy derived from fat oxidation increases significantly following training. This carbohydrate-sparing adaptation may result from facilitated release of fatty acids from adipose tissue depots (augmented by a reduced blood lactate level) and an increased amount of triglyceride within the endurance-trained muscle fibers. (From Hurley BF, et al. Muscle triglyceride utilization during exercise: effect of training. J Appl Physiol 1986;5:62.)

Copyright © 2001 Lippincott Williams & Wilkins

עלות אנרגטית של מאמץ בעצמות
קבועה שהספורטאי נמצא במצב יציב

כמות האנרגיה
משומן
(קלוריות)



Figure 21.5B. Aerobic exercise training enhances capacity to catabolize fat in exercise. During constant-load, prolonged exercise, total energy derived from fat oxidation increases significantly following training. This carbohydrate-sparing adaptation may result from facilitated release of fatty acids from adipose tissue depots (augmented by a reduced blood lactate level) and an increased amount of triglyceride within the endurance-trained muscle fibers. (From Hurley BF, et al. Muscle triglyceride utilization during exercise: effect of training. J Appl Physiol 1986;5:62.)

Copyright © 2001 Lippincott Williams & Wilkins

עלייה בחלקן של חומצות השומן בהרכב הדלק המטבולי
בעת מאמץ בעצימות קבועה שהספורטאי נמצא במצב יציב

כמות האנרגיה
מפחמימות
(קלוריות)

חיסכון בגליקוגן

לפני אימון

אחרי אימון

משך המאמץ

Before training After training

Figure 21.5A. Aerobic exercise training enhances capacity to catabolize fat in exercise. During constant-load, prolonged exercise, total energy derived from fat oxidation increases significantly following training. This carbohydrate-sparing adaptation may result from facilitated release of fatty acids from adipose tissue depots (augmented by a reduced blood lactate level) and an increased amount of triglyceride within the endurance-trained muscle fibers. (From Hurley BF, et al. Muscle triglyceride utilization during exercise: effect of training. J Appl Physiol 1986;5:62.)

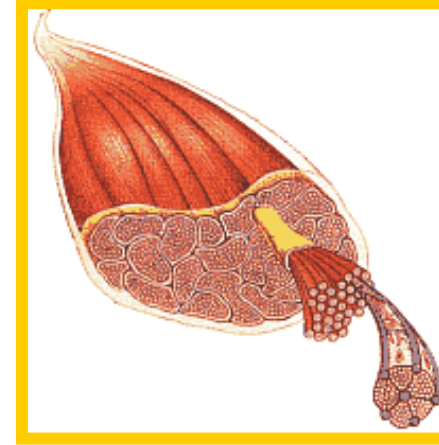
Copyright © 2001 Lippincott Williams & Wilkins

ירידה בחלקן של הפחמימות בהרכב הדלק המטבולי בעת
מאמץ בעצימות קבועה שהספורטאי נמצא במצב יציב

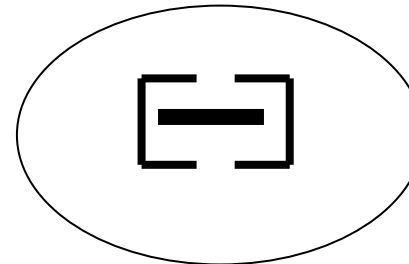
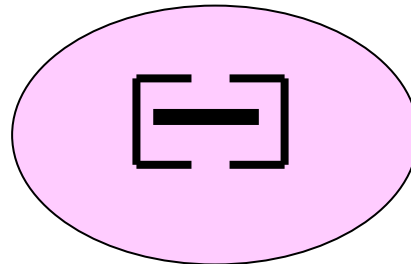
עליה בגודל תאי השריר (היפרטרופיה)

- כל השינויים שתוארו לעיל במערכת השרירים גורמים לעלייה בנפח תאי השריר, שעברו את הגירוי האימוני האירובי.
- ההיפרטרופיה הינה ספציפית לסיבי שריר מסוג I. הם נעשים גדולים יותר וחתך הרוחב הכללי שלהם גדל עד כ- 25%.
- בסיבי שריר מסוג II, שאינם מגויסים באימון אירובי באותו היקף כמו סוג I, לא תהיה עליה בחתך הרוחב הכללי.

