

הפיזיולוגיה של המאמץ

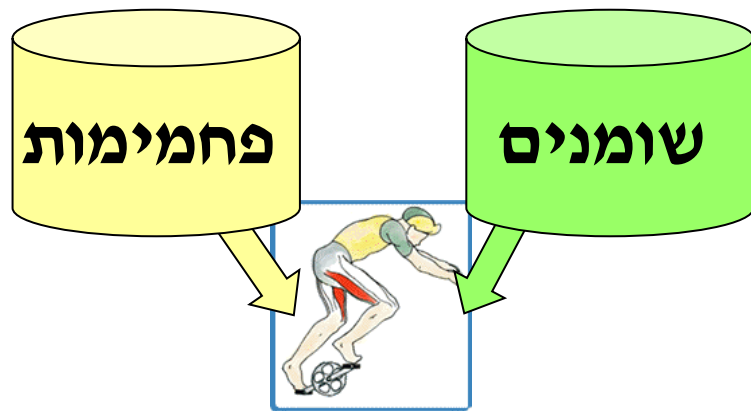
מהלכה למעשה



— שחר ניס —

פרק 3.1

מערכת הנשימה



מסלול אירובי

$V\dot{O}_2$
ליטר/דקה
הספק אנרגטי

$C\dot{O}_2$



הרכב האוויר (תערובת גזים) באטמוספירה

- 20.93% חמצן
- 79.04% חנקן
- 0.03% פחמן דו חמצני
- 0.97% גזים אחרים

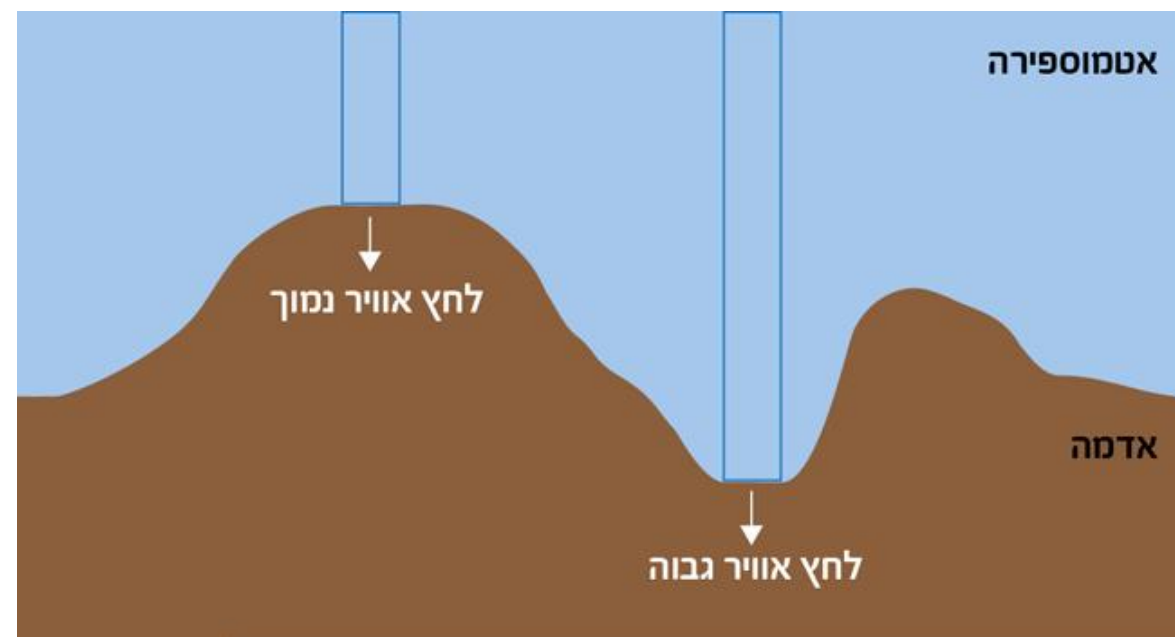
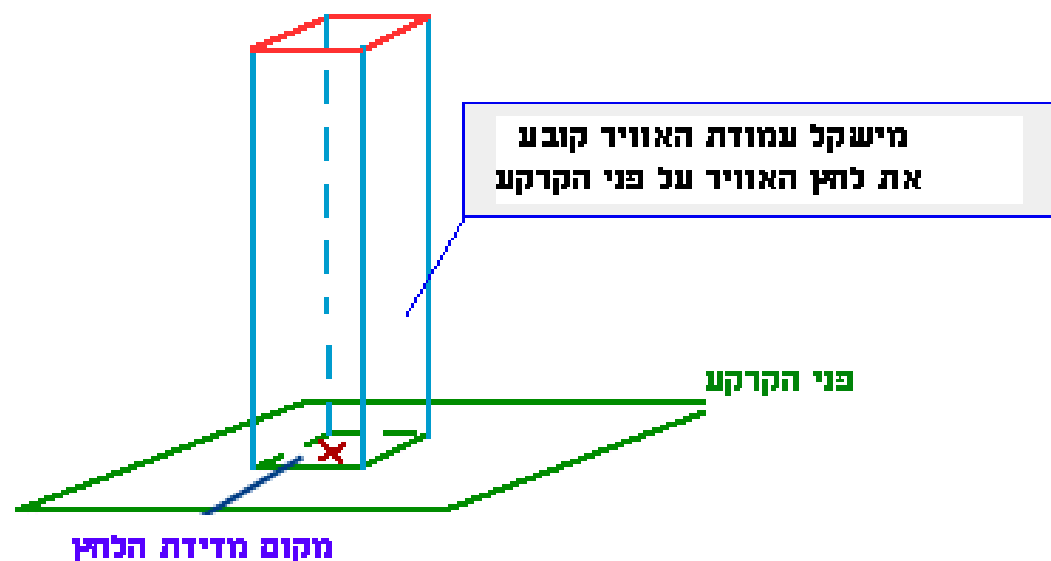
שכבות האטמוספירה

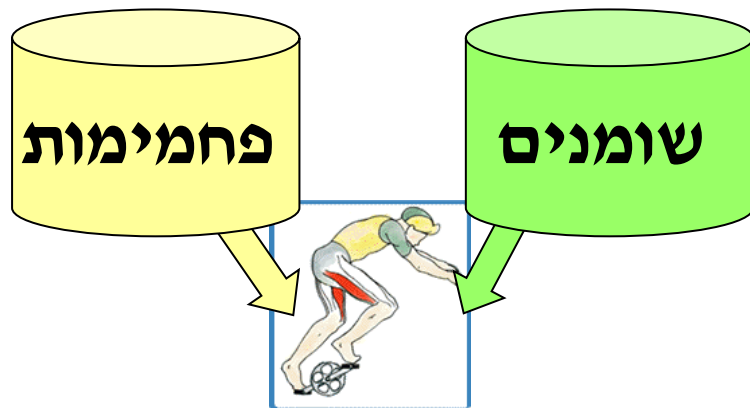
לחץ אטמוספירי - הלחץ שיוצר עמוד האוויר

הלחץ האטמוספירי בגובה פני הים - 760 מ"מ כספית

עם עלייה לגובה עמוד האוויר והלחץ שהוא יוצר קטנים

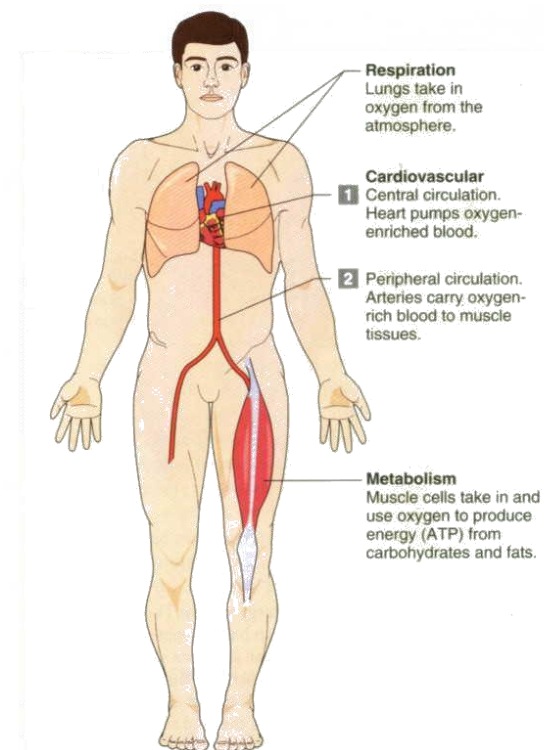
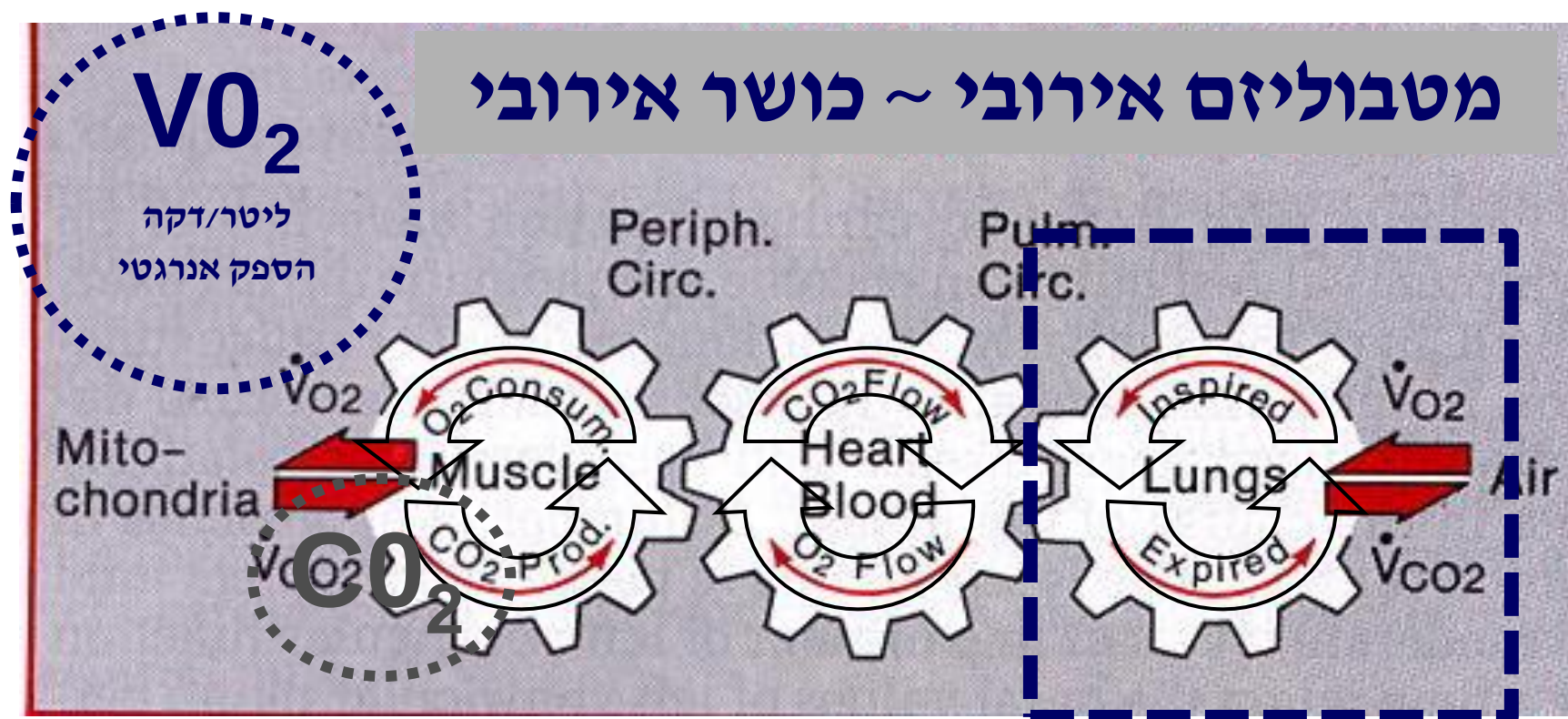
גבול עליון של האטמוספירה





שילוב המערכות לצורך אספקת אנרגיה במסלול האירובי

שרשרת פיזיולוגית

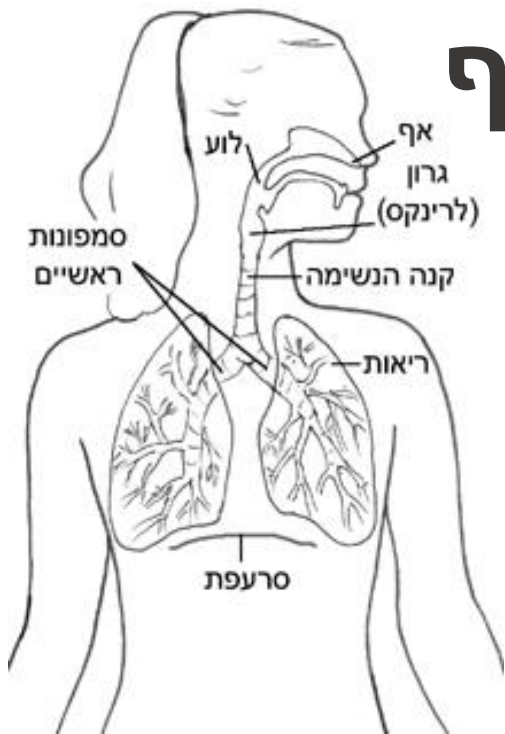


תפקידי מערכת הנשימה

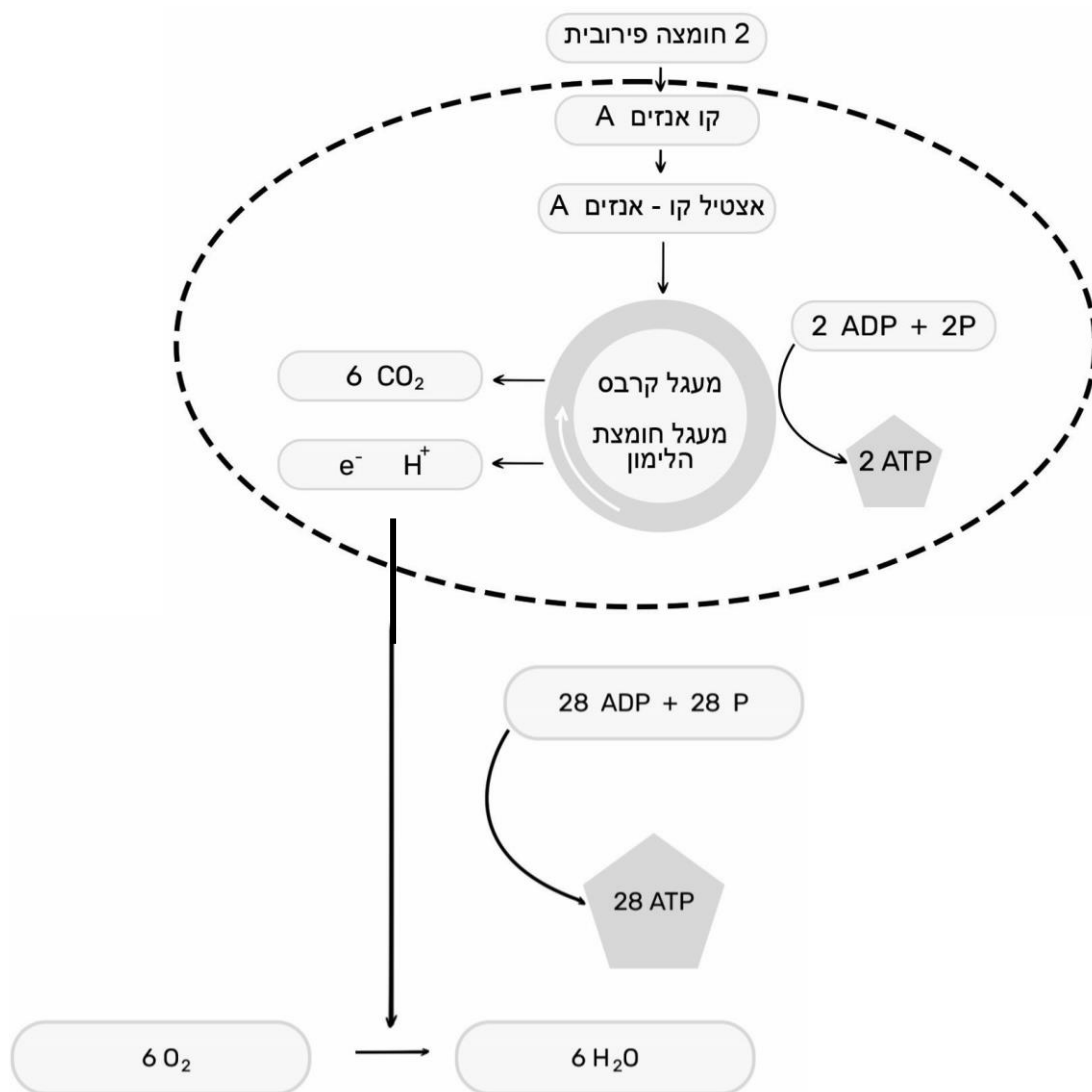
- שמירה על תכולת גזים (O_2 ו- CO_2) תקינה בדם

