

# האדם כמכונה ביולוגית: היכולת לחזות את מגבלותיה

מצפים גם ממפקד בחיל הרגלים שיידע מהן מגבלותיו של גוף-האדם. הרופאים פועלים לצידו של המפקד במתן ייעוץ מקצועי, אבל הם לעולם לא מקבלים החלטות במקומו. כשם שקחש"ר מוציא הנחיות טכניות ביחס לכלי-רכב ולאמל"ח, כך גם קרפ"ר מוציא הנחיות הקשורות לבני-אדם ולמגבלות תפקודם. אולם ההשוואה הזאת בין אדם למכונה היא פשטנית, שכן התפקוד של מערכות הגוף מסובך ומורכב לאין שיעור מתפקודן של מכונות.

קיימים הבדלים ביכולתם של בני-אדם שונים. יתר על כן, מערכות הגוף נענות לגירויים חיצוניים ומתאימות את עצמן במידה לא מועטה לשינויים סביבתיים. המכונות, לעומת זאת, דומות אלה לאלה ומשוללות מנגנוני הסתגלות לסביבה. ההיענות (compliance) של מערכות שונות לגירויים אינה מסונכרנת, ולכך עלולה להיות השפעה על יכולת התפקוד.

הנעלמים ביחס לאופן תפקודן של מערכות בגוף-האדם גדולים בהרבה מהנעלמים ביחס למכונות, שהן מעשי ידי אדם.

היות ומרכיבי השוני בין הלוחמים גדולים כל כך (גבוהים, נמוכים, חזקים, חלשים, נושאי פק"ל כבד לעומת נושאי פק"ל קל וכו'), נשאלת השאלה, כיצד אמור מפקד להחליט ביחס לביצועי כל אחד מאנשיו בתנאים בעייתיים או אפילו בתנאים רגילים. מהם הכלים הניתנים לו לצורך הבנה "פיסיולוגית" של מגבלות גוף האדם, הנדרש לפעול בתנאים קשים, ומהם הכלים המסייעים לו בתהליכי קבלת ההחלטות? מעבר לכך, באיזו רמה אמור להיות המפקד, שבסמכותו לקבל החלטות מסוג זה? לכאורה, המ"כ והמ"מ הם דרגי הפיקוד המתמודדים עם הבעיה מקרוב. אך במסלול ההכשרה העכשווי בצה"ל הם צעירים בגילם וחסרי ניסיון.

באחרונה פירסם קרפ"ר – באמצעות היחידה לפיסיולוגיה צבאית – שתי מפות של אזורי אקלים בארץ-ישראל: האחת לתקופת החורף והאחרת לתקופת הקיץ. המפות כוללות הפניה להוראות הבטיחות הרלוונטיות וכן מציגות גרפים וטבלאות, האמורים לספק למפקדים בשטח כלים פשוטים, יחסית, לקביעת דרגת עוצמתו של הקור בחורף או לקביעת עומס החום בקיץ. בעתיד הנראה לעין ניתן יהיה להמיר חלק מהאמצעים הקיימים במחשבוני כיס, שיסופקו למפקדים הזוטרים או אפילו לחיילים. לתוך מחשבוני אלה יוזנו נתונים

תת-אלוף דורון אלמוג\*

רס"ן ד"ר דני מורן\*\*

מפקדים חייבים להכיר את מגבלותיה של ה"מכונה" האנושית, שאם לא כן, יחזרו על עצמם אסונות דוגמת מותם של שני לוחמי סיירת מטכ"ל כתוצאה ממכת חום. בקרוב יעמדו לרשות המפקדים מחשבונים שיסייעו להם בתכנון נכון של מאמצים שניתן להטיל על חייליהם

## אחריות המפקד להבנת ה"מכונה" הקרויה גוף-האדם

ב-28 במאי 1992, בעת מסע ניווטים של קבוצת לוחמים מסיירת מטכ"ל באיזור הרי אילת, מתו שני חיילים, ערן עופר וירון בר-דור ז"ל כתוצאה ממכת חום. האירוע הטראומטי היה קטליזטור חריף לרצף של פעילויות, שנועדו ללמוד את סוגיית האימון באזורים שבהם תנאי מזג האוויר קשים במיוחד. יחידות החי"ר המתאמנות במדבר יהודה ובנגב מצאו את עצמן מתמודדות עם הקשחת הנהלים לאישור אימונים בתנאי מזג אוויר מגבילים. מאחר שהפקעת סמכותו של המפקד לקבוע סייגים לאימון כמוה כהצבעת אי-אמון בכושר שיפוטו והבנתו בתחום מקצועי בסיסי, נקבע שהוא ימשיך גם להבא להיות אחראי לבריאות חייליו.

כשם שטייס או מפקד טנק אמורים לדעת מהן מגבלות הכלי הנתון לאחריותם בכל מזג אוויר, כך

\* רח"ט תוה"ד במטכ"ל.  
\*\* חוקר בכיר, מקרפ"ר, היחידה לפיסיולוגיה צבאית.

על תנאי הסביבה (טמפרטורה, לחות, עוצמת הרוח, משקעים, לחץ ברומטרי) ועל החייל (משקל עם וללא ציוד, גובה, דופק, צריכת חמצן מירבית, הרכב רקמות, ארגומטריה, כושר גופני). המחשבון ישקלל יחד את כל הנתונים הרבים האלה ויסייע למפקד לקבל החלטות ביחס ליכולת הביצוע האישית של כל לוחם ולוחם.

