

# הפיזיולוגיה של המאמץ

מהלכה למעשה

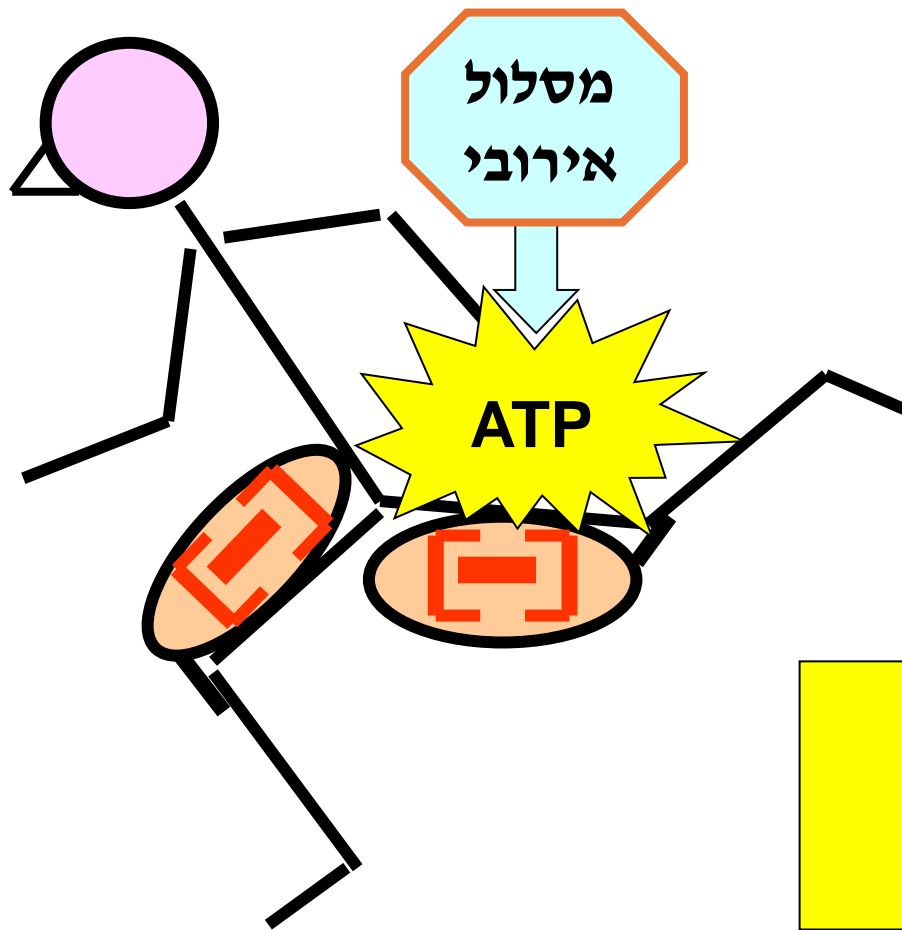


— שחר ניס —

## פרק 2.6

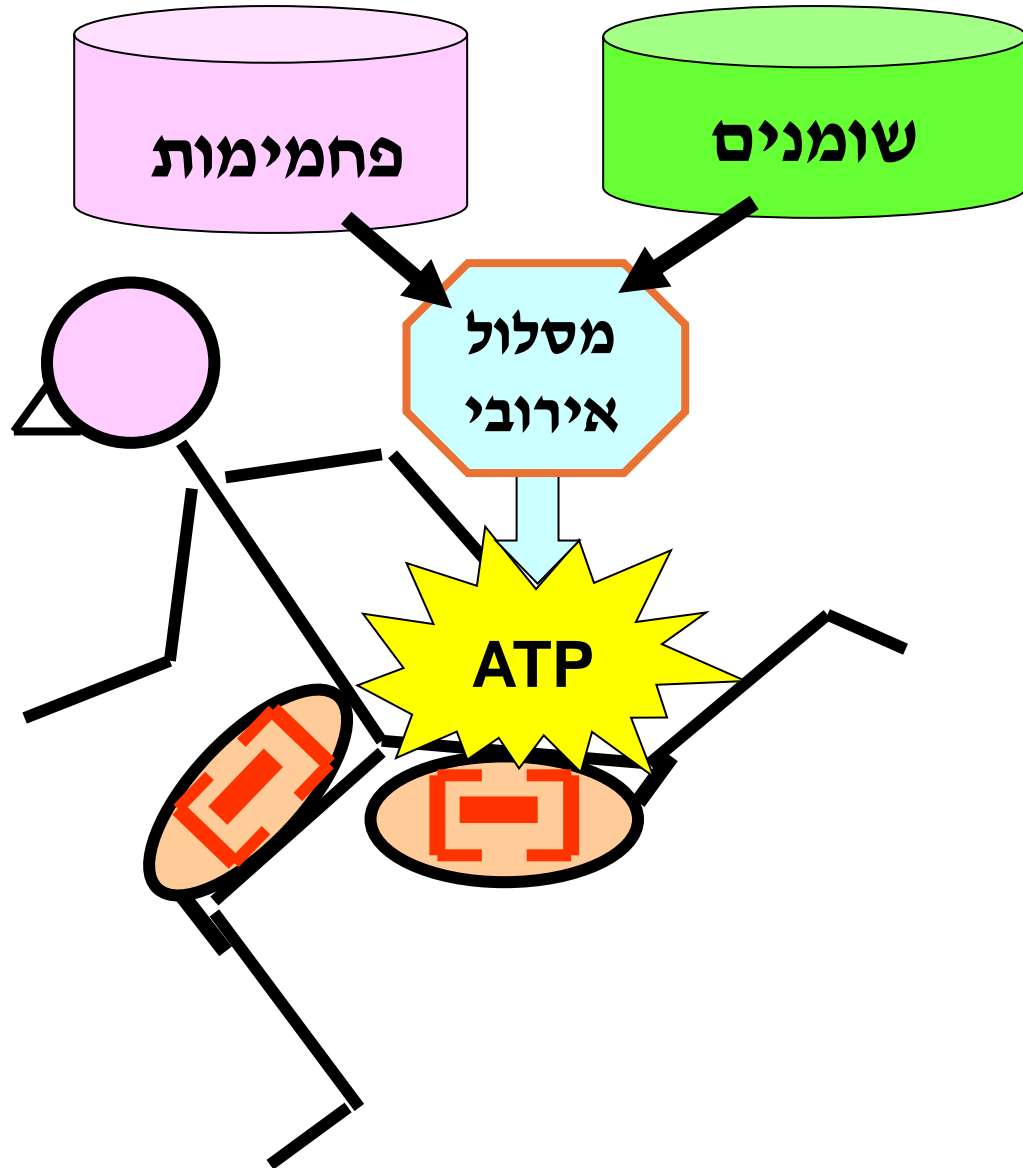
# עלות אנרגטית

# איזה מסלול מספק את עיקר האנרגיה?

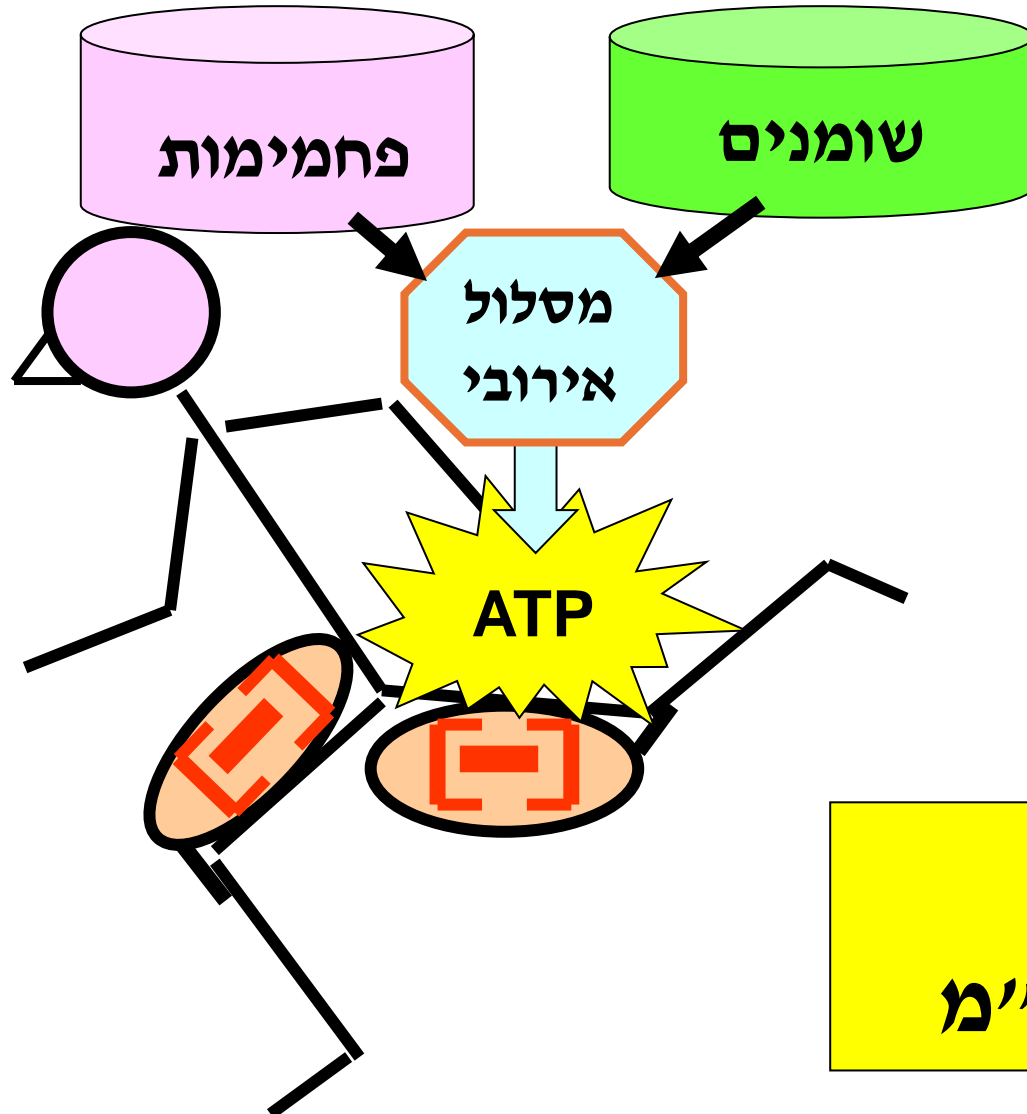


**תלמיד בשיעור כושר גופני  
רץ 12 דקות בקצב של 6 דקות/ק"מ**

# באיילו דלקים מטבוליים המסלול האירובי משתמש?



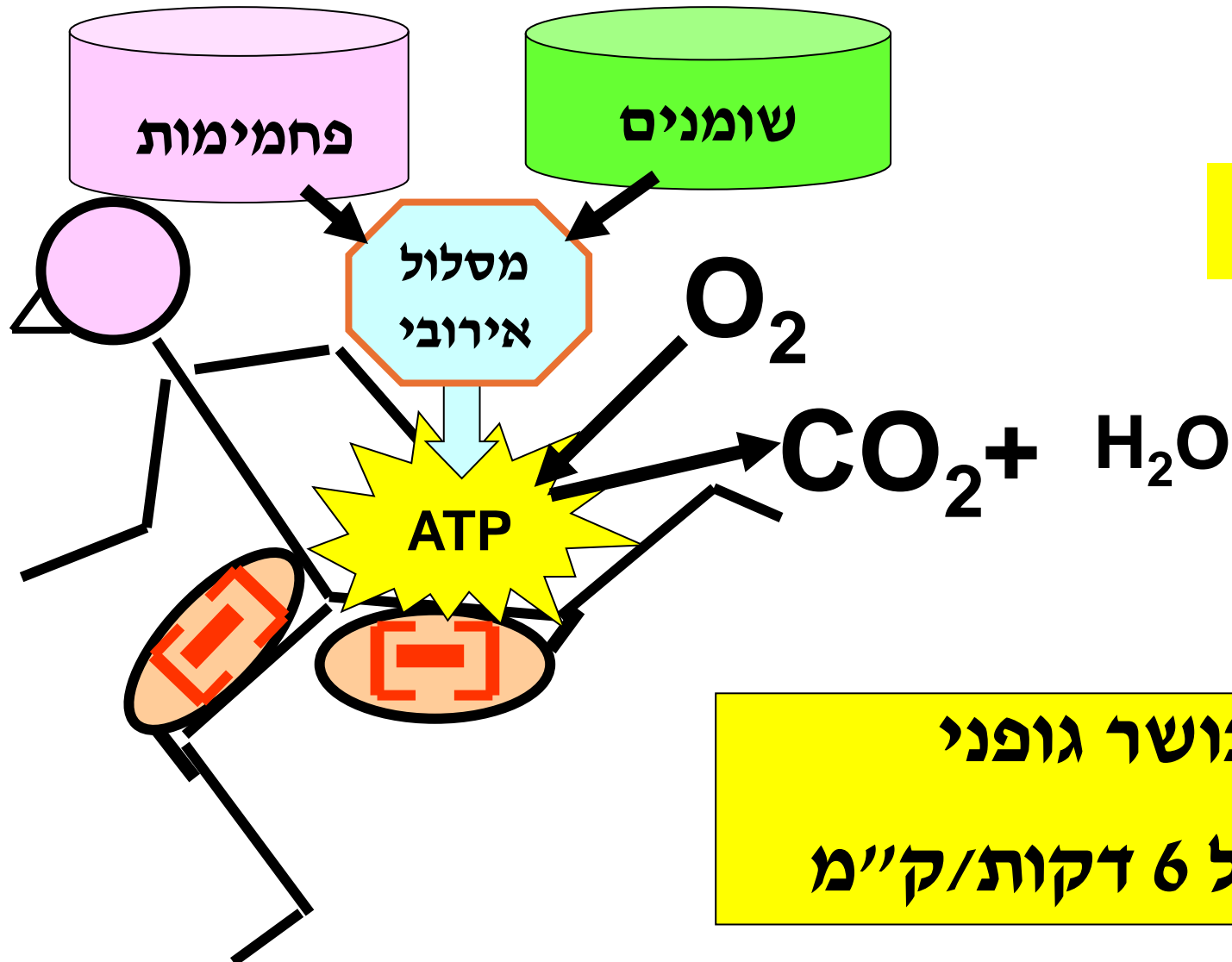
כיצד ניתן לדעת את הרכב הדלק המטבולי = חלקם היחסי של הפחמימות והשומנים?



תלמיד בשיעור כושר גופני  
רץ 12 דקות בקצב של 6 דקות/ק"מ

דלק מטבולי (פחמימות/שומנים) + O<sub>2</sub> ← CO<sub>2</sub> + מים

## מסלול אירובי



$$\text{מנת הנשימה} = \frac{\text{CO}_2}{\text{O}_2}$$

תלמיד בשיעור כושר גופני

רץ 12 דקות בקצב של 6 דקות/ק"מ