- שמירה על מאזן חומצה-בסיס בנוזלי הגוף

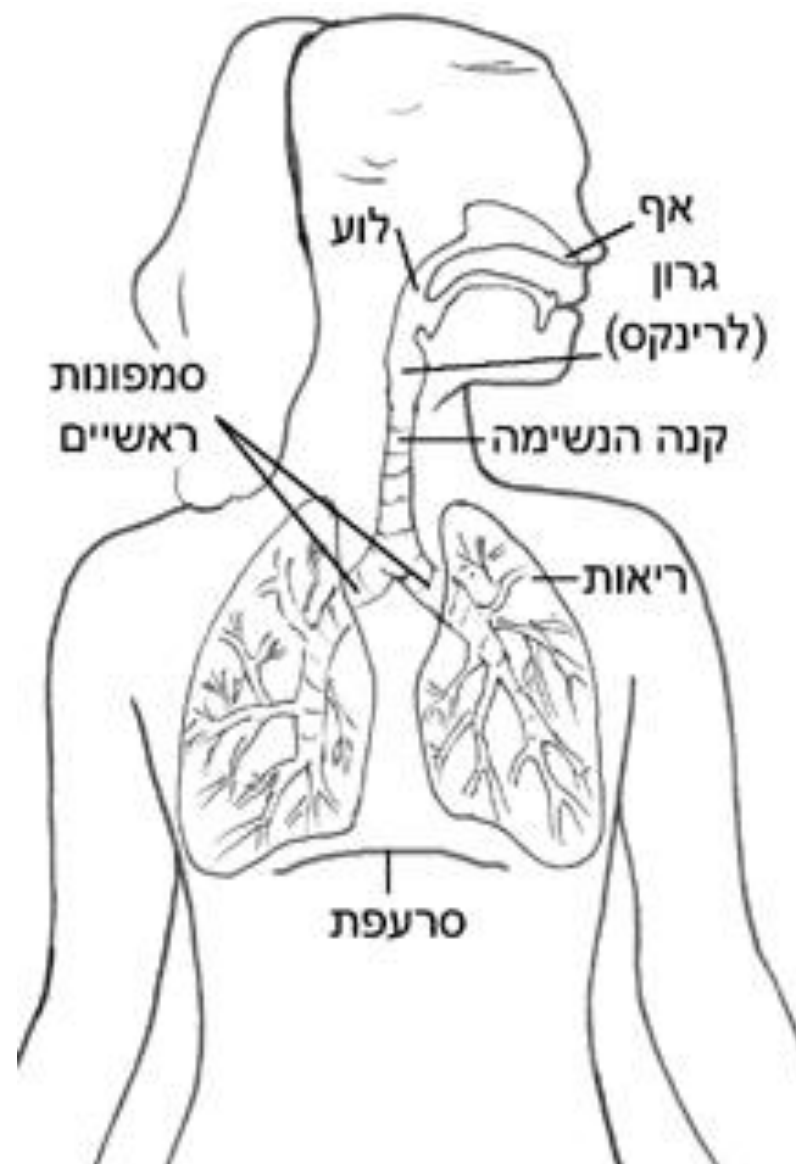
- מעורבת בויסות חום הגוף

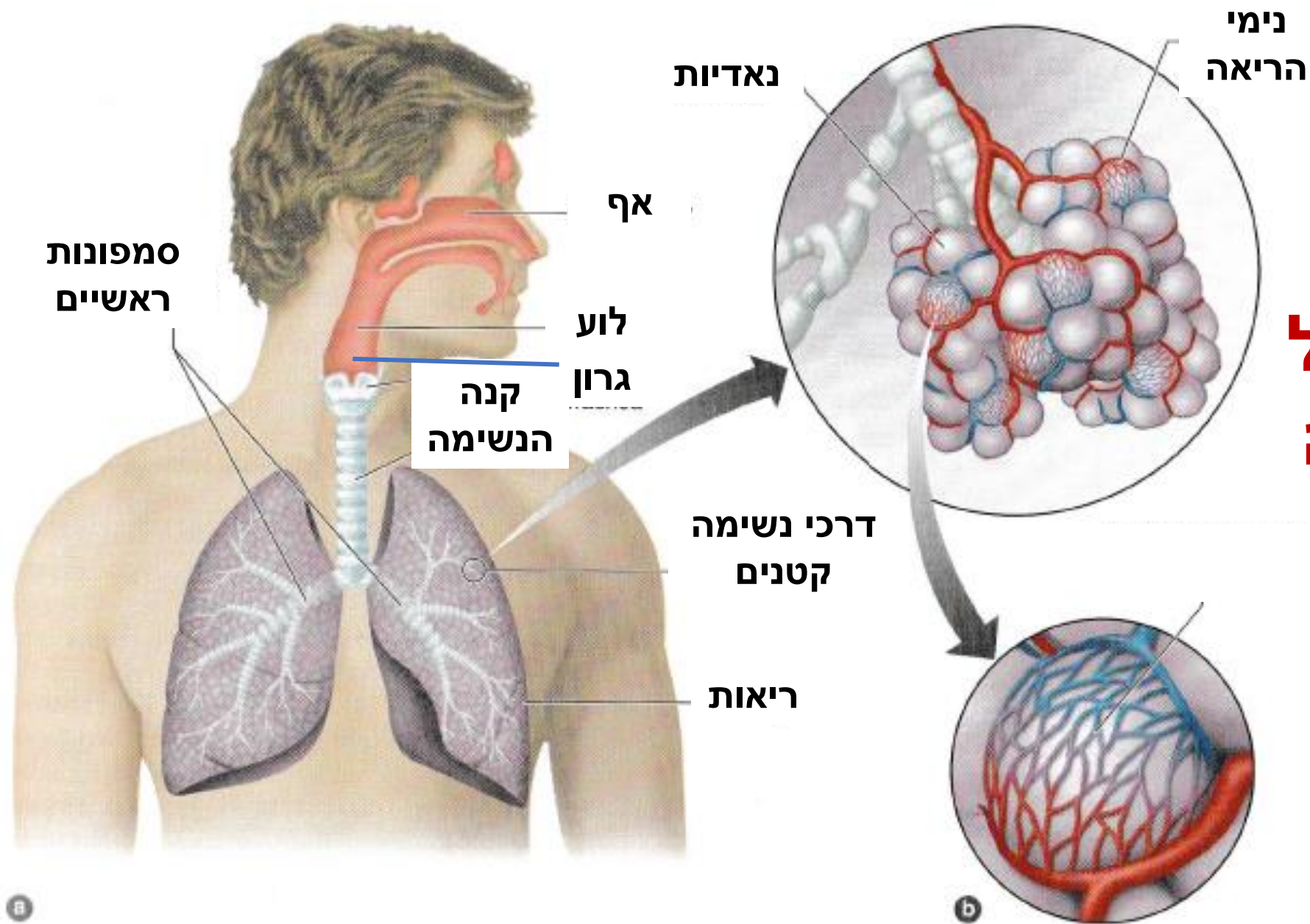


נשימה תאית



נשימה חיצונית

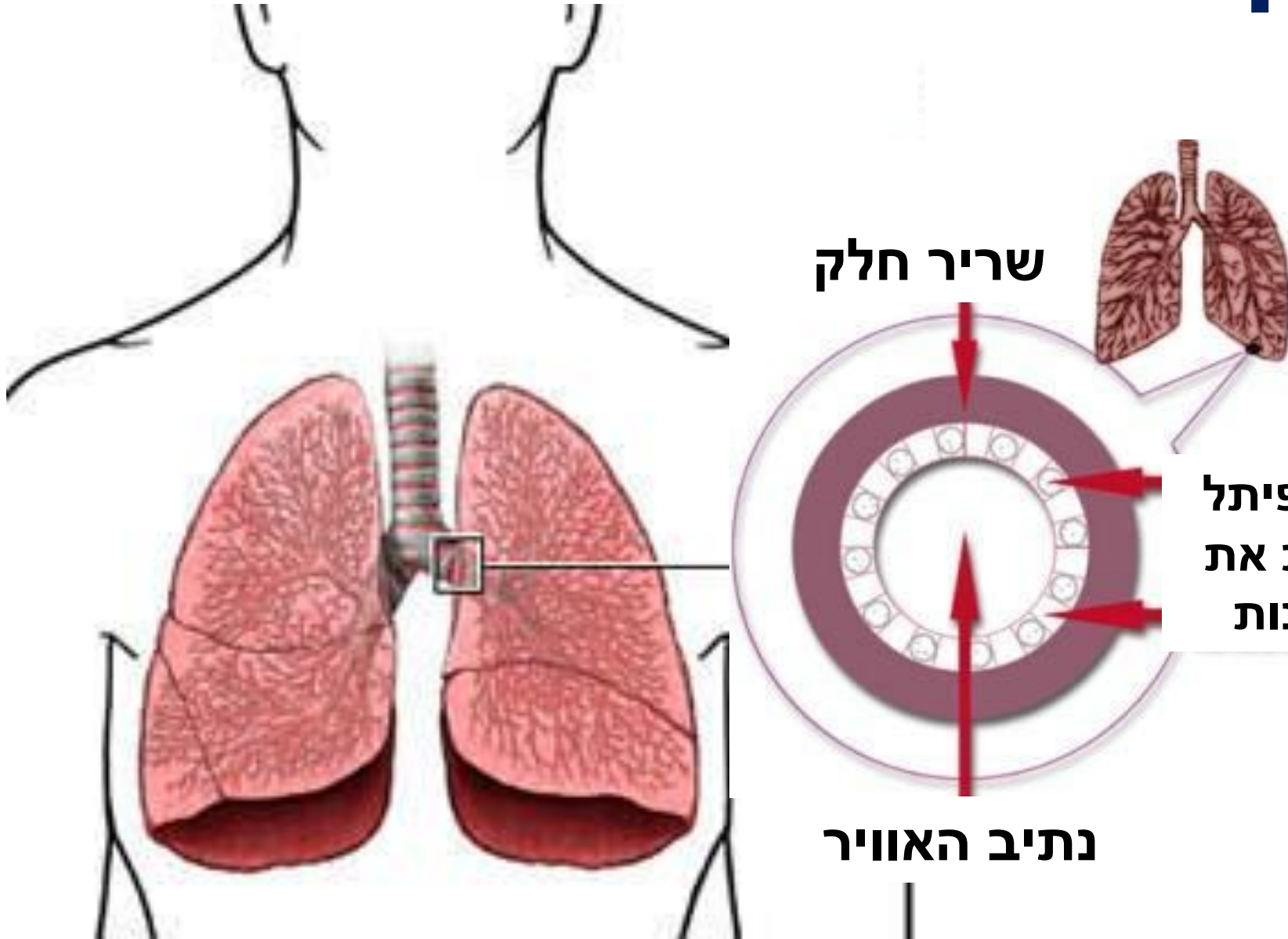




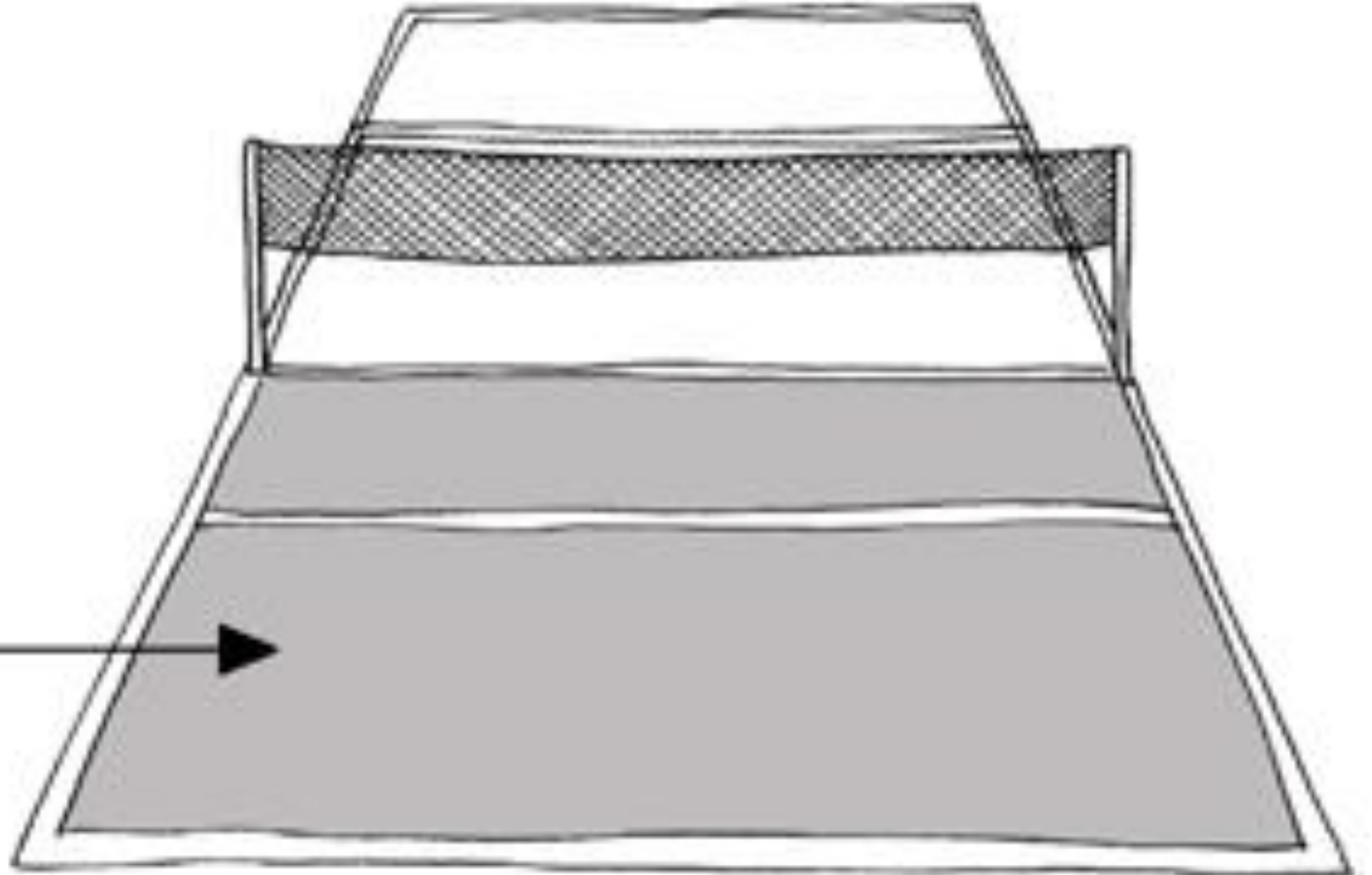
מבנה אנטומי של מערכת הנשימה

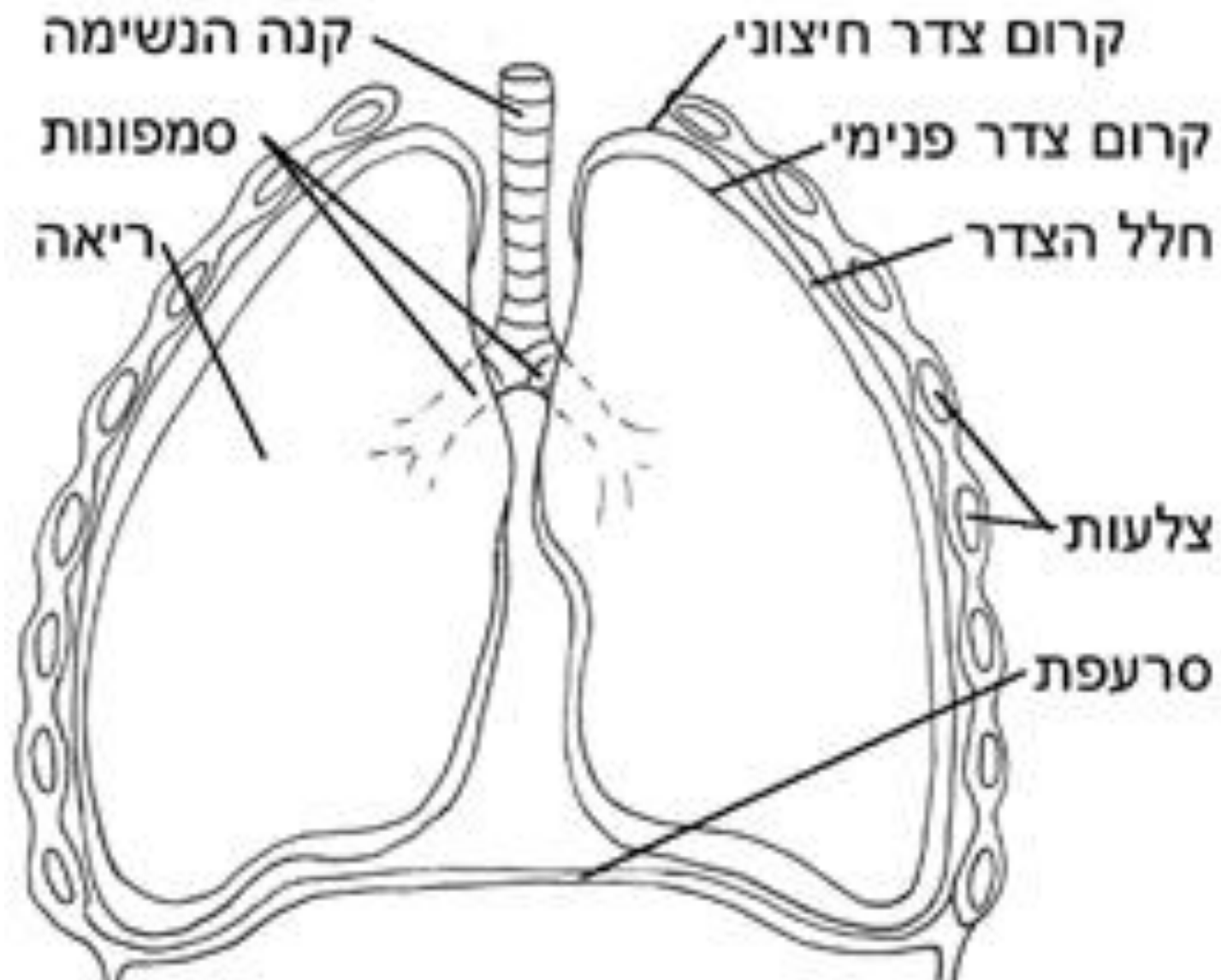
דרכי הנשימה

- להוביל את האוויר
- לנקות
- לחמם
- ללחלח

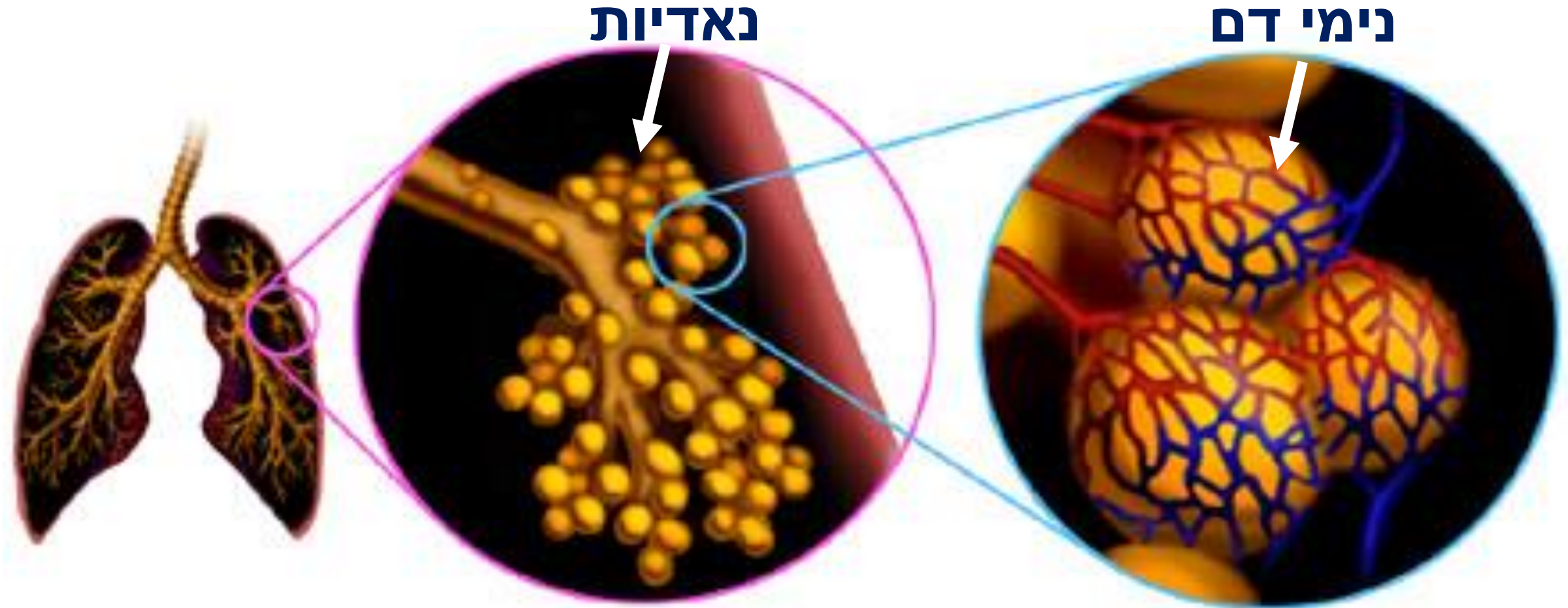


שטח הפנים של הריאות המאפשר את חילוף הגזים



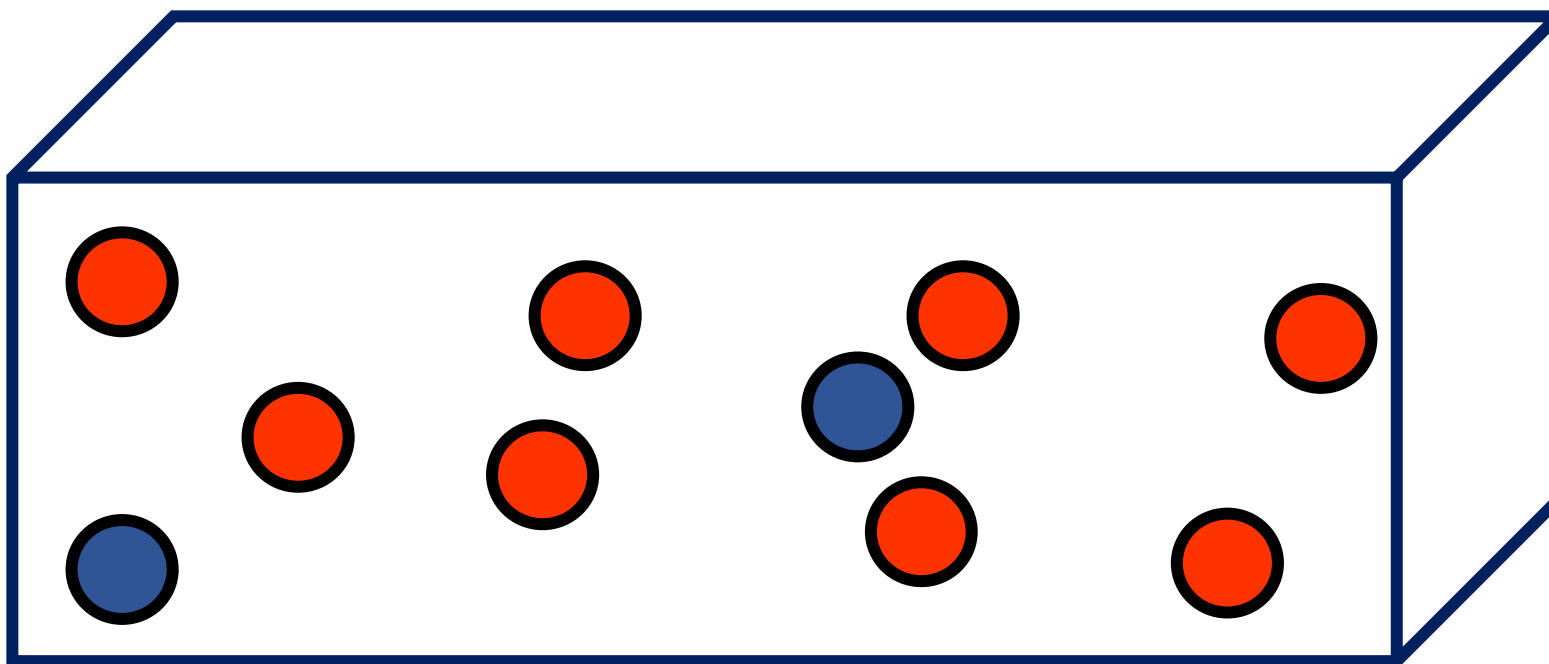


בית החזה, הריאות וקרומי הצדר

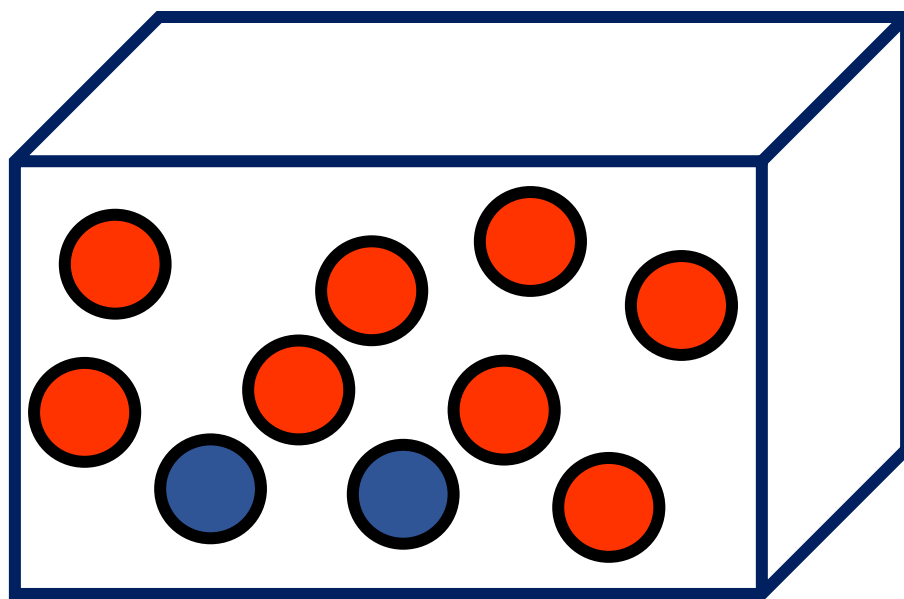


בריאות יותר מ- 300 מיליון נאדיות

**גז יוצר לחץ עקב ההתנגשויות של חלקיקיו זה בזה
ובדפנות החלל שבו הוא נמצא**

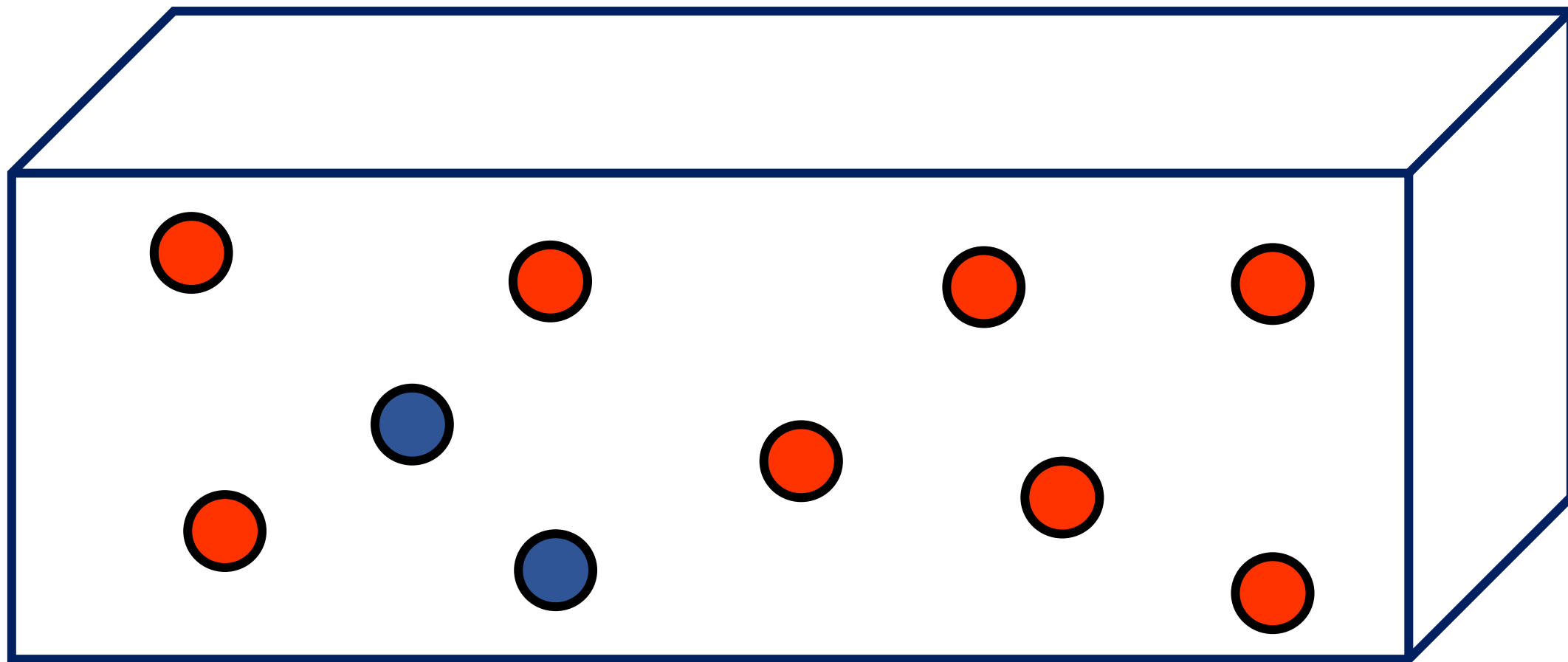


**הקטנת נפח החלל, שבו נמצא גז בכמות נתונה,
תגרום לעלייה בלחץ**



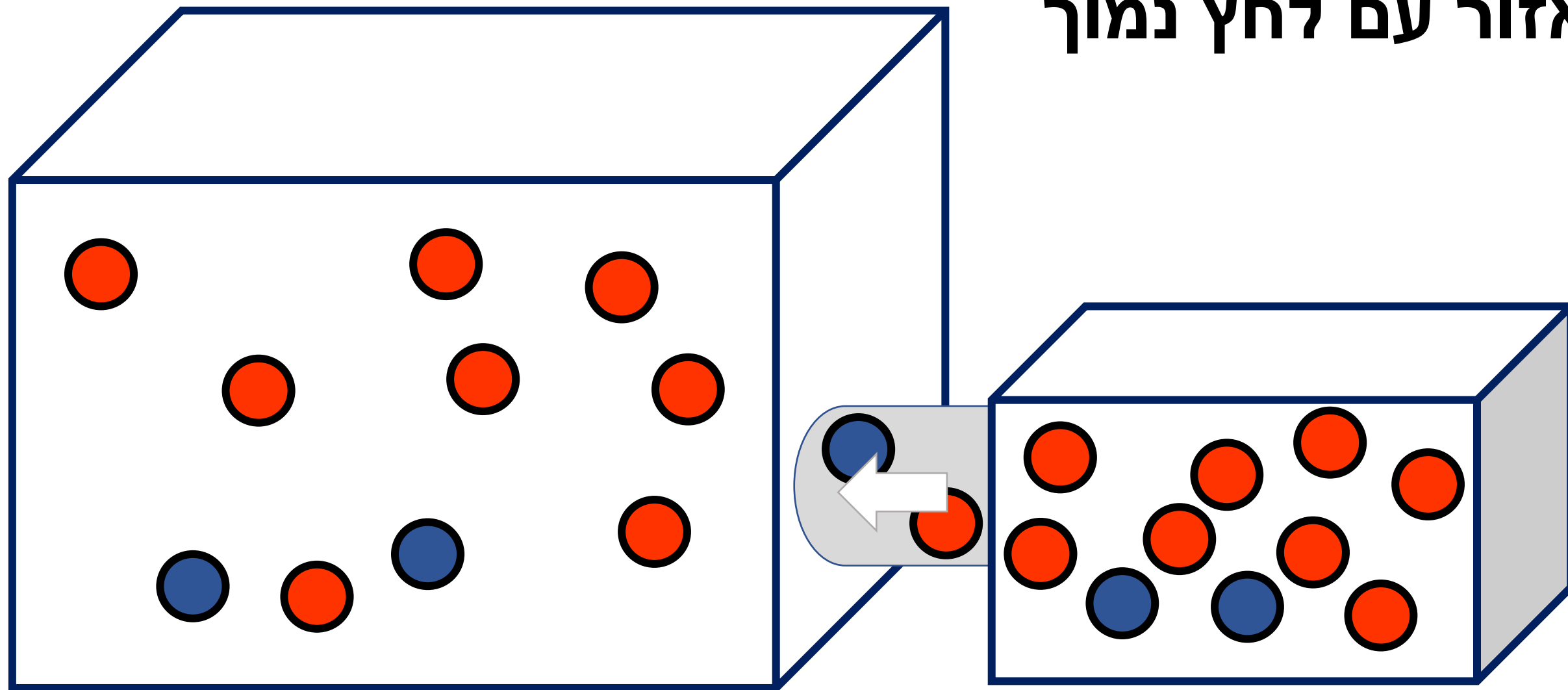
הגדלת נפח החלל, שבו נמצא גז בכמות נתונה,