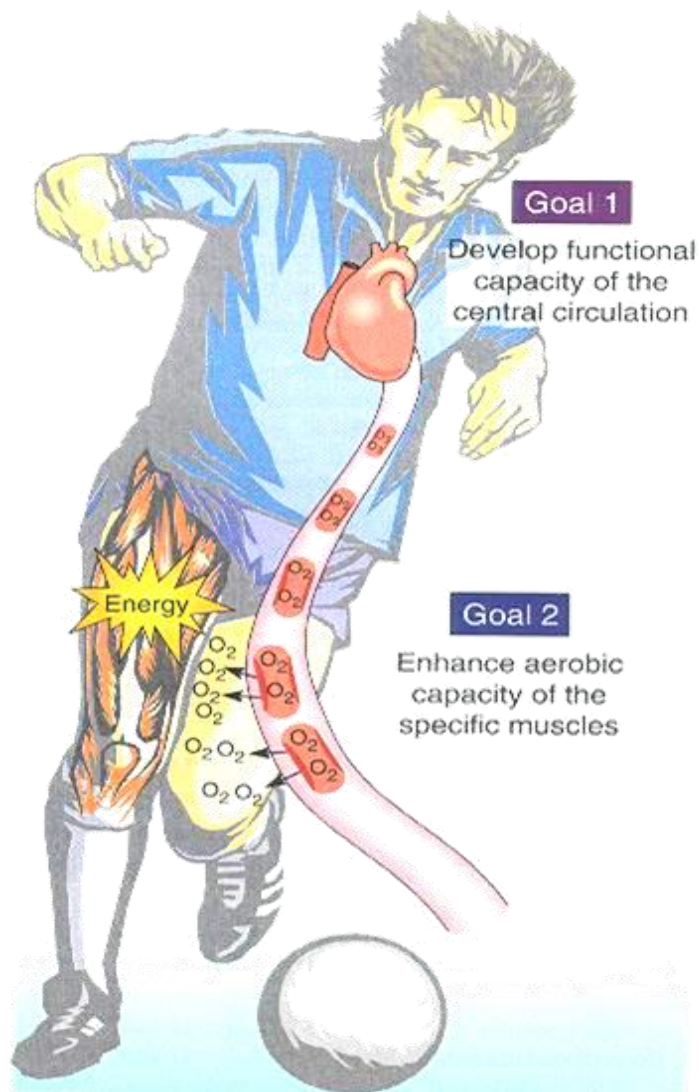
היפרטרופיה של תאי השריר



**הפיכת יחידות מהירות (לבנות) ליחידות
ביניים (ורודות)**



אפקט אימון במערכות מרכזיות - סיכום



• עלייה בתפוקת לב מרבית

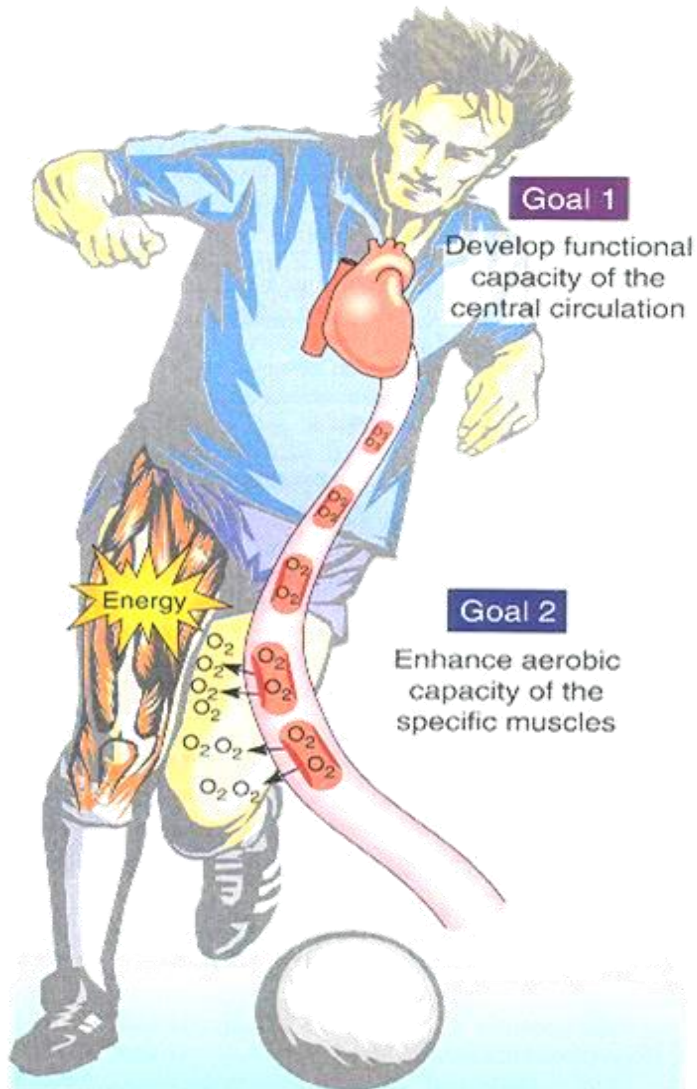
• עלייה בנפח הדם (כמות המוגלובין ונפח הפלסמה)