# CHO and Fat

**RER for CHO =**



$$\text{RER} = 6 \text{CO}_2 / 6 \text{O}_2 = 1.00$$

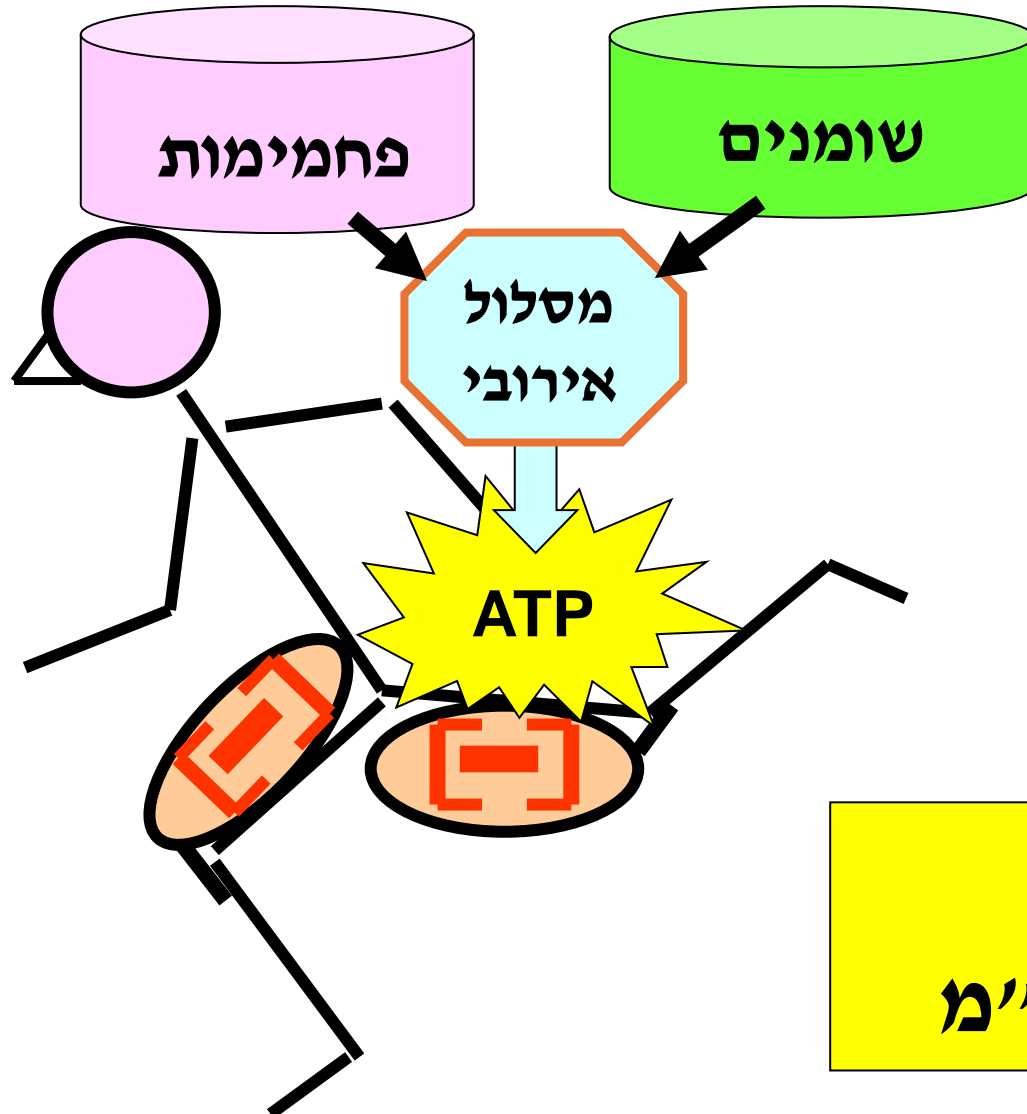
**RER for Fat (palmitic acid) =**



$$\text{RER} = 16 \text{CO}_2 / 23 \text{O}_2 = 0.696 \sim 0.7$$

התרומה היחסית באחוזים של חומרי הגלם לצורך הפקת ה-ATP		מנת הנשימה $VCO_2 / VO_2$
שומנים	פחמימות	
100%	0%	0.70
83%	17%	0.75
50%	50%	0.85
17%	83%	0.95
0%	100%	1.00

# מה העלות האנרגטית של המאמץ?



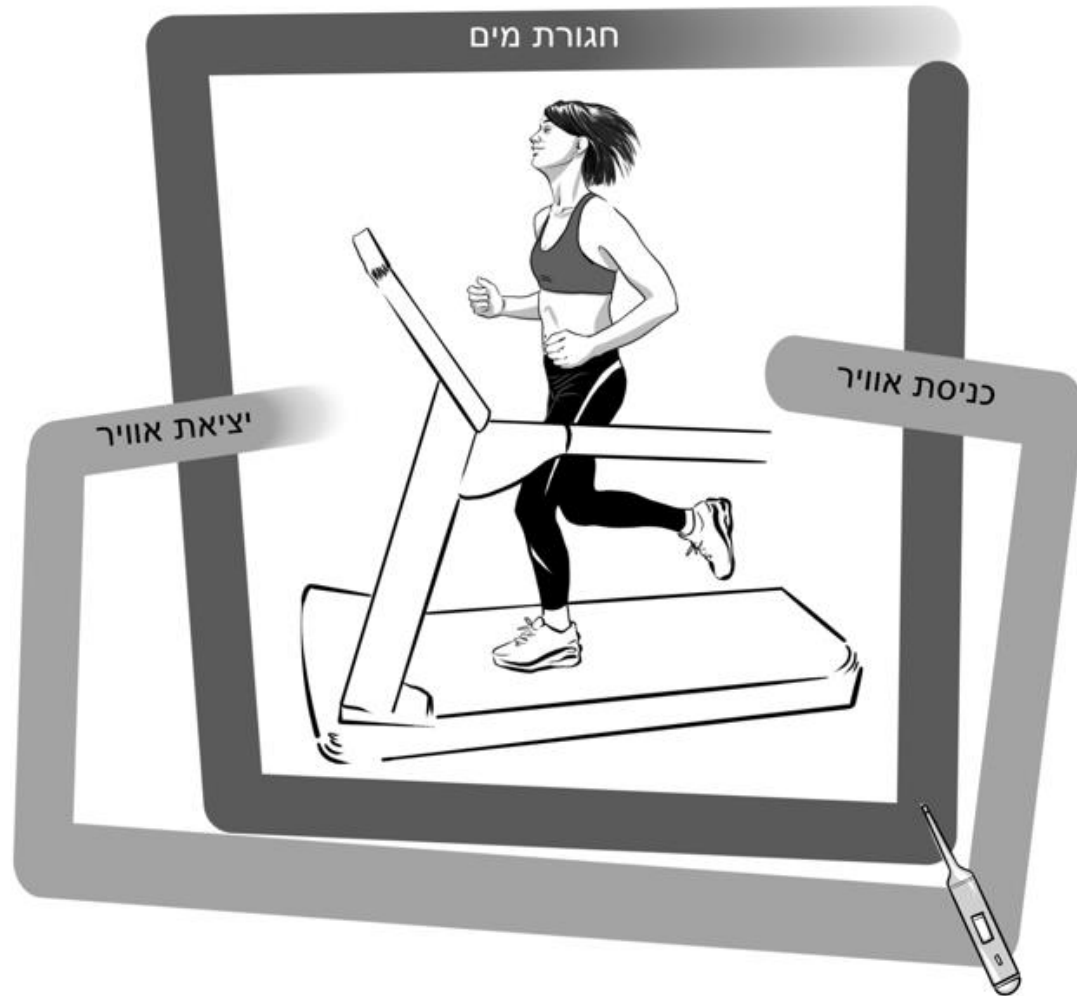
תלמיד בשיעור כושר גופני  
רץ 12 דקות בקצב של 6 דקות/ק"מ



# עלות אנרגטית

כמות האנרגיה, שמופקת במסלולים המטבוליים  
מפרוק הדלקים המטבוליים לטובת התהליכים  
הפיזיולוגיים שמתרחשים בגוף.

קלורימטריה (Calorimetry) - מדידת אנרגיה (קלוריה - יחידת אנרגיה, מטריה - מדידה).