מאמר זה עוסק בעיקר בפעילות הגופנית בתנאי חום, אולם מטרתו היא רחבה הרבה יותר: להעלות את המודעות לחשיבות הטמעתם של מושגי יסוד בפיסיולוגיה במערך ההכשרות השונות.

## חיזוי התגובות הפיסיולוגיות בפעילות צבאית

באופן טבעי מערכות הגוף מתפקדות בהתאם לתנאים שבהם האדם שוהה ועובד. עבור מרבית האנשים בני החברה המערבית מערכות הגוף תתפקדנה בצורה מיטבית כאשר טמפרטורת הסביבה תהיה כ-22 מעלות צלזיוס (מ"צ), הלחות היחסית כ-50%, המאמץ הגופני יוגדר כקל, והלחץ הברומטרי הוא 760 מילימטר כספית (1 אטמו-ספירה). כל סטייה מתנאים אלה מחייבת את הגוף להפעיל מנגנוני תיקון. למשל, לבישת בגד בעל

תכונות בידוד גבוהות יותר מהרגיל תחייב

הפעלת מנגנוני פיזיו לפיזור עודפי חום. במקרה של לבישת בגד כזה תהיה אפוא טמפרטורת הנוחות (שבה אין צורך להפעיל את מנגנוני הפיזיו) נמוכה מהמצוין לעיל.

באותה מידה פעילות גופנית אינטנסיבית, המבוצעת בטמפרטורה של 22 מ"צ, תגרום להפרשת זיעה (כמנגנון פיזיו לפיזור עודפי חום) בכמות רבה יותר מאשר פעילות גופנית זהה בטמפרטורה של 17 מ"צ. הדוגמאות הן רבות, וככל שגדל מספר המשתנים, כך גדלה המורכבות.

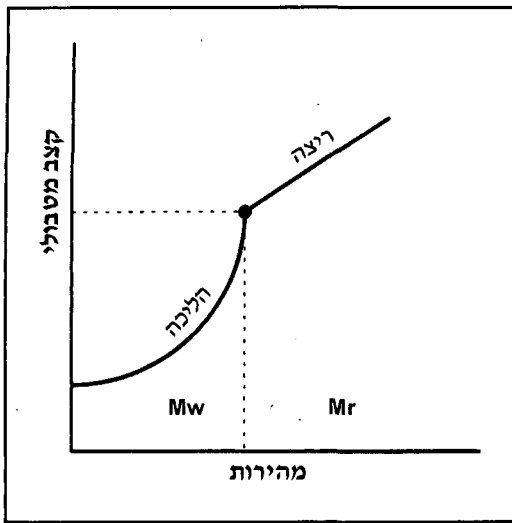
אחת הדרכים לבחינת יכולת התפקוד של האדם בתנאים משתנים (אקלים, ביגוד, מאמץ) היא בחיזוי התגובות הפיסיולוגיות הרלוונטיות (טמפרטורת הגוף, קצב הלב וקצב ההזעה). ליכולת לחזות את התגובות הפיסיולוגיות באמצעות דגמים מתימטיים יש חשיבות רבה. באמצעות דגמים אלה ניתן להציב סייגים ומגבלות לפעילות בתנאי חום ומאמץ כדי למנוע פגיעות חום וירידה תפקודית.<sup>19</sup> ניסיונות לפתח דגמים כאלה נעשו מאז תחילת המאה הנוכחית, 1-8 אך רובם המכריע יושם רק על-ידי הוגיהם. סרבולס ומורכבותם של הדגמים, ביטחון נמוך באמינותם ובסיס נתונים דל הם ככל הנראה הסיבות העיקריות לשימוש המוגבל שנעשה בדגמים אלה.

בשני העשורים האחרונים פותחו במעבדות המחקר לרפואה סביבתית של צבא ארצות-הברית מערכות דגמים מתימטיים לתיאור תגובות פיסיולוגיות בחום

חיילים במסע אלונקות. המפקד הוא האחראי לבריאות חייליו וחייב לדעת מהו גבול המאמץ שניתן לדרוש מהם



השפעת מהירות ההליכה/ריצה על הרמה המטבולית



מקרא:

Mw - רמה מטבולית בהליכה

Mr - רמה מטבולית בריצה

כאשר יעילות הריצה גדולה מיעילות ההליכה באותה מהירות. כלומר, צריכת האנרגיה בריצה תהיה נמוכה מזאת הנצרכת בהליכה.

באופן כללי, המעבר מהליכה לריצה נעשה כאשר הצריכה האנרגטית בהליכה גדולה מ-2.5 ליטרים צריכה בדקה. צריכה כזו היא שוות-ערך למהירות ההליכה/ריצה של כ-9 קמ"ש, אך היא תלויה גם במשקל הגוף ובמשקל הציוד הנישא. תוספת האנרגיה שיש להשקיע במעבר לריצה - בהשוואה לאנרגיה הנצרכת בהליכה - תלויה גם היא במשקל הנישא. עוד נמצא, שה"תשלום" עבור נשיאת משא הכבד ב-50% ממשקל הגוף הוא בקצב ההליכה - על מנת שסך האנרגיה המושקעת לא יעלה על 50% מהיכולת המירבית של החייל.