• עלייה בקצב הדיפוזיה במאמץ מרבי

• עלייה בכמות הדם המוזרמת לשרירים

הפעילים במאמץ מרבי

אפקט אימון במערכת השרירים - סיכום



• עלייה בריכוז המיוגלובין

• עלייה בכמות ובגודל המיטוכונדריה

• עלייה ברמת הפעילות של אנזימים אירוביים

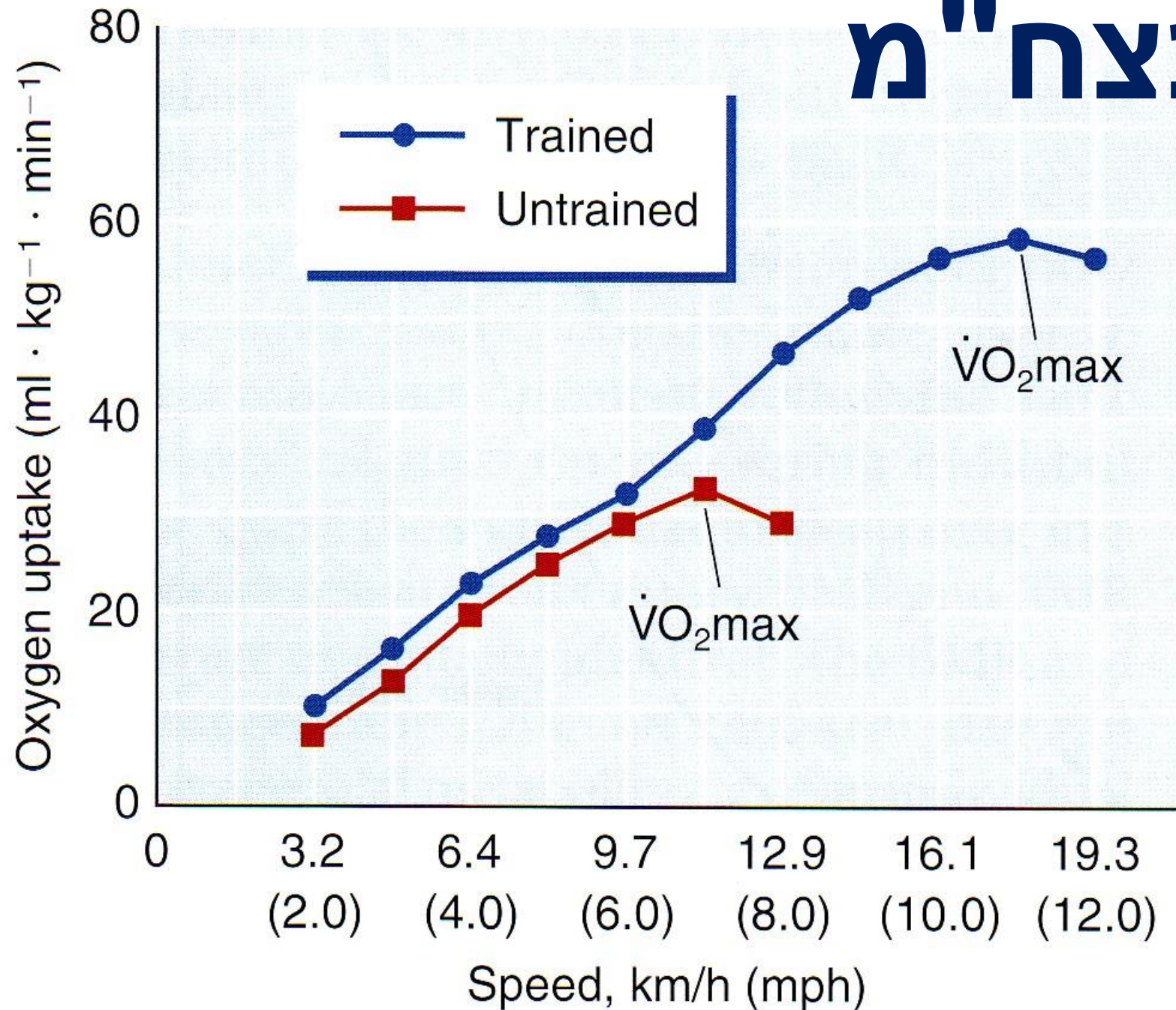
• שיפור בהספק האנרגטי של המסלול האירובי

השיפור בצח"מ בעקבות אימון לפיתוח היכולת האירובית

צריכת חמצן מרבית (מ"ל/ק"ג/דקה)