תגרום לירידה בלחץ

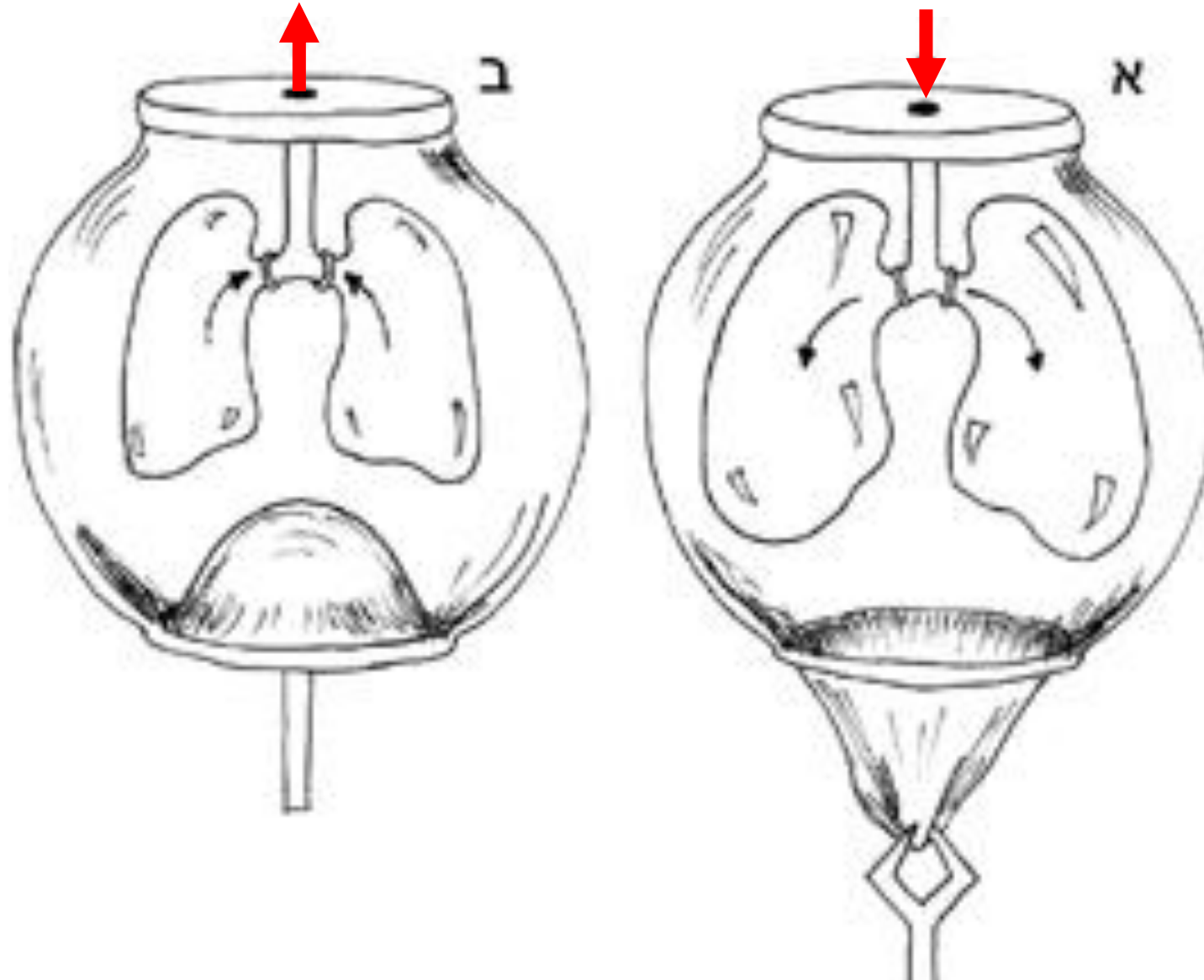


אוויר ינוע בהתאם למפל לחצים: מאזור עם לחץ גבוה

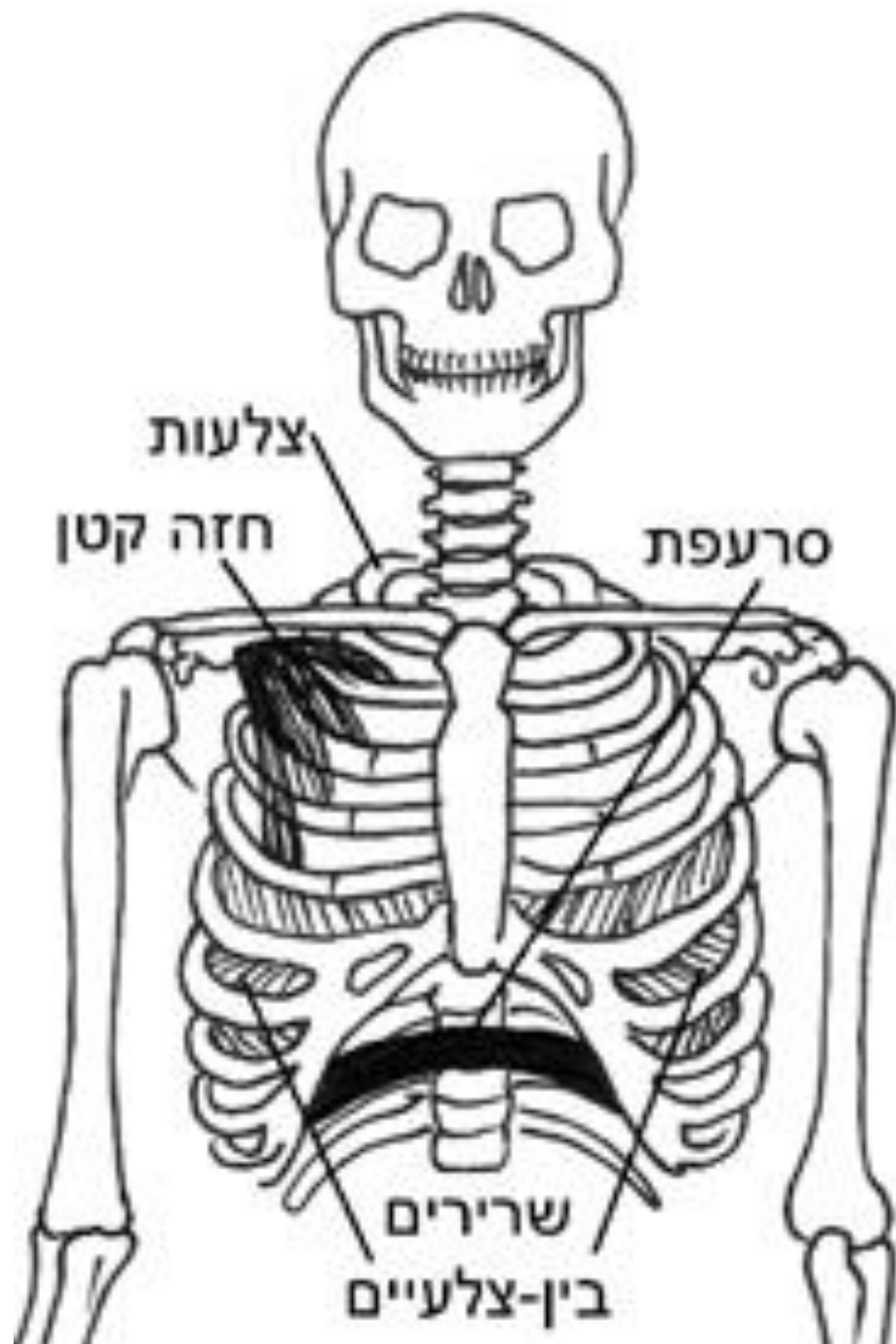
לאזור עם לחץ נמוך



דגם להמחשת פעולת הנשימה

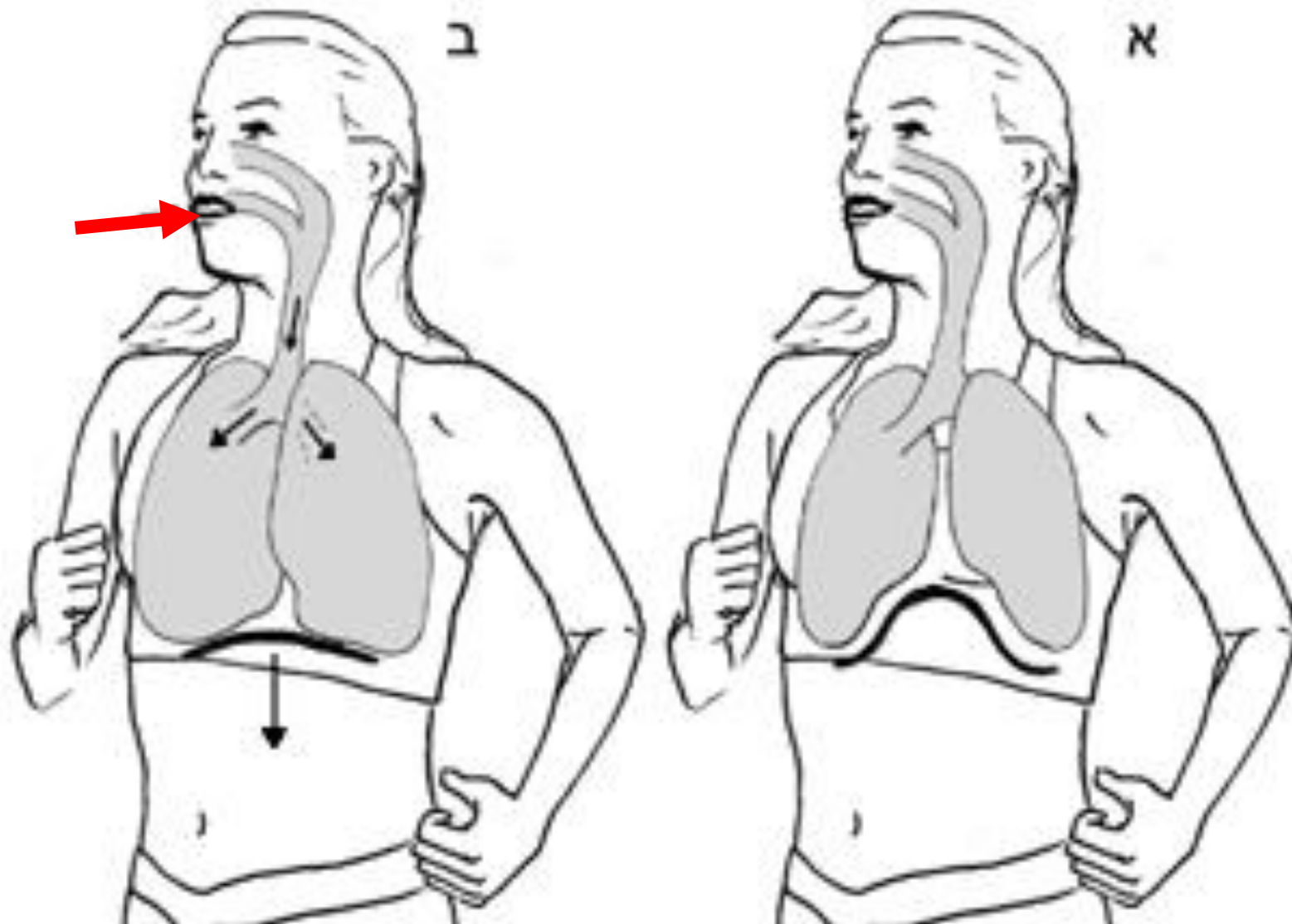


אוויר זורם ממקום בו הלחץ גבוה למקום בו הלחץ נמוך

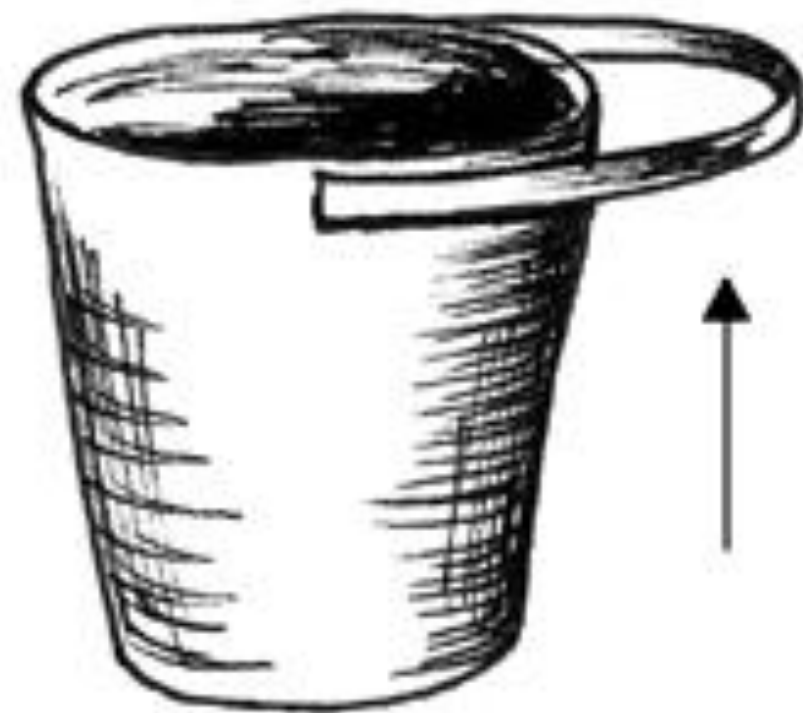
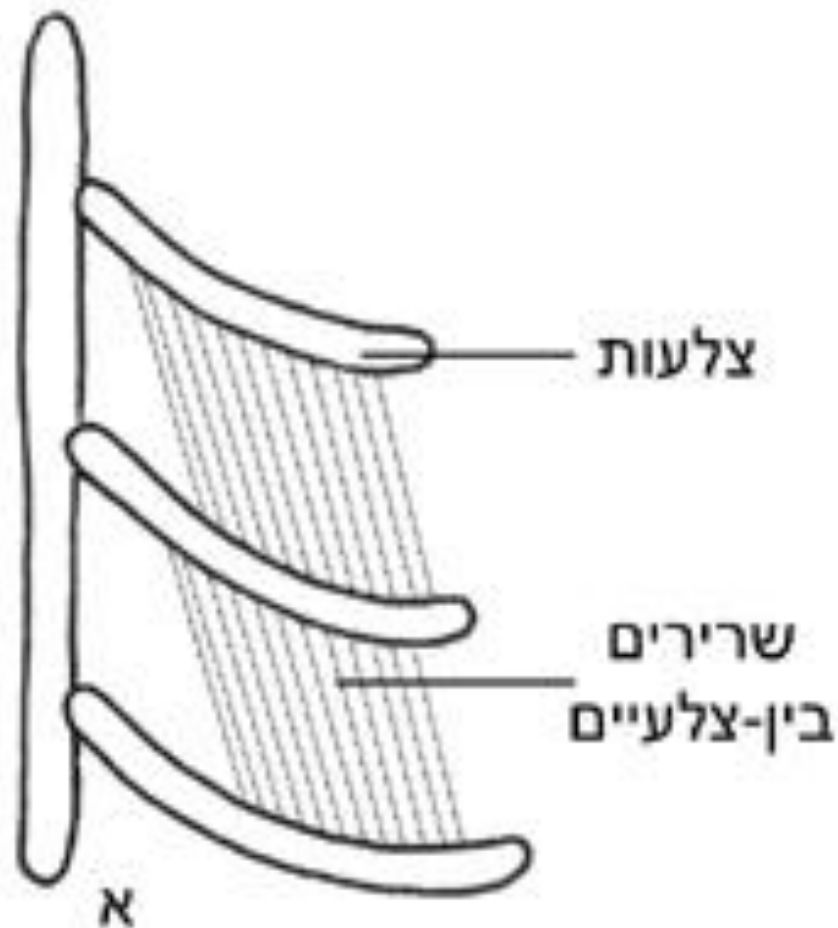
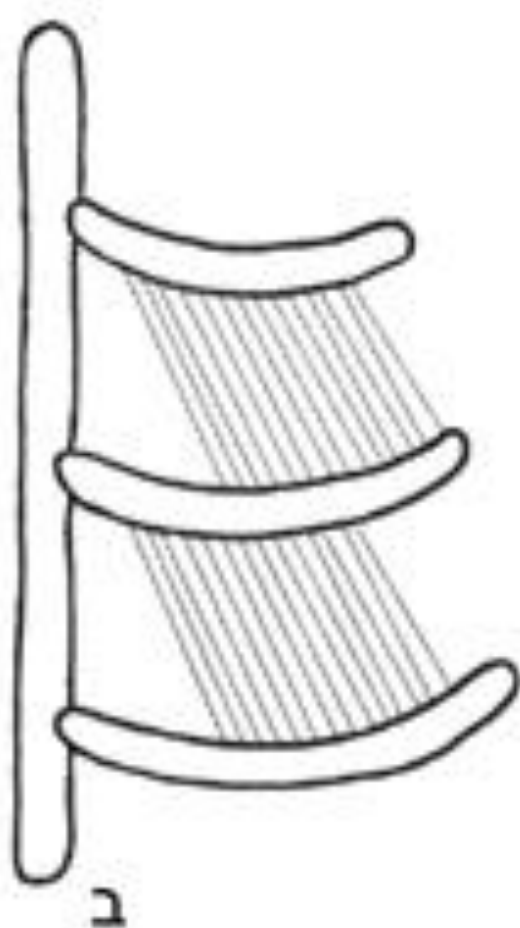


שרירי הנשימה

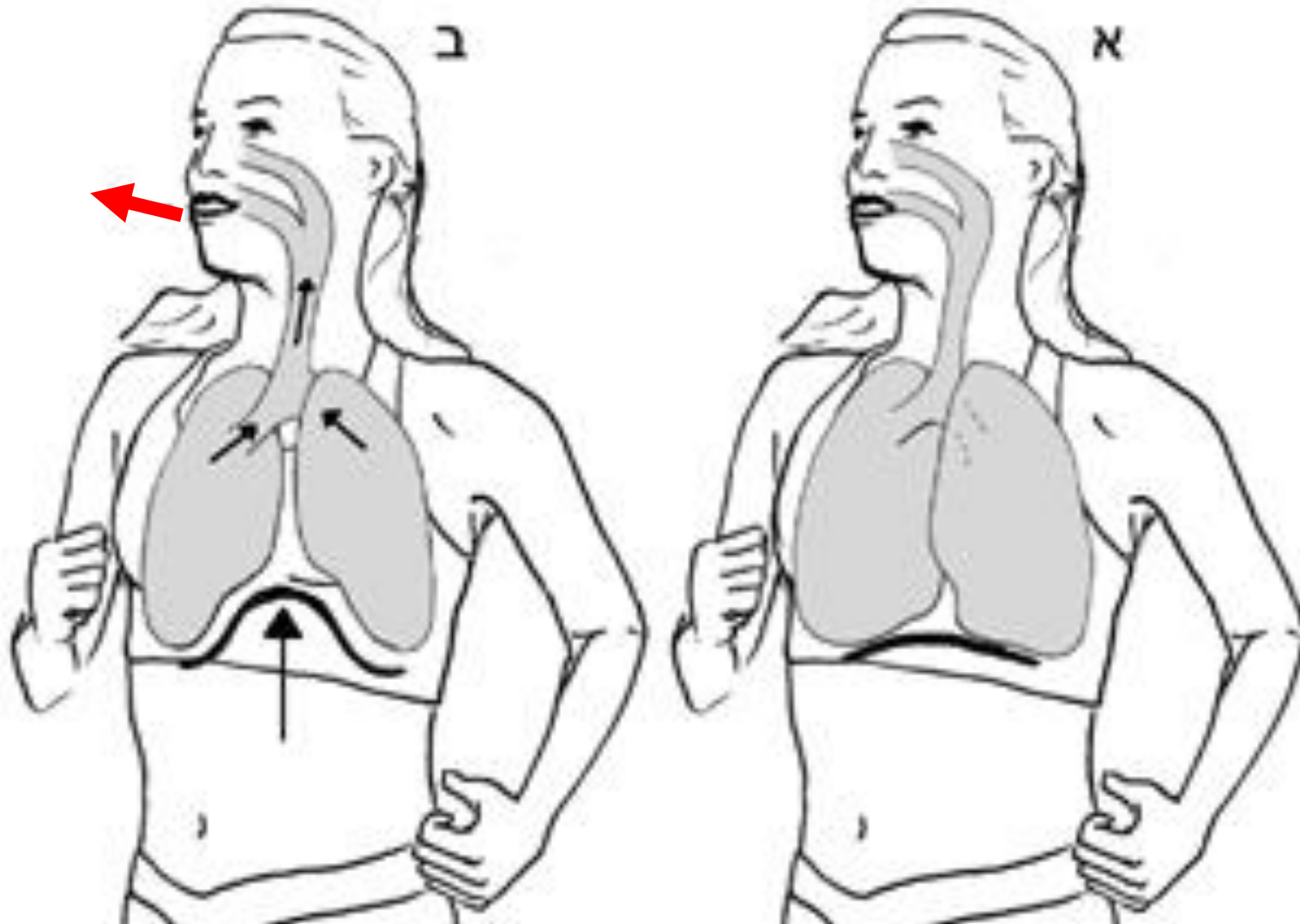
פעולת הסרעפת בשאיפה



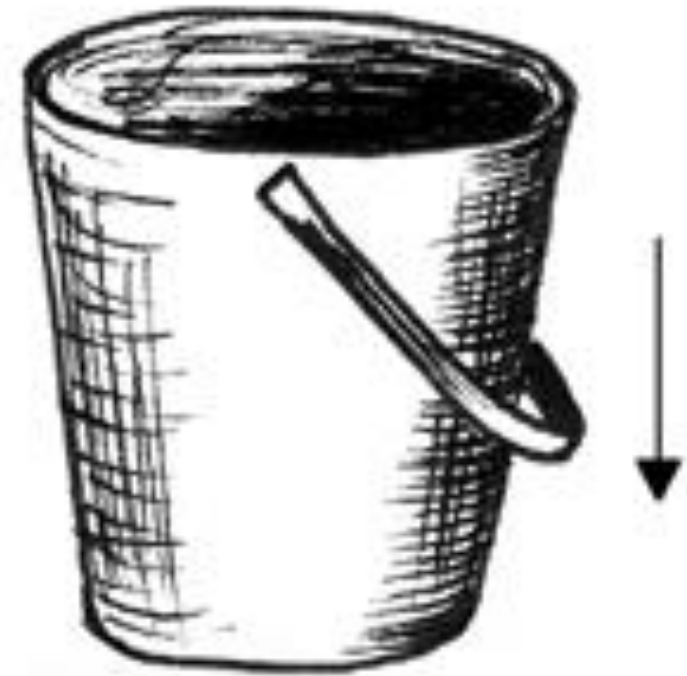
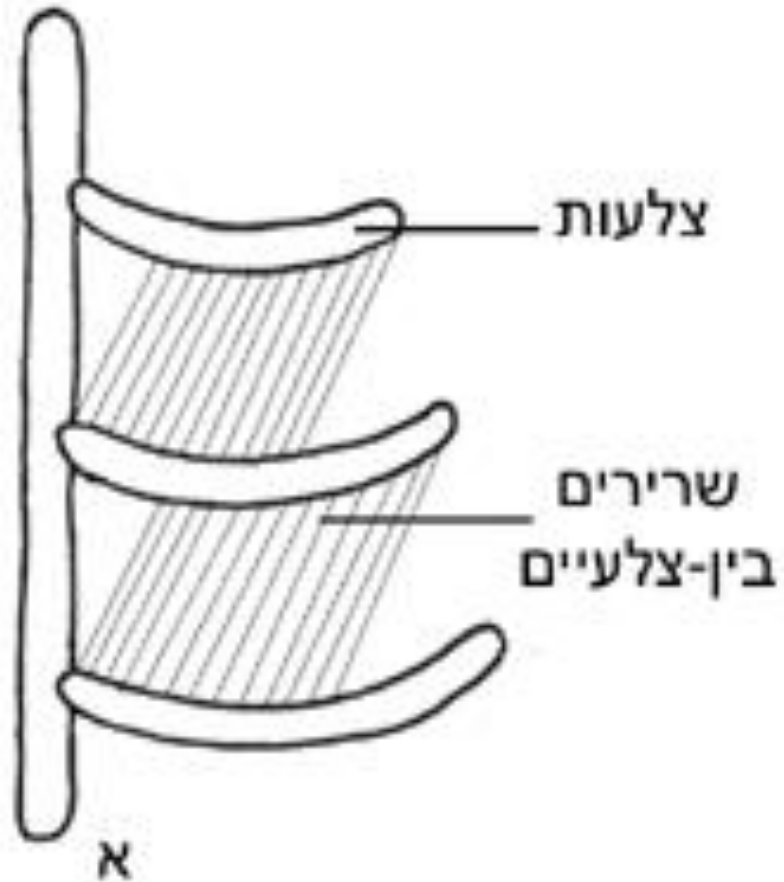
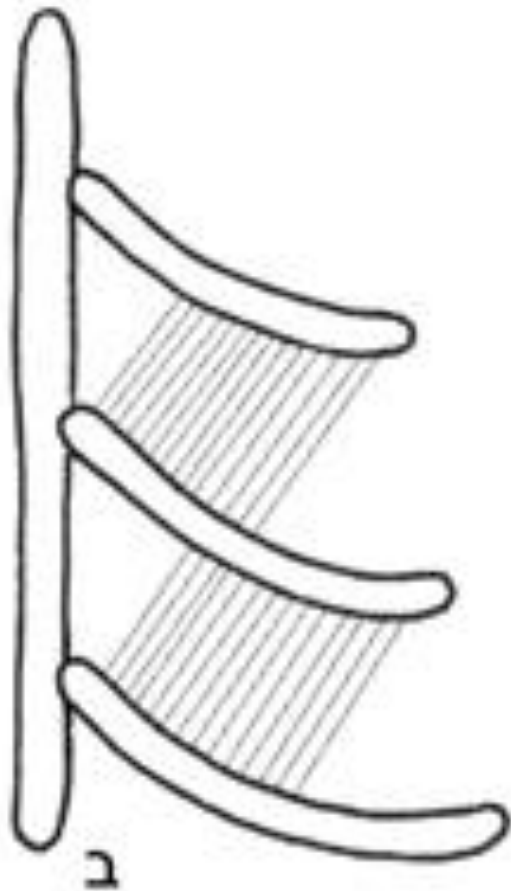
הגדלת נפח בית החזה באמצעות השרירים הבין-צלעיים החיצוניים



הרפיית הסרעפת והגדלת הלחץ בבית החזה בעת הנשיפה

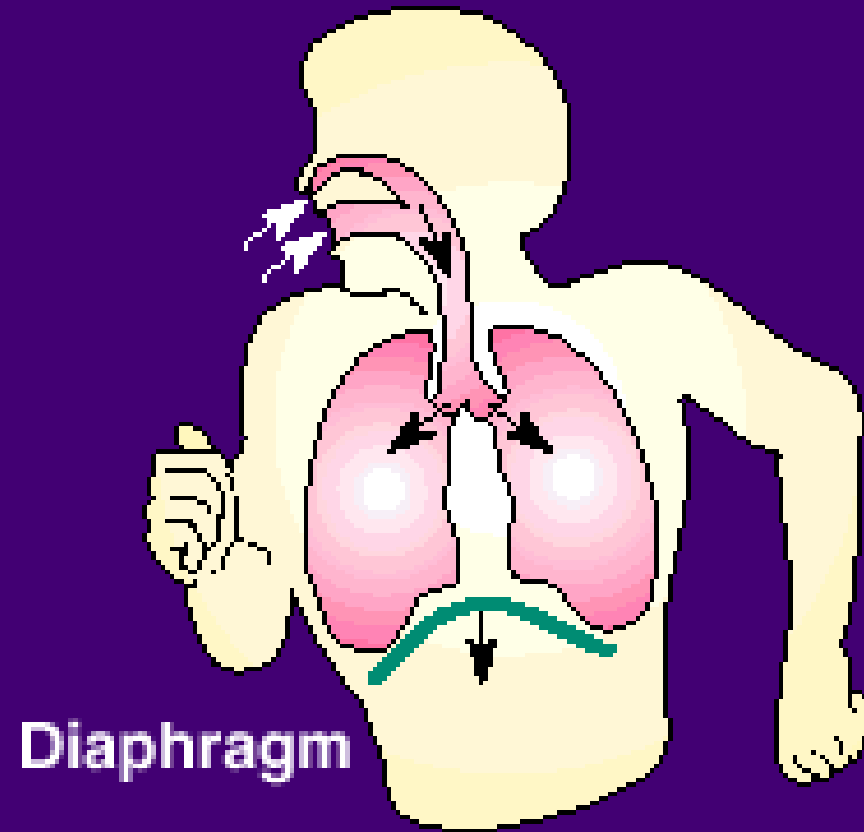
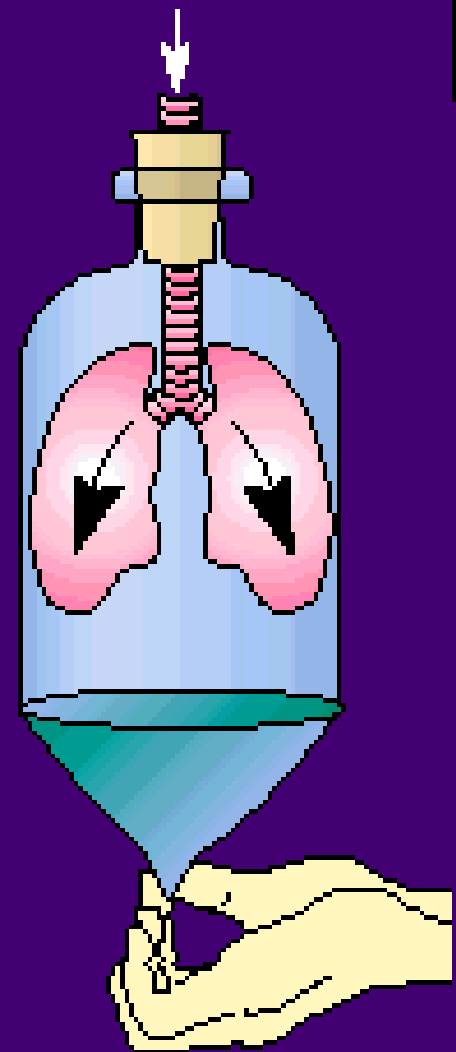


