

# מבוא לארגונומיה

מאת מהנדס עידו מורג



האם הרגשת קושי בהפעלה מדויקת של מכונה?  
האם ההפעלה של הציוד מעייפת אותך? -  
מי שחושב במושגים של הנדסת אנוש שואל  
במקרים אלה איך מאפשרים להוציא לשוק מוצר  
שתוכנן ללא חשיבה ארגונומית

סביר להניח ששביעות רצונה של העובדת, אשר זכתה בכל אלה, תהיה גבוהה ובנוסף - ההתמודדות עם המטלות והתפקיד תהיה קלה יותר ומוצלחת.

## הנדסת אנוש

תכנון אופטימלי של המימשק אדם-סביבה נקרא בארה"ב "הנדסת אנוש" (human factors) ובאירופה "ארגונומיה" (ergonomics). הגישה הזאת מושתתת על יישום שיטתי של מידע אודות יכולות האדם, מגבלותיו, גורמים מאפיינים להתנהגות והגורמים המניעים אותו. המידע הזה, המתבסס על מחקרים, מהווה בסיס לתכנון ולהבנה טובה יותר של ההשפעות שיש לתוכניות השונות.

- "הנדסת אנוש" כוללת מספר מאפיינים המייחדים אותה משאר ענפי הנדסה:
- מחויבות לרעיון שהטכנולוגיה נועדה לשרת את האדם ולכן חייבת להיות מתוכננת על פי תפיסה אנושית;
  - הכרה בשוני בין בני האדם - מבחינת יכולות, מיגבלות וצרכים;
  - הבנה שצורתם ואופיים של מוצרים ותהליכים משפיעים על התנהגותו של האדם ועל איכות חייו;
  - התבססות על שיטות של מחקר מדעי ושימוש במידע אובייקטיבי לבחינת השערות ולאיסוף נתונים על התנהגות האדם;
  - שילוב בין טכנולוגיה, תהליכים וסביבות עבודה, שאינם רכיבים עצמאיים אלא חייבים לעבוד במשולב ובהתאמה (סינכרוניזציה).

## התפתחות הגורם האנושי

ההתפתחות העיקרית של תחום "הנדסת אנוש" התרחשה בסוף המאה ה-19, בעקבות התנופה הטכנולוגית של המהפכה התעשייתית. הדוגמה המובהקת היא בני הזוג פרנק ויליאם גילברט, שעסקו בחקר תנועות הגוף (motion study). עבודתם,

את הקהל לשביעות רצונו - חייבים לספק לה עמדת עבודה מתאימה הכוללת את כל האמצעים הנדרשים לתנאי נוחות: כסא משרדי טוב, מהסוג הניתן לכיוונון למידותיה (משקל וגובה) של כל אחת, שולחן עבודה שמידותיו מתאימות לעבודה ולכסא המתכוונן, ועמדת מחשב שתאפשר לשבת בנוחות ולהדפיס ללא מאמצים. בנוסף, עליה לקבל הדרכה כיצד לשבת ולעבוד בצורה הנכונה כדי למנוע כאבי גב ותחושות אי-נוחות עקב ישיבה ממושכת. עמדת העבודה צריכה לכלול את כל האמצעים הארגונומיים הנדרשים, כמו: הגבהה/הנמכה של המסך לגובה המתאים, אמצעים לתמיכה בשורש כף היד (כריות או פדים למקלדת ולעכבר), התקן להצבת דפים לצורך הקלדה ועוד. סביבת העבודה צריכה להיות מוארת בתאורה מלאכותית או טבעית שאיננה יוצרת השתקפויות על צג המחשב, לא מסנוורת ולא גורמת למאמץ של העיניים. לטמפרטורה מתאימה בחלל יש חשיבות מכרעת לגבי יעילות העבודה ובריאות העובדים (התלונה הנפוצה במשרדים היא קירור יתר). יש למנוע חשיפה ישירה של חלקי גוף למשבי מערכת מיזוג האוויר.