עלייה בצח"מ

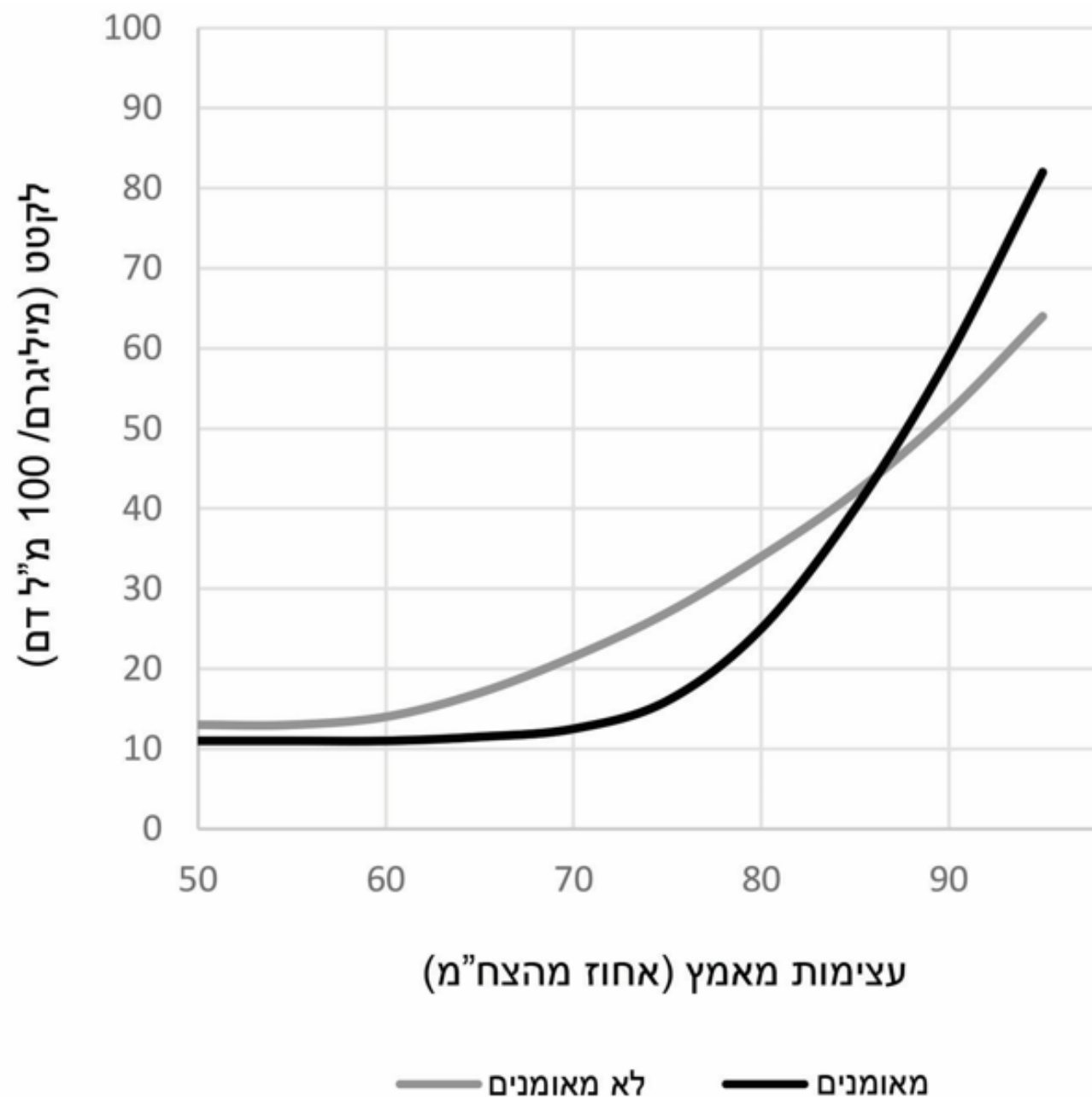


השגת הצח"מ הגבוהה ביותר (מיצוי

הפוטנציאל) יכולה להתרחש תוך פרק זמן של

18 חודשים (שנה וחצי) של אימון אינטנסיבי.