פעולת השרירים הבין-צלעיים בזמן נשיפה מאומצת



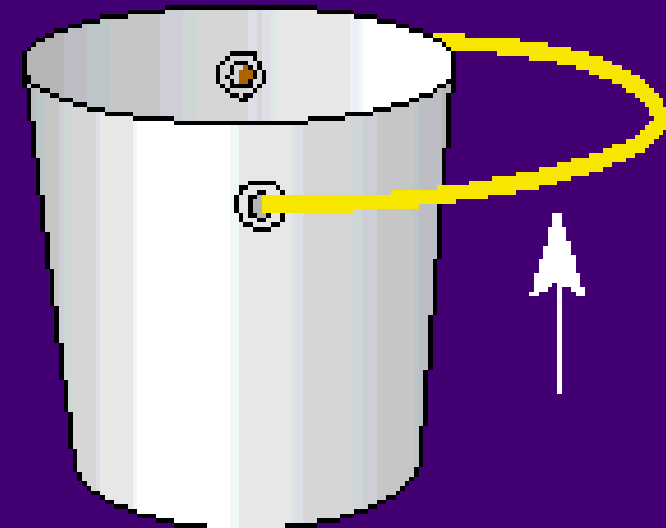
מערכת הנשימה במצב שאיפה

Diaphragm Action



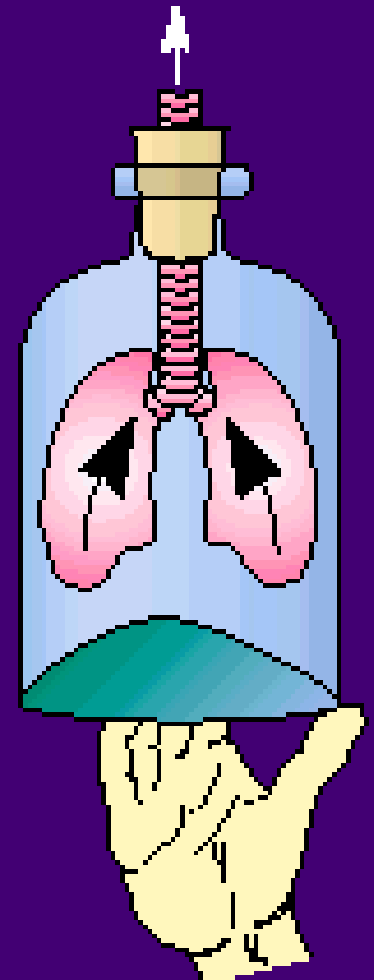
Diaphragm

Rib Action

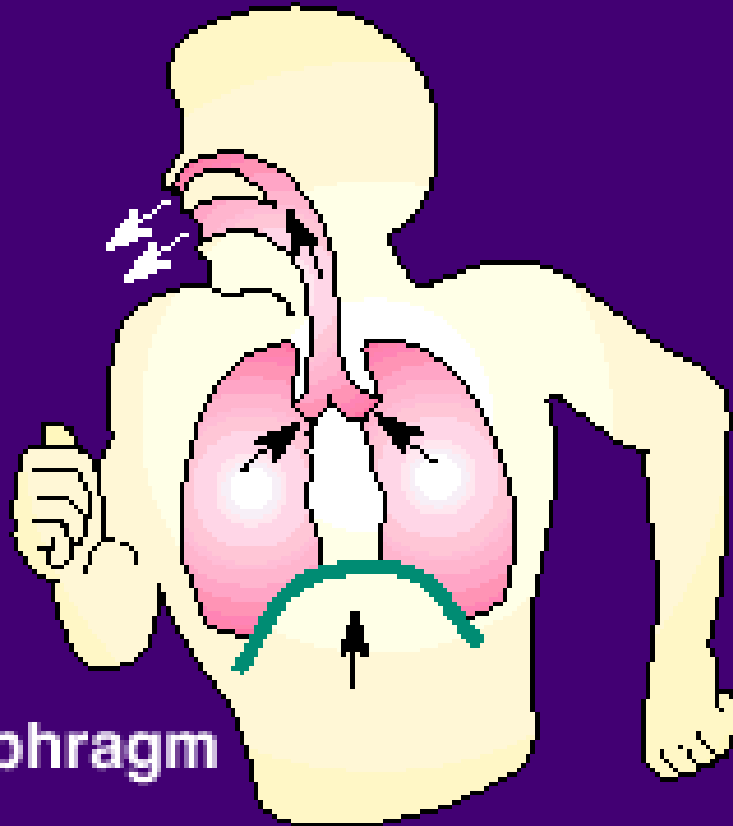


מערכת הנשימה במצב נשיפה

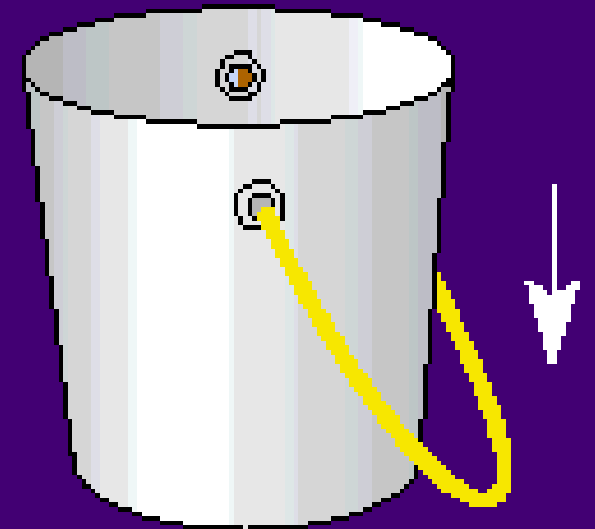
Diaphragm Action



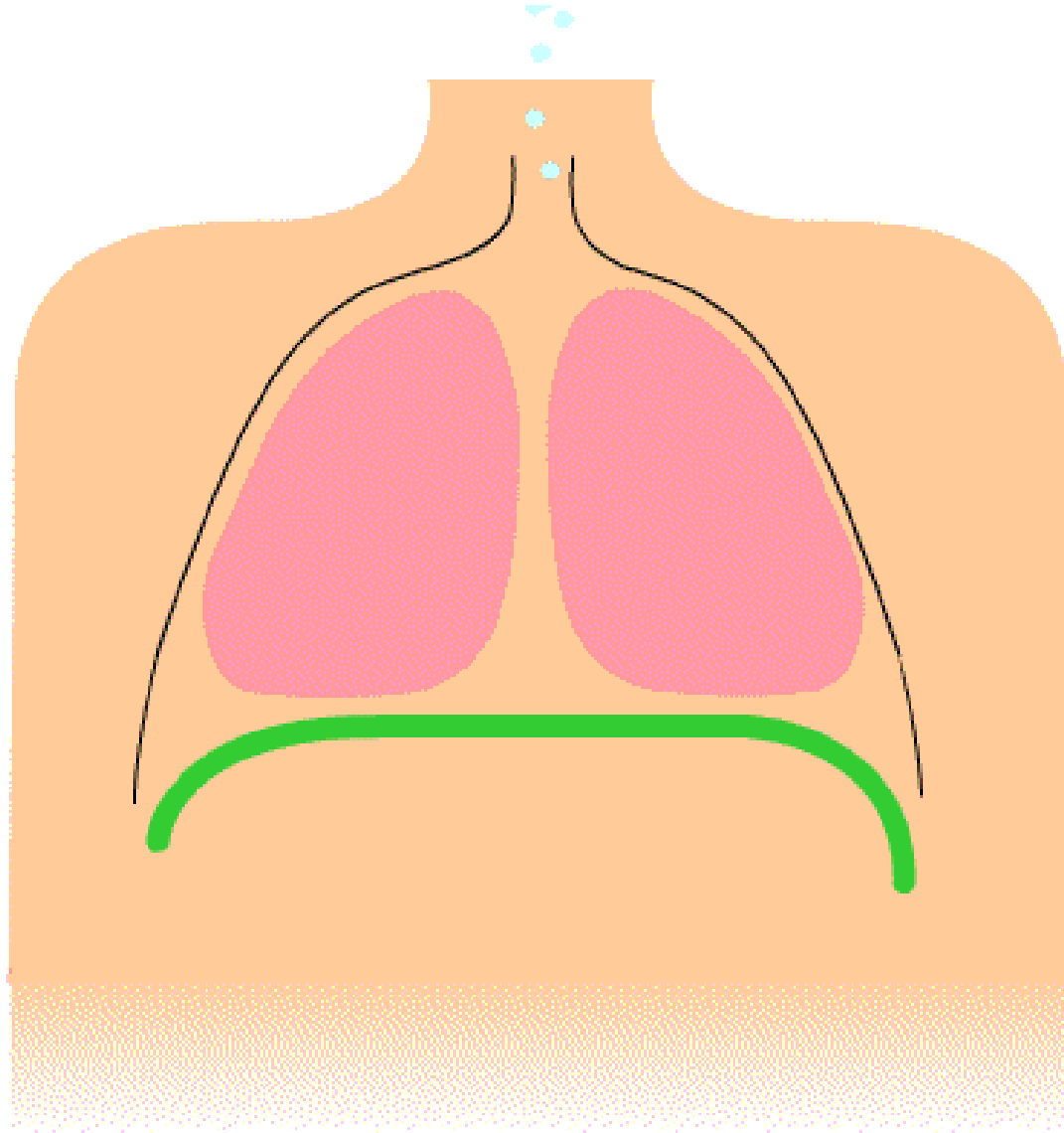
Diaphragm



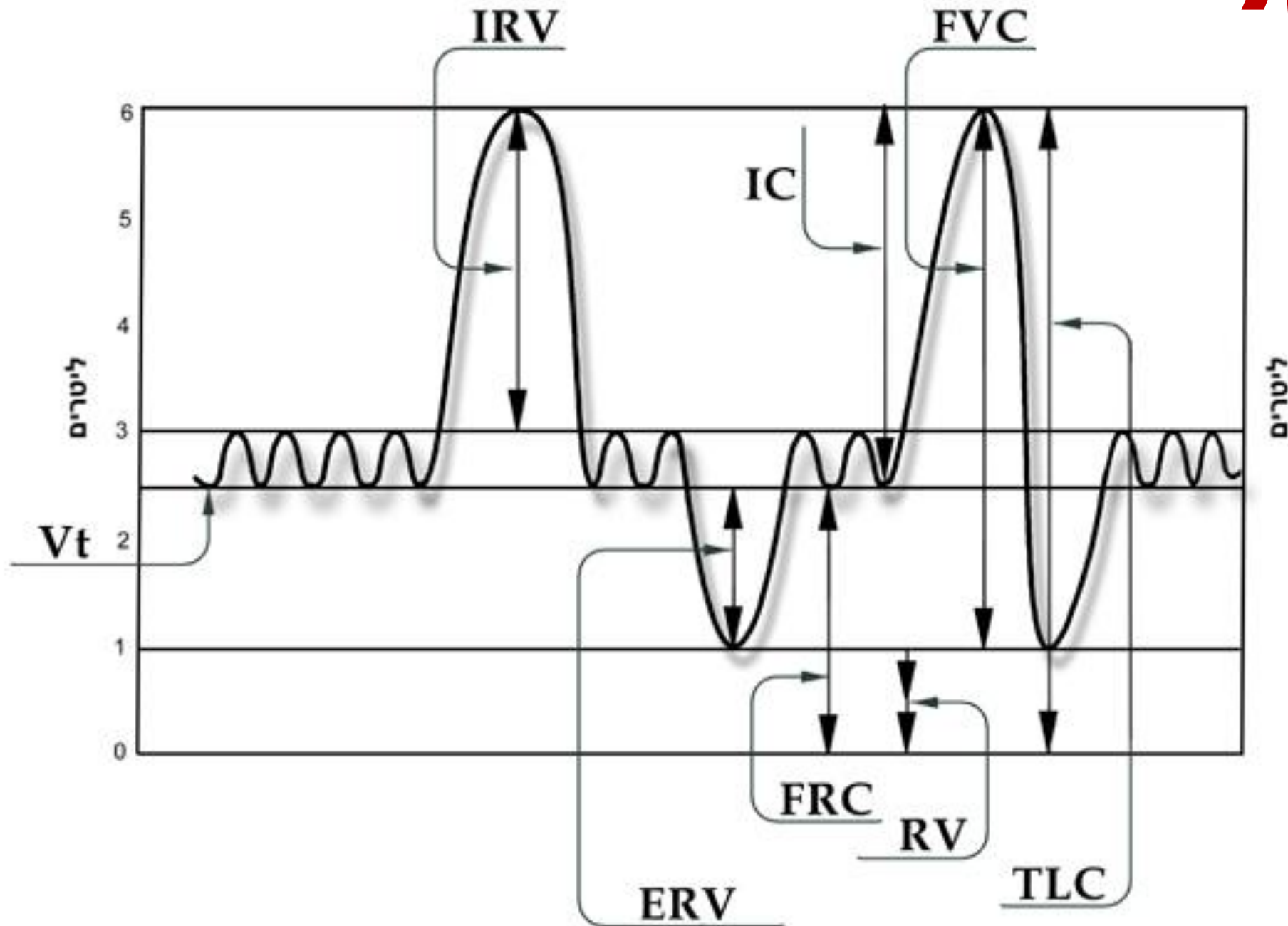
Rib Action



תהליך הנשימה: שאיפה + נשיפה



נפחי הריאות והקיבולות



B0516R



נפחי ריאות וקיבולות סטטיים

- נפח מתחלק (TV - Tidal Volume) - 0.4 - 1 ליטר: נפח האוויר שנכנס לריאות ויוצא מהן במהלך נשימה שקטה.
- נפח נשיפה רזרבי (ERV - Expiratory Reserve Volume) - 1 - 1.5 ליטר: נפח האוויר שניתן לנשוף מסוף נשיפה רגילה.
- נפח שאיפה רזרבי (IRV - Inspiratory Reserve Volume) - 2.5 - 3 ליטר: נפח האוויר שניתן לשאוף מסוף שאיפה רגילה.
- נפח שארית (RV - Residual Volume) - כ- 1.2 ליטר: נפח האוויר הנותר בריאות לאחר נשיפה רצונית מרבית.

- קיבולת חיונית (FVC - Vital Capacity) - נפח האוויר המרבי שניתן לנשוף מסוף שאיפה מרבית 4.5-5.0 ליטר
- קיבולת הריאה הכוללת (TLC - Total Lung Capacity) - קיבולת חיונית + נפח שארית כ- 6.0 לי' .
- קיבולת שאיפתית (IC - Inspiratory Capacity) - נפח האוויר שניתן לשאוף מסוף נשיפה רגילה 3 - 3.5 לי'
- קיבולת שארית תפקודית (FRC - Residual Capacity) - נפח האוויר שנשאר בריאות בתום נשיפה רגילה כ- 2.5 לי'

מדידת נפחי ריאה באמצעות ספירומטר

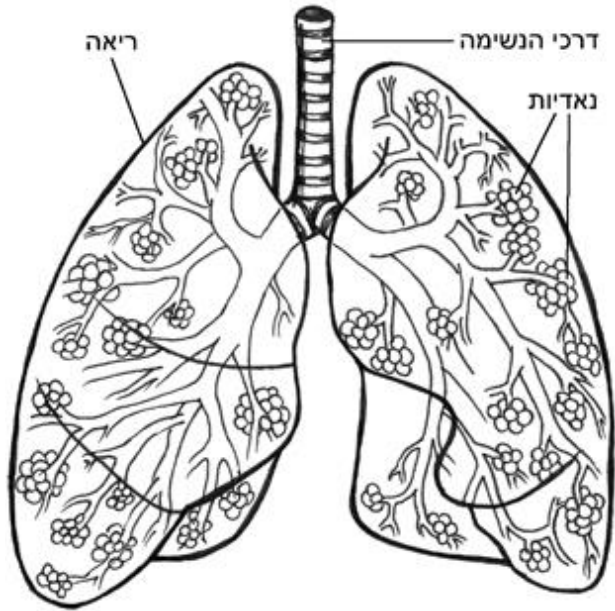
גיל

מין

גזע

גובה





נפח מתחלף (Tidal Volume)

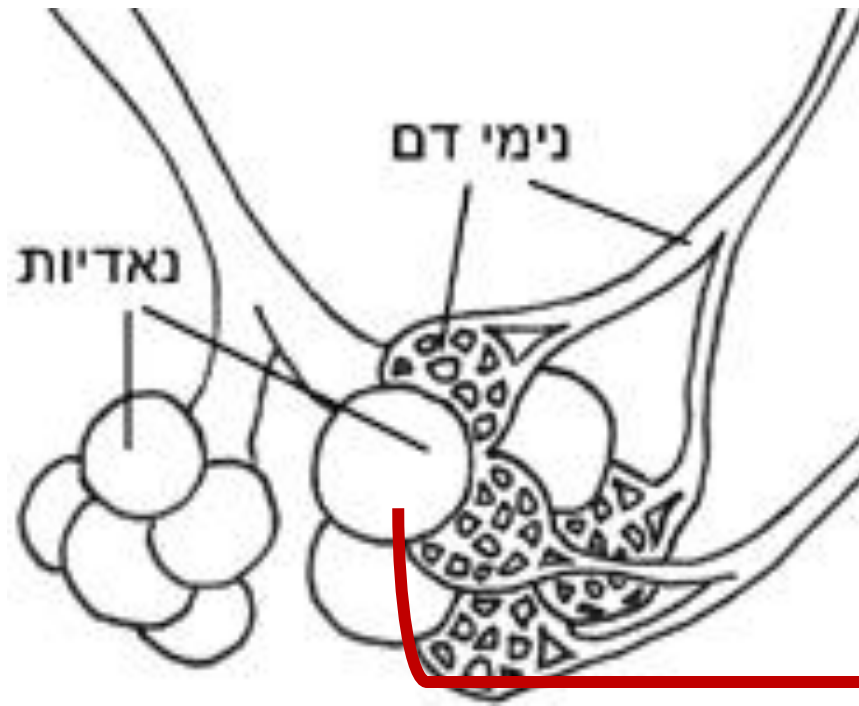
נפח האוויר שנכנס לריאות בנשימה אחת (במנוחה: 0.4 - 1 ליטר)

תדירות נשימה (Frequency)

מספר הנשימות שמבוצעות בדקה (במנוחה 12 - 15 נשימות)

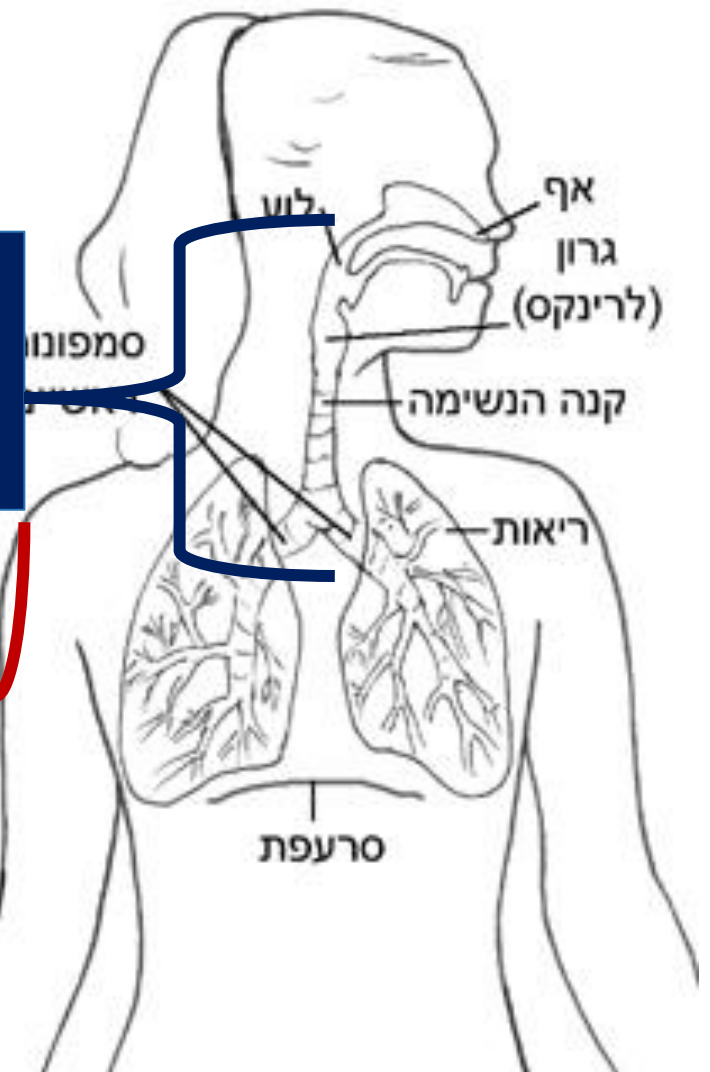
אזור ריאתי ($V_{\text{Entilation}}$)

נפח האוויר שנכנס לריאות במשך דקה אחת ($V_t * f = V_E$) (במנוחה כ: 6 - 10 ליטר/דקה)



נפח מת אנטומי

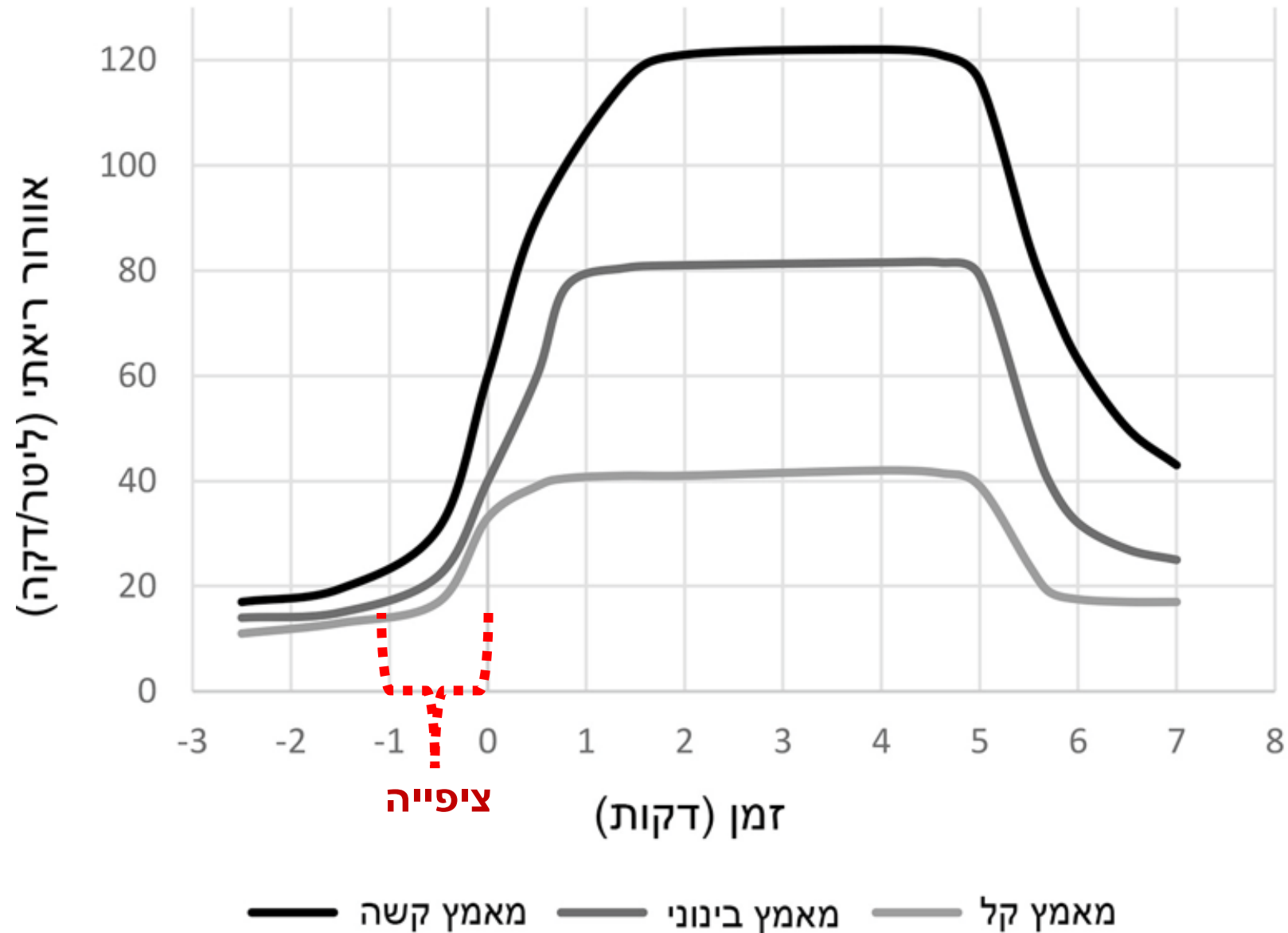
כ- 150 מ"ל



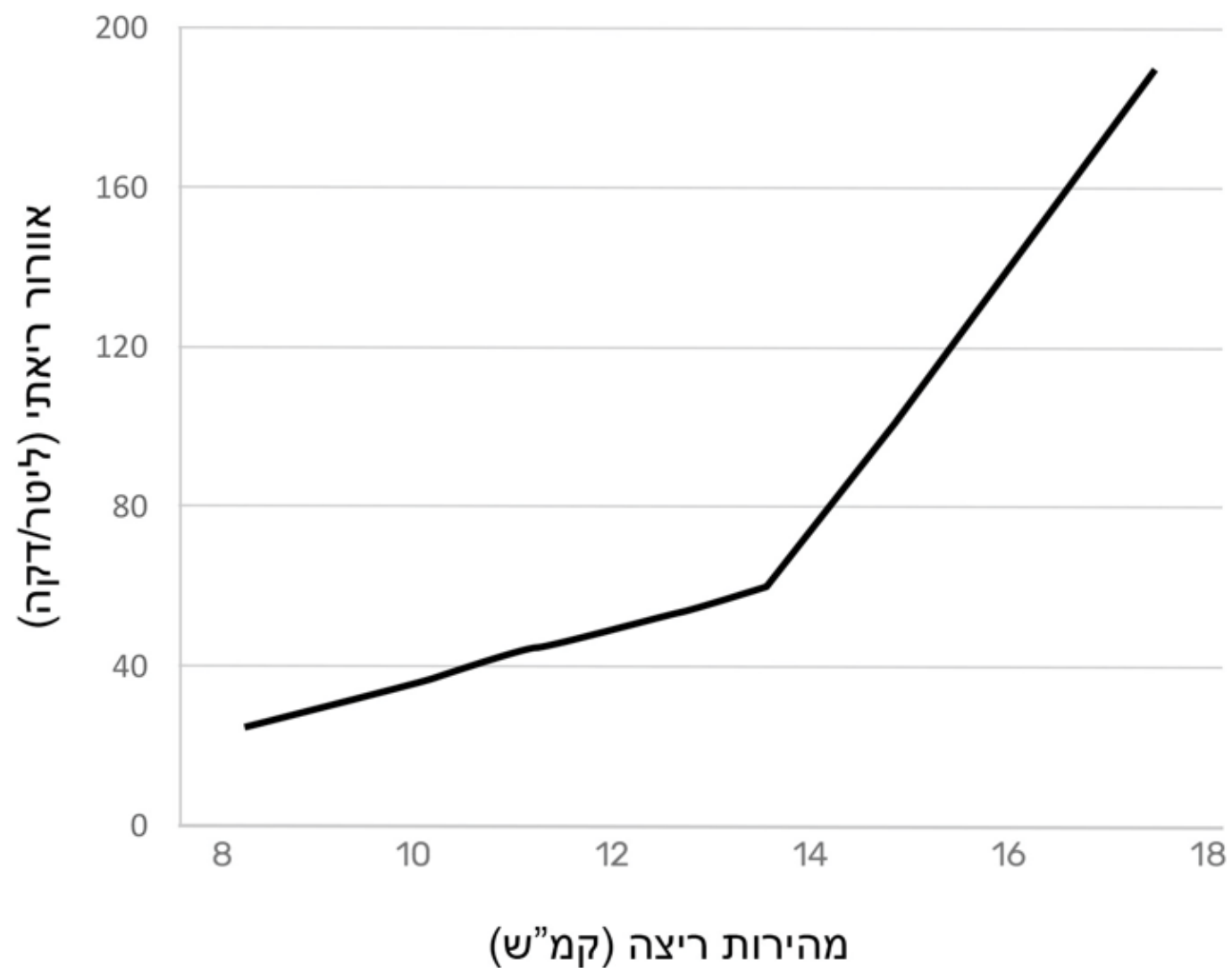
נפח מת פיזיולוגי

נפח מתחלף - נפח מת אנטומי = אוורור נאדיתי

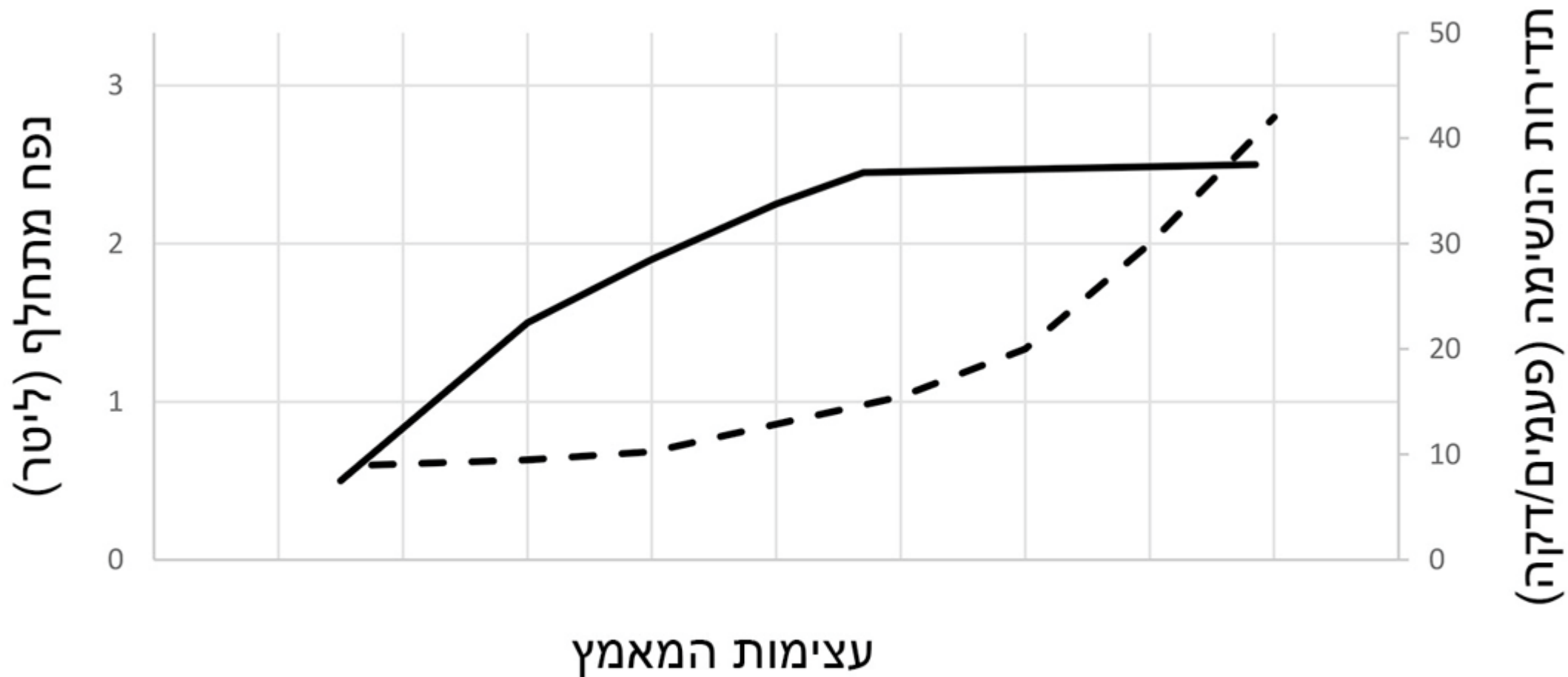
השינוי באורור הריאתי במהלך 3 מאמצים תת מרביים