זוויות בין אברי הגוף המומלצות לעבודה עמדת מחשב

העדויות הראשונות להתאמה של כלים שימושיים למבנה הגוף הן חניתות וקרדומים מאבן ומעץ מהתקופות הפרה-היסטוריות, אשר אזור האחיזה שלהם מגולף על פי מבנה כף היד. מאז עידן החנית והקרדום עשה האדם דרך ארוכה. כיום עושה כל אדם שימוש במיגוון כלים ומוצרים שאינם מיועדים דווקא לצורך הישרדות. שינוי זה התרחש הודות להתפתחות הטכנולוגית ולצרכיה, והוא מאפשר לבני האדם להשתמש בכלים שנוצרו על ידי אנשים אחרים עבור כלל האוכלוסייה.

## גישות בסיסיות

העיקרון המנחה את העוסקים בהנדסת אנוש הוא יצירת מוצרים, כלים או תשתיות (טכנולוגיה), שהשימוש בהם הוא בטוח, יעיל, עם כמה שפחות טעויות בהפעלה, נוח ככל האפשר, מקטין את חשיפת המשתמש בו לכאב ומונע חשיפה לסיכונים מיותרים. "הנדסת אנוש" מדגישה את חשיבות המימשק בין המשתמש לבין הכלי אותו הוא מפעיל לצרכיו.

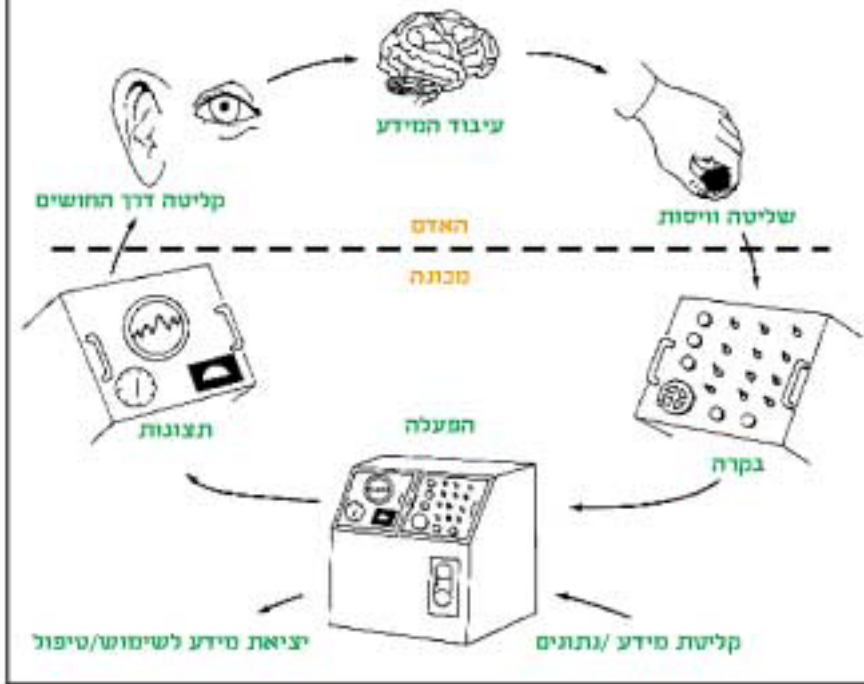
הגישה הבסיסית אומרת שכדי לבצע משימה בצורה הטובה ביותר צריך להתייחס ל-4 גורמים:

- האדם;
- המשימה אותה הוא צריך לבצע;
- תחנת העבודה בה הוא עובד;
- סביבת העבודה.

הבנת יכולותיו ומיגבלותיו של הגוף האנושי והכרה מעמיקה שלהן, מאפשרת לתכנן את עמדת העבודה ואת סביבת העבודה כך שהמטלה המיועדת להגשמה תתבצע בצורה הטובה ביותר. לדוגמה: כדי שמזכירה או פקידה, העובדות במשרד, תוכלנה להקליד דו"חות ללא טעויות, במהירות וללא שגיאות ובו בזמן גם לשרת

הכותב מרכז את נושא הארגונומיה במפעל ייצור

## סביבת העבודה



איור 1. מימשק טיפוסו בין אדם למכונה. החצים המקשרים בין הצגים לאברי הקליטה - העין והאוזן - מסמנים את מסלול קליטת הגירויים המגיעים מהמכונה לאדם ואת השימוש בהם