סף הלקטט אצל אנשים מאומנים ושאינם מאומנים



היכולת ההישגית בסבולת ממושכת

ממשיכה להשתפר, למרות שאין שינוי

בצח"מ, עקב השיפור בסבולת

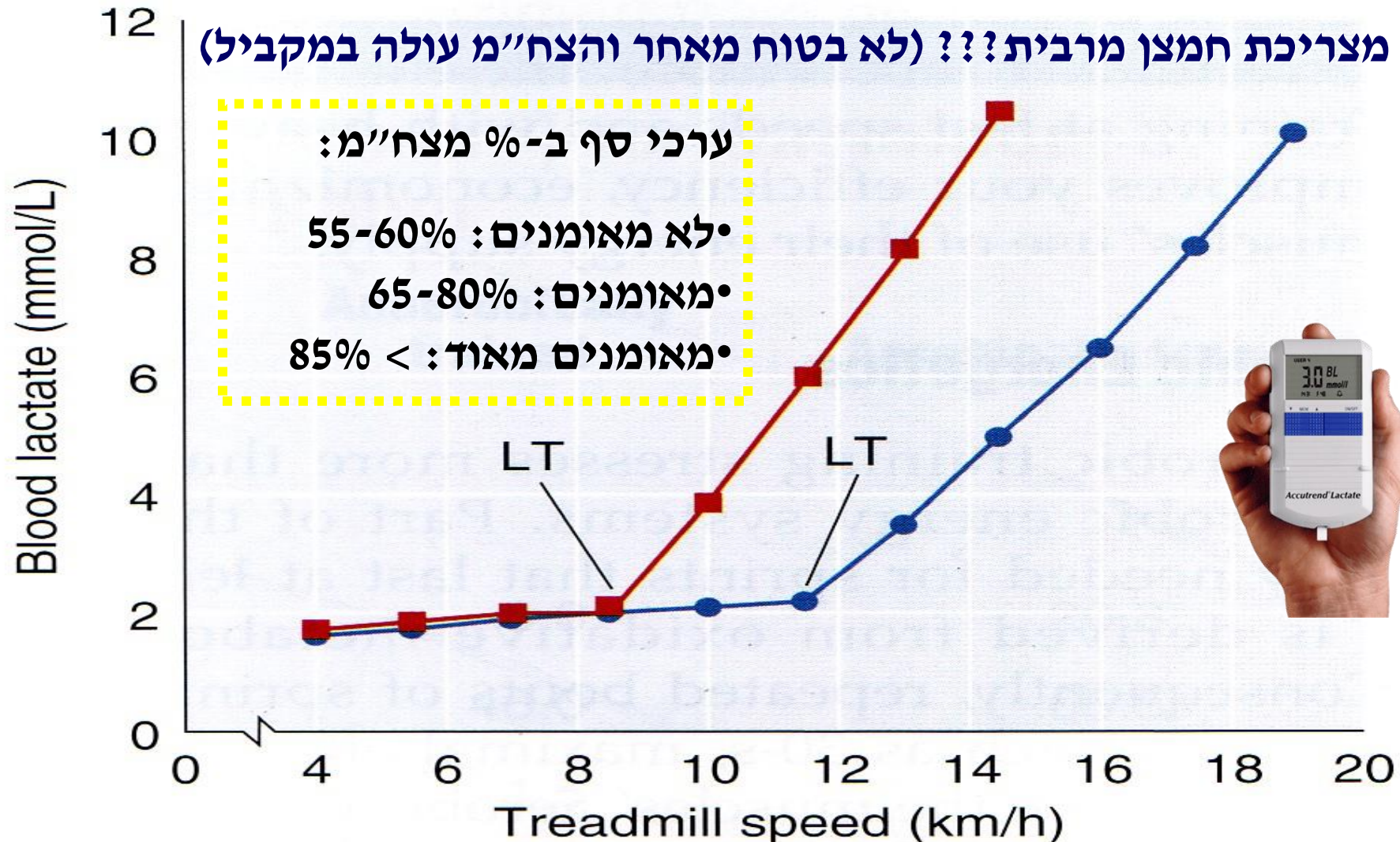
האירובית שבא לביטוי בסף האנאירובי

שיפור בסף האנאירובי, יבוא לביטוי בפרמטרים הבאים:

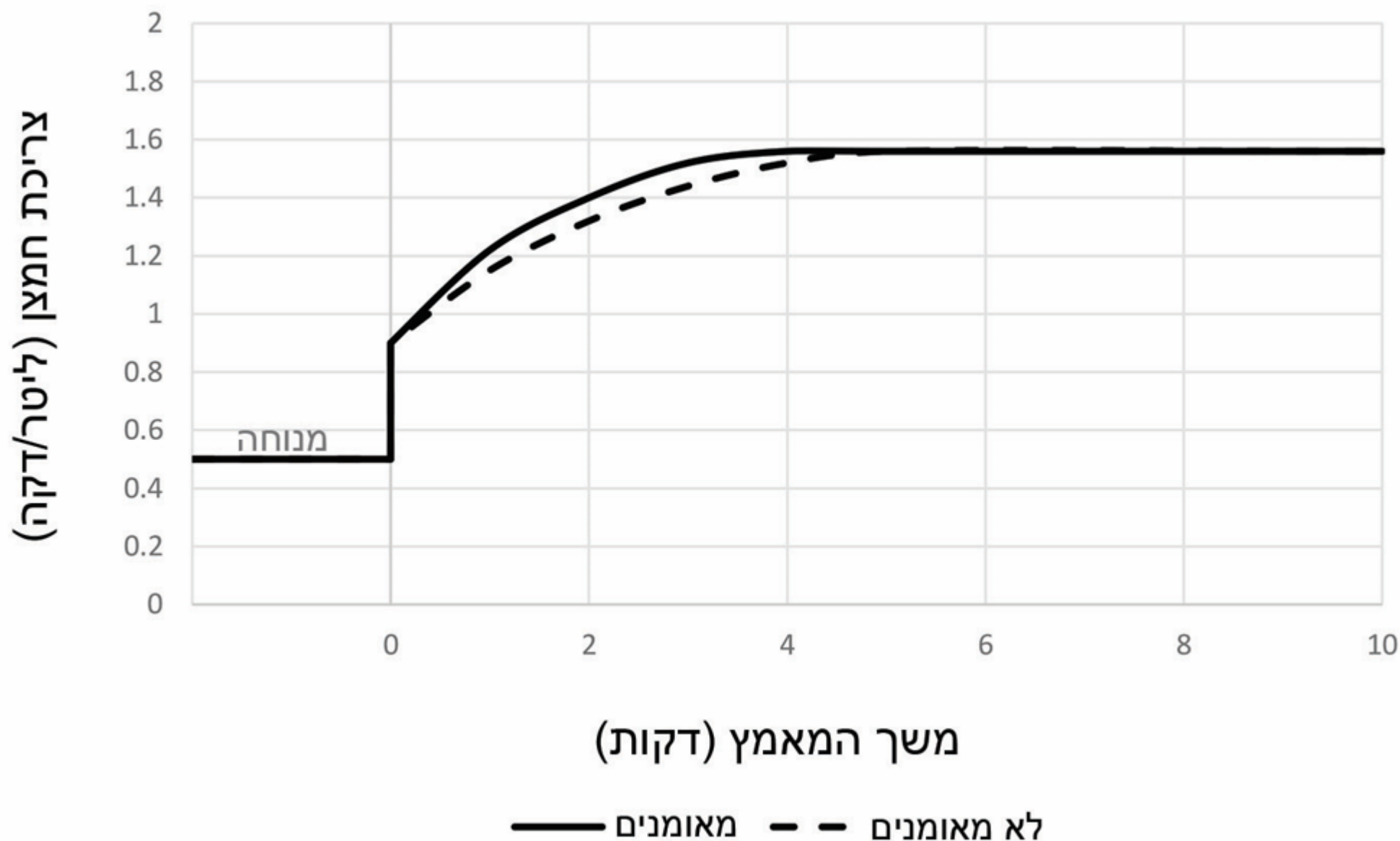
• מהירות ריצה !!!