השינוי באזור הריאתי במהלך מאמץ מדורג עד למאמץ מרבי

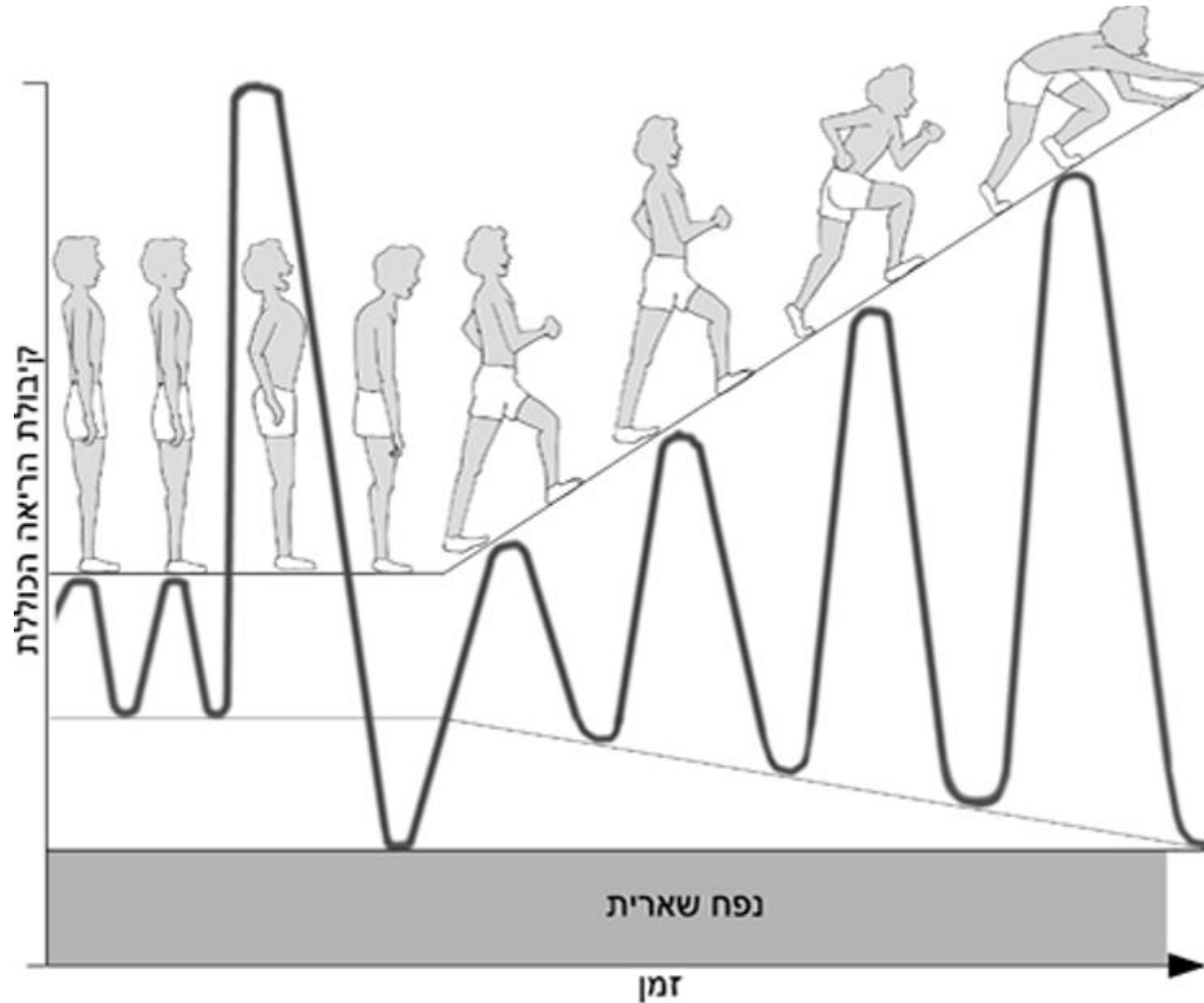


השינוי בנפח המתחלף ובתדירות הנשימה כתלות בעצימות המאמץ



— (Vt) נפח מתחלף — (f) תדירות הנשימה

השינוי בנפח המתחלף בעת מעבר ממנוחה למאמץ

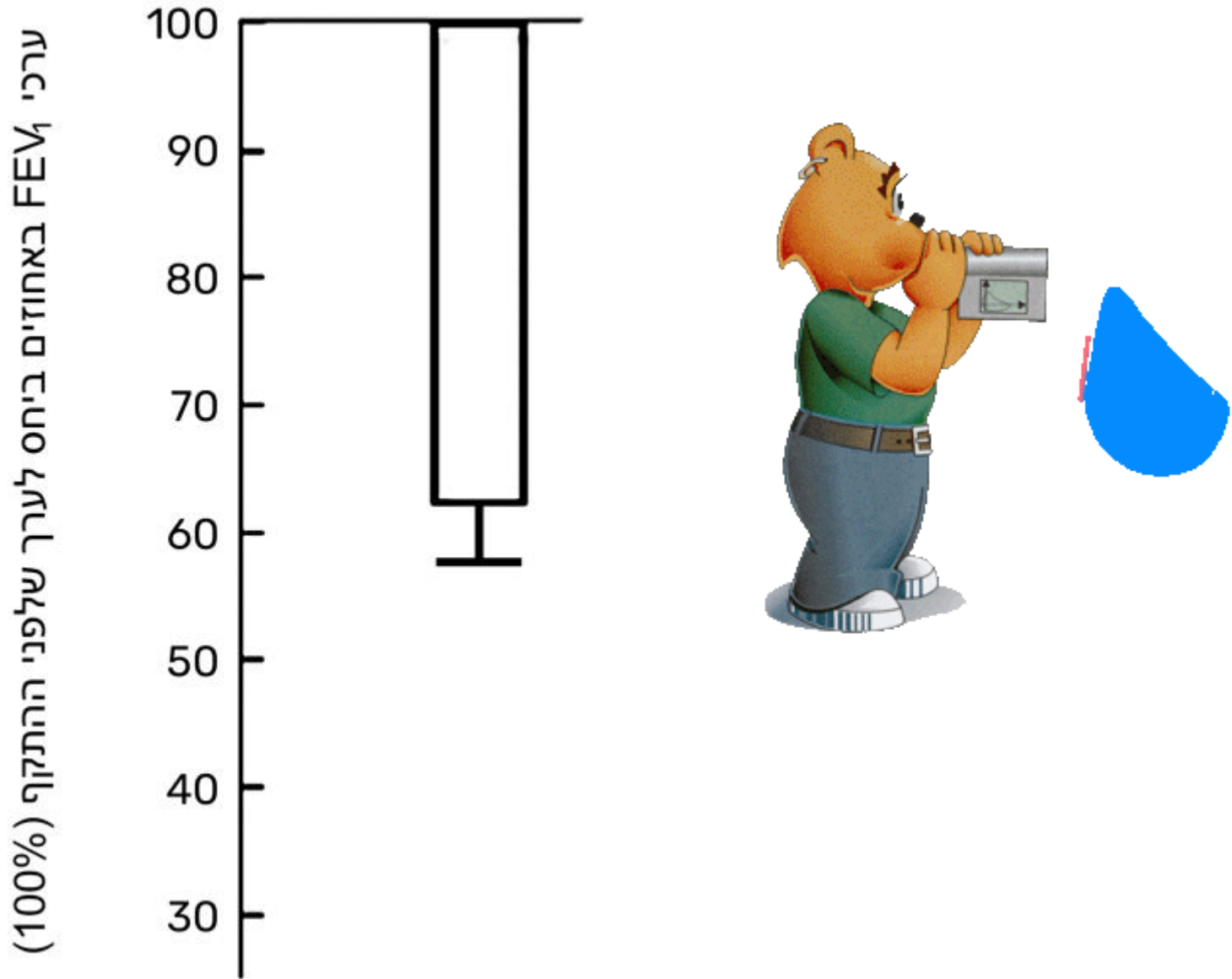


מבחני ריאות דינמיים לאיתור חסימתיות ומגבלת זרימה

מבחן FEV_1 (Forced Expiratory Volume in 1 second)

- בודק את נפח האוויר המרבי שיכול להינשף בשנייה הראשונה
- מבוטא באחוזים מהקיבולת החיונית
- במצב תקין כ- 85% מהקיבולת החיונית ננשפים בשנייה הראשונה
- נקודת האבחנה להיצרות ולחסימת דרכי הנשימה נמצאת ב- 70% מהקיבולת החיונית שננשפת בשנייה הראשונה

השינוי ב- FEV_1 אצל ילדים חולי אסתמה בעקבות התקף שגרם להיצרות דרכי הנשימה



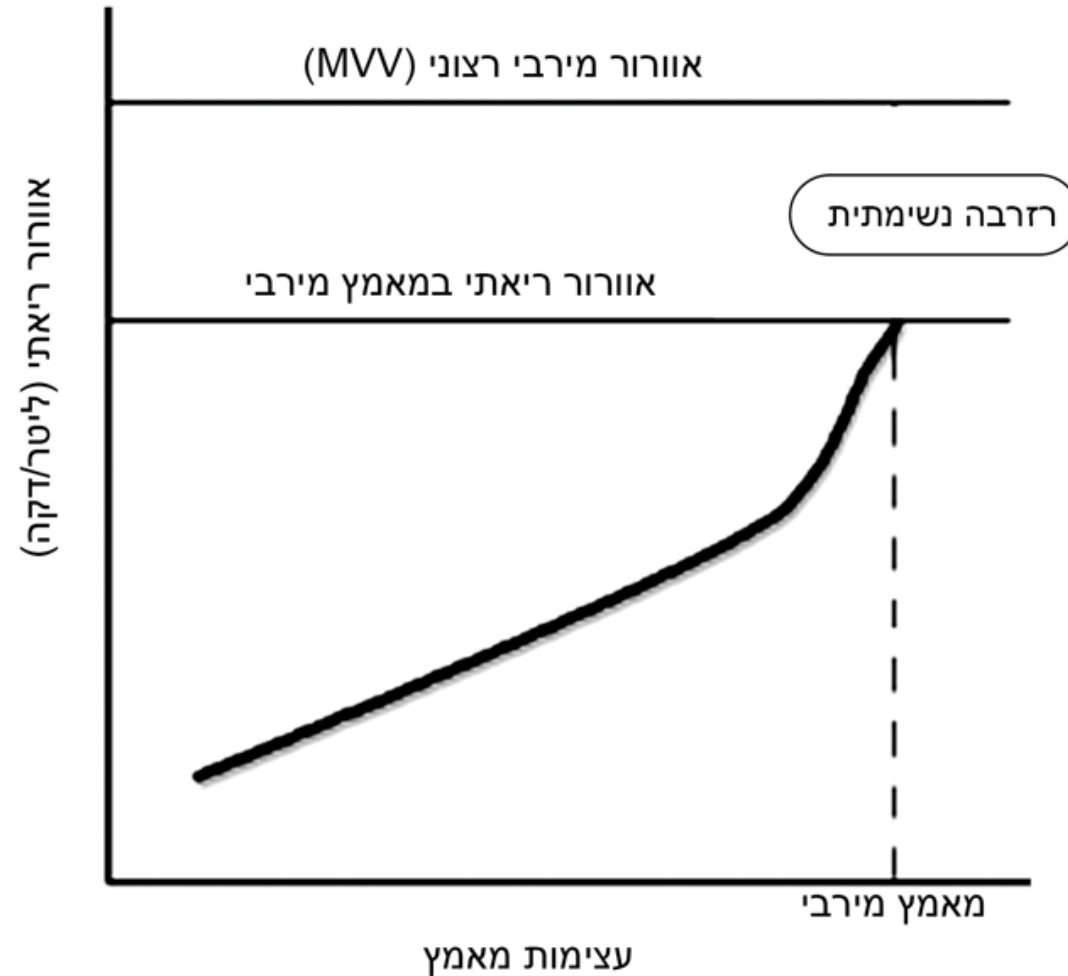
מבחני ריאות דינמיים לאיתור חסימתיות ומגבלת זרימה

מבחן MVV (Maximal Voluntary Ventilation)

- בודק את האוורור המרבי הרצוני.
- מבצעים נשימות עמוקות ומהירות במשך 15 שניות. את נפח האוורור שהושג כופלים בארבע והתוצאה היא האוורור המרבי הרצוני הצפוי בערכים של ליטר לדקה.
- ה-MVV של גברים צעירים, שאינם ספורטאי סבולת מאומנים, הוא 140 - 180 ליטר לדקה. ספורטאי סבולת מגיעים לערכים גבוהים יותר.
- חולים חסימתיים מגיעים רק ל- 40% מהערך, שחזוי עבורם על-פי גובה, גיל ומין.

השינוי באזור הריאטי במעבר ממצב מנוחה למאמץ מרבי

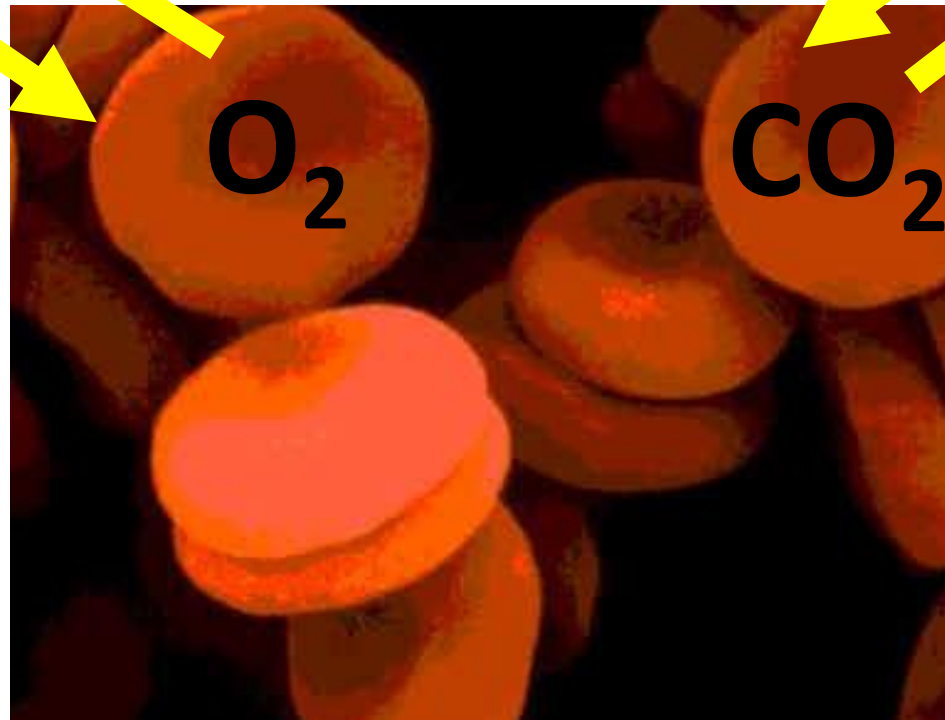
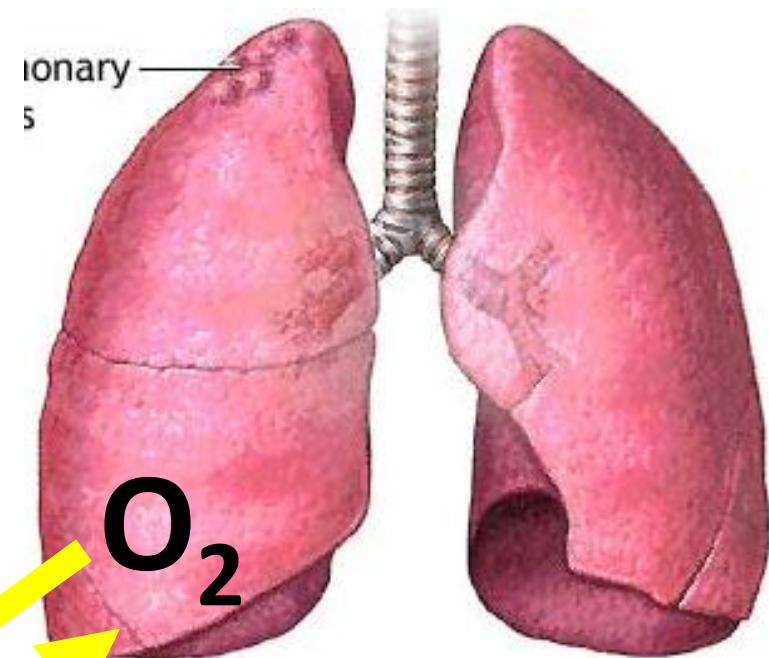
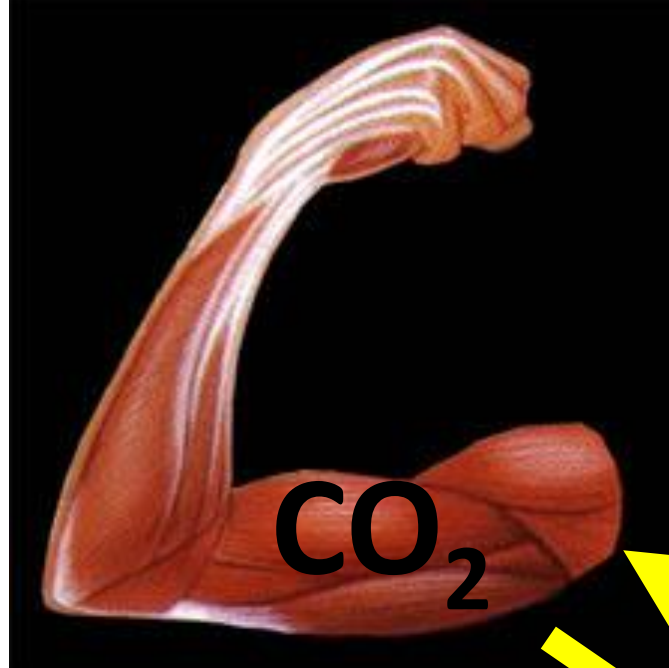
ביחס לאזור המרבי הרצוני (MVV)



חילוף גזים בדיפוזיה

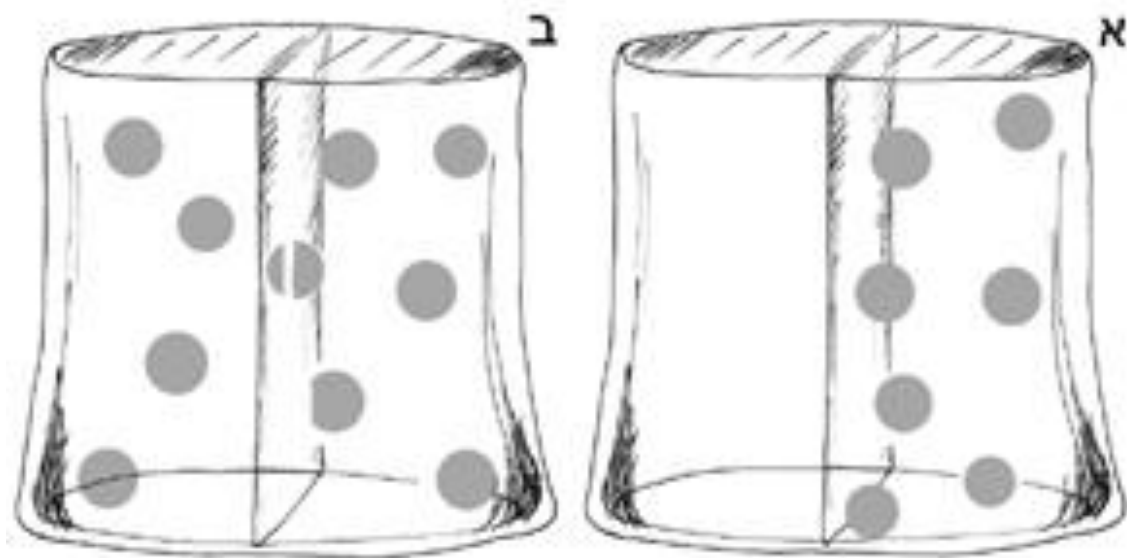
מעבר של חומרים באופן

אקראי בהתאם למפל לחצים



דיפוזיה

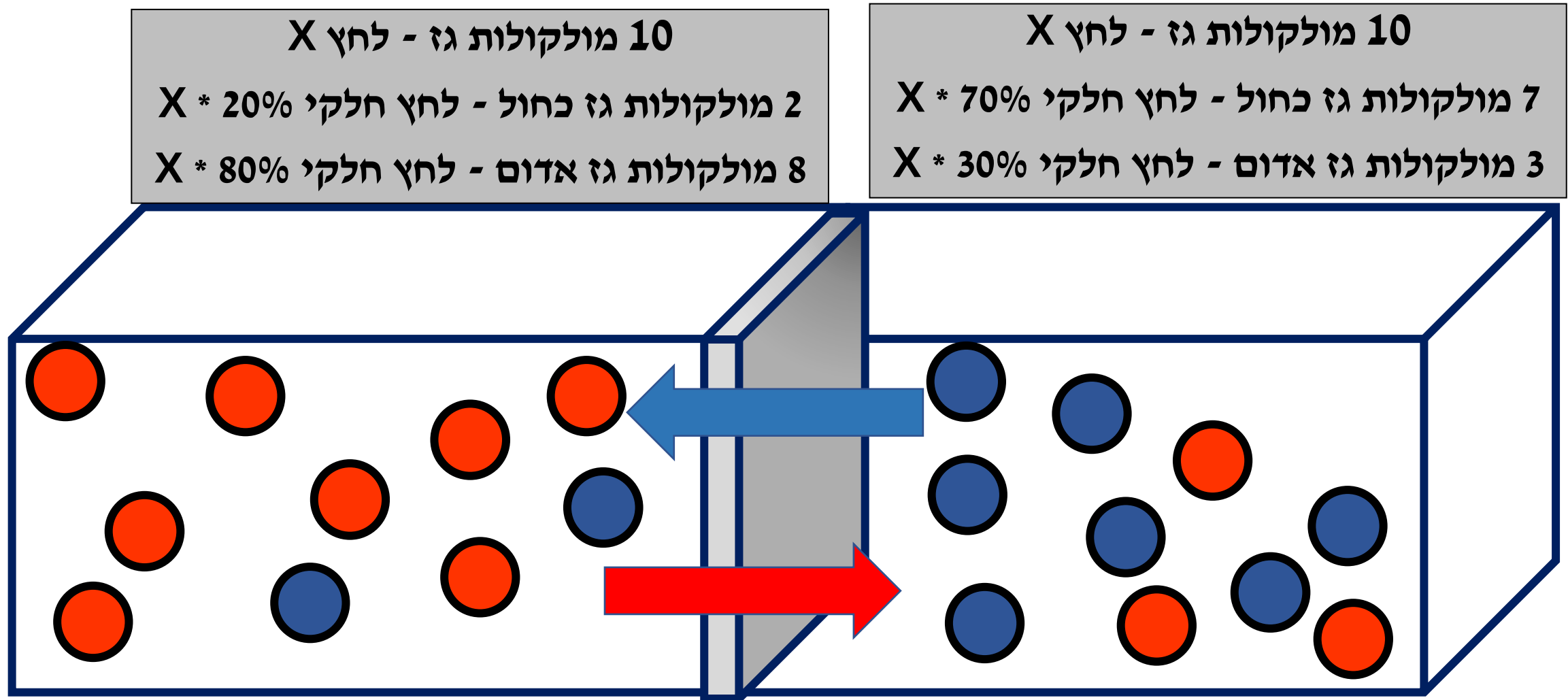
מעבר של חומרים באופן
אקראי בהתאם למפל לחצים