הכוח הגרעיני באי "3 המיילים" (פנסילוניה, ארה"ב). כל שטח התחנה זהם בפסולת רדיו-אקטיבית בעקבות סידרת טעויות של טכנאי הבקרה. הטעויות נבעו מתכנון לקוי של מערכות הבקרה. למרות שבתאונה הזאת לא היו הרוגים - פוטנציאל האסון היה עצום. אסון נוסף, שאירע 6 שנים מאוחר יותר, התרחש בכור הגרעיני בצ'רנוביל (בריה"מ), וגרם למותם של כ-500 אנשים, למחלות אצל אלפי בני אדם ולזיהום של עשרות מיליוני דונמים של קרקע חקלאית. גם כאן התברר שהתכנון - אשר לא כלל התייחסות להיבטי הנדסת אנוש - היה גורם מכריע בכישלון שהוביל לטרגדיה.

### פנים נוספות להנדסת אנוש

עליה במעורבות של היבטי הנדסת אנוש קיימת גם בהתדיינות המשפטית. בני המשפט הכירו בתרומתו של מומחה להנדסת האנוש להבנת התנהגותם של אנשים ועובדים, לציפיות מהם, להשפעותיו של תכנון לקוי על המוצר, על הסביבה או על עמדת העבודה, ולהערכת יעילותן של אזהרות (warnings) והוראות (instructions). בנוסף, קיימת כיום התפתחות בנושא התייחסות לאוכלוסיות של מוגבלים בתיפקוד עקב נכות וקשישים. תוחלת החיים הגדלה מגדילה את הצורך בהקמת סביבת חיים בטוחה ונוחה לאוכלוסייה בעלת המיגבלות.

### עקרונות מנחים

הנדסת אנוש היא מדע רב-תחומי. כדי להבין את המימשק בין האדם עם סביבתו ואת הדרכים לשפר אותו, יש צורך

התעשייה הכירה בחשיבותם של תחומי הארגונומיה ותרומתם לתכנון - הן של סביבת העבודה והן של עיצוב המוצרים. כיום אי אפשר למכור מוצר שלא תוכנן על פי כללים ארגונומיים.

התמורות בעולם המחשבים מספקות אתגרים חדשים לאנשי הנדסת האנוש. המחשב הוא מוצר צריכה ביתי עם אמצעי הפעלה מגוונים (input devices). הצורך בהצגת המידע בדרכים "ידידותיות" (כמו "חלונות" ומולטימדיה), מציבה בפני המהנדסים אתגר מיוחד: הפיכת המחשב לכלי קל להפעלה ונוח לטיפול, אשר יוכל להיות בשימוש של כל האוכלוסייה. אחת הדוגמאות הבולטות היא המעבר מהפעלה באמצעות פקודות מילוליות (dos), שהיתה נהירה למשתמשים מקצועיים בלבד, להפעלה באמצעות הצבעה על צלמיות (icons). שהיא קלה ומובנת לכלל האוכלוסייה. אחד הכיוונים שעליהם מתרכזים מאמצי הפיתוח הוא זיהוי קולי - המשתמש ה"הדיוט" יוכל להפעיל את המחשב באמצעות דו-שיח קולי, לדוגמה: לא יהיה צורך להקליד מסמך לתוך מעבד התמלילים. המחשב יעלה את המסמך מקריאה, על ידי זיהוי צלילים המלים להדפסה.