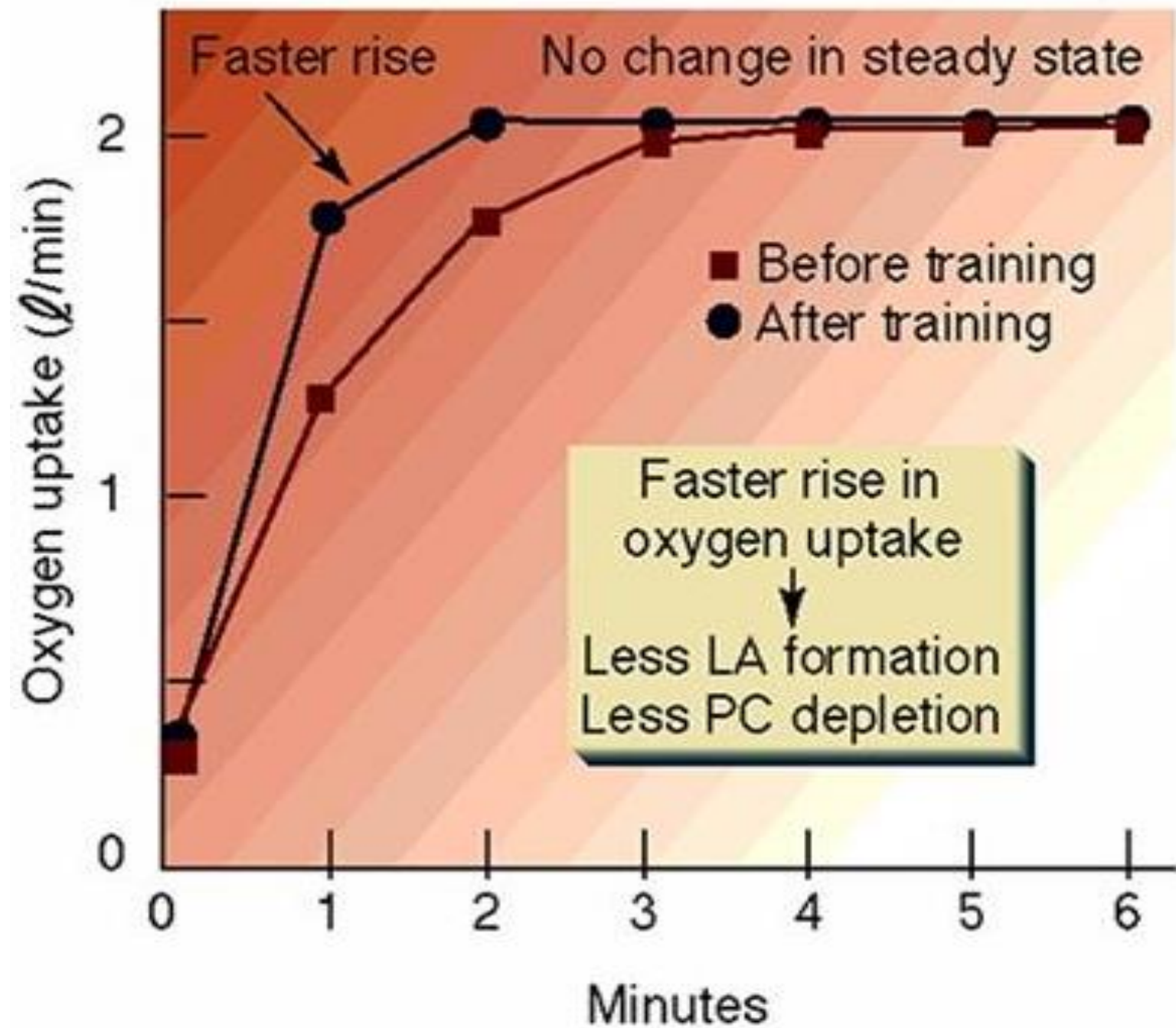
• צריכת חמצן (מ"ל/ק"ג/דק') !!!

• % מצריכת חמצן מרבית ??? (לא בטוח מאחר והצח"מ עולה במקביל)



השפעת אימון על משך ההגעה למצב יציב במאמץ תת-מרבי





הקטנת גירעון החמצן

עד להגעה למצב יציב

במאמץ נתון

גורמים המשפיעים על התגובה לאימון של מתאמנים שונים:

- רמת הכושר ההתחלתית
- תורשה - קובעת את טווח הצח"מ הפוטנציאלי מהנמוך לגבוה. האימון הוא שייקבע להיכן יגיע המתאמן בתוך הטווח.
- מין - לנשים / נערות בריאות ולא מאומנות ישנו צח"מ שנמוך ב: 20-25% מגברים / נערים בריאים ולא מאומנים. לספורטאיות סבולת מאומנות יש צח"מ שנמוך ב - 10% מזה של ספורטאי סבולת מאומנים.
- רגישות/תגובתיות גבוהה (high responders) ורגישות/תגובתיות נמוכה (low responders) - במחקרים נמצאו שיפורים אישיים בצח"מ בטווח של 0-50% ואף יותר אצל אנשים שונים באותה רמת כושר התחלתית שביצעו את אותה תוכנית אימונים בהיענות גבוהה.