### חיזוי טמפרטורת מרכז הגוף

טמפרטורת הגוף פרופורציונית לכמות החום בגוף. לכן הגישה שהנחתה את Givoni ואת Goldman בפיתוח הדגם המתמטי לחיזוי טמפרטורת מרכז הגוף התבססה על משוואת החום הכללית במצב של שיווי משקל, שבה נכללים הרכיבים הפיסיולוגיים-פיסיקליים הקשורים לחילוף החום בין הגוף לסביבה כדלקמן:<sup>6</sup>

ובמאמץ. בתחילת שנות ה-70 פיתחו Givoni ו-Goldman<sup>6,7</sup> סדרת דגמים מתימטיים, אשר באמצעותם ניתן לחזות את טמפרטורת מרכז הגוף ואת קצב הלב. בסוף העשור שיכללו Pandolf ושות'<sup>4</sup> דגם מתימטי קודם לחיזוי הרמה המטבולית בעמידה או בהליכה עם משא על גב<sup>4</sup>.

Shapiro ושות'<sup>9</sup> פיתחו בתחילת שנות ה-80 את הדגם המתמטי לקצב איבוד הנוזלים באמצעות מנגנון ההזעה. מערכות דגמים אלה הושלמו באמצע שנות ה-80 על-ידי Epstein ושות'<sup>10</sup> שהציעו דגם מתימטי לחיזוי הרמה המטבולית בזמן ריצה. דגמים אלה מבוססים על המודלים הביופיסיקליים המתארים את הצורך בפיזור חום<sup>11</sup> ועל ניתוח אנרגטי של עמידה או של הליכה במישור משופע.

דחיפה מעשית לפיתוח הדגמים ניתנה ממערכות צבאיות, שבהן נדרשים חיילים לבצע משימות שהן בגבולות היכולת הפיסיולוגית. באחרונה, בעת מלחמת המפרץ, עשה צבא ארצות-הברית שימוש מעשי בדגמים אלה, ובעזרתם ניתן היה להדריך את החיילים באשר לכמות המים שעליהם לצרוך בתנאי אקלים קשים בהקשר לפעילות הגופנית שנדרשה ולביגוד המגן שחיילים אלה נצטוו ללבוש.

### חיזוי הקצב המטבולי

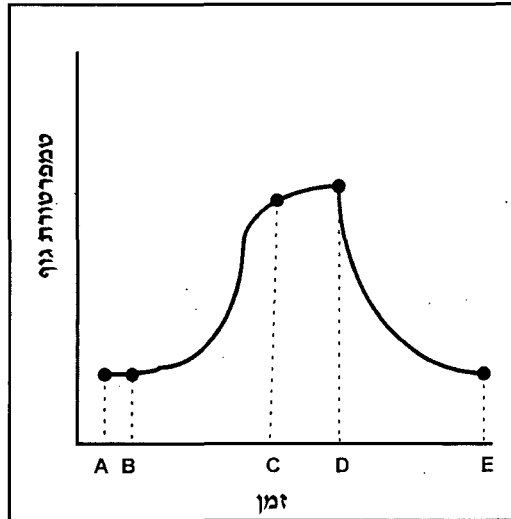
גורם יסודי בדגמים לחיזוי התגובות הפיסיולוגיות הוא הקצב המטבולי, המבטא את עוצמת המאמץ. בבואנו לתאר באופן תרשימי את הדרישות האנרגטיות למאמץ אנו מבחינים בשלושה רכיבים: א. כמות האנרגיה הדרושה כדי לשאת את משקל הגוף (M1); ב. כמות האנרגיה הדרושה כדי לשאת את משקל הגוף והמטען (משא גב, נשק, אפוד וכ"ו) (M2); ג. כמות האנרגיה הנדרשת להליכה (M3). על בסיס זה פירסמו Pandolf ושות'<sup>4</sup> בסוף שנות ה-70 את הדגם האמפירי המשלב את שלושת הגורמים הנ"ל לחיזוי הקצב המטבולי הכללי (MW):

$$MW = M1 + M2 + M3$$

עבודותיהם של Margaria ושות'<sup>12</sup> הראו, שהקשר בין מהירות ההליכה לצריכת האנרגיה הוא אקספוננציאלי, ואילו הקשר בין מהירות הריצה לצריכת האנרגיה הוא קווי (איור מס' 1). עוד נמצא על-ידי Keren ושות'<sup>13</sup> שהמעבר מהליכה לריצה תלוי ביעילות אנרגטית ואינו גורם קבוע, אלא תלוי במשקל. על בסיס זה הראו Epstein ושות'<sup>10</sup> באמצע שנות ה-80, שהמעבר מהליכה לריצה חל

## איור מס' 2

הדינמיקה של טמפרטורת מרכז הגוף המיוצגת על-ידי טמפרטורה רקטלית בחשיפה למאמץ



מקרא:

A - זמן תחילת המאמץ; AB - ההסתגלות למאמץ  
BC - שלב המאמץ; CD - ההסתגלות להתאוששות  
DE - ההתאוששות מהמאמץ

למאמץ/התאוששות ואת זמן העבודה/התאוששות.