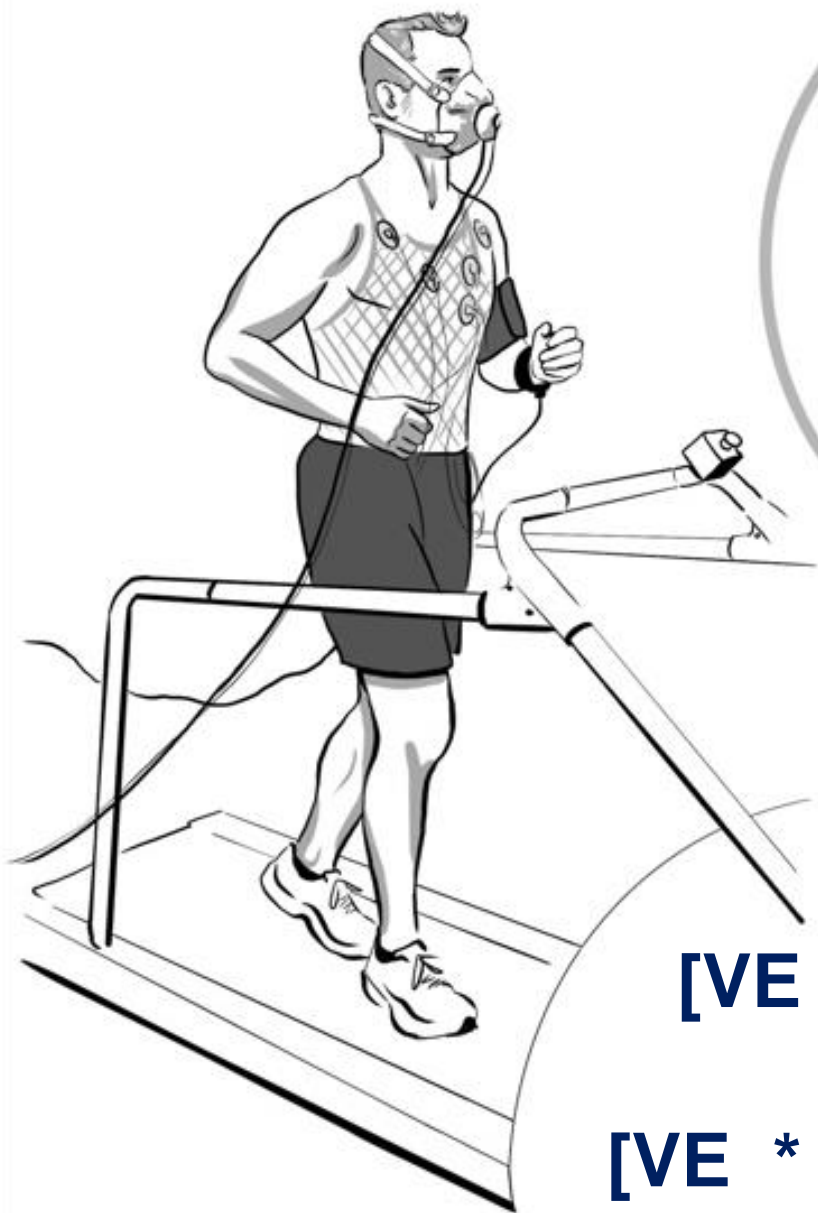
קלורימטריה ישירה

# קלורימטריה עקיפה



- החמצן שנצרך במסלול האירובי מגיע מהאוויר שאנו נושמים.
- קצב השיחלוף של החמצן והפחמן הדו-חמצני בריאות זהה לקצב השימוש והשחרור שלהם ברקמות הגוף.
- העלות האנרגטית האירובית יכולה להיות מחושבת על ידי מדידת נפח הגזים ( $O_2$  ו- $CO_2$ ) שמשוחלפים בריאות ביחידת זמן (1 דקה).

# קלורימטריה עקיפה



**מדידת נפחי הגזים נעשית בעזרת מערכת**

**מדידה מטבולית ומוחשבת באופן הבא:**

$$[VE * FiO_2 (20.93\%)] - [VE * FeO_2(\text{___}\%)] = VO_2$$

$$[VE * Fe CO_2 (\text{___}\%)] - [VE * Fi CO_2(\text{___}\%)] = VCO_2$$

# מגבלות הקלורימטריה העקיפה

- קלורימטריה עקיפה מתאימה למדידת העלות האנרגטית של מאמצים שבהם מלוא הדרישה האנרגטית נענית על ידי המסלול האירובי.
- חישוב צריכת החמצן מניח שבגוף אין שימוש אחר בחמצן פרט להפקת אנרגיה, וכל שינוי ברמת החמצן באוויר הנשוף מיוחס לשינוי במטבוליזם האירובי.
- מאגר הפחמן הדו-חמצני בגוף מושפע מגורמים שונים כמו נשימות עמוקות (היפרונטילציה) ורמת החומציות. שחרור הפחמן הדו חמצני בריאות אינו בהכרח נובע רק מהמטבוליזם האירובי שנעשה בתאים.
- החלבון מהווה עד 10% מהרכב מהדלק המטבולי במאמצים שנמשכים מספר שעות. אין אפשרות לחשב את תרומתו של החלבון להרכב הדלק המטבולי באמצעות מנת הנשימה המוגדרת כ- Non protein.

# ערך אנרגטי של חומר מזון

- כמות האנרגיה בקלוריות הטמונה בחומר מזון מסוים.

- ערך אנרגטי של מזון תלוי בערך האנרגטי הנקי של אבות המזון הנכללים בו (שומן - 9.4

- קלוריות/גרם, פחמימה - 4.1 קלוריות/גרם, חלבון - 4.3 קלוריות/גרם).

- הערך האנרגטי של 1 גרם חומר מזון נקרא אנרגיה סגולית של מזון.

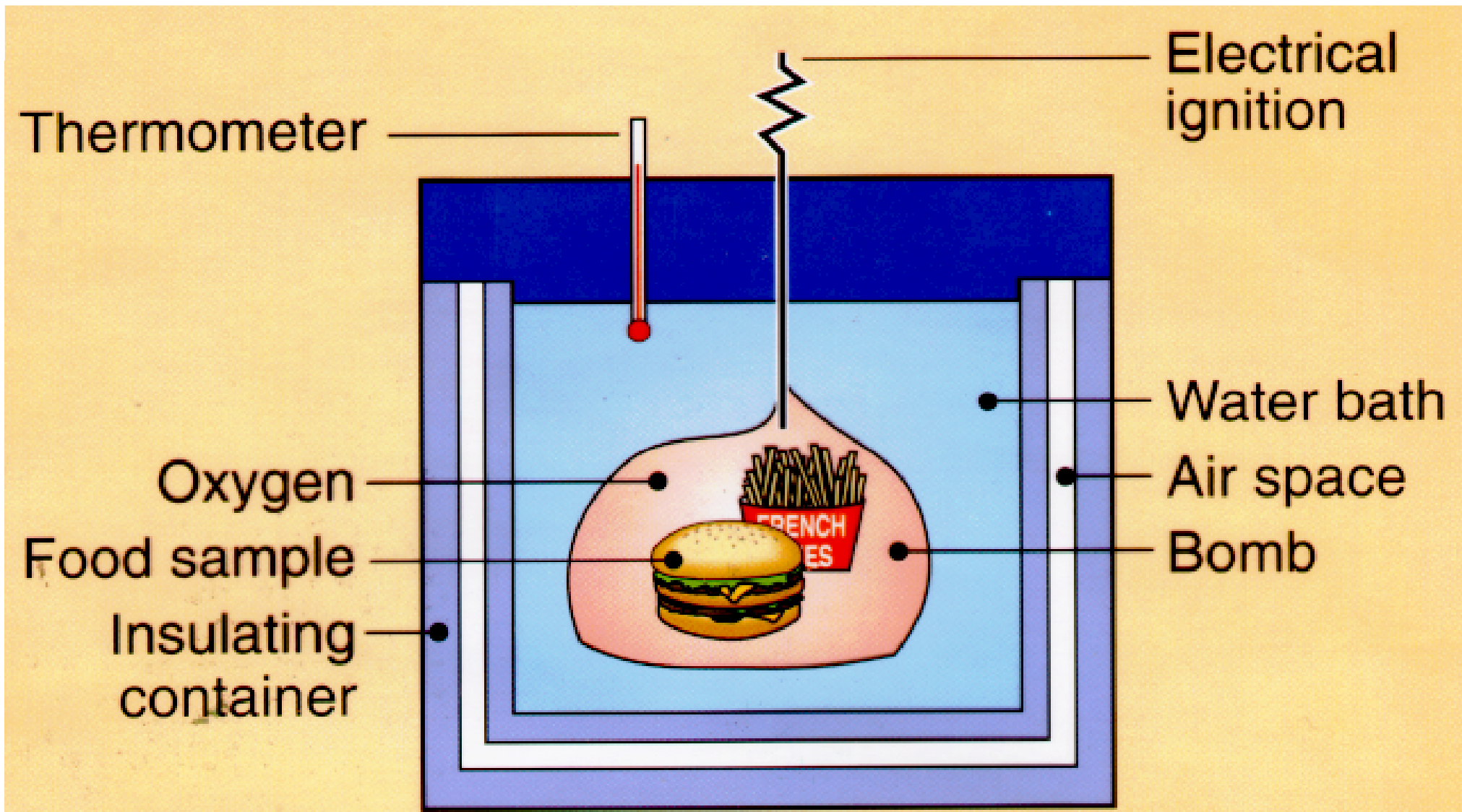
- הערכים התזונתיים של אבות המזון המצוינים בטבלת הסימון התזונתי שמוטבעת על מוצר

- המזון, צריכים להיות עם טווח טעות של לא יותר מ  $\pm 20\%$ . משמעות הדבר שאם רשום

- בסימון התזונתי לגבי משקל נתון של רכיב מסוים - 100 קלוריות, בתוך המזון עשויה

- להימצא כמות שערכה האנרגטי האמיתי יהיה בטווח שבין 80 קלוריות ל- 120 קלוריות.





# קלורימטר פצצה

ערך אנרגטי	המזון	ערך אנרגטי	המזון	ערך אנרגטי	המזון
26	אבטיח	38	אפרסק	170	אבוקדו
687	אגוז פקאן	85	בננה	500	חלבה
742	חמאה	116	חומוס	430	שוקולד
15	חסה	160	ביצה	129	אורז מלא