The 84-Day Deconditioning Study

7 נבדקים מאומנים:

- שנה של אימון איכותי (רצף ואינטרוולים) בתדירות של 5 אימונים/שבוע.
- אח"כ 84 ימים של אורח חיים יושבני (פחות מ- 500 צעדים/יום)
- ימי בדיקה: 0, 12, 21, 56, 84

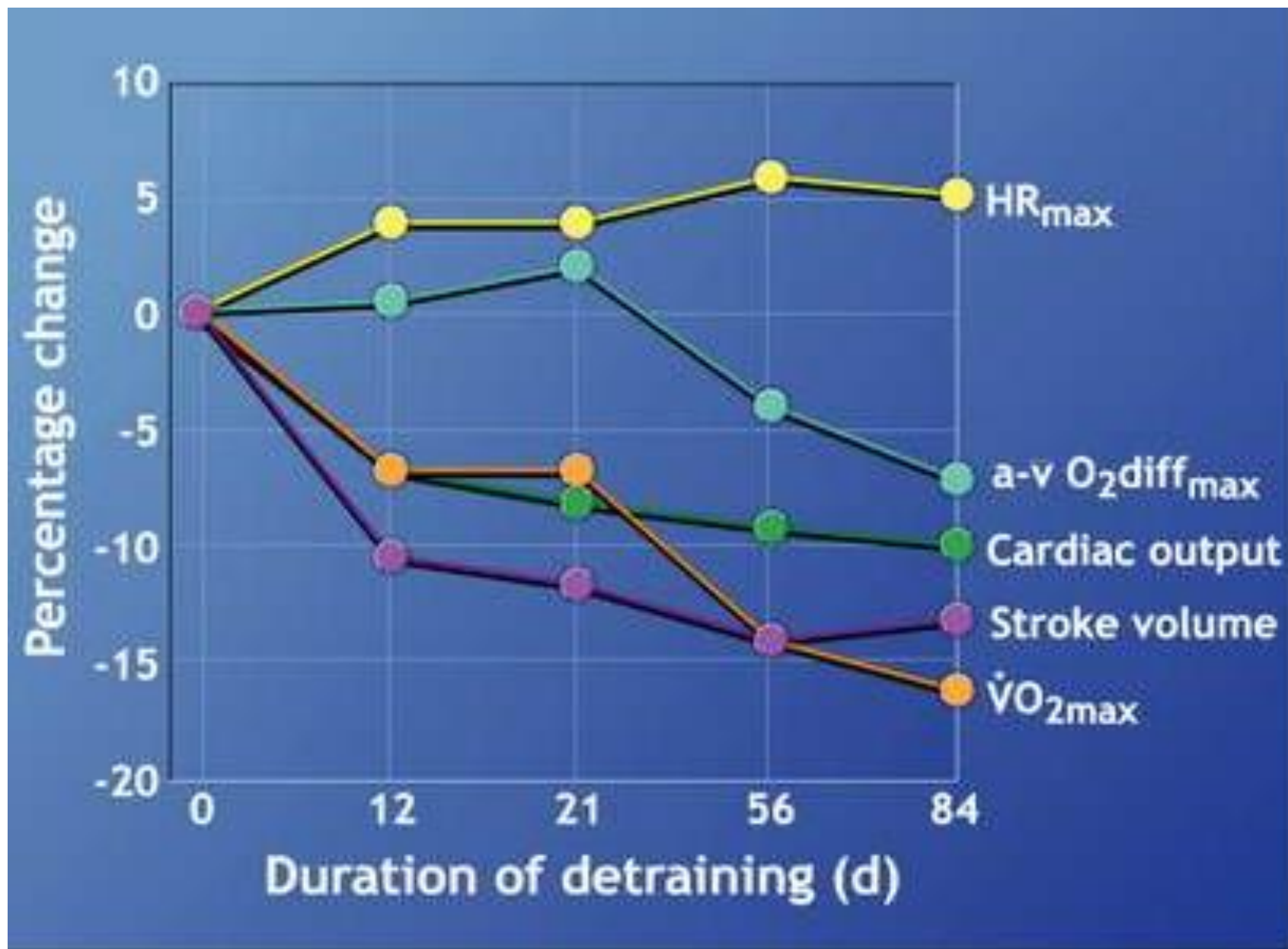


fig 17.1. Average changes in maximum heart rate (HR_{max}), stroke volume, arteriovenous oxygen differences ($\bar{v}O_2diff_{max}$), cardiac output, and $\dot{V}O_{2max}$ over 84 days of detraining.