

# המחיר האנרגטי של פעילות גופנית

ד"ר אריה רוטשטיין

אנרגיה מוציא פעול המעלה 100 ק"ג לבנים מנקודה א' לנקודה ב' הגבוהה ממנה כ-10 מטר, נראה שהתשובה לשאלה זו אינה פשוטה כלל. מנקודת מבטו של הקבלן, המעוניין בהעברת הלבנים, בוצעה עבודה של 1000 ק"גאמטר, אך מנקודת מבטו של הפועל, בוצעה עבודה רבה יותר.

ראשית, הפועל העביר גם את משקל גופו ולא רק את הלבנים, וקרוב לודאי שלצורך העברת 100 ק"ג לבנים לגובה של 10 מטר עבר את המרחק יותר מפעם אחת.

ניתן, אם נרצה, לחשב את העבודה הנוספת בגלל משקל גופו של הפועל, אך גם כך עדיין לא נוכל לענות על השאלה כמה אנרגיה הוציא הפועל. בזמן העברת הלבנים מבצע הפועל תנועות שרירים, שאינן מביאות ישירות לתנועת גופו או להעברת הלבנים. תנועות אלו מחייבות השקעת אנרגיה כך שקשה מאוד למדוד ישירות את כל העבודה המכנית שבוצעה על-ידי חישוב פיסיקאלי פשוט. כיצד, למשל, נמדוד את העבודה המכנית הכרוכה בהדחת כלים.

יוצא, אם כן, שבמקרים אחדים, כמו בדוגמה של הפועל המעביר לבנים, אנו יכולים למדוד מרכיבים אחדים של עבודה מכנית. במקרים אחרים קשה מאוד למדוד ישירות את העבודה המכנית, ובכל מקרה כמעט בלתי אפשרי למדוד את כל העבודה המכנית המבוצעת. האנרגיה לביצוע פעילות מקורה בפירוק חומרי מזון, ובניצול מאגרי אנרגיה בשרירי

הערכת עומס העבודה והוצאת האנרגיה הכרוכה בביצוע עבודה מהווה את אחת השאלות המרכזיות בתחום הפיסיולוגיה של המאמץ. מנקודת המבט של הפיסיקאי, המושגים "עבודה" ו"אנרגיה", מוגדרים בצורה ברורה למדי. גם הדרך למדידת כמות עבודה אינה מהווה בעיה מיוחדת, אך כפי שנראה, הערכה של הוצאת האנרגיה בעת פעילות גופנית, אינה כה פשוטה.