DIFFUSION



מעבר חלקיקים / גזים בהתאם למפל הלחצים החלקיים



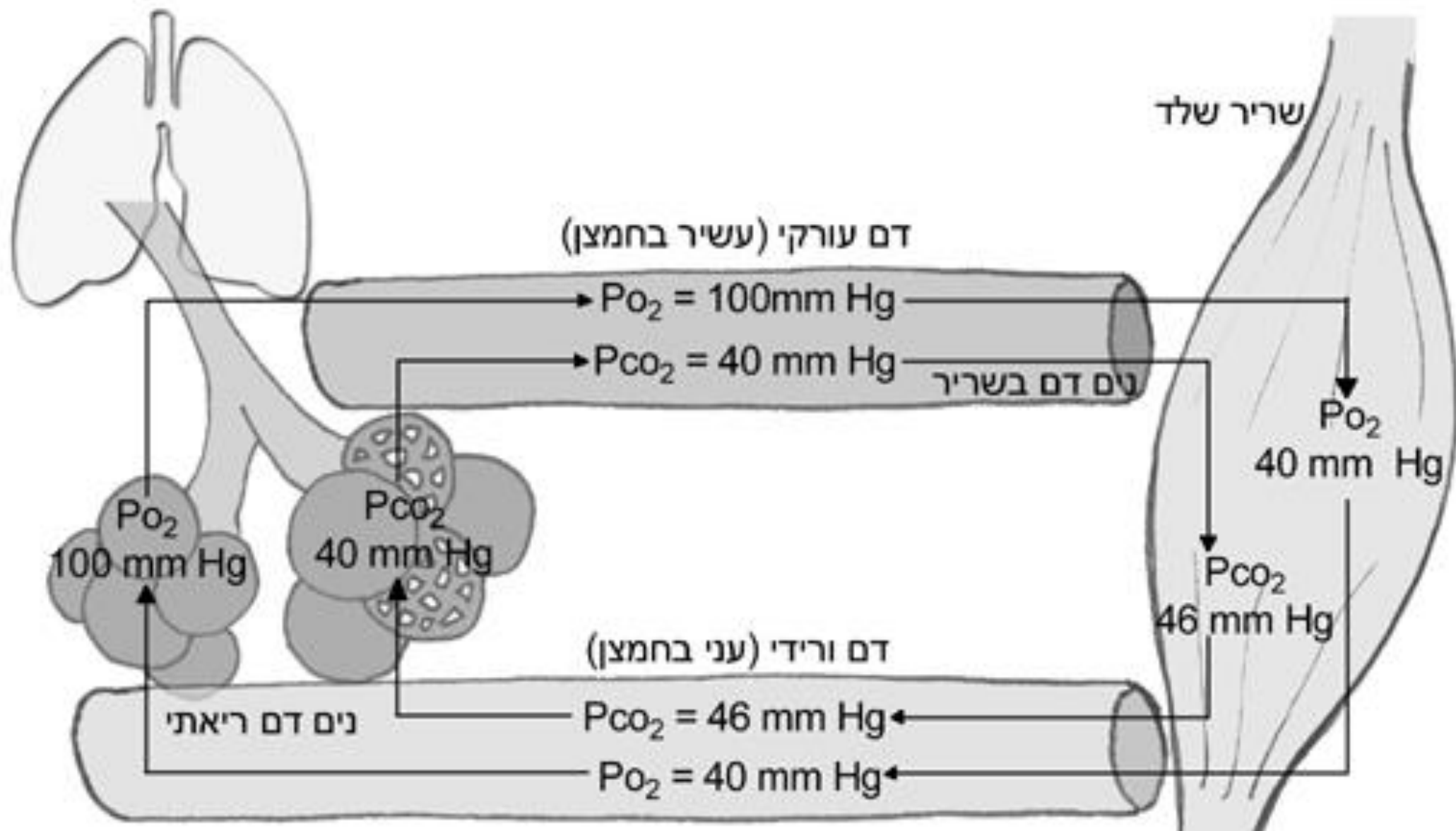
גובה פני הים

לחץ אטמוספירי - 760 מ"מ כספית

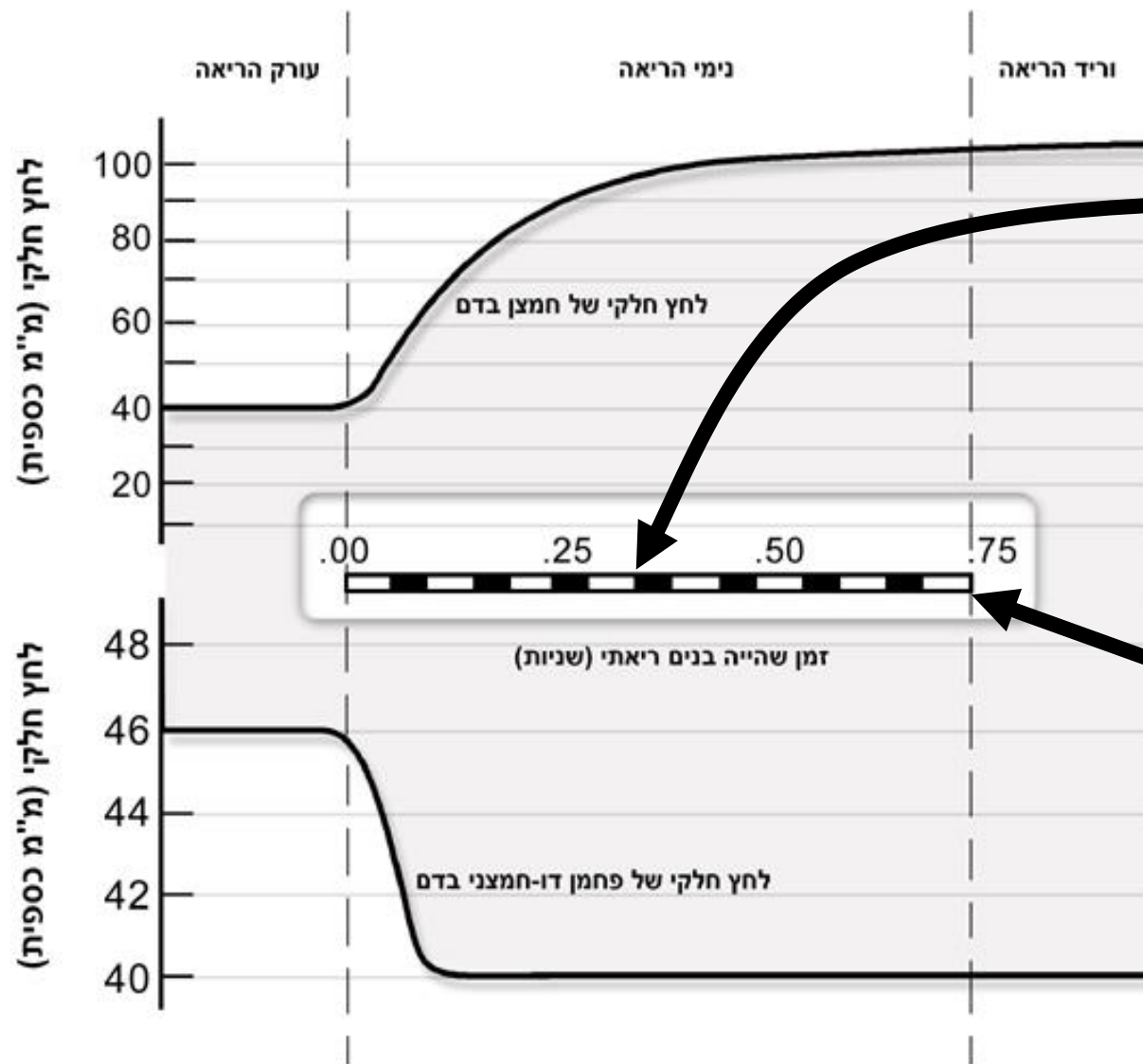
20.93% חמצן - לחץ חלקי 159.6 מ"מ כספית ($20.93\% \times 760$)

79.04% חנקן - לחץ חלקי 600.4 מ"מ כספית ($79.04\% \times 760$)

0.03% פחמן דו חמצני (זניח)

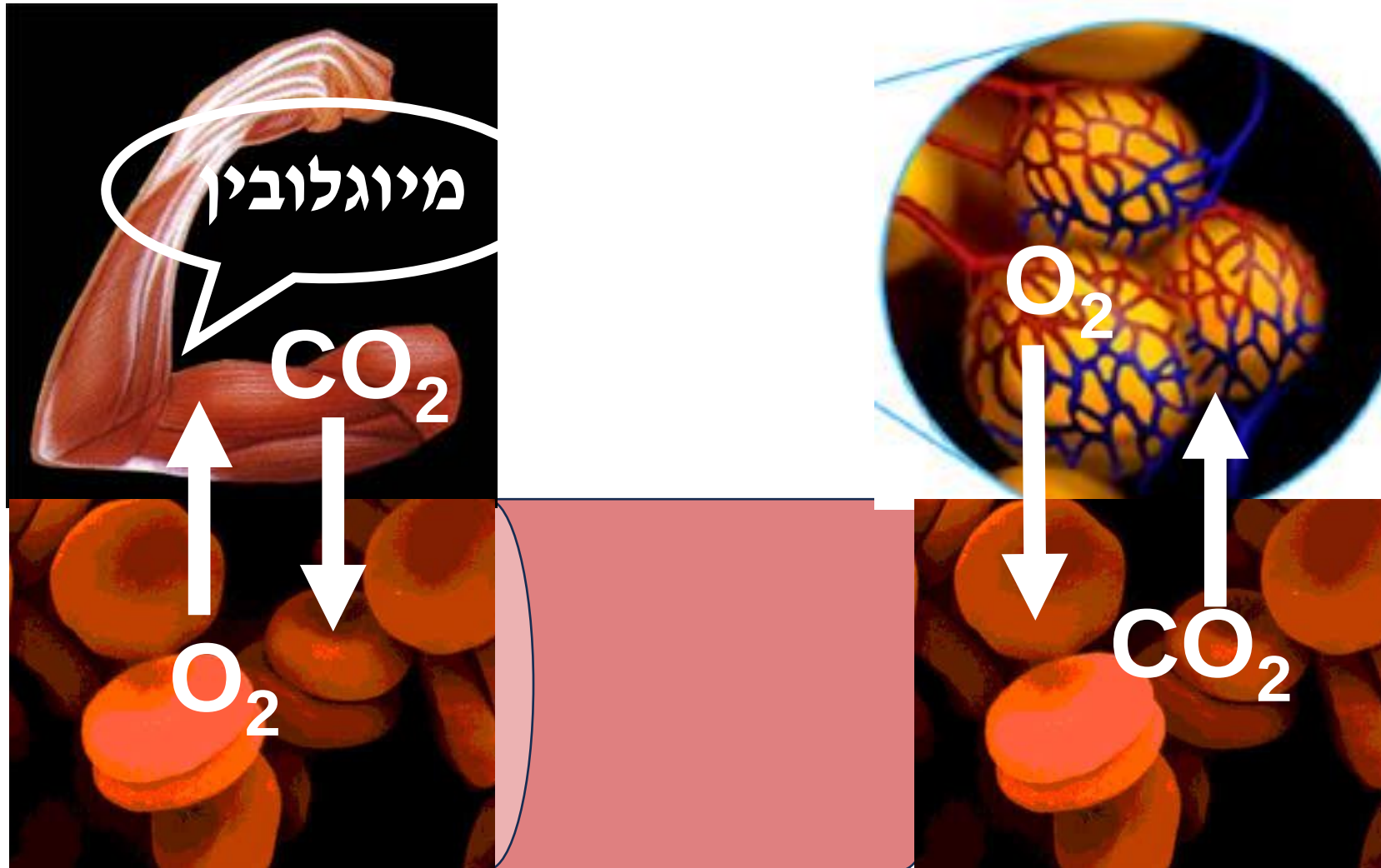


מפלי הלחצים החלקיים בנאדיות וברקמת השריר



**השינוי בלחץ החלקי של החמצן והפחמן הדו-חמצני במהלך
זמן המחזור הריאתי**

גורמים המשפיעים על הדיפוזיה



הגורמים הבאים משפיעים על הקצב ועל כמות הגזים שמתחלפים בדיפוזיה בין

הנאדיות לנימי הריאה ובין נימי הדם לתאי השריר:

- מספר תאי הדם האדומים - ככל שיהיו יותר ניתן יהיה לקלוט ולשחרר יותר חמצן בכל יחידת נפח של דם (בפרק זמן נתון), ולכן קצב הדיפוזיה יואץ.
- כמות המיוגלובין בתאי השריר - החמצן ששוחרר מההמוגלובין ועבר בדיפוזיה לתוך תא השריר נישא למיטוכונדריה על ידי מולקולות המיוגלובין. ככל שיהיו יותר מיוגלובין כך ניתן יהיה למצות יותר חמצן מהדם.
- שטח הפנים שזמין לדיפוזיה - תלוי במספר נימי הדם הפתוחים שנמצאים במגע ישיר עם הנאדיות המאווררות ו/או סיבי השריר. במנוחה מכילה רשת הנימים שבדפנות הנאדיות כ- 75 מ"ל דם. בעת מאמץ גופני גדל מספר הנאדיות המאווררות, ובנוסף נפתחים נימים נוספים ונפח הדם הזורם בהם גדל ומגיע לנפח המרבי - כ- 200 מ"ל. בעת מאמץ מרבי גדלה בשרירי השלד פי שלושה כמות הנימים הפתוחים, שדרכם יכול החמצן לעבור בדיפוזיה.

מגמת השינוי בקצב דיפוזיית החמצן בריאות במנוחה ובמאמץ

מדורג (מאמץ בעצימות הולכת וגדלה) עד מאמץ מרבי

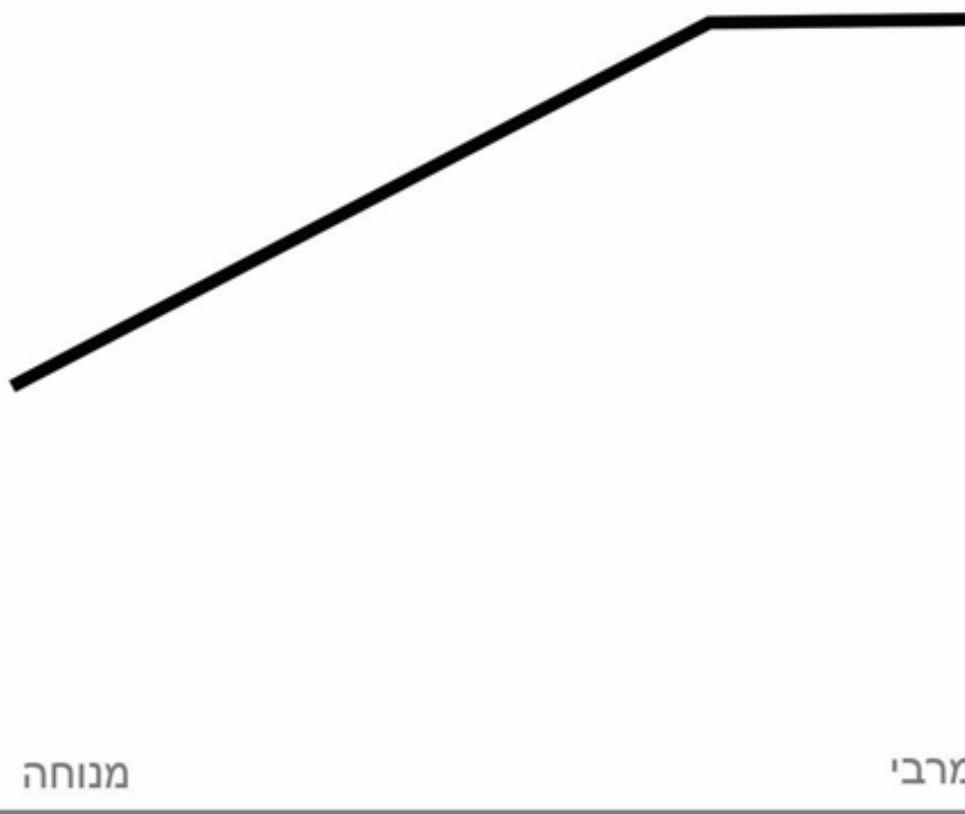
קצב דיפוזיית החמצן

0

מנוחה

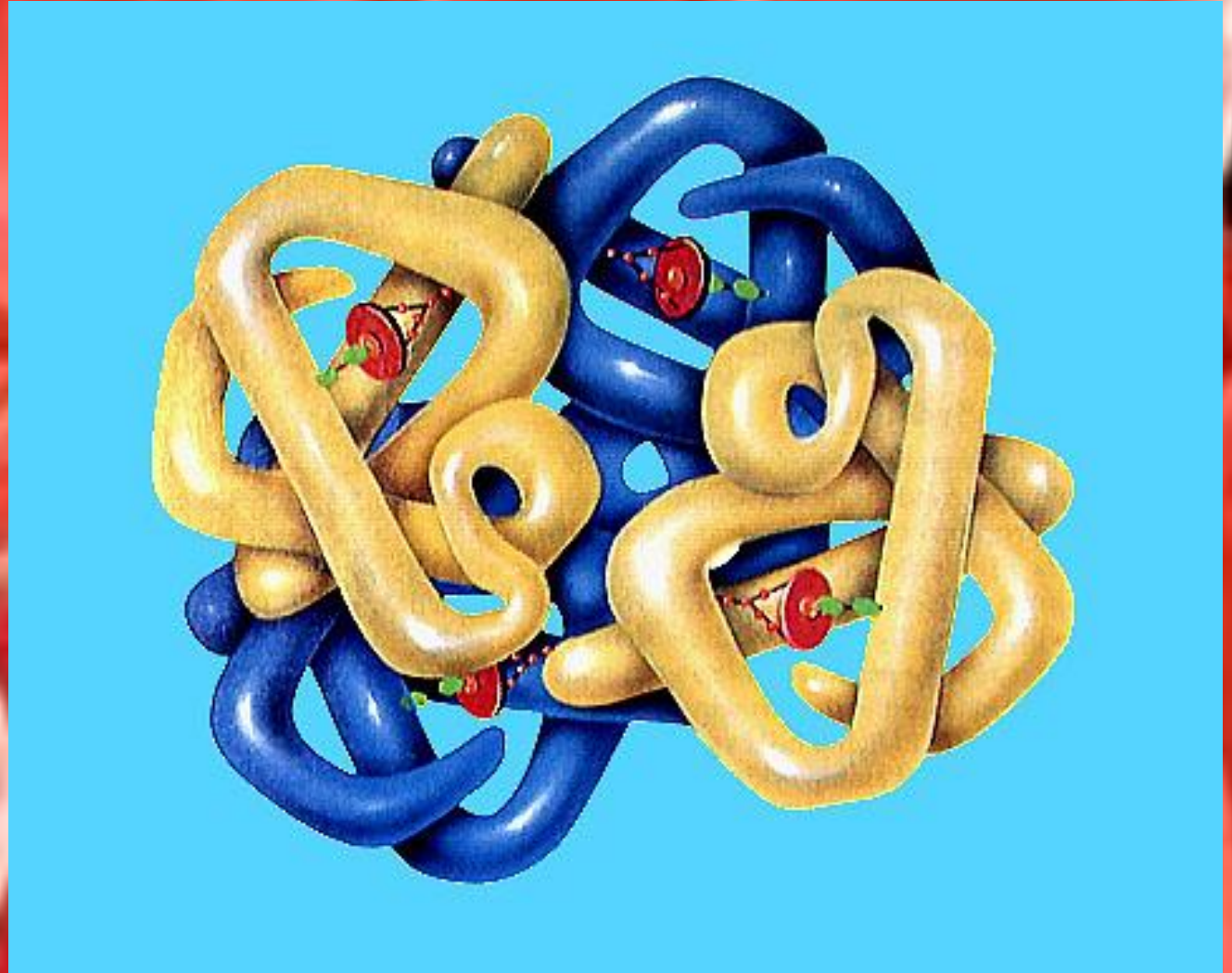
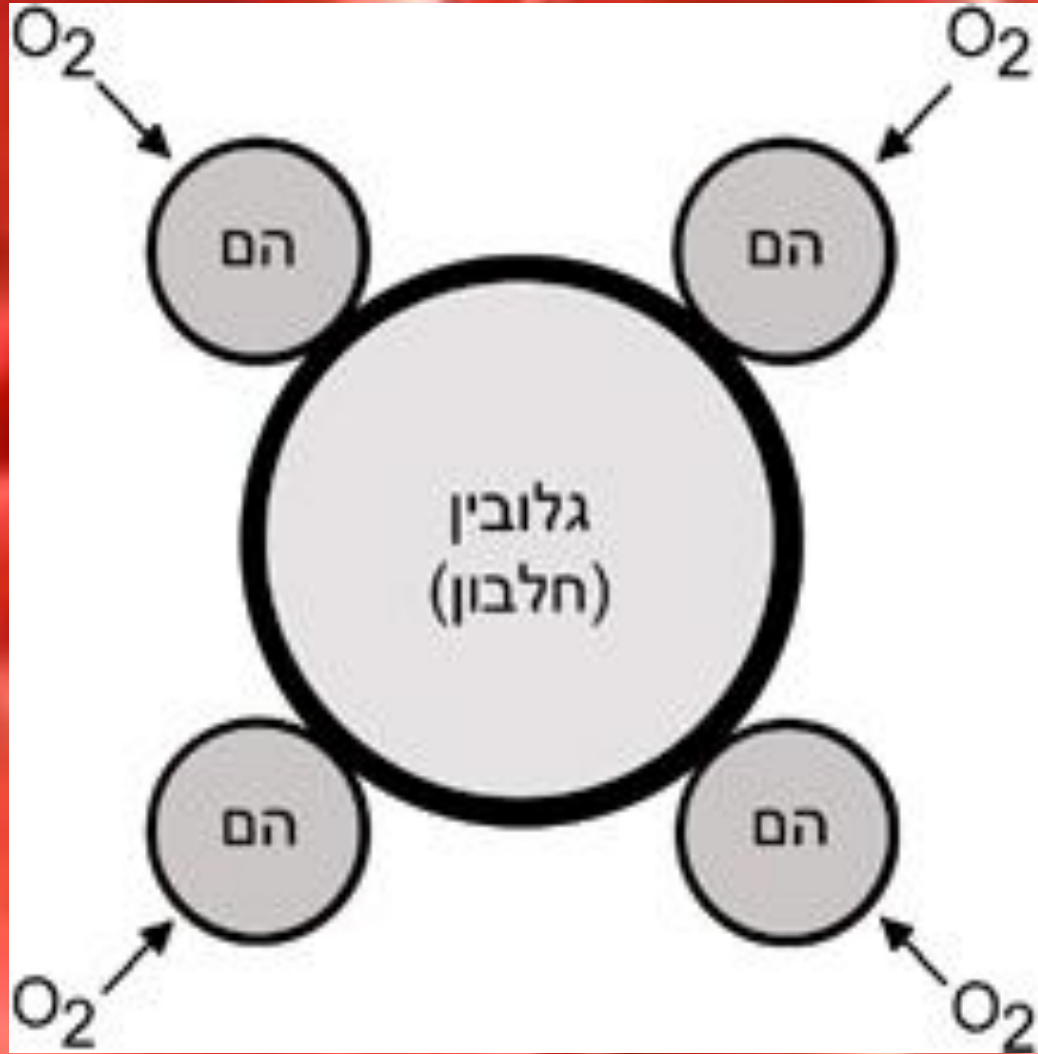
מרבי

עצימות מאמץ



העברת גזים באופן מומס ידי הדם

- כמות הגז שמומסת בדם תלויה במסיסות הגז ובלחץ החלקי שלו.
- כ- 1.5% מסך כל כמות החמצן שמועברת בדם נמצאת במצב מומס
- כ- 5% מסך כל הפחמן הדו-חמצני שמועבר בדם נמצאת במצב מומס



98.5 % מהחמצן מוסע בדם כשהוא קשור להמוגלובין



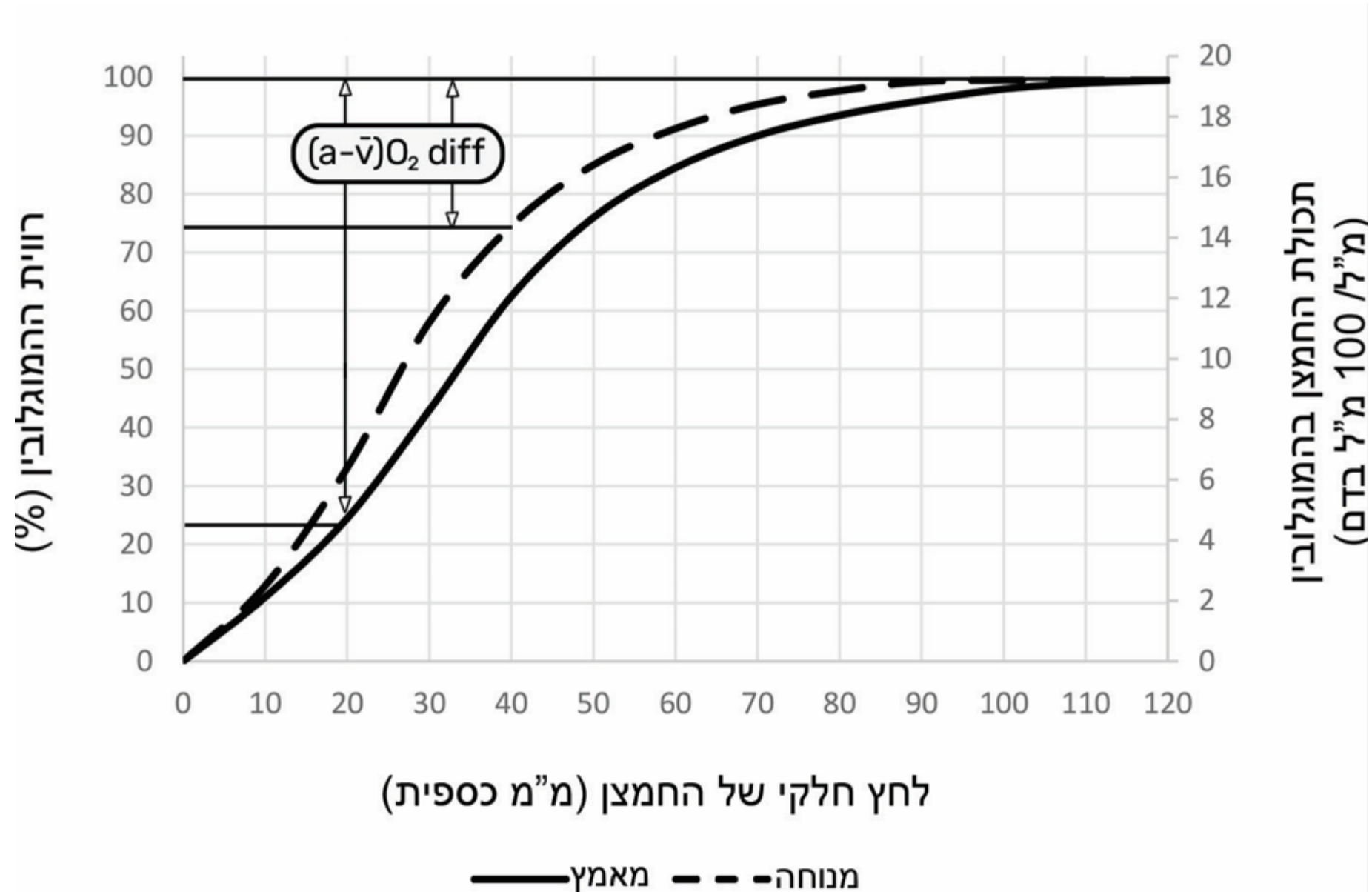
ב- 1 מ"ל דם 5 מיליון תאים אדומים, בכל תא אדום 300 מיליון המוגלובין, כל המוגלובין קושר 4 מולקולות O_2