**ערך אנרגטי של 100 גרם מזון**





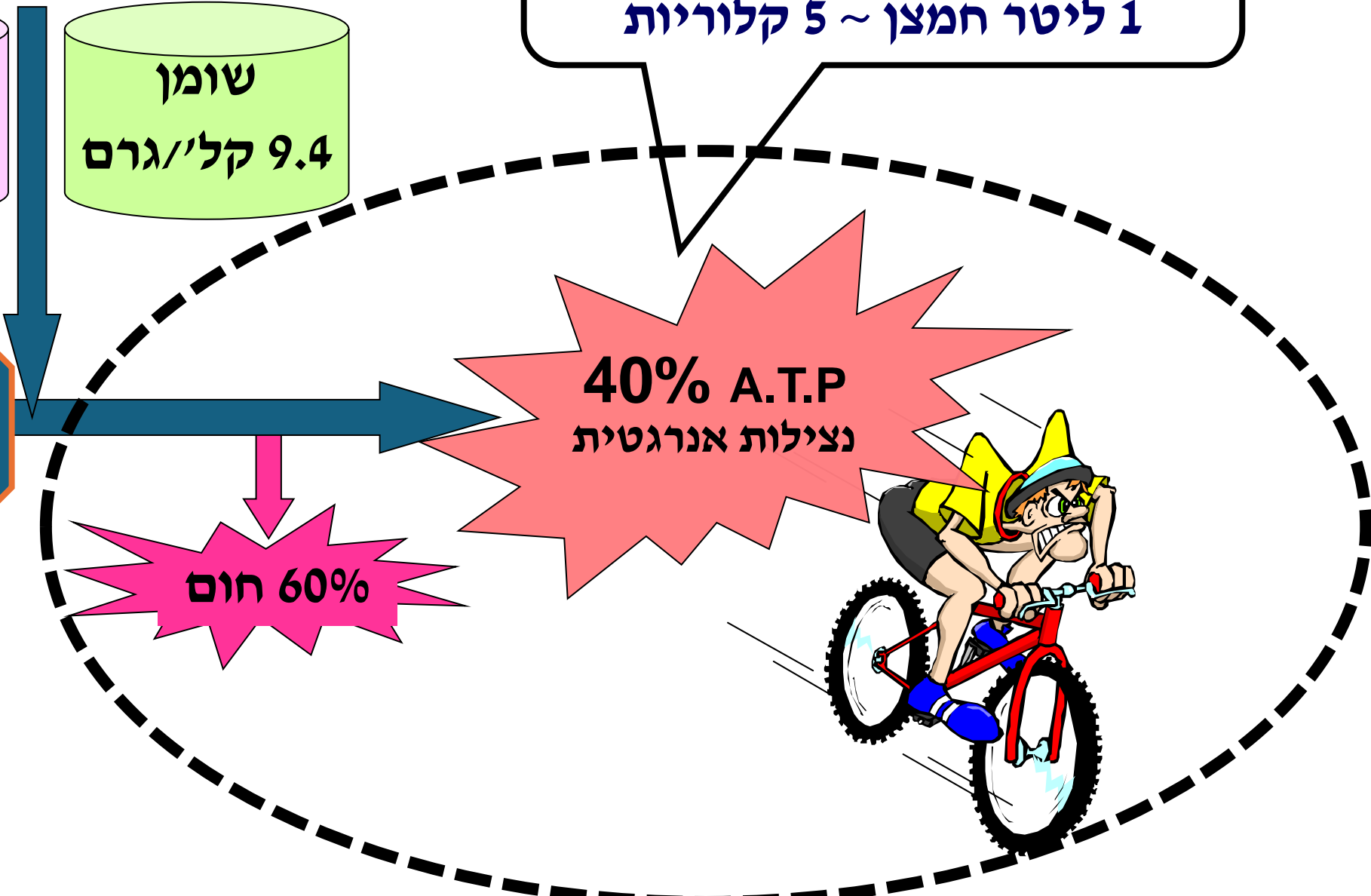
$O_2$

פחמימות  
4.1 קל' / גרם

שומן  
9.4 קל' / גרם

עלות אנרגטית של מאמץ  
1 ליטר חמצן ~ 5 קלוריות

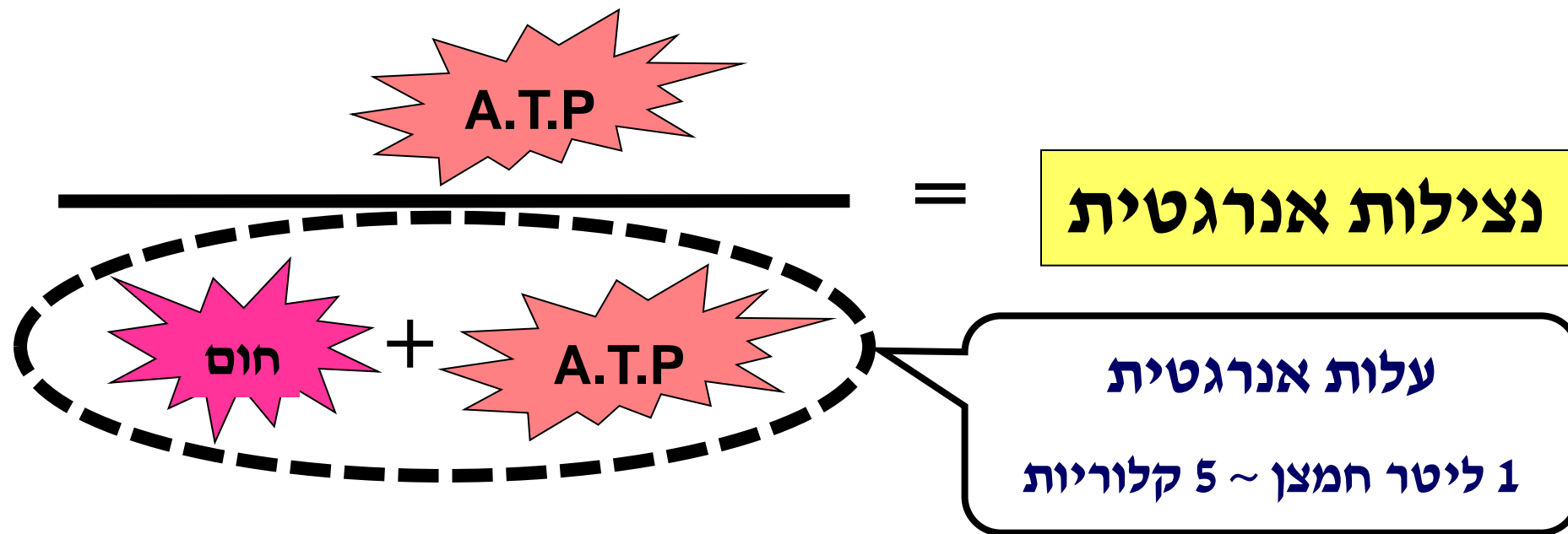
מסלול  
אירובי



40% A.T.P  
נצילות אנרגטית

60% חום





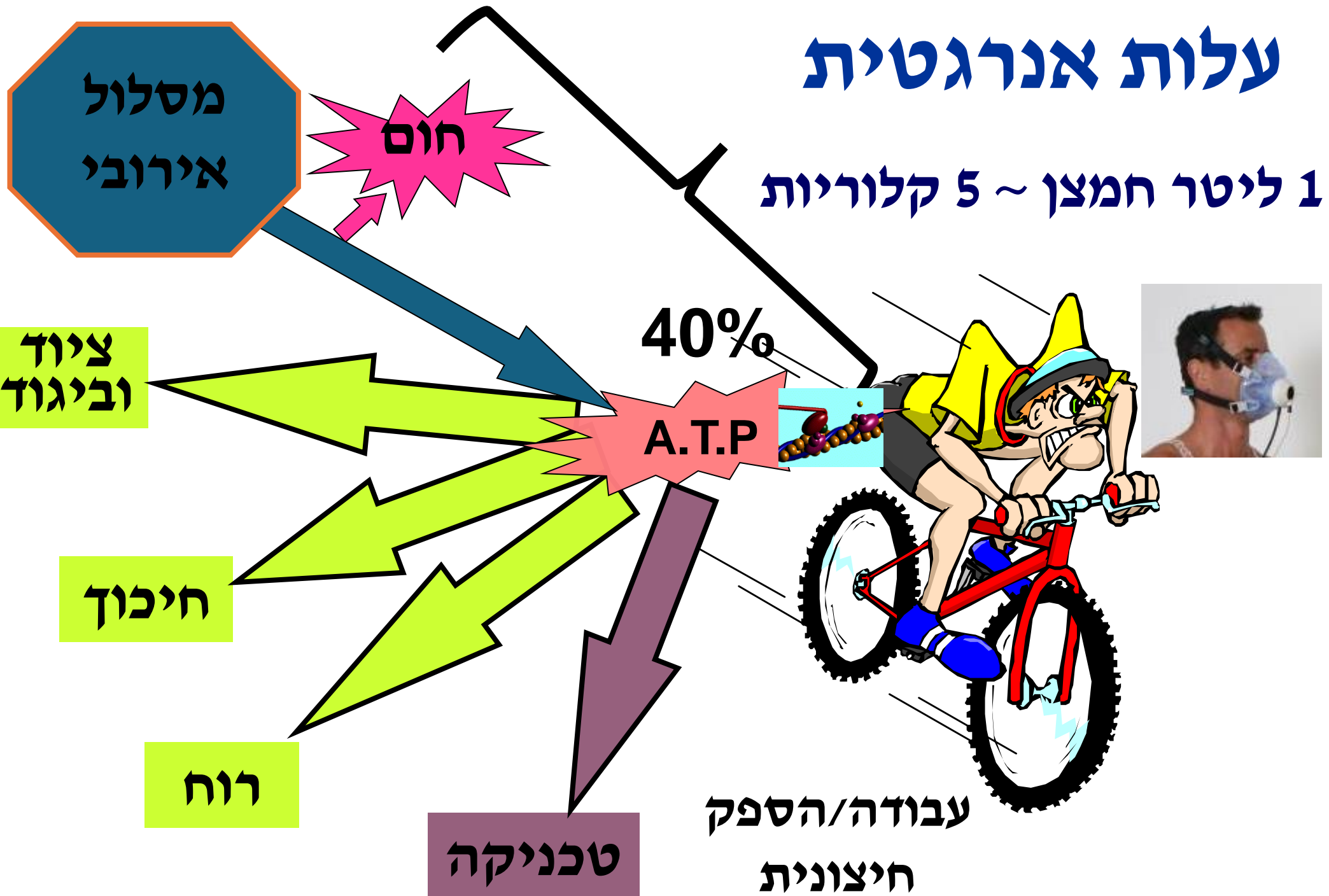
נצילות אנרגטית של המסלול האירובי כ- 40%

60% חום + 40% A.T.P. = 100%

עלות אנרגטית

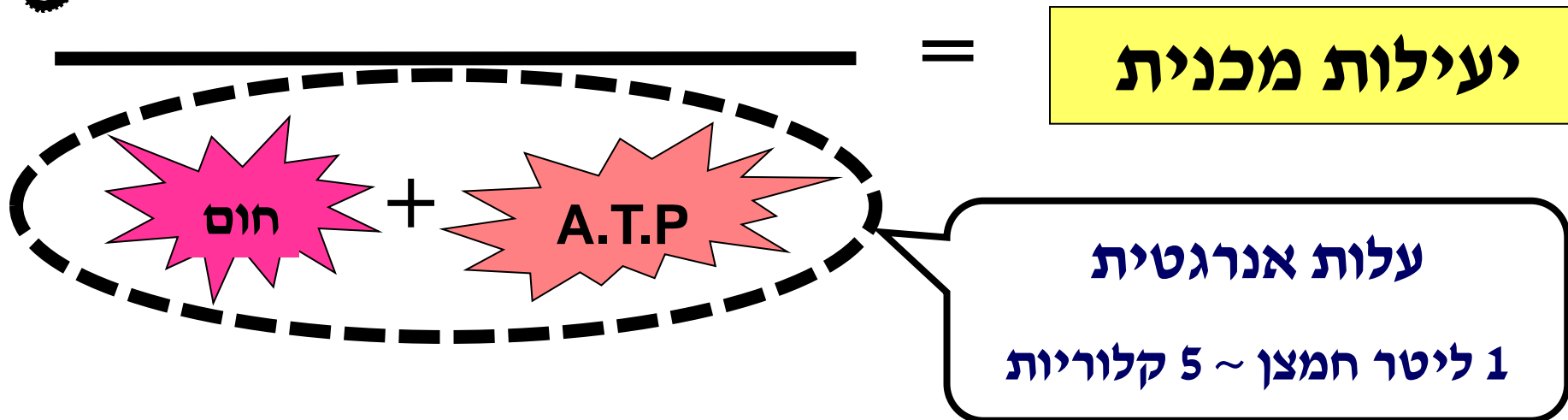
# עלות אנרגטית

1 ליטר חמצן ~ 5 קלוריות



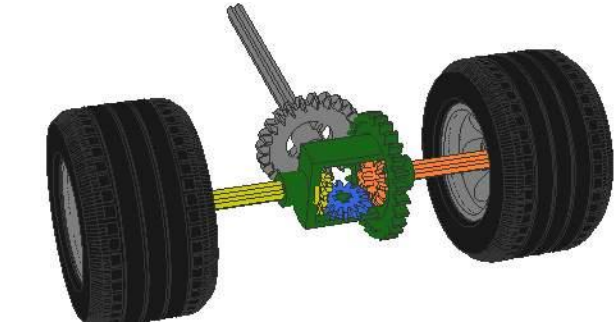


עבודה חיצונית



היעילות המכנית במאמצים כמו הליכה, ריצה ורכיבה על אופניים שעיקר האנרגיה בהם מסופקת על-ידי המסלול האירובי היא 20%-25%