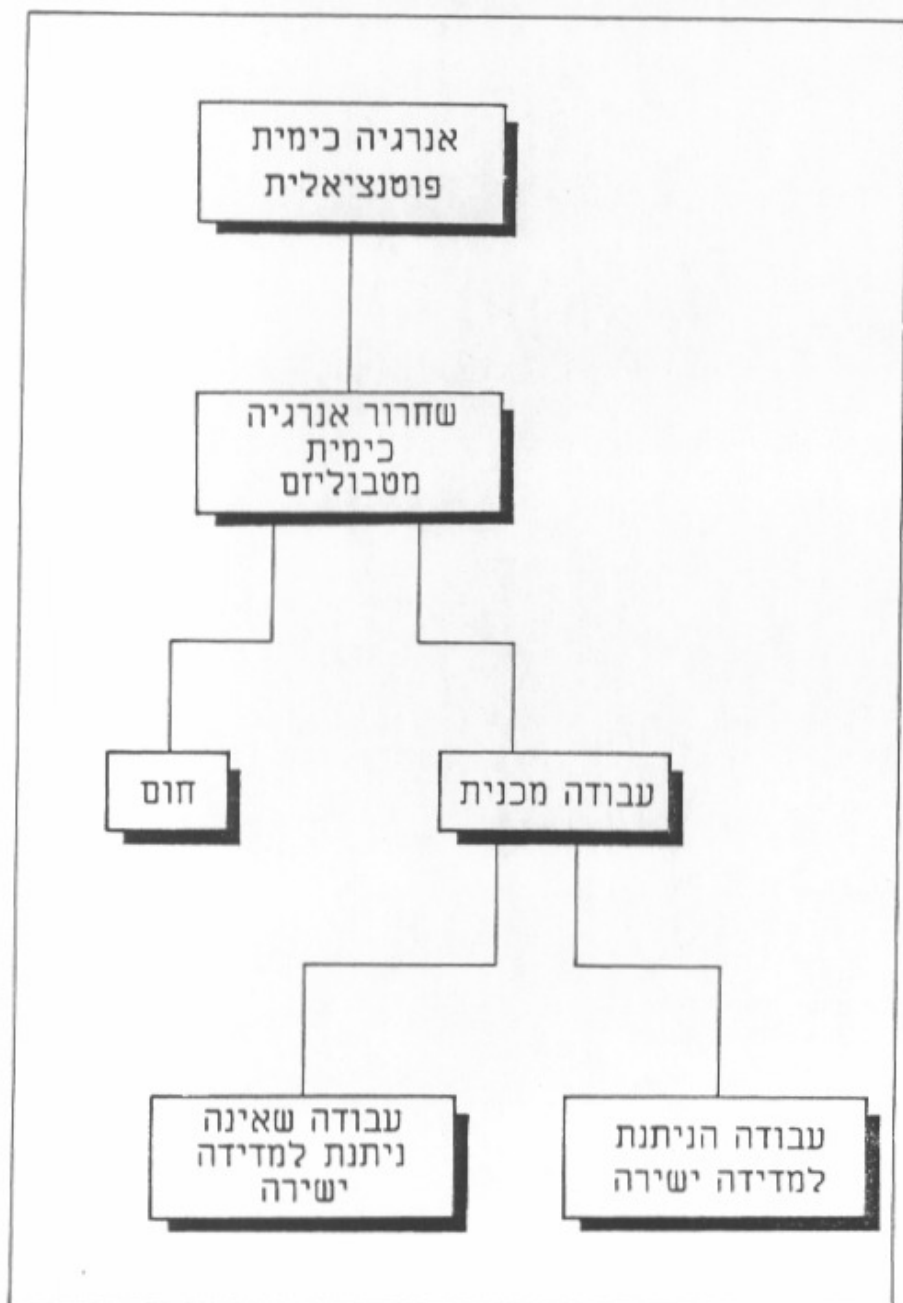
כגודל פיסיקלי, עבודה מוגדרת כמכפלת הכוח בדרך, שלאורכה הוא מופעל. כך נוכל לומר, שבהעברת לבנים כמשקל 100 ק"ג מנקודה א' לנקודה ב' הגבוהה ממנה כ-20 מטר, בוצעה עבודה של:  $100 \text{ ק"ג} \times 20 \text{ מטר} = 2000 \text{ ק"גאמטר}$ . היחידות בהן נמדדת עבודה הן, איפוא, יחידות של ק"גאמטר. יחידות אלו הן שוות ערך לאנרגיה וניתן לבטא אותן ביחידות אנרגיה אחרות, כמו למשל, קלוריות, ג'אולים, וכו'.

לדוגמה: 1 קילו-קלוריה (ק"ק) היא שוות-ערך ל-426.8 ק"גאמטר. במילים אחרות, בהרמת משא במשקל 426.8 ק"ג לגובה של מטר אחד בוצעה עבודה שהיא שוות ערך לאנרגיה של 1 ק"ק. בטבלה 1 מובאות יחידות מקובלות למדידת עבודה, אנרגיה והספק.

נראה לפיכך, שמן הבחינה הפיסיקאלית ניתן להעריך ולמדוד עבודה ושווה ערך אנרגטי של עבודה בקלוריות, בצורה פשוטה יחסית. אולם, אם נבחן את השאלה: כמה

טבלה 1: שווה-ערך של יחידות פיסיקליות מקובלות למדידת עבודה (אנרגיה) והספק.

עבודה ואנרגיה	
4186 ג'אול =	426.8 ק"גאמטר = 1 קילו-קלוריה
שווה, בקירוב לאנרגיה המשתחררת בצריכת 0.2 ליטר חמצן	
הספק	
69.77 וואט =	426.8 ק"גאמטר/דקה = 1 ק"ק/דקה
0.01433 ק"ק/דקה =	6.12 ק"גאמטר/דקה = 1 וואט



האדם המועל. אולם לא כל האנרגיה, המשתחררת ממקורות האנרגיה בזמן הפעילות, הופכת לאנרגיה מכנית. הסיבה לכך טמונה במהות התהליכים, ההופכים את האנרגיה הכימית, המשתחררת ממקורות האנרגיה בגוף, לעבודת שרירים מכנית. חלק גדול מן האנרגיה המשתחררת אינו הופך לעבודה ומשתחרר ישירות כחום. יוצא, איפוא, שרק חלק מן האנרגיה הכימית, המשתחררת בזמן מאמץ, הופכת לאנרגיה מכנית וחלק גדול הופך ישירות לחום.