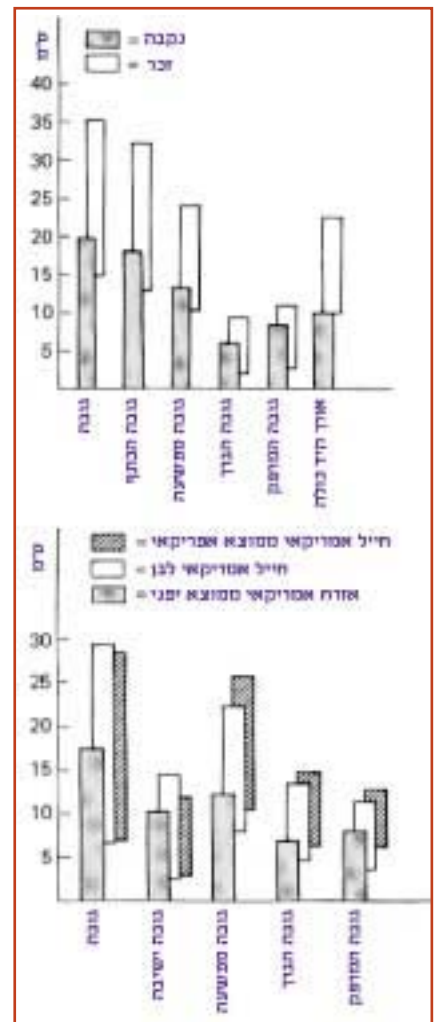
הנדסת האנוש זכתה לדחיפה נוספת דווקא מכיוון הבטיחות, בעקבות סידרת תאונות שספגה התעשייה בשנות ה-80. בחלק מהתאונות הקטלניות לא היה תכנון שהביא בחשבון את הגורם האנושי או שתכנון המיתקנים מההיבט הזה היה לקוי. כלומר: שימוש נכון בהיבטי הנדסת אנוש היה יכול למנוע את התרחשות התאונות. תאונה כזאת התרחשה ב-1980, בתחנת

הנחשבת כיום כראשיתו של חקר הגורמים האנושיים, כללה בחינה של מיומנויות ותחושות אי-נוחות של עובדים, והתאמת הציוד ותחנות העבודה לעובדים. המימצאים שלהם בנוגע לצוותים רפואיים בחדרי ניתוח הניחו את התשתית לתהליכי העבודה הנהוגים כיום: המנתח מתרכז בפעולות הכרוכות בנייתו עצמו וכל הפעולות התומכות, כמו: ארגון חדר הניתוח, בחירת הכלים המתאימים, סידור הכלים במגשים והגשתם למנתח הוטלו על האחות, כך שתשומת לבו המלאה של הרופא נתונה לניתוח בלבד.

התפתחות משמעותית נרשמה במלחמת העולם ה-2. חיל-האוויר האמריקאי השקיע משאבים רבים באיתור האנשים הנכונים למשימות השונות ובפיתוח מערכי הדרכה והכשרה, כדי לצמצם ככל האפשר את מספר התאונות. עיקר הדגש היה על התאמת האדם למשימה ולטכנולוגיה שאיתה הוא אמור להתמודד. במהלך המלחמה התברר כי למרות הבחירה הקפדנית וההשקעה העצומה בהכשרת האנשים - לא פחת מספרן של תאונות המטוסים. הגורמים העיקריים לתאונות היו טעויות אנוש של הטייסים בהפעלת המטוסים. בשלב זה ערב הצבא פסיכולוגים, שהתמחו בנושאי יכולת התפיסה/התחושה (perception). החוקרים נדרשו למצוא את הגורמים לשגיאות ההפעלה התדירות של טייסי המפציצים. במהלך המלחמה איבדו האמריקאים מטוסי B12 רבים, בעיקר בשלבי הנחיתה. כאשר נבחנו תא הטייס ואמצעי הפעלה שבו מהיבטים ארגונומיים התברר שצורתה של הידית המיועדת להרמת מדפי הכנפיים (לצורך האטת מהירותו של המטוס לקראת הנחיתה) ומיקומה היו דומות לאלה של ידית המיצערת המיועדת להאצת המטוס. הדמיון בין אמצעי הפעלה גרם לחלק מהטייסים, שכל תשומת ליבם בנחיתה מוקדה בקרקע המתקרבת, להפעיל את ידית המיצערת במקום ידית המדפים. וכך, במקום להאט את מהירותו של המטוס לקראת הנחיתה הם גרמו להאצתו ולהתרסקות בעוצמה רבה על הקרקע.

הפסיכולוגים הללו הובילו לפריצת דרך חשיבתית בכל מה שקשור לבחינת המימשק בין האדם והמכונה, ולשינוי הגישה - מהכשרת האדם לציוד הקיים להתאמת הציוד והטכנולוגיות לאדם.

שיגור החללית הרוסית "ספוטניק" (sputnik), שהחל את המירוץ העולמי לחלל, האיץ מאוד את המחקר בנושאי הגורם האנושי והוא הפך למרכיב משמעותי בתוכניות החלל של המדינות השונות. במהלך שנות ה-70 וה-80, התרחבה פעילות הנדסת האנוש לכיוון השוק המסחרי, ובאה לביטוי בעיקר בתעשיות הרכב והמחשבים.