# יעילות מכנית במכונית



$$\frac{\text{[Diagram of Axle Assembly]}}{\text{[Diagram of Fuel Tank]}} = 20\%$$



$$\frac{1.6}{8} \text{ נח/ליטר}$$

**יעילות מכנית = עלות אנרגטית (צריכת חמצן) / הספק מכני**



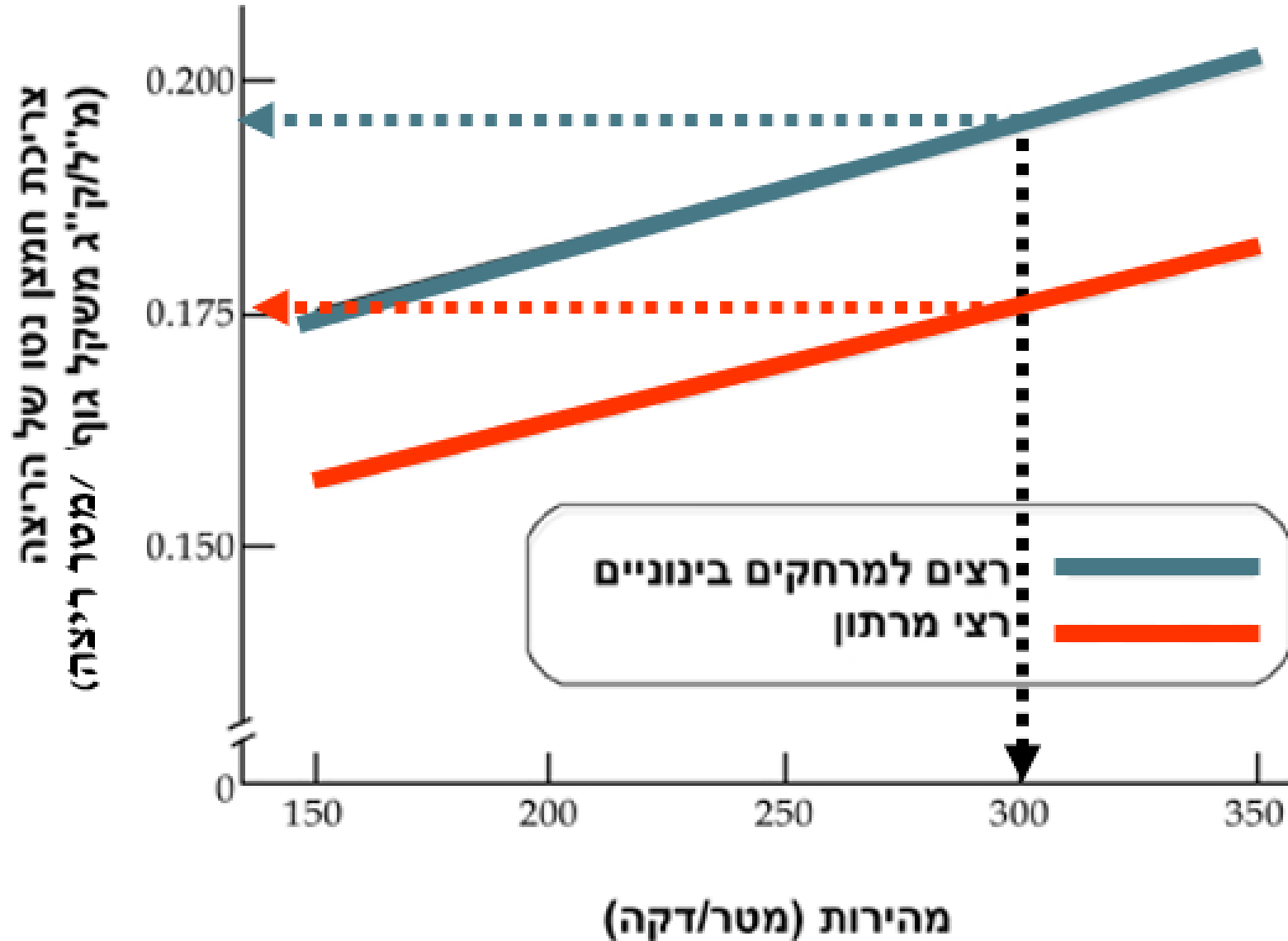
## נתון:

- משך החתירה - 30 דק'
- הספק מכני חיצוני - 200 וואט (0.048 קלוריות/שניה)
- צריכת חמצן - 3 ליטר/דקה
- מנת הנשימה - 0.90 (שווי ערך קלורי: 4.924 קלוריות/ליטר חמצן)

## חישוב:

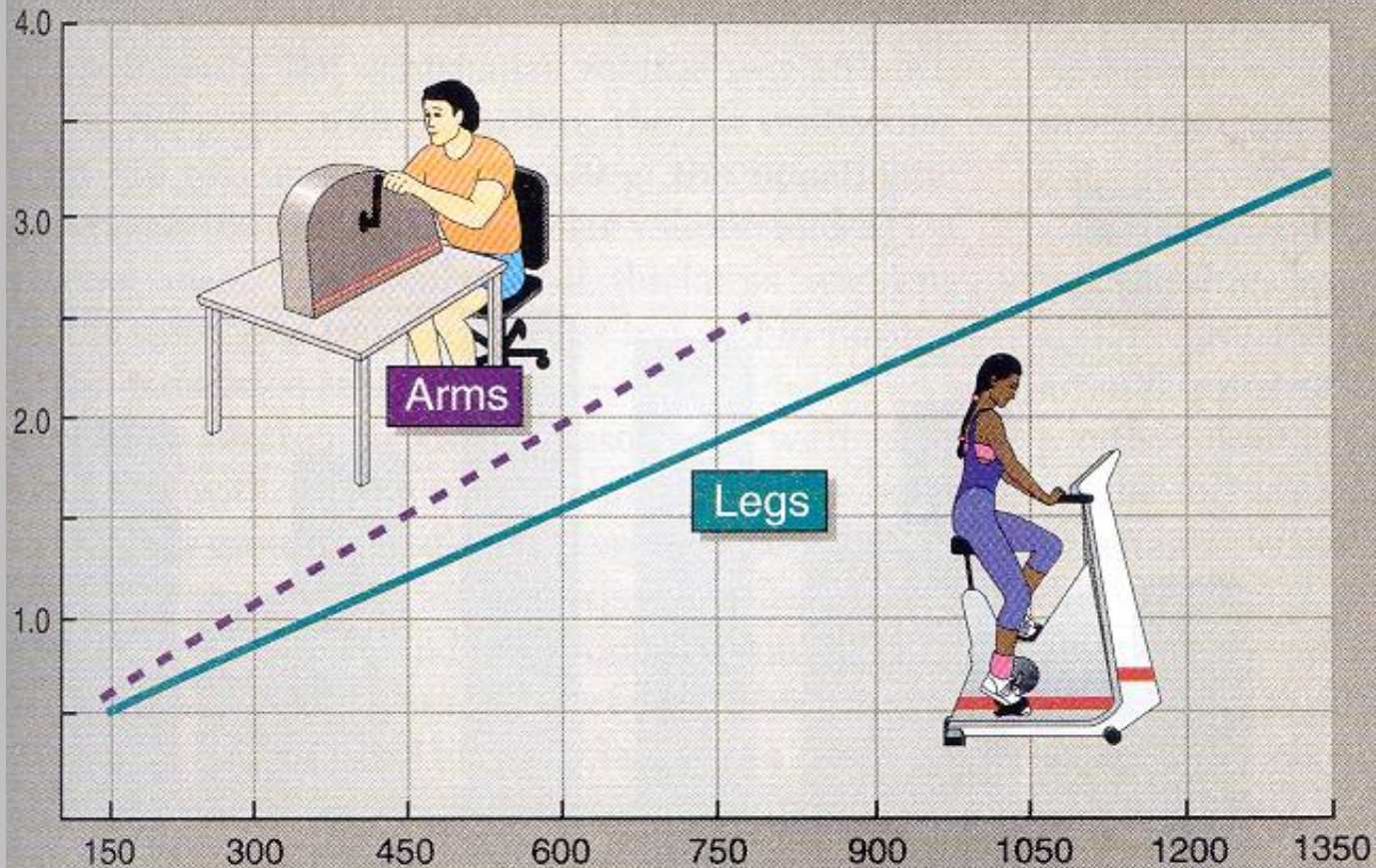
- עבודה חיצונית ב- 30 דק':  $86.4$  קלוריות =  $0.048$  קל"/שנ' x  $60$  שנ' x  $30$  דק'
- עלות אנרגטית של החתירה:  $443.2$  קלוריות =  $4.924$  קל"/ל' x  $3$  ל'/דק' x  $30$  דק'
- יעילות מכנית:  $19.5\% = 86.4 / 443.2 \times 100$

# הבדלים ביעילות המכנית בין רצי מרתון לרצים למרחקים בינוניים





צריכת חמצן (ליטר/דקה)

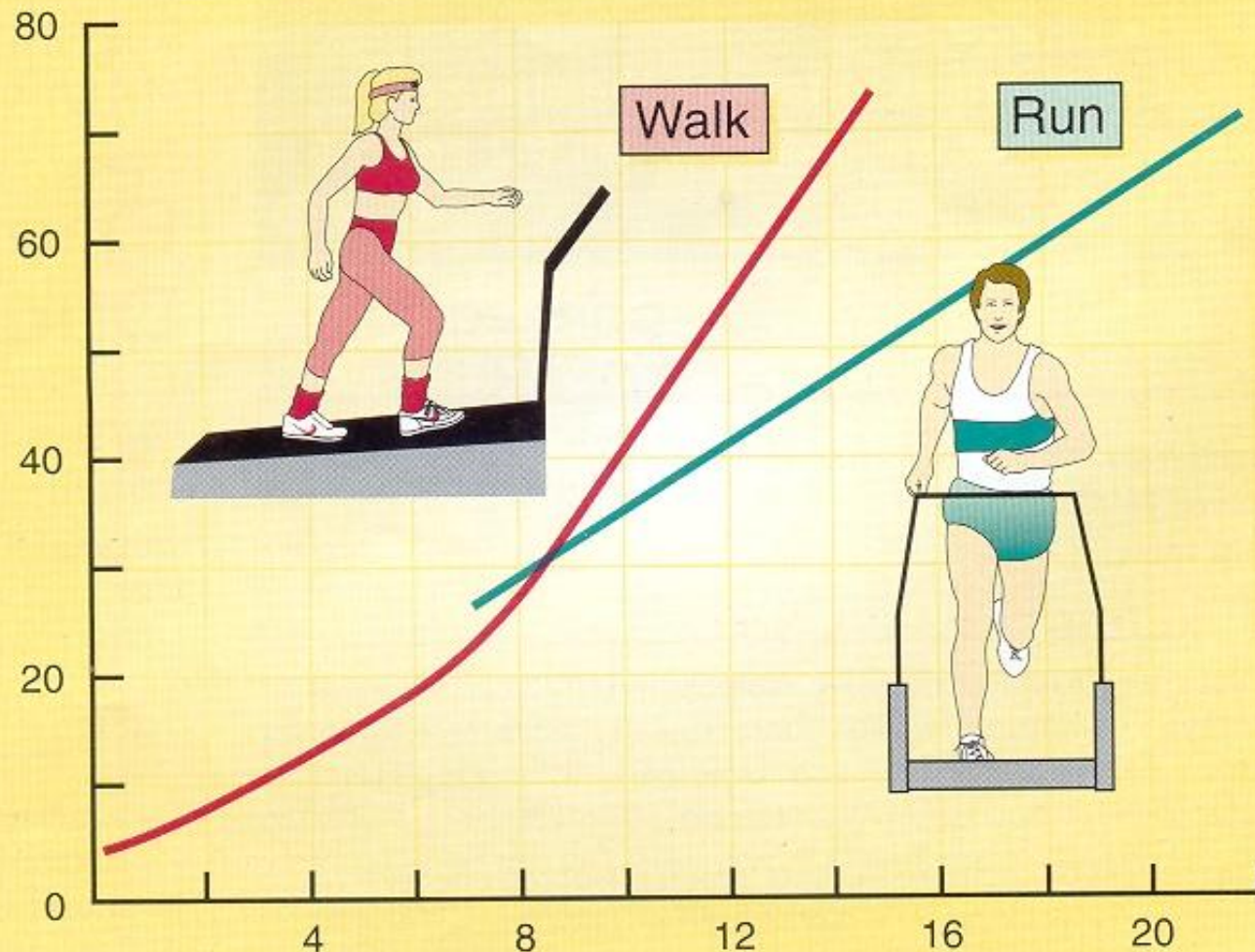


עצימות המאמץ (הספק)