### חיזוי קצב ההזעה וכמות השתייה

גורם מרכזי בוויסות טמפרטורת הגוף הוא מנגנון ההזעה. תגובת הגוף למאמץ או לחשיפה לחום היא הפרשת זיעה. כדי להגיע לשיווי משקל תרמי חייב קצב אידוי הזיעה להדביק את הצורך בפזור החום. הפרשת הזיעה כשלעצמה היא פונקציה פיסיולוגית התלויה בטמפרטורת הגוף. לעומת זאת נידוף הזיעה, שהוא פונקציה פיסיקלית (ולא פיסיולוגית) תלוי במידה רבה בתנאי האקלים. בתנאי אקלים חם ולח יכולת האידוי היא קטנה. במצב כזה תופרש כמות רבה של זיעה (כפונקציה של טמפרטורת הגוף), אך רק מעט זיעה תתנדף (כפונקציה של תנאי הסביבה). גם הביגוד משמש כגורם המשבש את יכולת הנידוף של הזיעה. ביגוד כבד (דוגמת בגדי מגן), שמונע מעבר של אדי הזיעה, יוצר מיקרו־סביבה חמה ולחה, שאינה מאפשרת ויסות של חום הגוף.

להפרשה רבה של זיעה, שאינה מצליחה להתנדף, יש משמעות כפולה: א. הגוף יאבד רק מעט מאוד חום, והטמפרטורה שלו תמשיך לעלות.

$$M+Hr+c-Esk = 0; \text{ (watt)}$$

כאשר:

M - האנרגיה המטבולית

Hr+c - חילוף החום הפיסיקלי בין הגוף לסביבה

Esk - איבוד החום באידוי

מביטוי מתימטי זה ניתן לגזור את התרומה של כל רכיב לטמפרטורת הגוף:

א. T1 - תרומת הפעילות המטבולית לטמפרטורת הגוף.

ב. T2 - תרומת חילוף החום הפיסיקלי לטמפרטורת הגוף.

ג. T3 - שינוי טמפרטורת הגוף כפונקציה של יכולת אידוי הזיעה ושל הצורך באיבוד חום באמצעות אידוי.

טמפרטורת הגוף במצב של שיווי משקל תרמי (Tref) היא לפיכך:

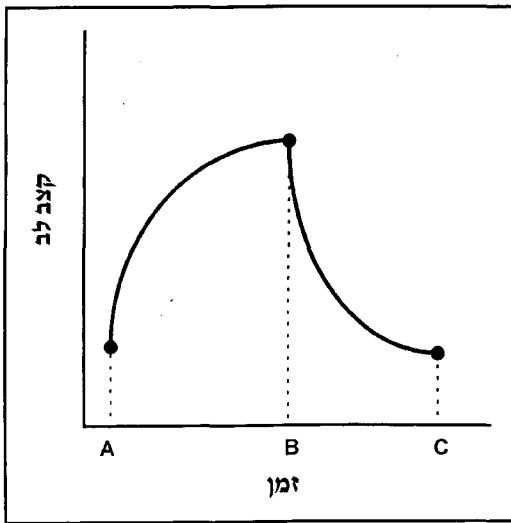
$$Tref = T1+T2+T3$$

מנוסחה זו עולה, כי ככל שהמאמץ יהיה גדול יותר, תעלה טמפרטורת הגוף [T1]. הסכנה גוברת כאשר לכמות החום הנוצרת בגוף כתוצאה מהמאמץ מתווספת גם כמות חום מהסביבה [T2], וכאשר יכולת קירור הגוף בלתי מספקת [T3]. במצב שבו צבירת החום בגוף כתוצאה מעבודת השרירים והחשיפה לתנאי אקלים חם עולה על קצב פיזור החום - עולה טמפרטורת הגוף. הדינמיקה של עלייה בטמפרטורת הגוף בעת מאמץ ושל ירידה בטמפרטורת הגוף בעת מנוחה מזכירה תכונות של "קבל חשמלי" (איור מס' 2). השלב הראשון הוא שלב ההסתגלות למאמץ. בשלב זה - למרות תחילת ביצוע המאמץ - ב-10 הדקות הראשונות טמפרטורת מרכז הגוף אינה משתנה. בשלב השני, שלב המאמץ, משתנה טמפרטורת הגוף, אם כי באיחור מה. השלב השלישי הוא שלב ה"הסתגלות" להתאוששות, ובו טמפרטורת מרכז הגוף ממשיכה לעלות למרות הפסקת העבודה. שלב זה נמשך כ-20-30 דקות (בהתאם לעוצמת המאמץ). רק בשלב הרביעי, שלב ההתאוששות, טמפרטורת מרכז הגוף יורדת עד לרמתה שמ לפני המאמץ.