1 גרם המוגלובין - 1.34 מ"ל חמצן

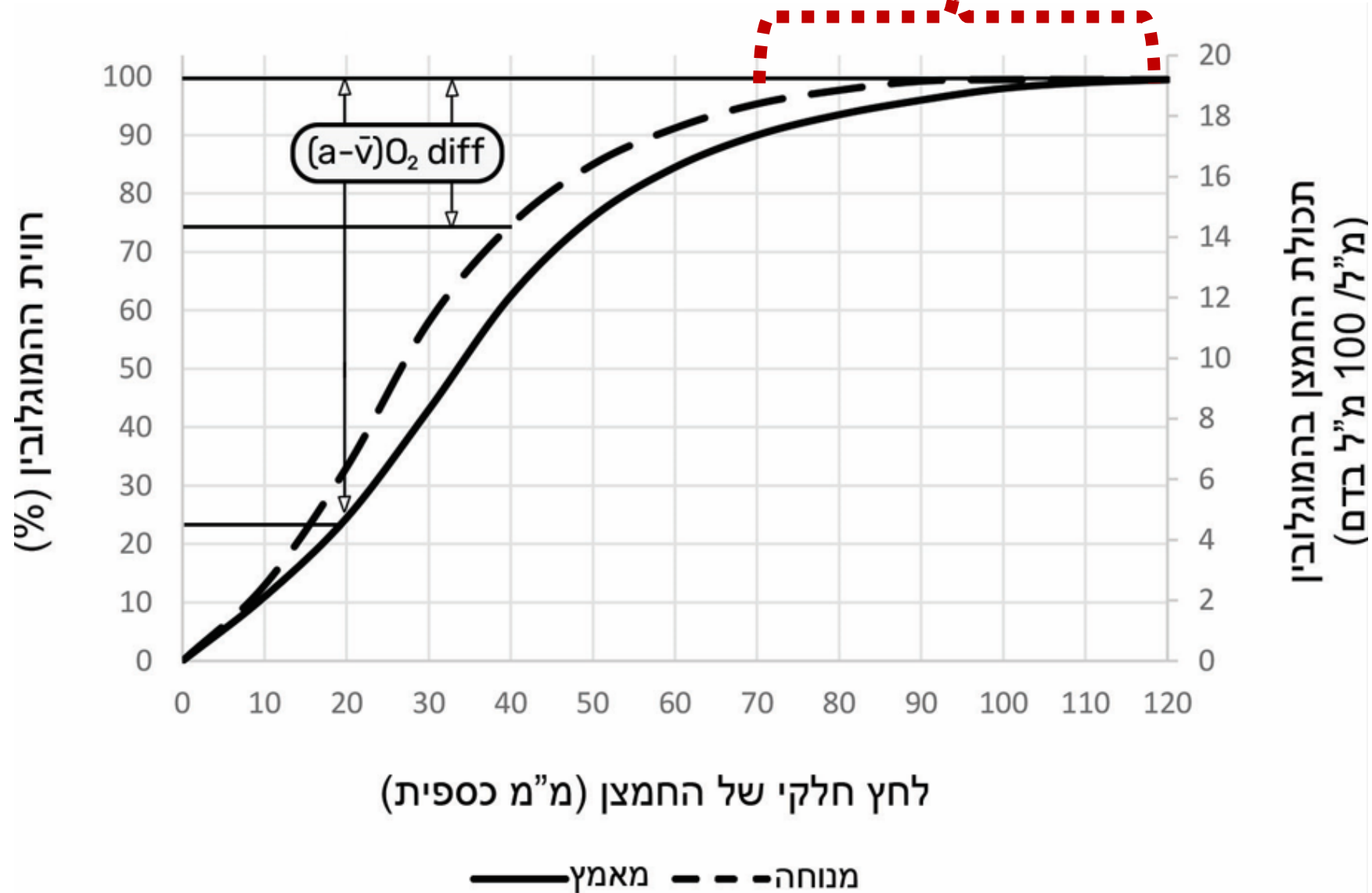
כ- 15 גרם המוגלובין / 100 מ"ל דם

ב- 100 מ"ל דם - 20.1 מ"ל חמצן = 100% רוויה (סטורציה)

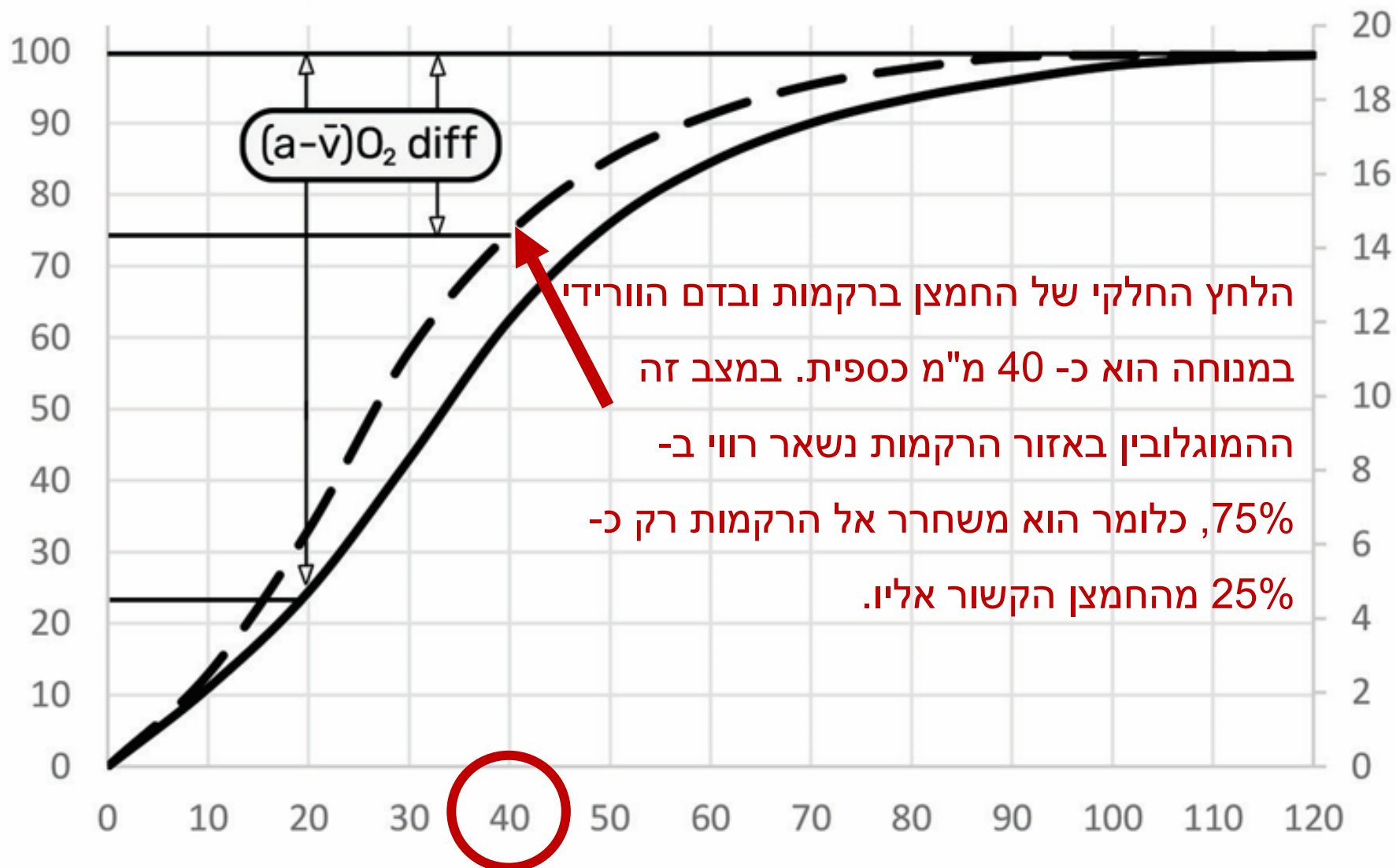
עקומת ההיפרדות של החמצן מהמוגלובין בזמן מנוחה ובזמן מאמץ



אזור "העמסה" (loading) טעינת ההמוגלובין בחמצן בריאות.



רויט ההמוגלובין (%)



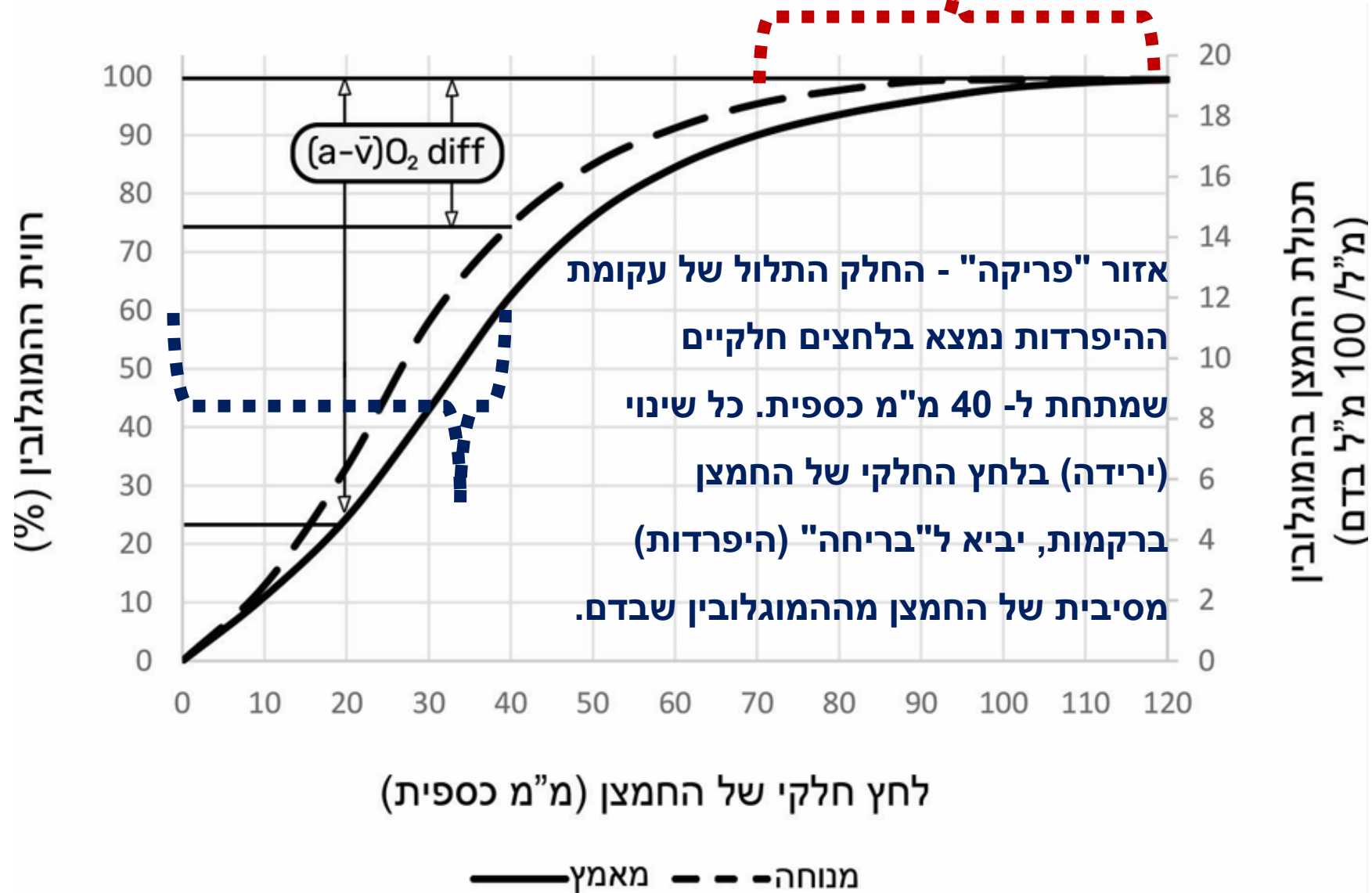
לחץ חלקי של החמצן (מ"מ כספית)

מנוחה - - - מאמץ

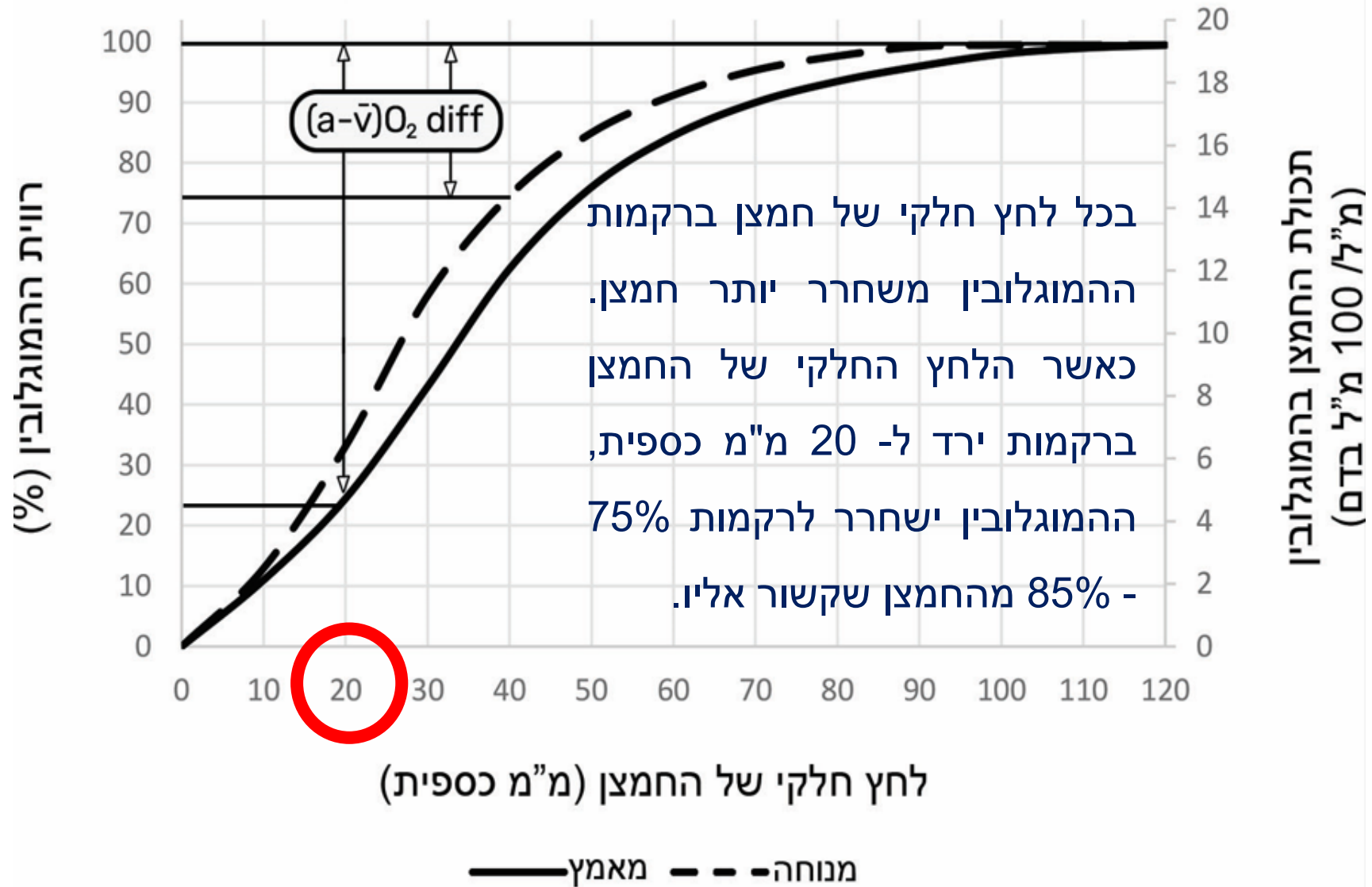
תכולת החמצן בהמוגלובין
(מ"ל/100 מ"ל בדם)

הלחץ החלקי של החמצן ברקמות ובדם הוורידים
במנוחה הוא כ- 40 מ"מ כספית. במצב זה
ההמוגלובין באזור הרקמות נשאר רווי ב-
75%, כלומר הוא משחרר אל הרקמות רק כ-
25% מהחמצן הקשור אליו.

אזור "העמסה" (loading) טעינת ההמוגלובין בחמצן בריאות.



במאמץ, העלייה בלחץ החלקי של הפד"ח, בטמפרטורה ובחומציות (אפקט בוהר)
גורמים להמוגלובין לשחרר את החמצן ביתר קלות – תזוזת עקומה ימינה ומטה.



$(a-v)O_2$ diff.

ההפרש בתכולת החמצן שבין העורק לוריד

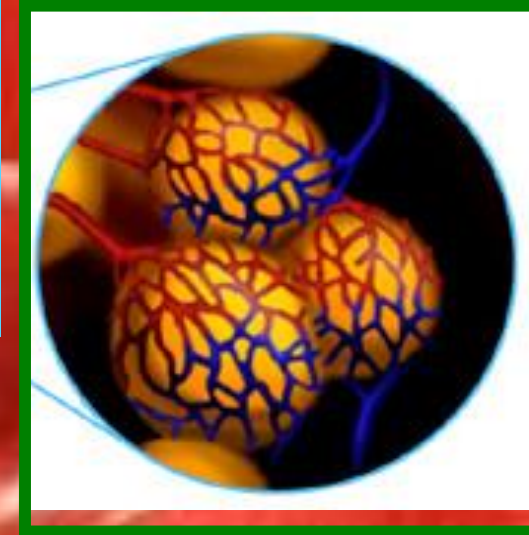




1 גרם המוגלובין - 1.34 מ"ל חמצן

כ- 15 גרם המוגלובין / 100 מ"ל דם

ב- 100 מ"ל דם - 20.1 מ"ל חמצן = 100% רוויה



מנוחה

15 מ"ל O_2 / 100 מ"ל דם

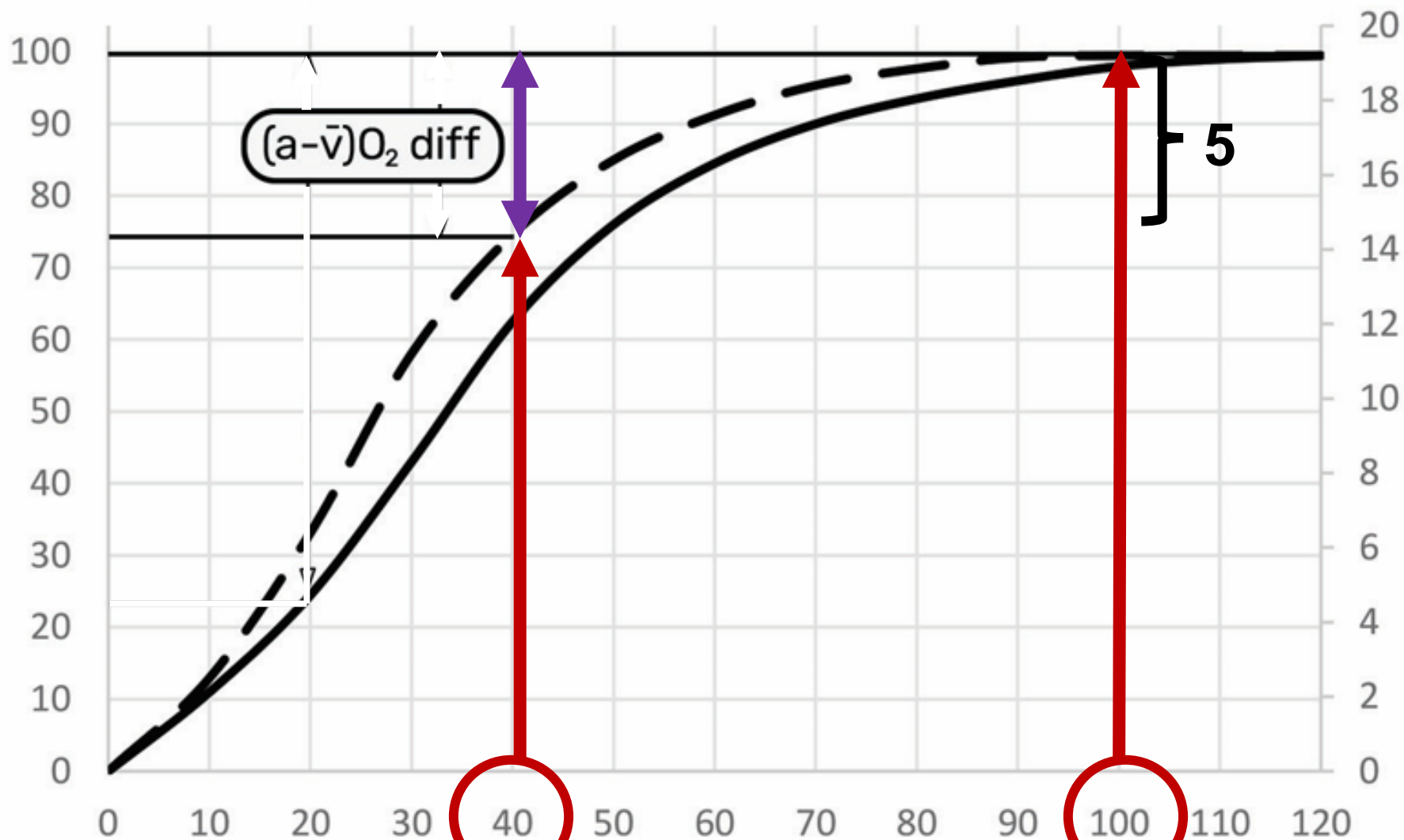
דם ורידי

20 מ"ל O_2 / 100 מ"ל דם

דם עורקי

$(a-v)O_2 \text{ diff.} = 5 \text{ מ"ל} / 100 \text{ מ"ל דם}$

רויט ההמוגלובין (%)



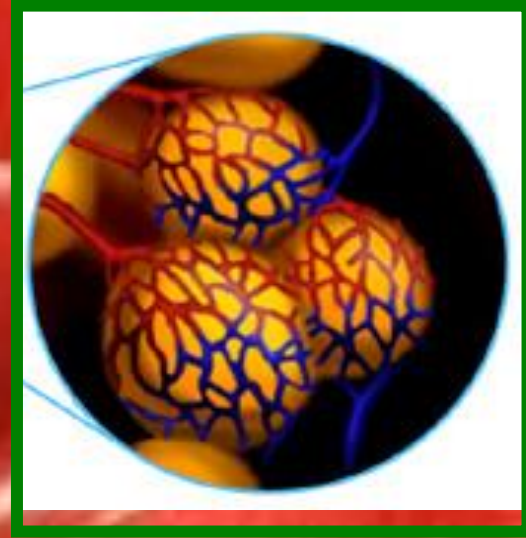
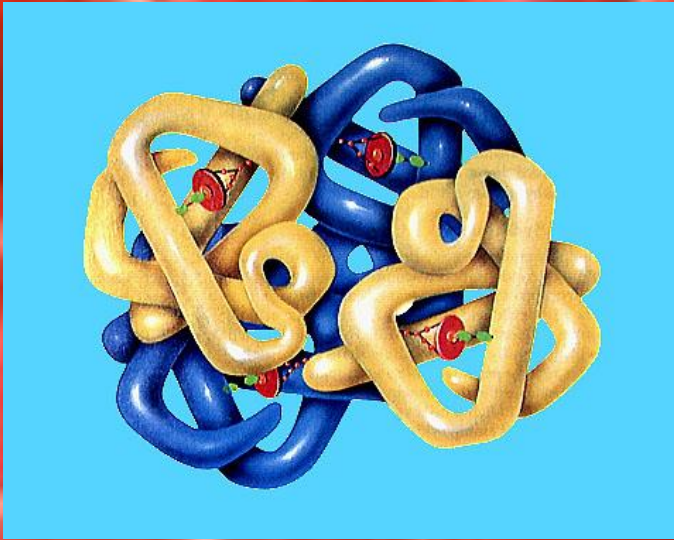
רקמות

לחץ חלקי של החמצן (מ"מ כספית)

נאדיות

מנוחה - - - מאמץ —

תכולת החמצן בהמוגלובין
(מ"ל / 100 מ"ל בדם)



מאמץ

5 מ"ל O_2 / 100 מ"ל דם

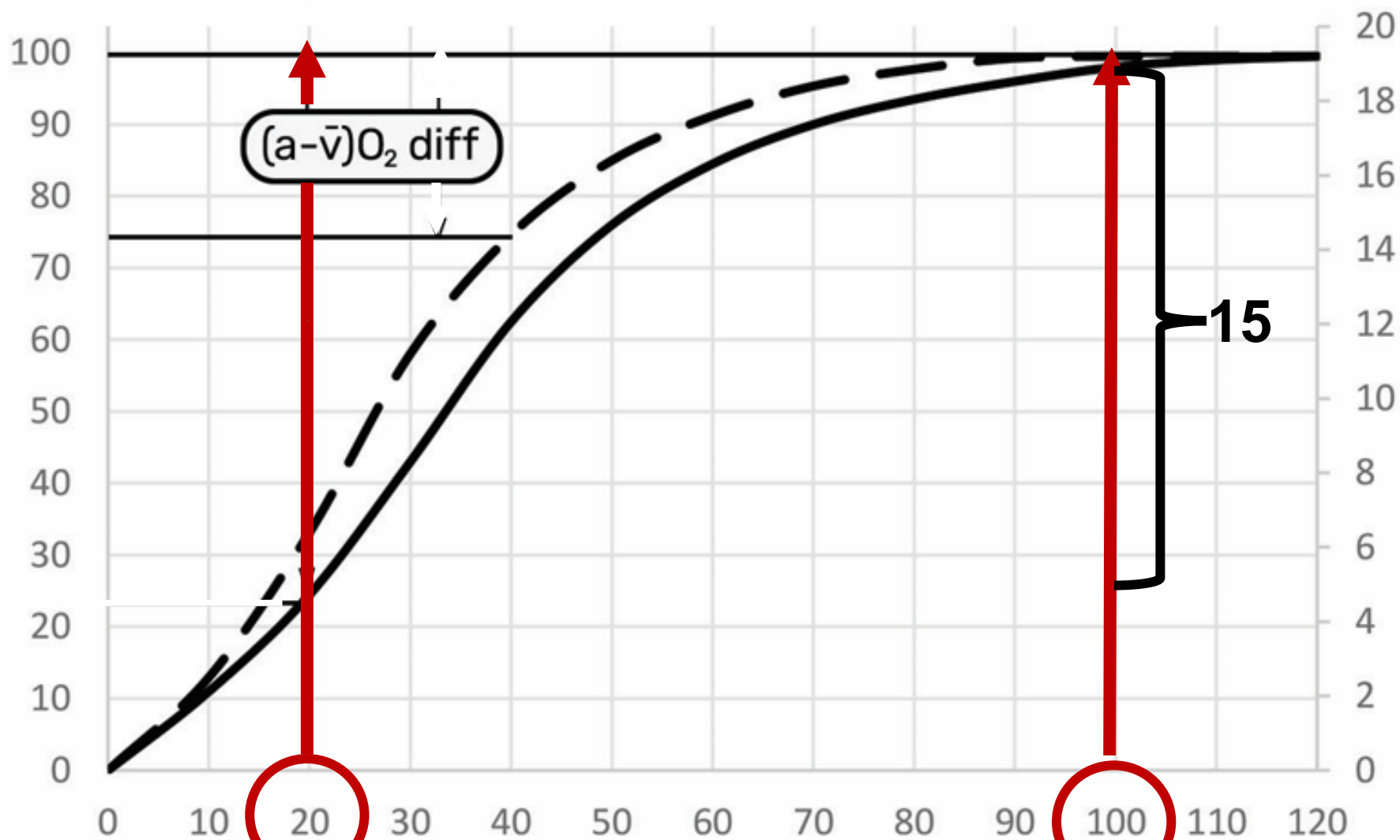
דם ורידי

20 מ"ל O_2 / 100 מ"ל דם

דם עורקי

$(a-v)O_2 \text{ diff.} = 15 \text{ מ"ל} / 100 \text{ מ"ל דם}$

רויט ההמוגלובין (%)



רקמות

לחץ חלקי של החמצן (מ"מ כספית)

נאדיות

מאמץ — מנוחה - - -

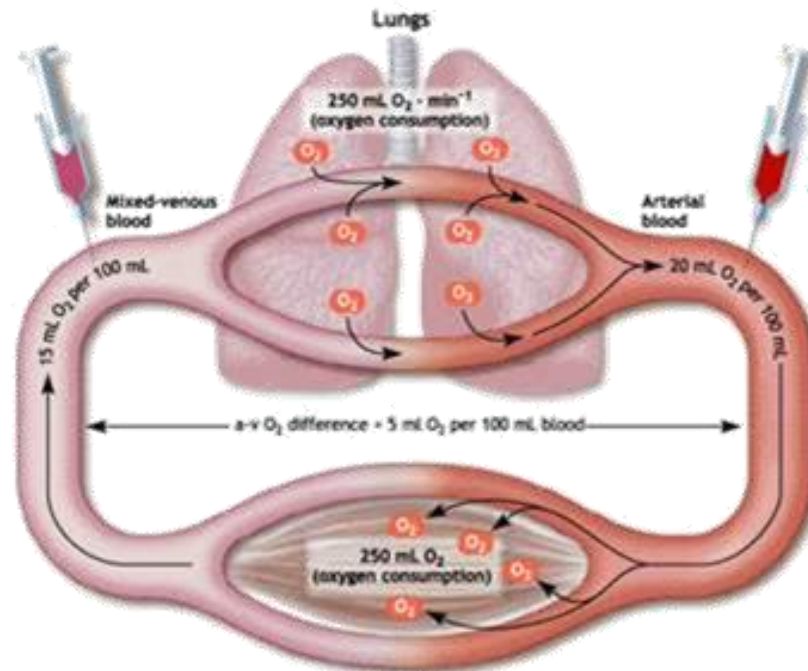
תכולת החמצן בהמוגלובין
(מ"ל / 100 מ"ל בדם)

$(a-v)O_2$ diff.