הבדלים ביעילות המכנית במאמצים בעצימות נתונה שמפעילים

קבוצות שרירים שונות

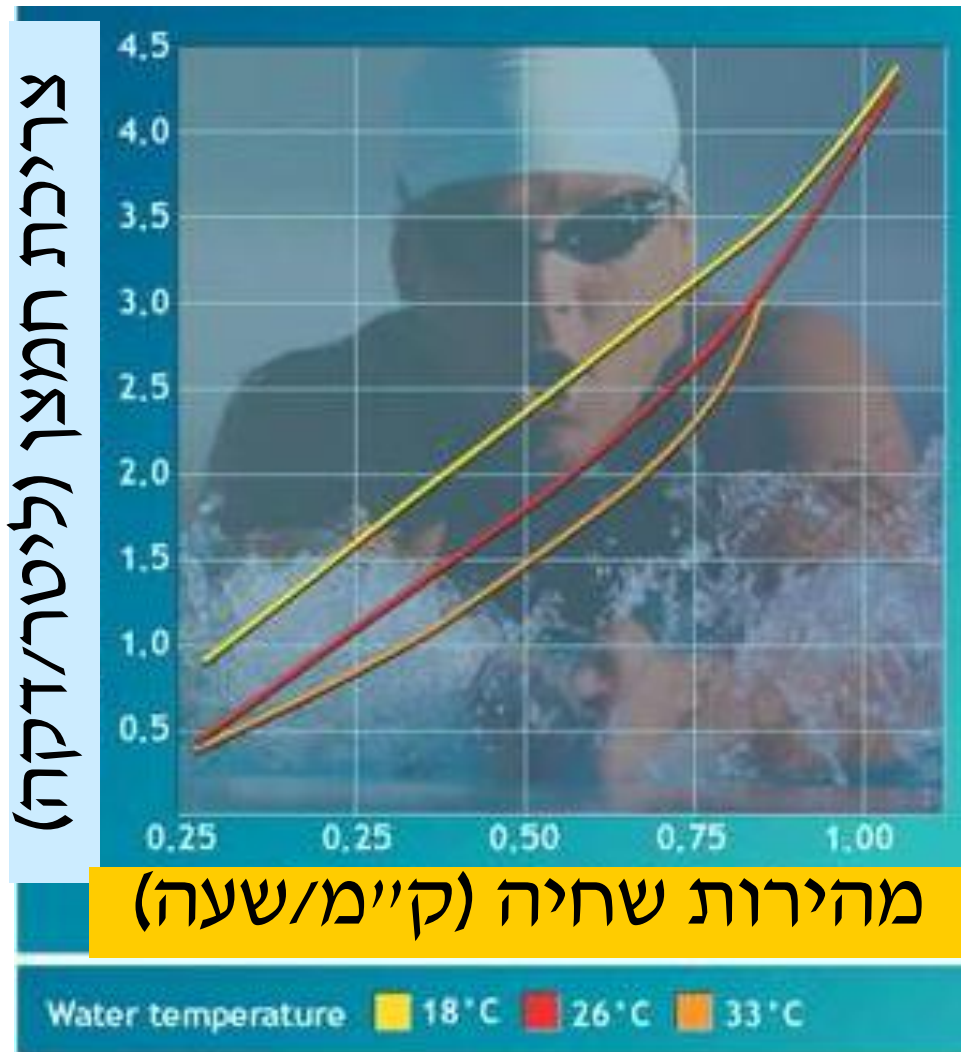
צריכת חמצן (מ"ל/ק"ג/דקה)



מהירות (ק"מ/שעה)

הבדלים ביעילות המכנית בין ריצה להליכה





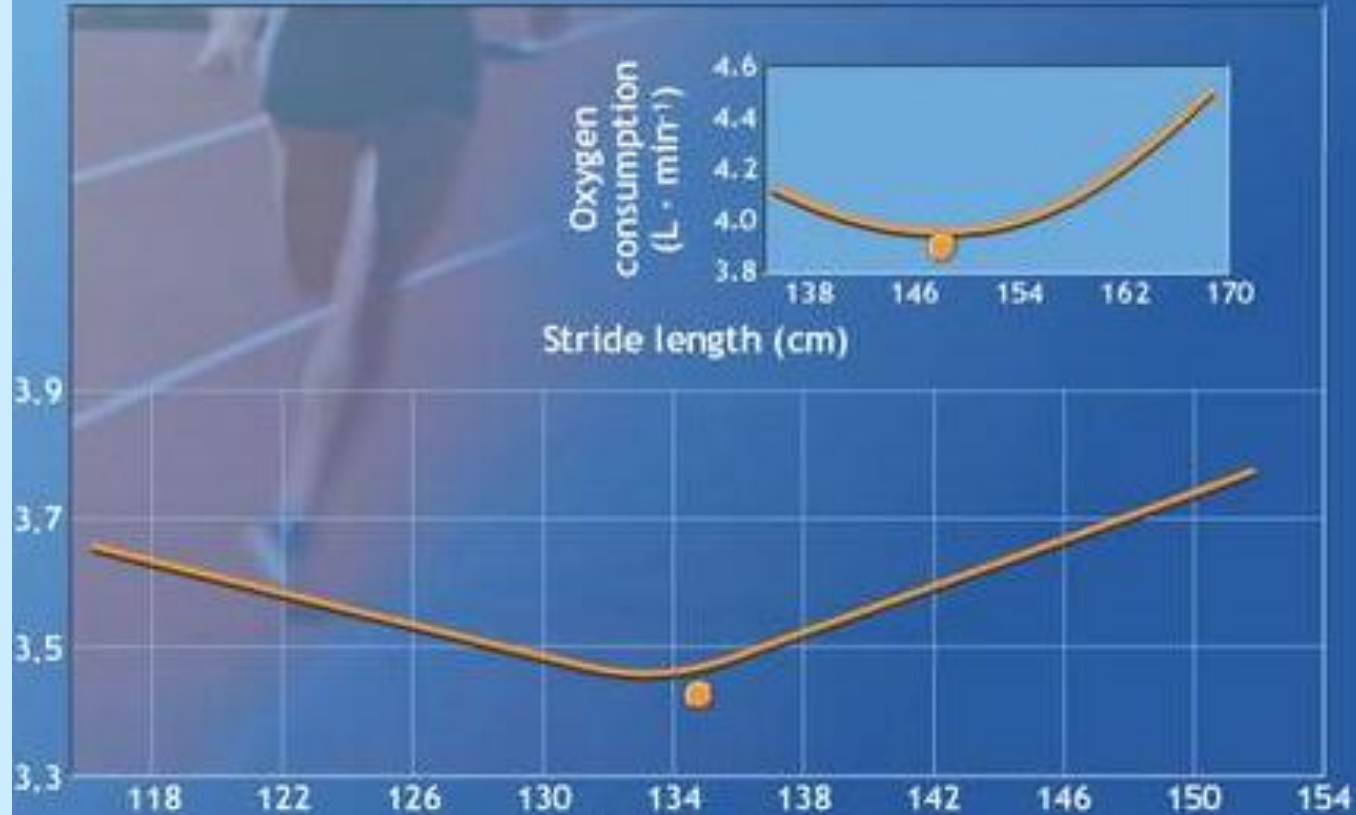
צריכת חמצן (ליטר/דקה)

מהירות שחיה (ק"מ/שעה)

Water temperature 18°C 26°C 33°C

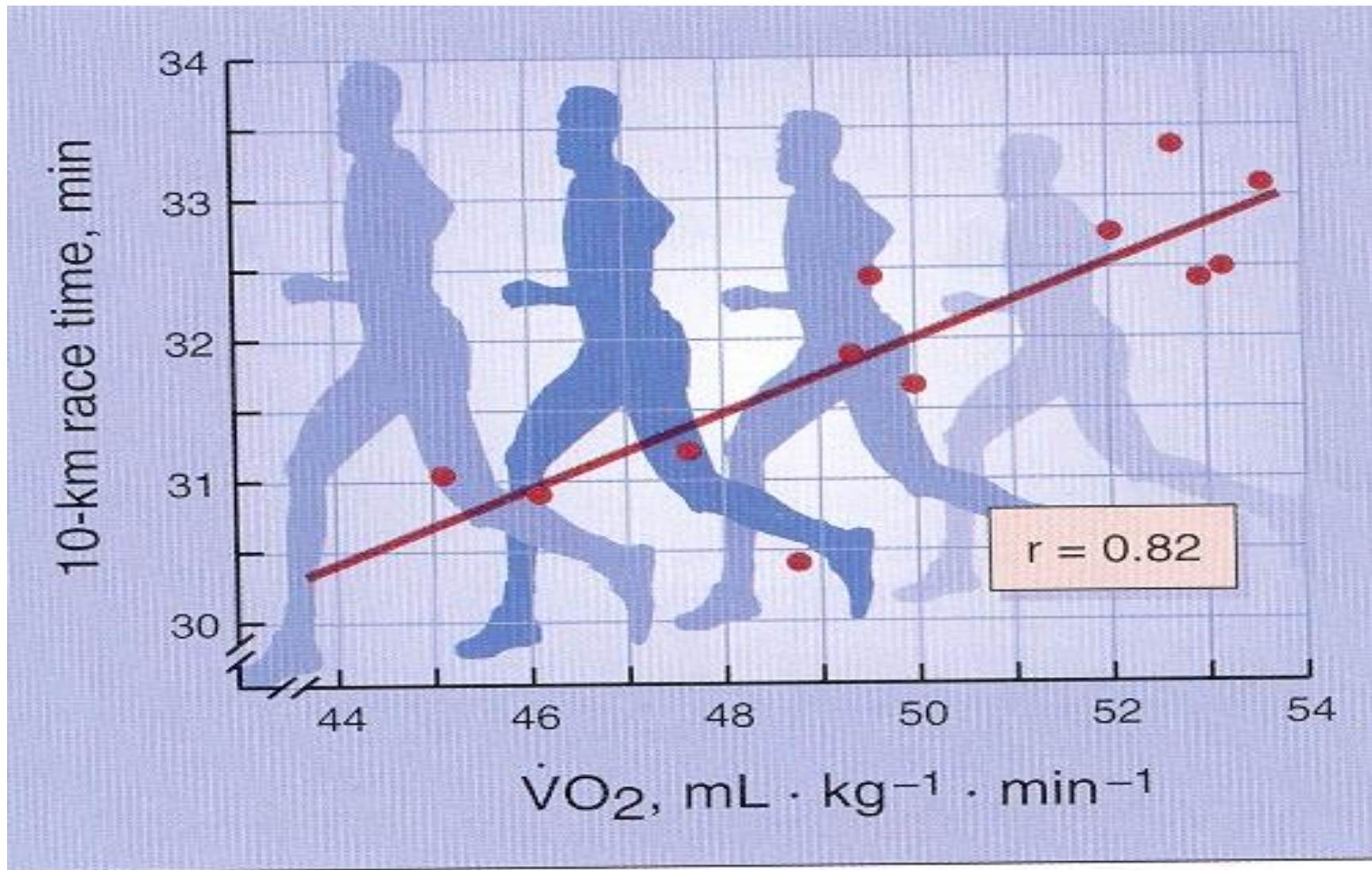
**יעילות מכנית - השפעת טמפ' המים על צריכת החמצן בשחיה**

צריכת חמצן (ליטר/דקה)



אורך צעד (ס"מ)