על בסיס זה פיתחו Givoni ו-Goldman<sup>6</sup> דגמים פרטניים לקביעת טמפרטורה בשלב של מנוחה, בשלב העבודה ובשלב ההתאוששות. הדגמים הפרטניים לחיזוי טמפרטורת הגוף בפרקי הזמן השונים כוללים את טמפרטורת הגוף, את קיבוע הזמן לעבודה/מנוחה, את תקופת ההסתגלות

### איור מס' 3

הדינמיקה של קצב הלב בחשיפה למאמץ



מקרא:

A - זמן תחילת המאמץ; AB - שלב המאמץ

B - הפסקת המאמץ; BC - ההתאוששות מהמאמץ

ו-Goldman<sup>7</sup> מערכת ביטויים פרטניים עבור קצב הלב במנוחה ובמאמץ תוך התחשבות בגורם הזמן. דגם זה נמצא מסורבל ומוגבל ביכולתו לחזות את קצב הלב מעל רמה של 140 פעימות בדקה. ניתוח בדרך שונה בוצע ע"י Moran<sup>14</sup> ושות', שפיתחו באחרונה דגם הכולל את המשתנים בעלי ההשפעה העיקרית על קצב הלב, ושאינו מתבסס על טמפרטורת גרעין הגוף. נכונותו של דגם זה אושרה במספר מחקרים.

#### יישום הדגמים המתמטיים בתנאי שדה

תקפות הדגמים השונים לחיזוי טמפרטורת מרכז הגוף, קצב ההזעה וקצב פעימות הלב נבחנה בסדרות של מחקרים שנערכו בתנאי מעבדה מבוקרים. המחקרים כללו צירופים רבים של קצב מטבולי, תנאי אקלים ולבוש, והתוצאות הצביעו על מיתאם גבוה בין הערכים החזויים לבין המדידות האמיתיות. אולם הדגמים נתגלו כמוגבלים בעת ניסיון ליישםם בתנאי שדה.<sup>15-16</sup>

ב-1979 נבחנה במחקר שבוצע על-ידי Pandolf ושות'<sup>17</sup> השפעתה של קרינה אינפרה-אדומה מלאכותית על עומס חום במנוחה ובמאמץ. תוצאות הניסויים הוכיחו שלקרינה יש השפעה

ב. הגוף יפסיד כמויות מים ניכרות.

כאשר קצב איבוד המים מהגוף גדול מקצב השתייה, מגיעים למצב של התייבשות. לדרגת התייבשות הגבוהה מ-2% ממשקל הגוף (איבוד של כ-1.5 ליטרים אצל אדם שמשקלו כ-70 ק"ג) יש כבר השלכה פיסיולוגית על מערכת הלב וכלי הדם ועל מערכת ויסות החום. יתר על כן, דרגת התייבשות כזו פוגעת בתפקודים פסיכומטוריים וקוגניטיביים. עומק הפגיעה התפקודית עולה ככל שדרגת ההתייבשות גבוהה יותר.

לפיכך פעילות גופנית אופטימלית תיתכן רק כאשר מונעים התייבשות על-ידי שתייה נאותה, שתדביק את קצב איבוד הנוזלים. מניעת התייבשות תשמר פונקציות פיסיולוגיות חיוניות החשובות בפעילות גופנית: שמירה על תפוקת לב ולחץ דם תקינים, שיבטיחו זרימת דם נאותה לשרירים ולעור; הפרשת זיעה תקינה, שתאפשר פיזור חום נאות (בדרגת התייבשות שמעל 5%-6% ממשקל הגוף ישנה ירידה בקצב ההזעה).

בסוף שנות ה-70 פיתחו Shapiro ושות'<sup>9</sup> דגם לחיזוי קצב ההזעה (msw), הנותן ביטוי לצורך בפיזור חום באמצעות אידוי זיעה (Ereq) וליכולת המירבית של הסביבה לפזר חום באמצעות אידוי הזיעה (Emax). על פי מחקריהם של חוקרים אלה, אמינותו של דגם זה גבוהה מאמינותם של כל הדגמים שהוצעו בעבר. לאפשרות לחזות את קצב ההזעה יש חשיבות מעשית ויישומית, מאחר שהיא מאפשרת לחשב את קצב איבוד הנוזלים מהגוף ואת הצורך בהשלמתם כדי למנוע התייבשות.

#### חיזוי קצב הלב

בעת מאמץ גופני נדרשת הזרמת כמות רבה של דם לשרירים העובדים. במקביל עולה גם הדרישה להזרים כמות דם גדולה לעור במטרה להסיע חום רב ממרכז הגוף להיקף. מההיקף ישנה אפשרות להעביר את החום לסביבה. תגובת מערכת הלב וכלי דם היא מיידיית, ולכן - בניגוד לדינמיקה של טמפרטורת הגוף - לא קיימת תקופת השהיה בשלב המאמץ, שבו קצב הלב עולה, ובשלב ההתאוששות, שבו קצב הלב יורד עד לרמתו הבסיסית (איור 3).

הדגמים הראשונים שפיתחו לחיזוי קצב הלב נגזרו מחיזוי טמפרטורת מרכז הגוף, מה שחייב להציב דגם מקדים, שבאמצעותו ניתן יהיה לבטא את השינויים בטמפרטורת הגוף במושגים של קצב לב. בדומה לטמפרטורה הרקטלית פיתחו Givoni

מובהקת על עומס החום. השפעת הקרינה התבטאה בעלייה בטמפרטורת הגוף, בקצב הלב ובכמות הזיעה. אולם חוקרים אלה לא הצליחו לשלב את גורם הקרינה בנוסחאות החיזוי. יחד עם זאת מצביעים ממצאי המחקר על הצורך להתחשב בקרינה כמרכיב בעומס החום ובמשוואות החיזוי לעומס החום.