איור 2. ההפרשים (בס"מ) בין מידות הגוף של האוכלוסייה שנבדקה (באחוזונים 5-95)

במעורבות של בעלי מקצוע שונים, כגון: פסיכולוגים, מהנדסים, חוקרים בנושאי מדעי ההתנהגות, אנשי חינוך, מעצבים תעשייתיים, מהנדסי מחשב ועוד, ובשיתוף פעולה ביניהם.

גישה עקרונית בהנדסת האנוש הוא ראיית האדם והמכונה כמערכת ולא כפרטים נפרדים. מערכת מוגדרת. המערכת כוללת את האדם, המכונה והמימשק שביניהם. כדי שהמטרה תוכל להתבצע נדרש שילוב מירבי ביניהם. כלומר: הצלחתו של כל אחד ממרכיבי המערכת בנפרד לא תוביל לביצוע המשימה. ביצוע איכותי, המאופיין במינימום טעויות, מתאפשר רק תוך כדי שיתוף פעולה מלא.

המערכת יכולה להיות ידנית, כגון: נגר העובד עם פטיש, ספר עם מספריים או נהג הנוהג במכונית; תהליכית, כגון: טכנאי בקרה האחראי על תקינותו של תהליך כימי; או מכנית, כגון: טייס המטיס מטוס. קיימות גם מערכות אוטומטיות. מערכות אדם-מכונה אינן מאופיינות רק במגע יד אדם אלא כוללות גם שיקול ובקרה של האדם. הרובוטים הם דוגמה טובה למערכות אוטומטיות. בכל המערכות האוטומטיות נדרשת מעורבות אנושית, לצורך תכנון, התקנה ותחזוקה. הדגש על

הגורם האנושי במערכות האוטומטיות זהה לזה המושקע במערכות האחרות. את המערכות ניתן לאפיין גם מהיבטים נוספים, כמו: רמת המיומנות הנדרשת מהאדם; רמת האיכות הנדרשת בעבודה; האם המערכת כוללת גם את מימד הזמן ותגובת האדם תלויה בו, כגון: טייס שכל פעולותיו חייבות להיות מתוזמנות במדויק לעומת מפעיל מחשב, שלאמן אין משמעות מיוחדת לגבי פעולותיו.

רמת הביצוע הנדרשת משפיעה גם היא על המורכבות של מערכות, עקב הסיכון הנלווה לתהליך. עבודה "איכותית" של שף במטבח שונה מעבודה איכותית של מנתח לב, שאליה נכנס המרכיב של "מחיר הטעות". ככל שמחיר הטעות גבוה יותר - יוקדשו יותר משאבים לתכנון המערכת ולבקרה על היישום הנכון. לדוגמה: עיצוב המימשק של מאוורר חשוב פחות מעיצוב מימשק של אמצעי הפעלה במטוס קרב. "מחיר הטעות" בלחיצה על לחיץ שגוי של מאוורר היא אפסית בהשוואה לטעות של טייס שלחץ על כפתור שחרור הפצצות במקום על מתג מכשירי הקשר.

באיור 1 ניתן לראות מימשק טיפוסי בין אדם למכונה. שניהם נמצאים בתוך סביבת העבודה. האדם קולט את הגירויים המגיעים מהמכונה, מעבד את המידע ומקבל החלטה לפעולה. יישום ההחלטה נעשה על ידי שינוי אמצעי ההפעלה של המכונה. המכונה משנה את התהליך בהתאם להתערבות האדם. השינויים מוצגים על גבי לוח המחזונים, וחוזר חלילה.