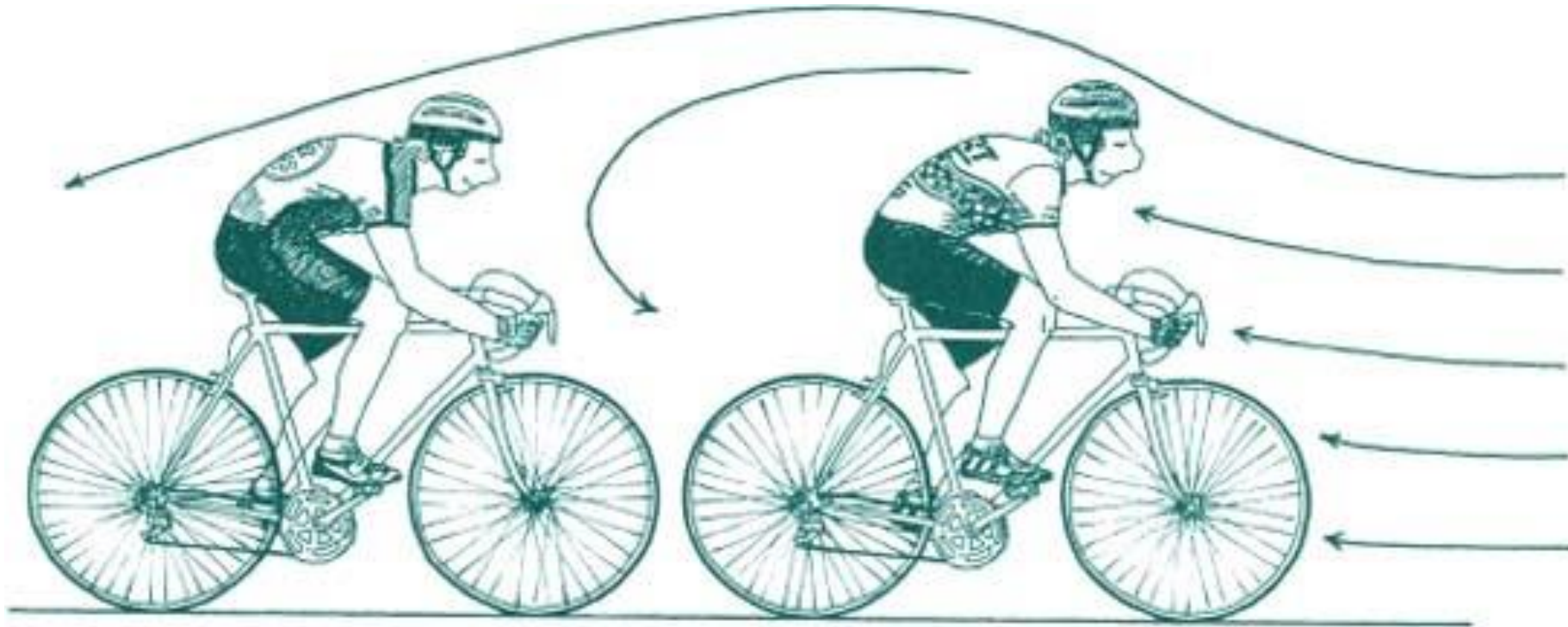
יעילות מכנית - השפעת אורך הצעד על צריכת החמצן במהלך ריצה  
בקצב של 14 קמ"ש (16 קמ"ש במסגרת הקטנה)



הקשר שבין היעילות המכנית (באה לביטוי בצריכת החמצן בעת ריצה בקצב של 16.1 ק"מ /שעה - ציר X) ובין ההישג בריצת 10 ק"מ



# דראפטינג (Drafting) ~ "כיס אוויר") אליו נשאב הרוכב שמאחור



Energy Savings

Drafting Formation

26 ± 8%



27 ± 6%



27 ± 7%



39 ± 6%



62 ± 6%



מאחורי רוכב אחד/טור  
רוכבים במהירות של 37-40  
קמ"ש - 27%

רוכב המוקף ב- 7 רוכבים - 39%

# יעילות מכנית של ילדים

- פחותה משל בוגרים ובפרט בפעילויות הכרוכות בנשיאת משקל הגוף.
- משתפרת במהלך הגדילה עקב השינויים הבאים:
  - אורך הרגליים
  - עלייה בגודל הצעד וירידה בתדירות הצעדים (הגורם העיקרי בשיפור היעילות המכנית)
  - מיומנות הביצוע (קואורדינציה בין שרירית)
  - חוזק השרירים
  - תגובת חום הגוף למאמץ
  - יעילות נשימתית (יעילות מכנית של האוורור הריאתי)
- השיפור ביעילות מביא להתקדמות ביכולת הריצה גם אם אין שינוי ברמת האימונים ובצריכת החמצן המרבית.

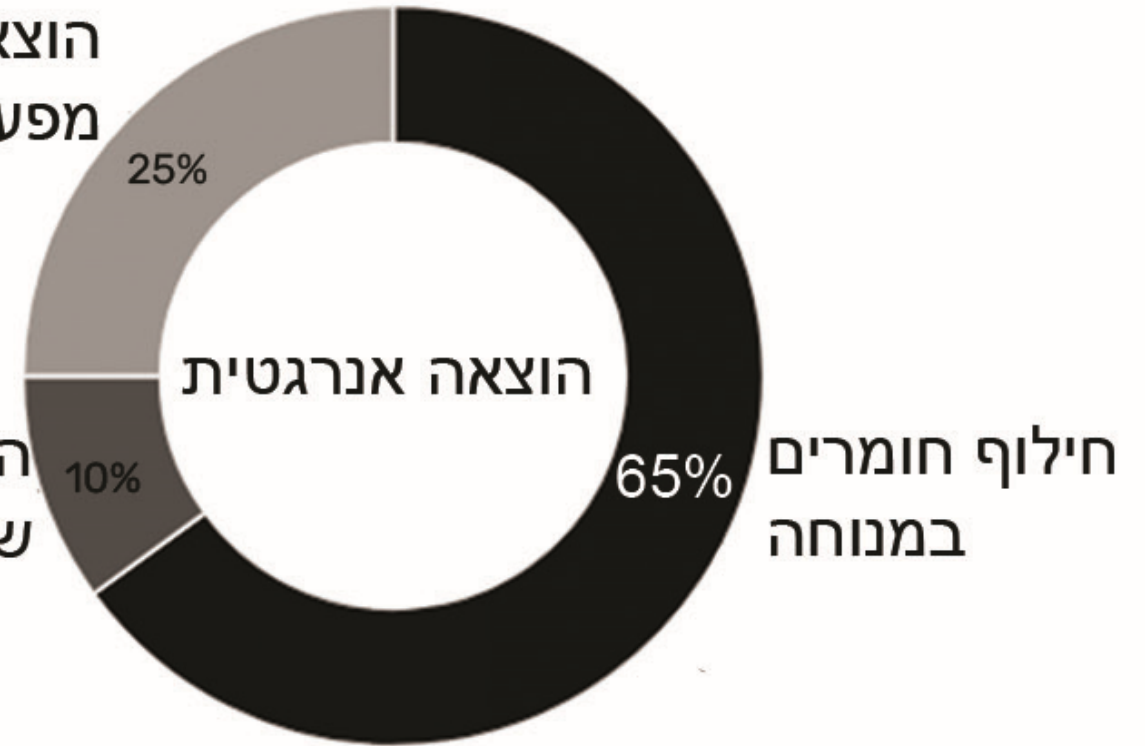


# גורמים המשפיעים על הוצאת האנרגיה היומית



הוצאה אנרגטית כתוצאה  
מפעילות ואימון גופני

האפקט התרמוגני  
של המזון



# קצב חילוף חומרים בסיסי / במנוחה

בשעה שהגוף נמצא במנוחה, מתקיימים בו התהליכים הבאים הצורכים אנרגיה:

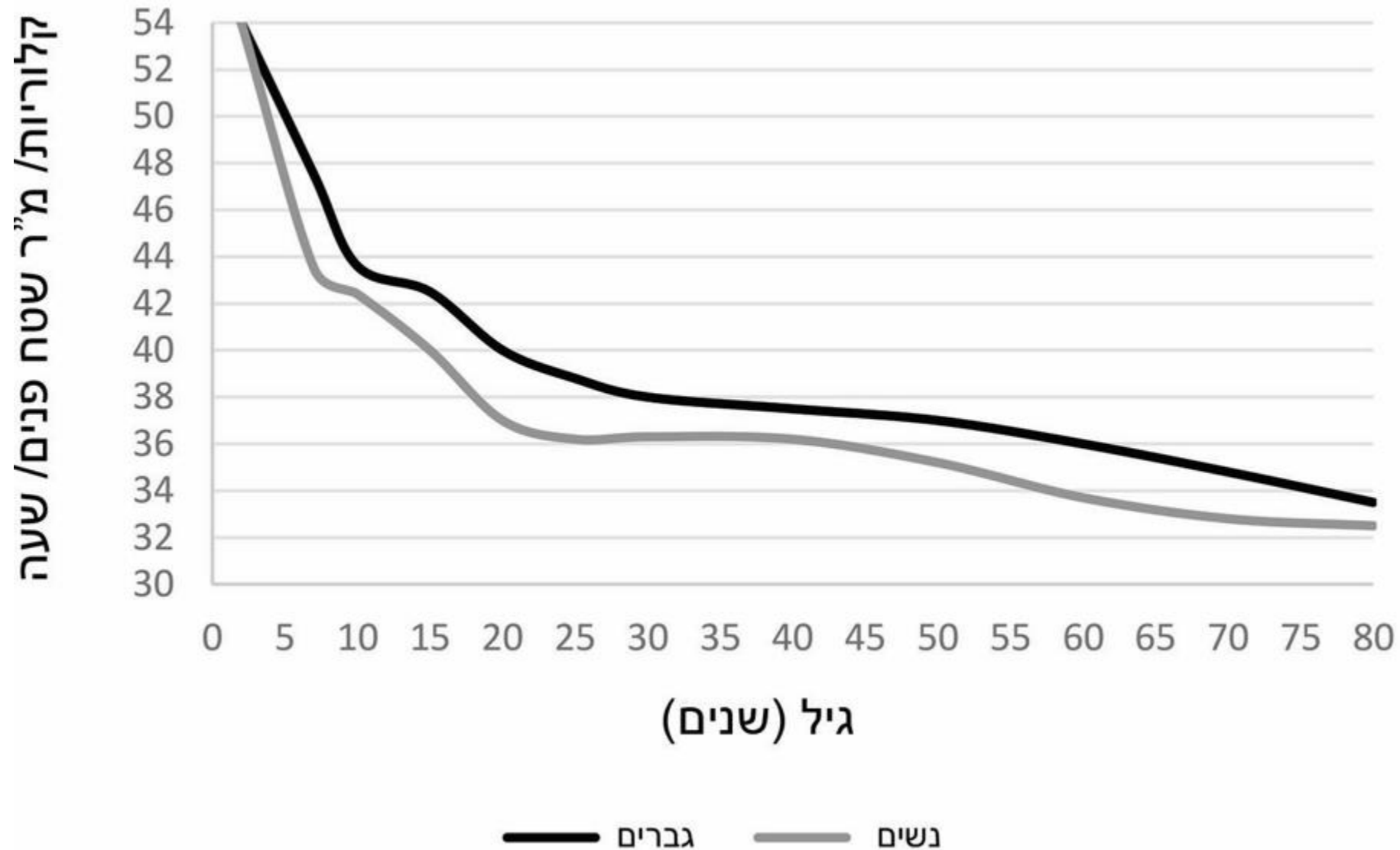
- הכפלת תאים
  - הפעלת שרירים (לב, נשימה, שרירים חלקים)
  - העברת גירויים עצביים
  - העברה פעילה דרך קרומי תאים
- צריכת האנרגיה במנוחה בדקה מוגדרת כ - **1MET's (Metabolic equivalent)**.  
אצל גבר במשקל 70 ק"ג היא בסדר גודל של אנרגיה שמופקת מצריכת חמצן ( $VO_2$ ) של 0.250 ליטר חמצן/דקה (250 מ"ל/דקה) שהם 3.5 מ"ל/ק"ג גוף/דקה.