השילוב בין משתנים שונים (אורך גלי הקרינה, ביגוד וכד') מקשה על יצירת הדמיה מלאכותית אמינה של קרינת השמש ומחייב ביצוע מחקרים בתנאי שדה. התברר שמרכיב חילוף החום הפיסיקלי בין האדם לסביבה הוא עקב אכילס של הדגמים המקוריים. קביעה זו התבססה על העובדה, שהדגמים פותחו בתנאי מעבדה, שאין בהם אפשרות להדמיה מלאה של תנאי האקלים הטבעיים.<sup>17</sup> העדר עבודות שדה מבוקרות בתנאי קרינת שמש טבעית ומיעוט נתוני מעבדה בקרינה מלאכותית לא איפשרו התקדמות נוספת בנושא במשך יותר מעשור.

הערכה מקורבת ראשונה להשפעת הקרינה הוצעה על-ידי Epstein ו-Shapiro<sup>18</sup> מתוך ניתוח תיאורטי של משוואת החום. במשוואת מאזן החום מייצג הערך  $Hr+c$  את חילוף החום הפיסיקלי (באמצעות קרינה, הולכה והסעה) בין הגוף לסביבה – חילוף התלוי במפל שבין טמפרטורת העור לטמפרטורת הסביבה. לפיכך הציע Shapiro<sup>18</sup> לשנות את ביטוי חילוף החום הפיסיקלי כך שיכלול ממוצע משוקלל של טמפרטורת האוויר (Ta) וטמפרטורת הכדור השחור (Tg) \* במקום טמפרטורת האוויר בלבד.

באחרונה, במסגרת שיתוף-פעולה עם מעבדות המחקר לרפואה סביבתית של צבא ארצות-הברית התאימו Moran ושות'<sup>15</sup> ו-Shapiro ושות'<sup>16</sup> את הדגם לחיזוי טמפרטורת מרכז הגוף של Goldman ו-Givoni ואת הדגם לחיזוי קצב איבוד הזיעה של Shapiro ושות' על-ידי שילוב מרכיב הקרינה בגורמים המתארים את מאזן החום. על פי שיטתם של Moran ושות'<sup>15</sup> ושל Shapiro ושות'<sup>16</sup> נקבעה אבחנה בין החום המוחלף באמצעות הסעה (Hc), לבין החום המוחלף באמצעות קרינה קצרת גל (Hr) ולבין קרינה ארוכת גל (Hi).

מרכיבי הקרינה השונים (Hi ו-Hr) שולבו בדגמים הקיימים לחיזוי טמפרטורת הגוף וקצב הזיעה ומאפשרים חיזוי משתנים אלה בתנאי שדה

ברמת דיוק גבוהה (הדגם לחיזוי קצב הלב פותח מראש כשמשולבים בו גורמי הקרינה השונים).

לסיכום, במהלך 20 השנים האחרונות נעשה ניסיון מתמשך לחזות את התגובות הפיסיולוגיות בתנאי חום ומאמץ. ניסיון זה התבסס על הבנת הדינמיקה של מאזן החום ועל ניתוח הפעילות הגופנית. יחד עם זאת, פיתוח ביטויים מתימטיים התבסס על מספר רב של עבודות ומחקרים, שהוחל בהם כבר בראשית המאה.

באחרונה פרץ פיתוח הדגמים אל מחוץ למעבדות הניסוי וחדרי החום. עבודות בתנאי שדה איפשרו להתאים את הדגמים המדעיים שפותחו בתנאי מעבדה גם ליישום יומיומי בתנאי סביבה טבעיים. היכולת לחזות את התגובות הפיסיולוגיות הובילה לתוכנית לפתח מחשב כיס פיסיולוגי פשוט וקל ליישום בשטח. מכשיר זה, הנמצא עדיין בשלב הפיתוח, ישמש בעתיד ככלי עזר בטיחותי למפקד הן באימונים והן בפעילות מבצעית. שילוב המודלים במחשבון כיס יאפשר להעריך את משך הזמן שבו יוכלו חיילים לעבוד ולהתאמן, את מחזורי הפעילות/מנוחה ואת כמות השתייה הנדרשת בתנאי אקלים מגוונים ובעת לבישת סוגי לבוש שונים.

שילוב לימודי פיסיולוגיה בקורס קצינים ובקורסים צבאיים מתקדמים יותר יאפשר למפקדים להבין תהליכים שונים המתרחשים בגוף האדם בתגובה לגירויים חיצוניים ויאפשר מיצוי מושכל ונבון של יכולת החייל הרגלי. לאחר שיובנו מגבלות יכולתו של החייל הרגלי, קיום ההוראות והפקודות ייעשה מתוך הבנה ולא מתוך כורח.

## סיכום

ההתפתחות בתחום הפיסיולוגיה תאפשר - כנראה - כבר בעתיד הקרוב לפתח אמצעי עזר, שיוכלו לסייע למפקדים וללוחמים בשטח לקבל החלטות בתחום המאמצים הפיסיים בהתחשב בתנאים הגיאוגרפיים-אקלימיים המשתנים.