### התאמת סביבת העבודה לעובד

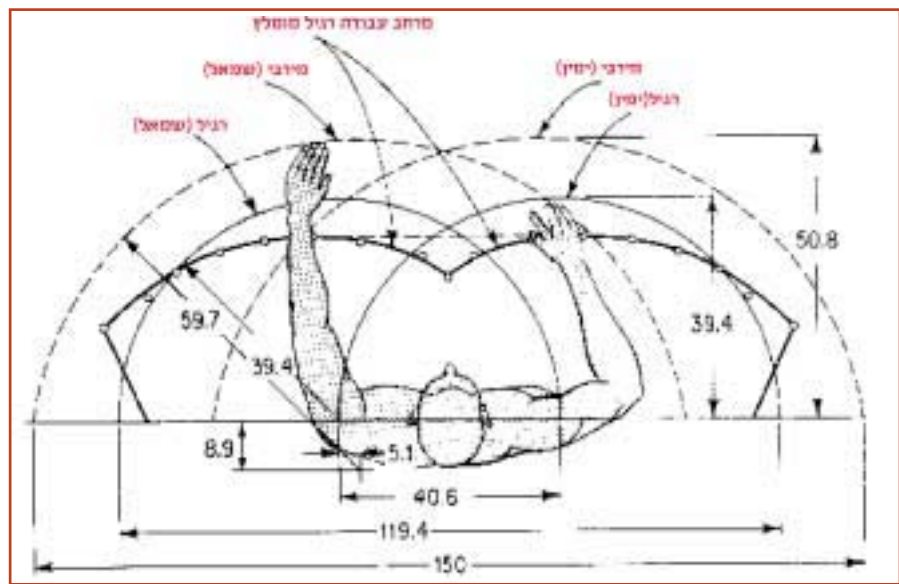
בשלב הראשוני של בניית מערכת אדם-מכונה בוחנים את סביבת העבודה כדי להתאים אותה לאדם. בתהליך הזה

משתמשים במידע "אנטרופומטרי" - הכולל את כל הנתונים הרלוונטים שעל גוף האדם: משקל, מידות (גובה, רוחב, אורך ועובי של אברים שונים), מרכזי כובד וכו'. בסיס הנתונים הוקם כבר בשנות ה-40, ע"י צבא ארה"ב. הנתונים קיימים בספרות והם מעודכנים מדי מספר שנים.

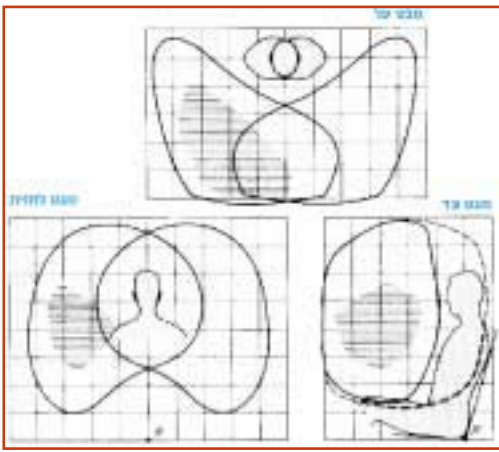
המידע לגבי מידות הגוף (נשים מול גברים, נשים בהריון, חיילים ממוצא שונה וכו') חיוני, לדוגמה, לתעשיית הטקסטיל והביגוד (איור 2). הנתונים הכלולים במידע האנטרופומטרי משפיעים על תכנון המכונות ומיקומן על ריצפת הייצור. כאשר ידוע שלעבודת תחזוקה מסוימת נדרשת הגנה של כפפות או ביגוד מבודד להגנה מקור - המכונה צריכה להיות מתוכננת כך שכל פעולות הפירוק וההרכבה בטיפול התחזוקה המסוים תוכלנה להתבצע בקלות, עם אמצעים שאותם ניתן להפעיל גם בעזרת כפפות. וסביב המכונה יהיה מרחב מספיק לטכנאי הלבוש בביגוד המסורבל כך שיוכל לעבוד ללא הפרעה. המידע האנטרופומטרי משמש גם בתכנון מרחב העבודה. מרחב העבודה מחולק ל-2 רמות:

### המרחב האישי:

מעטפת של כ-70 ס"מ סביב הגוף מאפשרת לאדם לבצע את הפעולות השכיחות והחיוניות ללא מאמץ ומבלי להתעייף. האדם מבצע במרחב הזה את הפעולות שעבורן נדרש דיוק רב, ושאותן קל יותר לבצע בקירבת מרכז הכובד של הגוף, בפחות מאמץ והתעייפות. לדוגמה: בתיקון השעונים נדרש דיוק לאורך זמן ממושך. השען מבצע את עבודתו קרוב מאוד לגופו.