# הקשר שבין חילוף חומרים במנוחה, METs, צריכת חמצן, קלוריות

## ועלות אנרגטית של פעילות גופנית.

- $1 \text{ METs} = \text{עלות אנרגטית של מנוחה} = 3.5 \text{ מ"ל חמצן/ק"ג/דק} = 0.250 \text{ ליטר חמצן/דקה} = 1.25 \text{ קלוריות/דקה (5 קל' מופקות מהדלקים המטבוליים עם צריכת 1 ליטר חמצן)}$ .
- מאמץ של  $10 \text{ METs} = \text{עלות אנרגטית של פי 10 מאשר מנוחה}$ . צריכת חמצן של 35 מ"ל/ק"ג/דק'  $(3.5 \times 10)$
- אם האדם שוקל 80 ק"ג, צריכת החמצן של כל הגוף 2,800 מ"ל/דק'  $= 2.8 \text{ ליטר/דק' (} 80 \times 35)$
- העלות האנרגטית של האדם בדקה אחת של מאמץ היא 14 קלוריות/דקה  $(2.8 \times 5)$
- אם האדם מבצע מאמץ כנ"ל במשך 60 דק', העלות האנרגטית של כלל המאמץ היא 840 קלוריות  $(14 \times 60)$ .

# חילוף החומרים הבסיסי של נשים וגברים בגילאים שונים



# הערכת חילוף החומרים במנוחה באמצעות נוסחת האריס בנדיקט (Hariss Benedict)

נוסחת האריס בנדיקט - לגברים

$$\text{RMR} = 66.5 + (13.75 \times W) + (5.003 \times H) - (6.775 \times A)$$

W - משקל בק"ג

H - גובה בס"מ

A - גיל

לדוגמה:

גבר בן 50 שנה, גובה 180 ס"מ, משקל 80 ק"ג

$$\text{RMR} = 66.5 + (13.75 \times 80) + (5.003 \times 180) - (6.775 \times 50) = 1728 \text{ קק"ל/יממה}$$

## נוסחת האריס באנדיקט (Hariss Benedict)

### גברים

קק"ל/ליממה RMR	משקל	גובה בס"מ	גיל
<b>1728</b>	80	180	50

### נשים

קק"ל/ליממה RMR	משקל	גובה בס"מ	גיל
<b>1519</b>	80	180	50

# הערכת חילוף החומרים במנוחה באמצעות נוסחת האריס בנדיקט (Hariss Benedict)

נוסחת האריס בנדיקט - לנשים

$$\text{RMR} = 655.1 + (9.563 \times W) + (1.850 \times H) - (4.676 \times A)$$

W - משקל בק"ג

H - גובה בס"מ

A - גיל

לדוגמה:

אישה בת 35 שנה, גובה 160 ס"מ, משקל 70 ק"ג

$$\text{RMR} = 655.1 + (9.563 \times 70) + (1.850 \times 160) - (4.676 \times 35) = 1457 \text{ קק"ל/יממה}$$

## נוסחת האריס באנדיקט (Hariss Benedict)

### גברים

קק"ל/ליממה RMR	משקל	גובה בס"מ	גיל
<b>1592</b>	70	160	35

### נשים

קק"ל/ליממה RMR	משקל	גובה בס"מ	גיל
<b>1457</b>	70	160	35



# הערכת חילוף החומרים במנוחה באמצעות נוסחת קנינגהאם (Cunningham)

$$\text{RMR} = 500 + [22 \times \text{LBM}] \text{ ק"ל/יממה}$$

LBM - מסת הגוף הרזה בק"ג

לדוגמה:

נבדקת עם 30% שומן ומשקל של 80 ק"ג

מסת הגוף הרזה = 56 ק"ג (80 ק"ג X 70%)

חילוף חומרים במנוחה = 1732 ק"ל/יממה [RMR= 500 + (22 X 56)]

חישוב RMR באמצעות LBM - נוסחת קנינגהאם Cunningham	
80	משקל (ק"ג)
30	אחוז (%) שומן
56	LBM (kg)
<b>1732</b>	<b>RMR (kcal)</b>

# ההוצאה האנרגטית בעקבות אכילה (האפקט התרמוגני של המזון)

- ערכה הקלורי הכולל הוא כ-10% מקצב חילוף החומרים במנוחה.
- אכילת פחמימות: 6-8% מהערך הקלורי של הפחמימות שנאכלו.
- אכילת שומנים: 2-3% מהערך הקלורי של השומנים שנאכלו.
- אכילת חלבונים: 25-30% מהערך הקלורי של החלבונים שנאכלו.

## תזונה מעורבת בשיעור 2000 קק"ל

- 55% פחמימות - 1100 קק"ל
- 30% שומנים - 600 קק"ל
- 15% חלבון - 300 קק"ל
- 175 קק"ל  $(7\% \times 1100 + 2.5\% \times 600 + 27.5\% \times 300)$

## תזונה דלת פחמימות בשיעור 2000 קק"ל

- 10% פחמימות - 200 קק"ל
- 52% שומנים - 1055 קק"ל
- 38% חלבון - 745 קק"ל
- 245 קק"ל  $(7\% \times 200 + 2.5\% \times 1,055 + 27.5\% \times 745)$

## **ההוצאה האנרגטית כתוצאה מפעילות גופנית**

• פעילות גופנית שגרתית - ספונטנית בחיי היום יום (הליכה,

עבודות בית, נהיגה וכד')

• פעילות גופנית ייעודית מתוכננת (אימון) לשיפור מרכיבי כושר

גופני

# Indirect Calorimetry קלורימטריה עקיפה



# עלויות אנרגטיות של פעילויות שונות בקלוריות לק"ג גוף לדקת מאמץ

עלות אנרגטית קלוריות/ק"ג/דקה	פעילות
0.085	אימון התנגדות (כוח) מחזורי
0.132	משקולות חופשיות
0.116	מכונות הידראוליות
	מכונות עם משקולות (Universal)
0.142	אימון מדרגה (30 פע׳/דקה)
0.156	גובה המדרגה - 15 ס״מ
0.169	גובה המדרגה - 20 ס״מ
	גובה המדרגה - 25 ס״מ
0.097	באולינג
	בדמינטון
0.097	משחק פנאי - נופש
0.145	משחק תחרותי
0.175	ג'ודו
0.071	גלישה על גלשן רוח
0.088	החלקה על סקייטבורד
0.193	היאבקות תחרותית
	הליכה
0.079	מסלול מישורי (5 קמ״ש)
0.053	מסילה נעה (3.2 קמ״ש)
0.073	מסילה נעה (4.8 קמ״ש)
0.097	מסילה נעה (6.4 קמ״ש)

# עלויות אנרגטיות של פעילויות שונות ביחידות של מץ (MET's)

METs	פעילות בעצימות קלה (פחות מ-4METs)
2.5	ביליארד
2.5	אימון מתיחות
פעילות בעצימות בינונית (בין 4METs ל-6METs)	
4	התעמלות במים
4	שייט בסירת דושות
METs	פעילות בעצימות נמרצת (יותר מ-6METs)
6.3	הליכה במהירות 7 קמ"ש
7	אופני כושר 150 ואט
7	חתירה במכשיר ייעודי (Rowing machine) 100 ואט

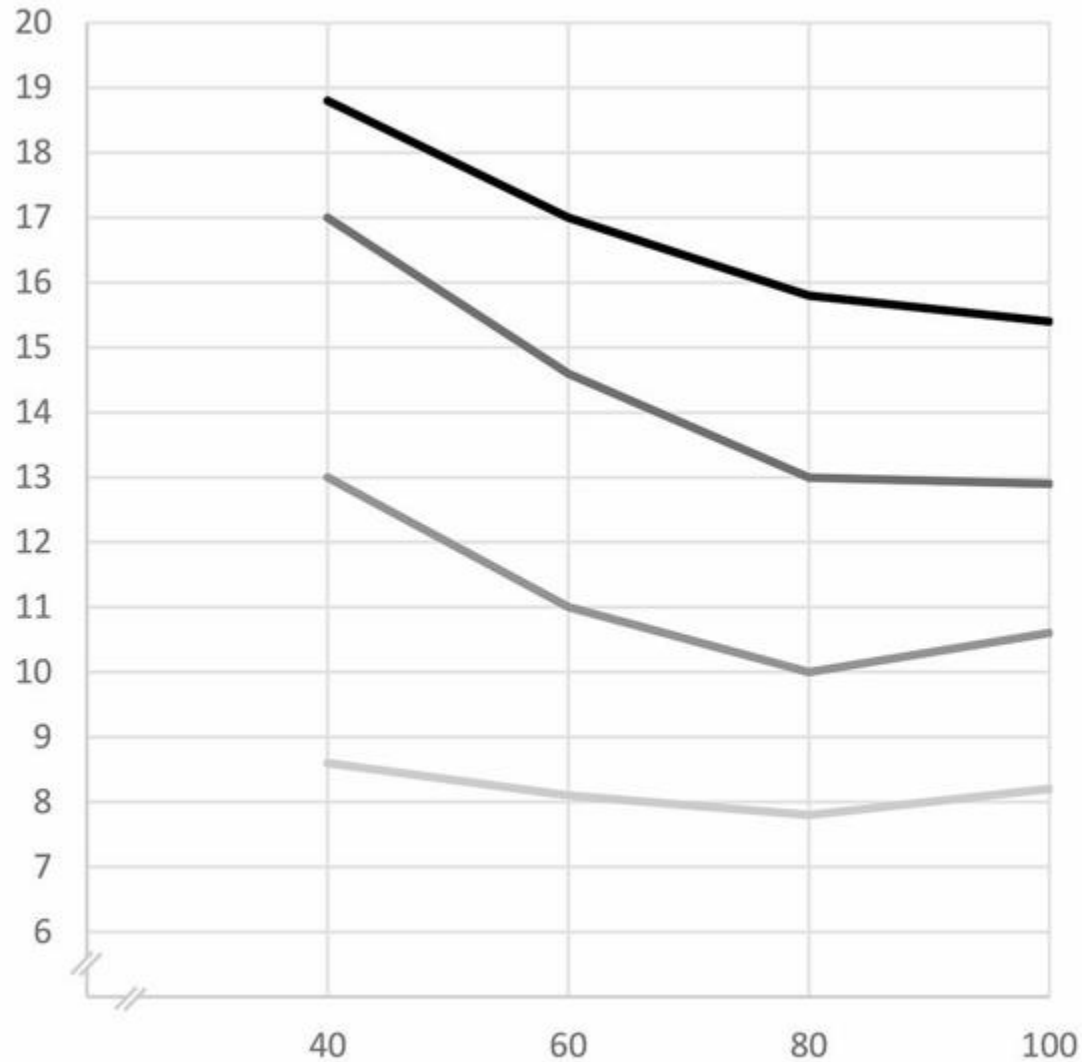
# סיווג מאמצים לדרגות קושי על בסיס ההספק האנרגטי

הספק אנרגטי				רמת קושי
גברים				
METS	צריכת חמצן מ"ל/ק"ג/דקה	צריכת חמצן ליטר/דקה	קלוריות/דקה	
3.9 - 1.6	15.2 - 6.1	0.99 - 0.40	4.9 - 2	קל
5.9 - 4	22.9 - 15.3	1.49 - 1	7.4 - 5	בינוני
7.9 - 6	30.6 - 23	1.99 - 1.5	9.9 - 7.5	קשה
9.9 - 8	38.3 - 30.7	2.49 - 2	12.4 - 10	קשה מאוד
> 10	> 38.4	> 2.5	> 12.5	קשה מדי
נשים				רמת קושי
METS	צריכת חמצן מ"ל/ק"ג/דקה	צריכת חמצן ליטר/דקה	קלוריות/דקה	
2.7 - 1.2	12.5 - 5.4	0.69 - 0.3	3.4 - 1.5	קל
4.3 - 2.8	19.8 - 12.6	1.09 - 0.7	5.4 - 3.5	בינוני
5.9 - 4.4	27.1 - 19.9	1.49 - 1.1	7.4 - 5.5	קשה
7.5 - 6	34.4 - 27.2	1.89 - 1.5	9.4 - 7.5	קשה מאוד
> 7.6	> 34.5	> 1.9	> 9.5	קשה מדי



# שאלה: באיזה קצב סיבובי דושות היעילות המכנית היא הגבוהה ביותר?

תחושת מאמץ סובייקטיבית (RPE)  
סקלת הבורג הישנה



קצב סיבובי דושות (סיבובים/דקה)

— 200 גרם  
— 150 גרם  
— 100 גרם  
— 50 גרם