אולם העזרים הטכנולוגיים המתקדמים אסור שיבואו במקום למידה אישית ופיתוח מודעות עצמית גבוהה בתחום הפיסיולוגיה של גוף האדם. מפקדים זוטרים רבים, הפועלים יום-יום בשטח, מקבלים לא פעם החלטות באופן לא רציונלי, מתוך מאציואיזם, בורות ודפוסי הכוונה ופיקוח בלתי הולמים. כך, למשל, המ"כ שדורש מחייליו לצאת לשמירת לילה בטמפרטורה הקרובה לאפס

\* הפרש בין הטמפרטורה של כדור בצבע שחור לבין טמפרטורת הסביבה מייצג את החום שנוצר כתוצאה מהקרינה.

מן הראוי לדעת, שגם בצה"ל בוצעו לא מעט מחקרים בתחומים אלה, כמו המחקר המפורסם על משמעת המים, שבוצע באמצעות 60 חיילים מחטיבה 35, והמחקר על נזקי גוף שנגרמים במסעות למרחק של 120 ק"מ.

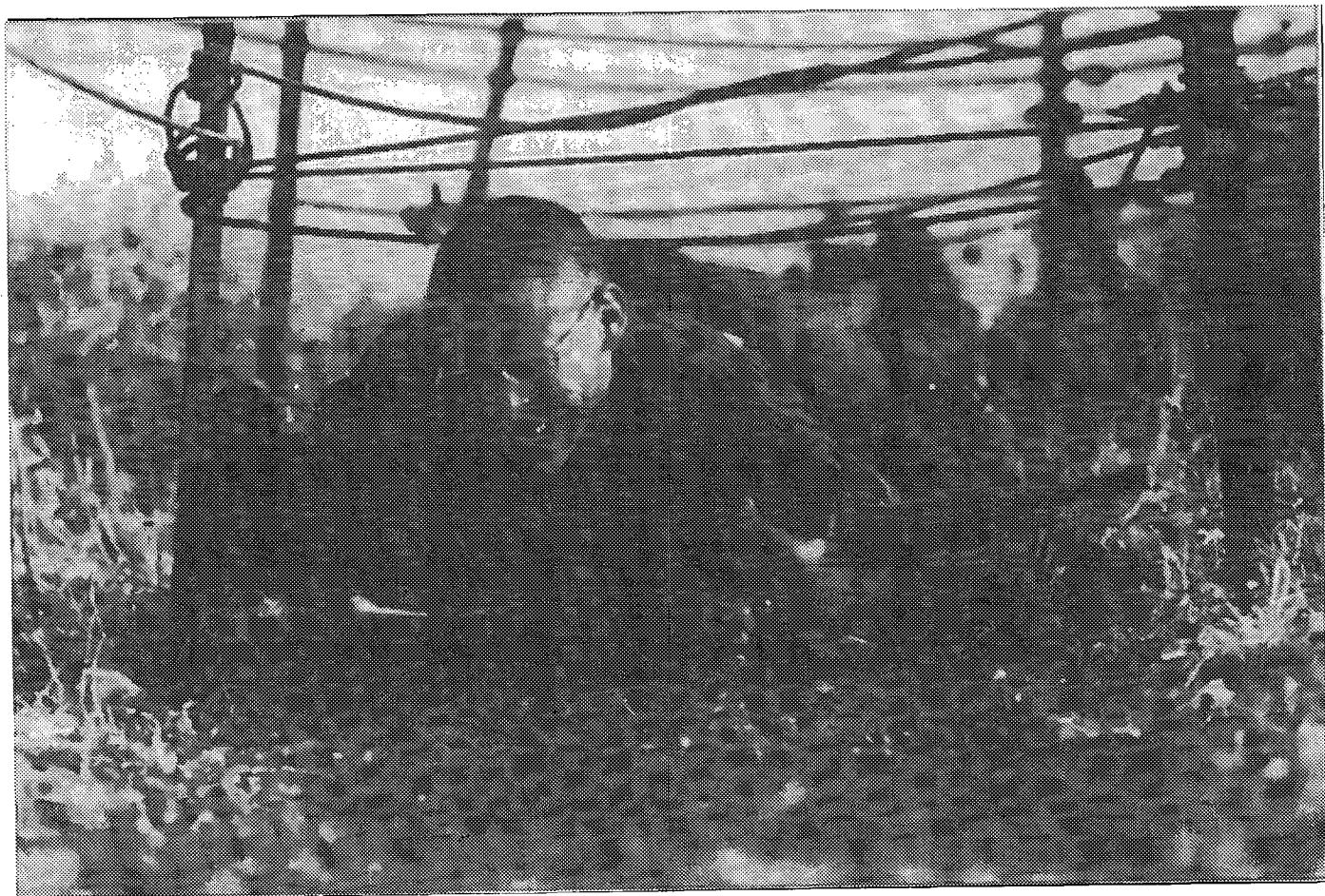
העברת מידע לרוחב הארגון, יצירת מאגר לקחים זמין ושינוי דפוסי הלמידה של נושא זה הם הכרח המציאות. לימוד מעמיק במיוחד חייב להיעשות על-ידי אותה שדרת מפקדים, הנדרשת לעסוק דרך קבע בתחום הפיסיולוגיה של האדם. לימוד זה צריך להתבסס על ניסיונו שלנו ועל ניסיונם של האחרים.