אם ננסה לסכם את הנאמר עד כה בצורה סכמטית נוכל להציג את המצב בסכימה שבצמוד זה.

כאן המקום להרחיב מעט את המושג "עבודה מכנית שאינה ניתנת למדידה ישירה". נבדוק, לדוגמא, רץ, שמשקלו 60 ק"ג, המתאמן בריצה בעליה על מדרון חולי תלול, העולה מנקודה א' לנקודה ב' הגבוהה ממנה ב-10 מ'. חישוב מרכיב העבודה של העלאת משקל הגוף הוא  $60 \times 10 = 600$  ק"גמטר. אך ברור שהוצאת האנרגיה של רץ, המבצע את העליה במדרון החולי בתנועות נכונות ויעילות, תהא נמוכה משל רץ, שאינו מבצע תנועות נכונות ואשר מפעיל עבודה מכנית בתנועות, שאינן תורמות ישירות להעלאת הגוף במדרון. הרץ

הרץ הלא יעיל מבצע עבודה מכנית רבה, שאינה מקדמת אותו במעלה המדרון. לעומתו, הרץ היעיל מבצע פחות עבודה, שאינה מקדמת אותו, כל זאת למרות שהמרכיב של העבודה, שבוצעה בסופו של דבר בהעלאת משקל הגוף לנקודה ב', זהה אצל שניהם.

כאשר אנו שואלים כמה אנרגיה הוציא אדם בפעילות מוגדרת אנו מבקשים, למעשה, תשובה ביחידות של אנרגיה, כגון קלוריות שהיא שוות ערך לתיבה "שיחרור אנרגיה כימית" בסכימה שהצגנו.

תיבה זו מייצגת את המחיר האנרגטי של ביצוע הפעילות, וכאמור, רק חלק קטן ממנו מתורגם לעבודה מכנית וחלק קטן מזה למרכיב מוגדר של עבודה, המעניין אותנו.

כיצד ניתן להעריך את המחיר האנרגטי של ביצוע פעילות מוגדרת? אחת הדרכים האפשריות היא מדידה של כמות החום, המשוחררת מן הגוף בשעת הפעילות.

### הערכת המחיר האנרגטי של עבודה על ידי מדידה של פליטת החום

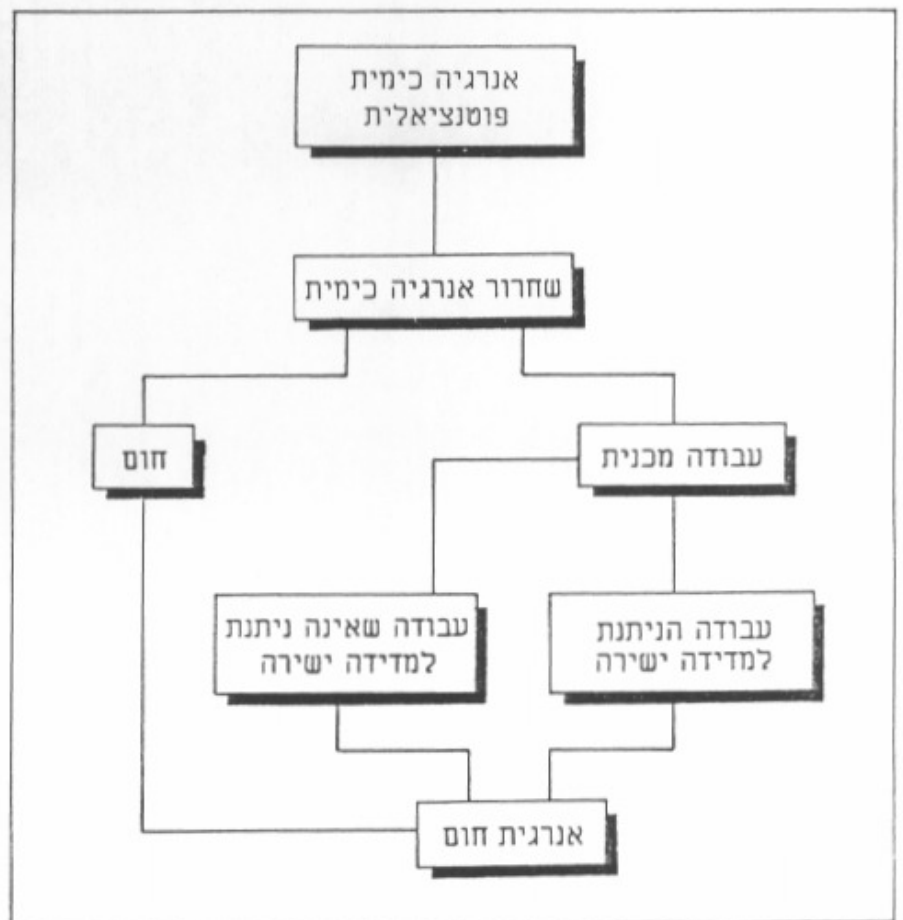
כל האנרגיה הכימית, המשתחררת בזמן פעילות, מתגלגלת והופכת, בסופו של דבר, לאנרגיית חום. כלומר, גם כלל העבודה המכנית שבוצעה הופך לאנרגיית חום, המשתחררת לסביבה. אנרגיה זו שווה לאנרגיה הכימית, שהשתחררה ממקורות האנרגיה ומהווה את המחיר האנרגטי של הפעילות. אם נוסיף מידע זה לסכימה היא תקבל את הצורה הבאה:

הדרך למדידת כמות החום, הנפלטת בזמן פעילות מוגדרת (כגון, 5 דקות ריצה בקצב 12 קמ"ש, וכדומה), אינה פשוטה. החום הנוצר מועבר אל הסביבה ומתפזר, כך שמדידת חום הגוף לא תיתן תשובה לבעיה. כדי למדוד את כל החום המשתחרר יש להכניס את האדם, המבצע את הפעילות, למתקן מיוחד בו יוכל לבצע את הפעילות ובו יוכל להימדד כל החום שישתחרר לפני שיתפזר ויאבד בסביבה. מתקן כזה הוא, בעצם קלורימטר ענק, שהוא בעיקרו, חדר מבודד מן הסביבה. כל החום הנפלט נקלט על ידי נוזל, הנמצא בדמנות החדר ומביא

לעליית הטמפרטורה של הנוזל. מעליית טמפרטורת הנוזל ניתן לחשב את כמות החום שנקלטה בו וכך למדוד ישירות, בקלוריות, את המחיר האנרגטי של ביצוע הפעילות. מתקן כזה הוא מסובך למדי מבחינה טכנית, וכיום כמעט שאינו נמצא בשימוש למדידות מסוג זה, אך כאמור הרקע העיוני למדידה בדרך זו הוא פשוט וברור.

### הערכת המחיר האנרגטי של עבודה על-ידי מדידה של צריכת החמצן

כיום, משתמשים בדרך אחרת להערכת המחיר האנרגטי של ביצוע עבודה והיא מדידה של צריכת החמצן על ידי האדם המבצע את הפעילות. הבסיס העיוני להערכת העלות האנרגטית של פעילות גופנית על ידי מדידה של צריכת החמצן, הוא העובדה שכדי להפיק את האנרגיה הכימית, יש צורך בחמצן. ניתן להפיק אנרגיה גם בתהליכים, שאינם מחייבים שימוש בחמצן. תהליכים אלו מכונים "תהליכים אנאירוביים", אך בפעילות, בה כל האנרגיה המופקת מפירוק חומרי המזון מחייבת שימוש בחמצן, ניתן להעריך את המחיר האנרגטי של הפעילות על-פי כמות החמצן הנצרכת. החמצן, הנצרך על ידי השרירים בשעת פעילות, משתתף בתהליך פירוק חומרי המזון בתאים. כמקור אנרגיה עיקרי משמשים פחמימות ושומנים, המצויים בשריר, או המועברים אליו באמצעות זרם הדם. חשוב לציין שקיים קשר כמותי ברור בין נפח החמצן הנצרך לבין כמות חומרי המזון המתפרקות וכמות האנרגיה המשתחררת. מכך נובע, שאם נדע את שווה-הערך הקלורי של ליטר חמצן ונדע את נפח החמצן שנצרך לביצוע פעילות נתונה, נוכל להעריך את העלות האנרגטית של ביצוע הפעילות במונחים של קלוריות. כל זאת, כאמור, בתנאי שכל האנרגיה הכימית, ששחררה בפירוק המזון, מקורה בתהליכים אירוביים צורכי חמצן.



(רשימה ראשונה בסדרה)