מידות שטח העבודה ("מרחב העבודה") הרגיל והמירבי במישור האופקי (המידות בס"מ)



מעטפת הפעולה של העובד מורכבת מהמרחב התלת-מממדי שבינו גופו. האזורים הכהים יותר הם מרחבי הפעולה המועדפים. המרחק בין קווי הרשת מצוין מרחק של 15 ס"מ במציאות

עלולה לגרום לשחיקה של רקמות, גידים ושרירים ולעייפות גופנית ונפשית. הסיבה לרוב שגיאות ההפעלה בעבודה כזאת הן עייפות ושעמום. כדי למנוע את הסיכון, יש להקפיד על הפסקות בעבודה הכוללות מנוחה פיזית וגיוון של המטלות לאורך יום העבודה.

**• עבודה בתנוחה ניטרלית**

כדי לבצע עבודה בתנוחה נכונה, יש להקפיד על מספר כללים: העבודה תבצע קרוב ככל שניתן לגוף, כך שלא ייווצרו מאמצים מיותרים בתנועה. ניתן להגיע לתנוחה נכונה ע"י הקפדה על סימטריה בתנועות ובעומס העבודה על ידי חלוקה שווה בין שתי הידיים, ובעבודה בגובה מתחת למרפקים (מתחת לקו הלב).

**• עבודה בתנוחה סטטית**

עבודה הנעשית בתנוחת גוף קבועה, כמעט ללא תנועה, לאורך פרקי זמן ממושכים. עבודה כזאת מוגדרת כ"ביצוע עבודה המצריכה תנוחת גוף קבועה, ללא תמיכה, עבור מחזור עבודה ארוך יותר מ-20 שניות, וחשיפה גבוהה של העובד למימשק המכונה כחלק מביצוע עבודה חוזרת ונישנית, עבור מחזור עבודה שאורכו עולה על 5 דקות". עבודה כזאת יוצרת עומס על השרירים ועלולה לגרום בטווח הארוך לקיצור השרירים לשם מניעת הסיכון יש לוודא שהעובד מבצע ביום העבודה מיגוון פעילויות, הכוללות גם תנוחות סטטיות וגם תנועות דינמיות.

**• עבודה רצופה ללא מנוחה**

כל עבודה המתמשכת לאורך זמן רב, עלולה לגרום לשחיקה של רקמות, גידים ושרירים ולעייפות גופנית ונפשית. גם כאן, הסיבות לרוב שגיאות ההפעלה הן העייפות ושעמום. לשם מניעת הסיכון יש להקפיד על הפסקות בעבודה, הכוללות מנוחה גופנית ו/או גיוון של המטלות. ■

להוביל לפגיעה מצטברת, הבאה לביטוי בפגיעות ובליקויים באברים שונים וברקמות. ניתן לזהות את הליקויים במערכת העצבים, בגידים ובמיתרים, במערכת השריר-שלד של העובדים וכו'. דוגמאות לפגיעות ולליקויים כתוצאה מנזק מצטבר כוללות כאבי שרירים (myalgia), דלקות גידים (tendonitis), דלקת שריון הגיד (tenosynovitis) ודלקות של שורש כף היד (carpal tunnel syndrome). הסיכונים שאותם חייבים למנוע הם:

**• עבודה תוך השקעת כוח פיזי רב**

השקעת כוח פיזי לאורך זמן עלול לגרום למעיכה של רקמות וגם לפגיעה במערכת השריר-שלד, אשר יכולה להתבטא בפגיעות כמו פריצת דיסק או בקע (שבר, כילה). הרמת משאות היא אחת הצורות שבהן יש חשיפה לסיכון הזה. למניעת הסיכון קיימות הגבלות על המשקל המותר להרמה, ותירגול להרמה נכונה שבה מועמס המשקל על מרכז הכובד של הגוף, בעזרת שרירי הגפיים (הרמה תוך כפיפת הרגליים ולא כפיפה של הגב). להרמת מיטען כבד, רצוי כמובן להשתמש באמצעי הרמה מכניים כמו מנופים, מלגוזות וכו'.