מפקדים שיטרוח ללמוד סוגיות יסוד בפיסיו-לוגיה של המכונה היקרה ביותר, המורכבת ביותר והרגישה ביותר שנתונה תחת סמכותם יהיו מקצועיים יותר, יוכלו לקבל החלטות נבונות יותר – וגם להפיק את המקסימום מעצמם ומהחיילים שלהם.

מעלות, כשהם לבושים חולצות בלבד, ובפיו אידיאולוגיה של זריזות חיילית בעת מגע עם האויב, או המפקד שמכריח את חייליו לשתות מימייה מלאה לפני היציאה לשטח. המפקד האחד חוטא, בכך שאינו מאפשר לחייליו לשמור על חום גופם, שלו הם נזקקים כל כך לצורך ביצוע משימתם, ואילו המפקד האחר, הפועל מתוך בורות ועיקשות, אינו מתחשב ברמת הנוזלים האמיתית הנחוצה לגוף בעת היציאה לפעילות.

המפקדים, הדורשים מעצמם ומפקודיהם ביצועי שיא באימונים ובפעילות מבצעית, אמורים להיות מקצוענים בתחום הפיסיולוגיה של גוף האדם לפחות כמו ספורטאים, הנדרשים לביצועי שיא בתחרויות המחייבות סבולת מתמשכת, דוגמת טריאתלון וריצות מרתון. המחקר הספורטיבי העוסק בתחומים אלה עשיר למדי בהמלצות המתייחסות לתזונה נכונה, לשמירת חום הגוף, לשמירת רמת הנוזלים ולתחומים רבים אחרים.

חייל במסלול מכשולים. החלטות שמקבלים מפקדים מתוך מאצוואיים ובורות פוגעות בבריאות החיילים וביכולתם לבצע את משימותיהם. תצלום. דו"צ



1. Wissler EH, An analysis of factor affecting temperature levels in the nude human. In: Hardy JD (ed.), *Temperature its Measurement and control in Science and Industry*, New-York, Reinhold, 1963, vol. 3.
2. Gagge AP, Stolwijk JAJ & Nishi Y., An effective temperature scale, based on a simple model of human physiological regulatory response, *ASHARE Trans*, 1971; 74: 242-262.
3. Gordon RG, Roemen RB & Horvath SM, A mathematical model of the human temperature regulatory system transient cold exposure response, *IEEE Trans Biomed Eng BME*, 1976, 32: 434-444.
4. Pandolf KB, Givoni B & Goldman RF, Predicting energy expenditure with loads while standing or walking very slowly, *J Appl Physiol*, 1977; 43: 577-581.
5. Stolwijk JAJ & Hardy JD, A mathematical model of physiological temperature regulation in man, *NASA Contractor Report CR*, 1855, 1971.
6. Givoni B & Goldman RF, Predicting rectal temperature response to work environment and clothing, *J Appl Physiol*, 1972; 32: 812-822.
7. Givoni B & Goldman RF, Predicting heart rate response to work, environment and clothing, *J Appl Physiol*, 1973; 34: 201-204.
8. Wyndham CH & al, Thermal responses of men with high initial temperature to the stress of heat and work, *J Appl Physiol*, 1954; 6: 687-690.
9. Shpairo Y, Pandolf KB & Goldman RF, Predicting sweat loss response to exercise, environment and clothing, *Eur J Appl Physiol*, 1982; 48: 83-96.
10. Epstein Y, Stroschein LA & Pandolf KB, Predicting metabolic cost of running with and without backpack loads, *Eur J Appl Physiol*, 1987; 56: 495-500.
11. Moran D, Epstein E & Shapiro Y, Body temperature regulation in thermodynamics terms, *Harefuah*, 1994; 127: 246.
12. Margaria R, Cerretelli P, Aghemo P & Sassi G, Energy cost of running, *J Appl Physiol*, 1972; 32: 706-708.
13. Keren G, Epstein Y, Magazanik A & Sohar E, The energy cost of walking and running with and without a backpack load, *Eur J Appl Physiol*, 1981; 317-324.
14. Moran D, Epstein Y, Laor A, Vitalis A, Shapiro Y, Predicting heart rate response to various metabolic rates, environments and clothing, *J Appl Physiol*, 1995, 87: 318-322.
15. Moran D, Shapiro Y, Epstein Y, Burstein R, Stroschein L, Pandolf KB, Validation and adjustment of the mathematical prediction model for human rectal temperature responses to outdoor environmental conditions, *Ergonomics*, 1955, 38: 1011-1018.
16. Shapiro Y, Moran D, Epstein Y, Stroschein L, Pandolf KB, Validation and adjustment of the mathematical prediction model for human sweat rate responses to outdoor environmental conditions, *Ergonomics*, 1955, 38: 981-986.
17. Pandolf KB, Shapiro Y, Breckenridge JR, Goldman RF, Effects of solar heat load on physiological performance at rest and work in the heat, *Fed Proc*, 1979; 38: 4360.
18. Shapiro Y, Epstein Y, Environmental physiology and indoor climate - thermoregulation and thermal comfort, *Energy Build*, 1984; 7: 29-34.
19. Moran D, Epstein Y, Shapiro Y, Mathematical prediction models for physiological responses under exercise heat - stress. *Harefuah* 127: 1994, 312-317.