**• פעולות בתדירות גבוהה**

עבודה הכוללת פעולות החוזרות על עצמן ("חזרתיות"), המתמשכת לאורך זמן

חלוקה נוספת במרחב האישי היא בגובה, מעל ומתחת לקו הלב. מומלץ לבצע את הפעולות התדירות והשכיחות מתחת לקו הלב, מכיוון שהרמת היד מעל לקו הלב מעייפת את שרירי הגוף.

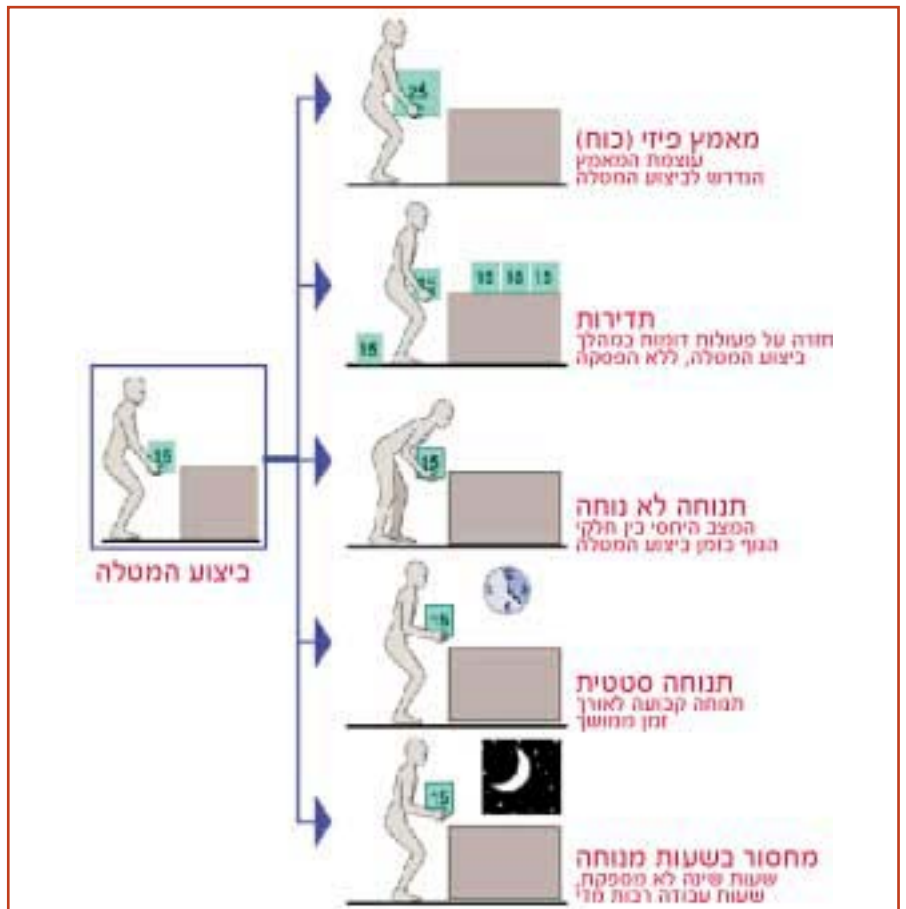
**המרחב המשני:**

מעטפת הכלולה בקוטר המרחק שבין כפות הידיים כשהזרועות פשוטות לצדדים. העבודה באזור המשני מתבצעת רחוק ממרכז הכובד של הגוף והיא מעייפת יותר. כך שבמרחב הזה מומלץ לרכז את הפעילויות הפחות תכופות. לדוגמה: אמצעי ההפעלה בתא הטייס בהליקופטר מחולקים בין המרחב האישי והמשני ומיקומם מתוכנן על פי מבנה גוף ממוצע של טייס.

בתכנון מרחב עבודה צריכים לבוא לידי ביטוי גם איפיוני התנועה של האדם. בתכנון אמצעי ההפעלה במרחב קיימות מייגבלות, המוגדרות ב-8 תת-מרחבים סביב גוף האדם. כשבכל תת-מרחב כזה אפשרית תנועה בעלת אופי שונה.

**הנדסת אנוש ובריאות**

כאשר מתייחסים להנדסת אנוש מהיבטי הבטיחות והבריאות, מדובר על ביצוע עבודה באופן שימזער את חשיפת העובד לסיכונים אפשריים. חשיפה מתמשכת לסיכונים עלולה



הגורמים לסיכונים ארגונומיים