ההפרש בתכולת החמצן שבין העורק לוריד

וריד

מנוחה - 15 מ"ל
מאמץ - 2-5 מ"ל
ב - 100 מ"ל דם



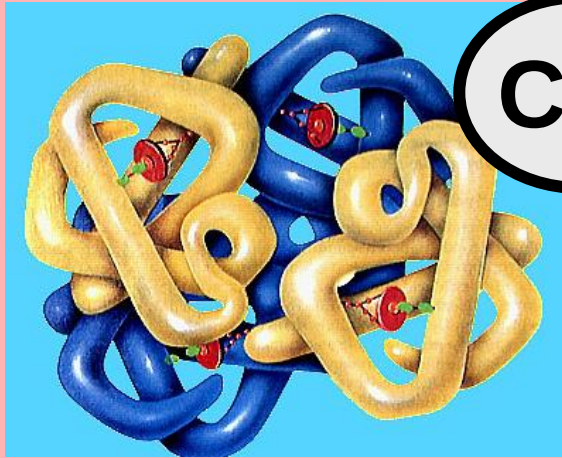
עורק

מנוחה - 20 מ"ל
מאמץ - 20 מ"ל
ב - 100 מ"ל דם

מנוחה - 5 מ"ל/100 מ"ל דם

מאמץ מרבי - 15-18 מ"ל/100 מ"ל דם

העברת CO_2 בדם



CO_2

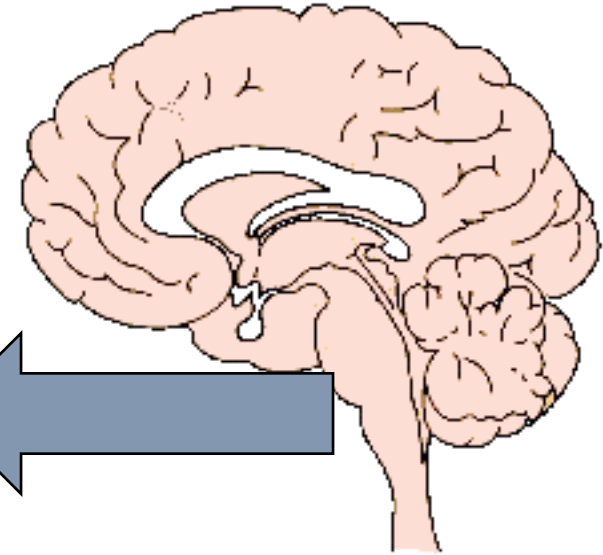
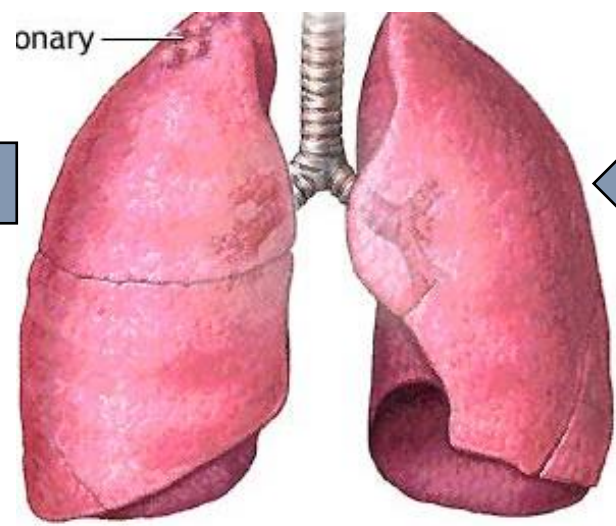
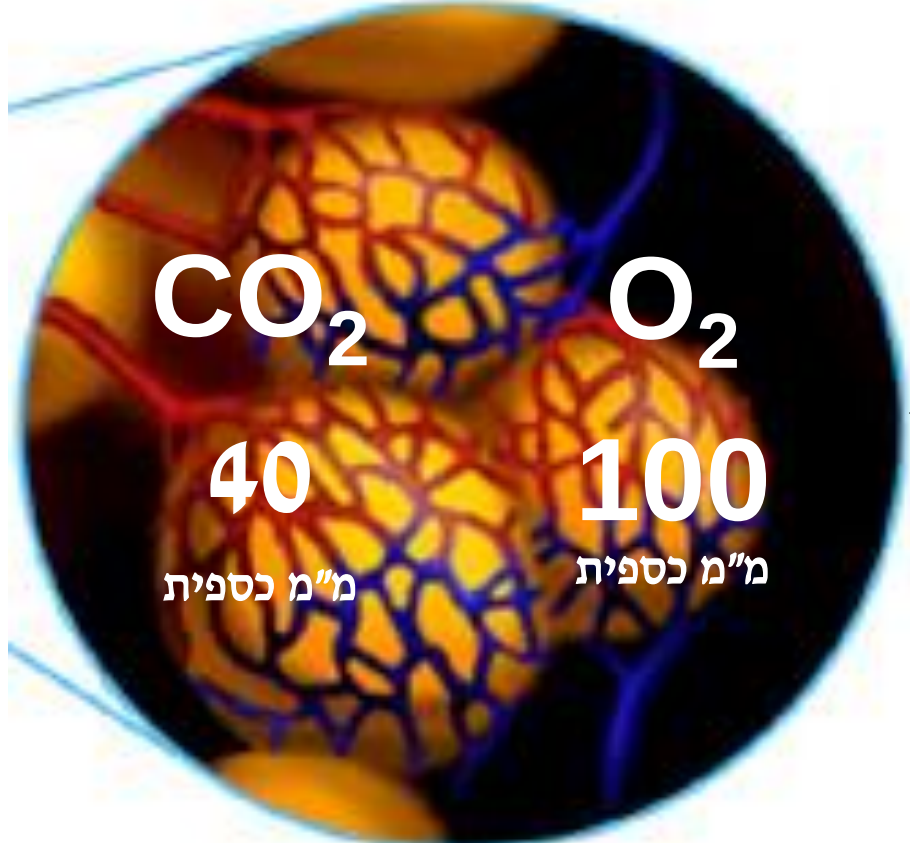
CO_2

5% - מומס

35% - קרבאמינו

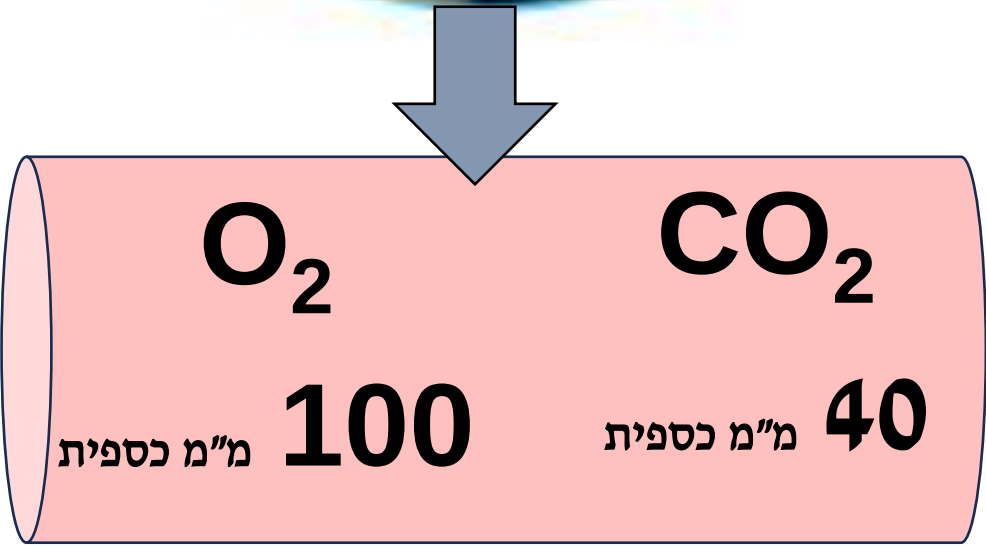


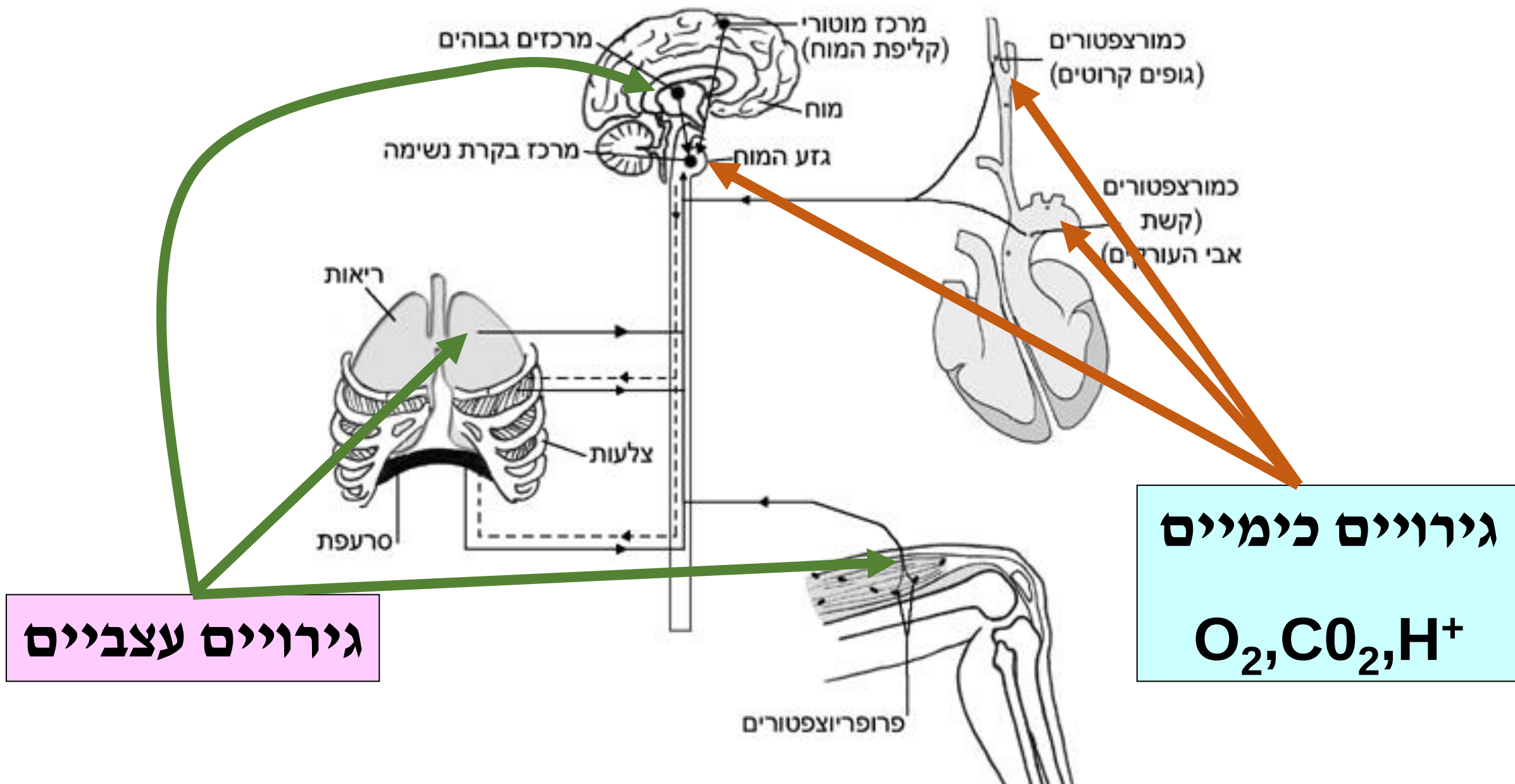
65% - יון ביקרבונט



מרכז
בקרת
הנשימה

אוורור ריאתי
 $(V_t * f = V_E)$

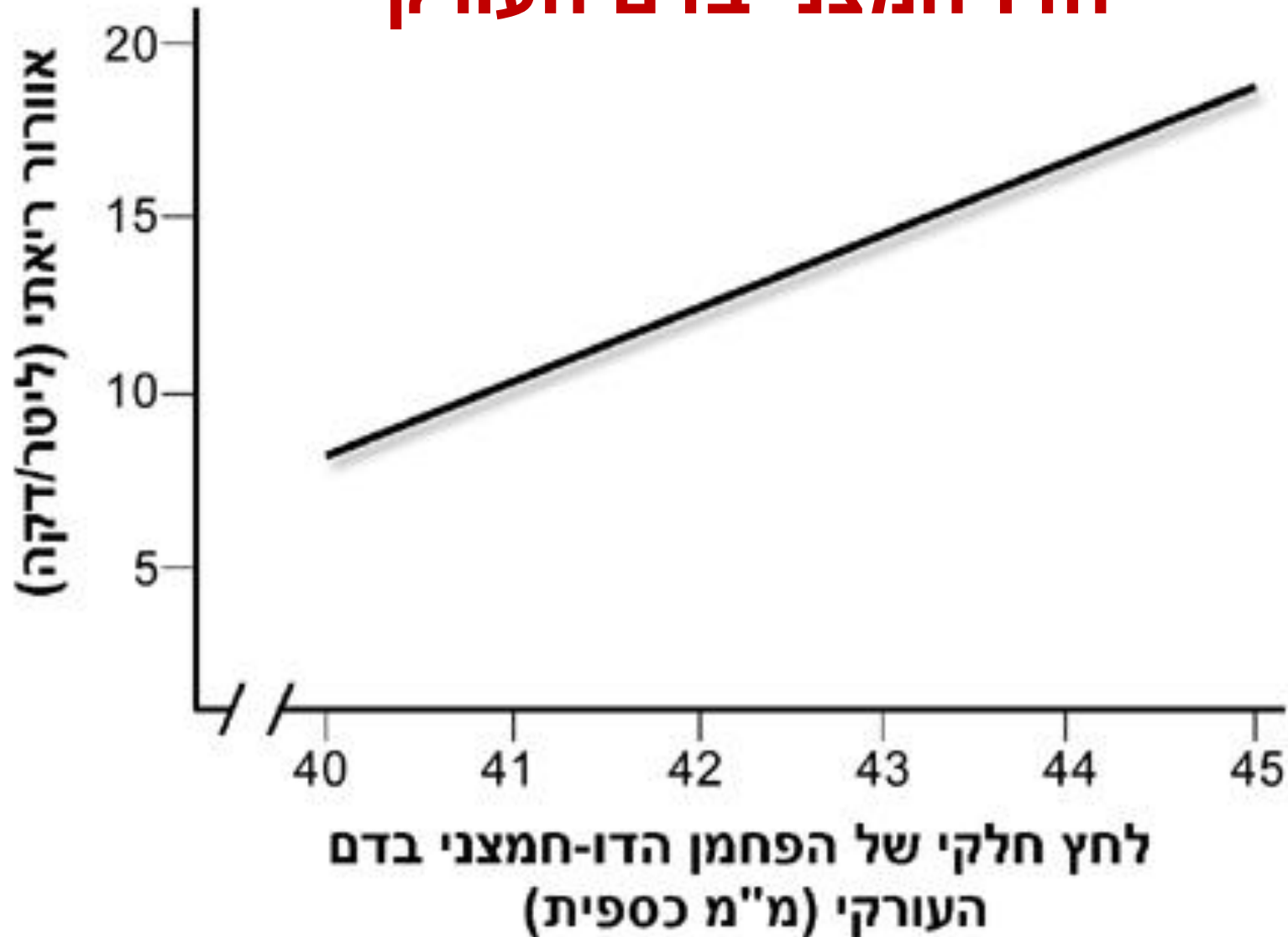




מנגנוני ויסות ובקרה של תהליך הנשימה

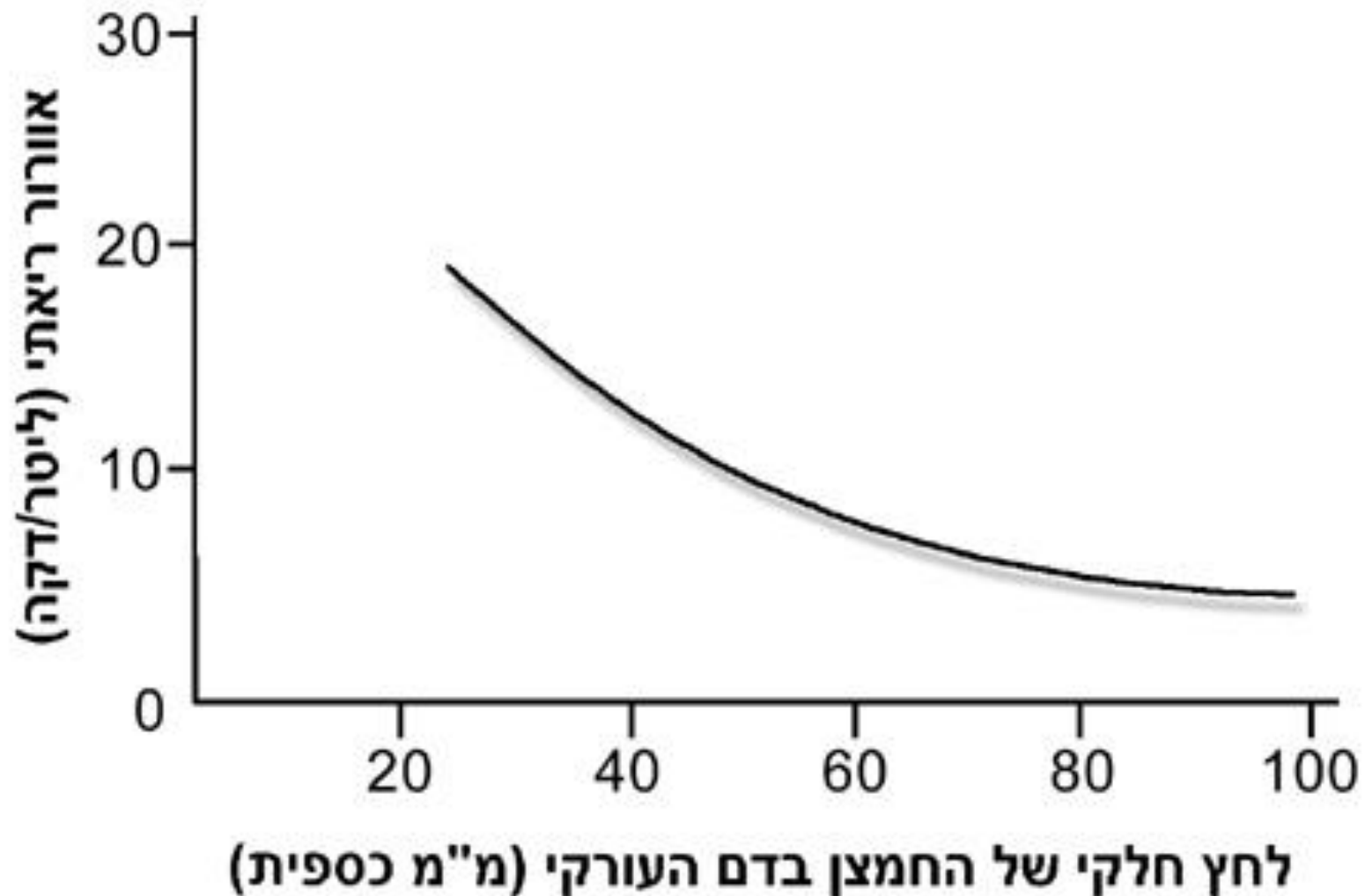
השינוי באורור הריאתי עם העלייה בלחץ החלקי של הפחמן

הדו-חמצני בדם העורקי



השינוי באזור הריאתי עם הירידה בלחץ החלקי של החמצן

בדם העורקי



סקר המרכז הלאומי לבקרת מחלות משנת 2020

- שיעור המעשנים בישראל בגיל 21 ומעלה עומד על כ- 20.1%.
- שיעור העישון באוכלוסייה הערבית הוא 24.4% ובאוכלוסייה היהודית 19.1%.
- שיעור העישון בקרב גברים (25.6%) גבוה מהשיעור בקרב נשים (14.8%).
- בכל שנה נפטרים בישראל למעלה מ- 5,000 איש עקב עישון סיגריות.

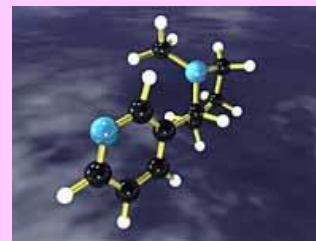
עשן סיגריות מכיל כ- 4,000 תרכובות כימיות



עטרן

CO

פחמן חד-חמצני



ניקוטין

נזקים בריאותיים הנגרמים עקב עישון

- **סרטן** - העטרן מהווה גורם להתפתחות סרטן הריאות, סרטן הגרון, סרטן הפה וסרטן הוושט
- **מחלות בדרכי הנשימה** - דלקת סמפונות כרונית (ברונכיטיס) ונפחת הריאות (אמפיזמה).
- **טרשת העורקים הכליליים** - קשורה לפחמן חד-חמצני בעשן הסיגריות.
- **עלייה בלחץ הדם** - הניקוטין מגרה את בלוטת יותרת הכליה להפריש אפינפרין שגורם להתכווצות כלי דם, לעליית קצב הלב, לעלייה בלחץ הדם ולהגברת העומס על הלב.
- **פגיעה בעוברים** - עישון בתקופת ההיריון פוגע בבריאות האישה ובבריאות תינוקה. נראה שקיימת השפעה שלילית על התפתחותם הגופנית, הנפשית והאינטלקטואלית של ילדים לאימהות שהרבו לעשן בתקופת ההיריון.

שכיחות טרשת העורקים הכליליים אצל אנשים שאינם מעשים ואצל מעשנים

שכיחות טרשת העורקים הכליליים (אחוזים %)



נזקים בריאותיים הנגרמים עקב עישון

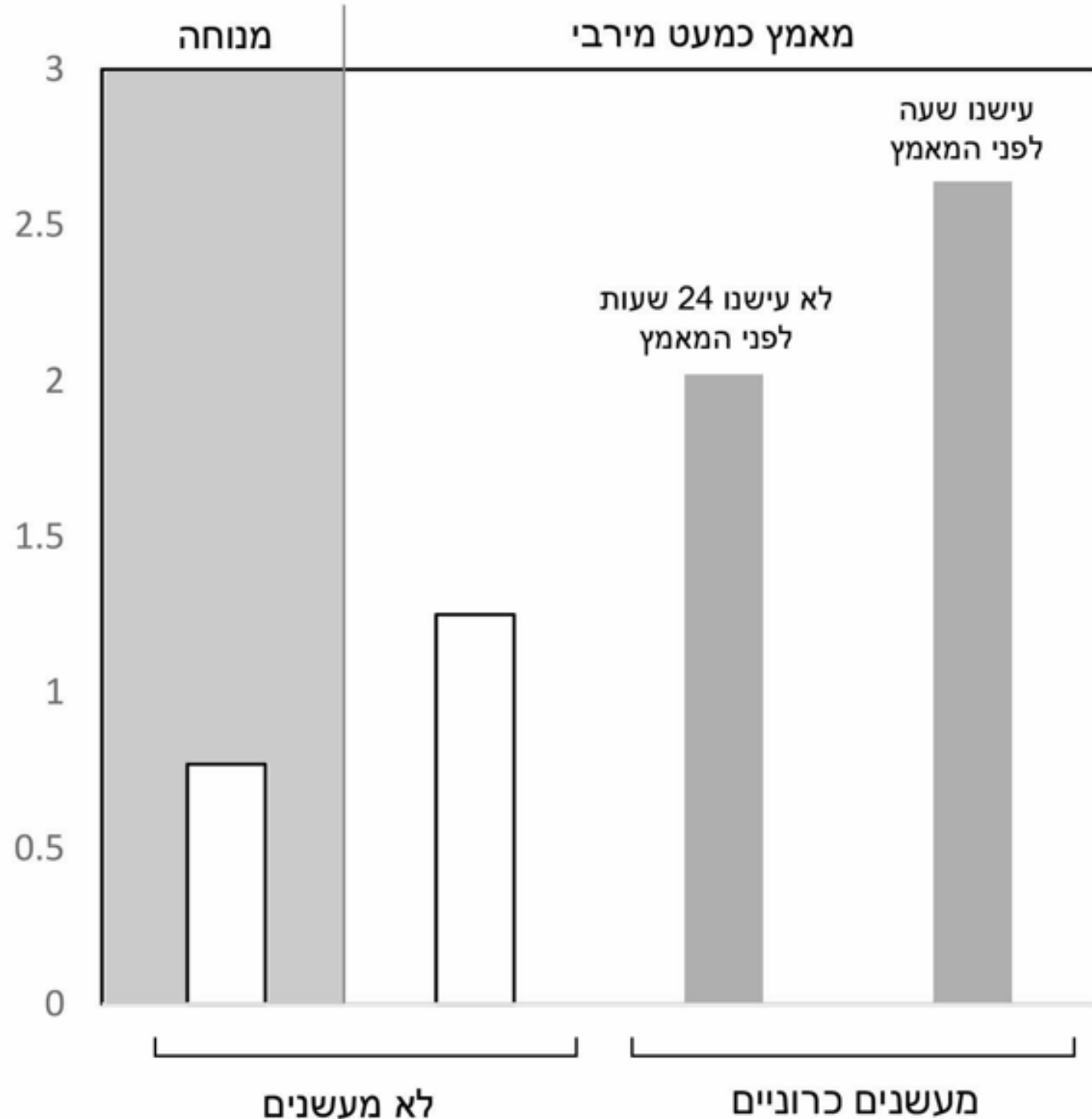
- **נזק למנגנון הניקוי של האוויר -** החומרים שבעשן גורמים לשיתוק הדרגתי של פעולת הריסים. בלימת פעולת הריסים מאפשרת למרכיבי העשן, לאבק ולחיידקים לפגוע בריאות ובדרכי הנשימה וליצור בהן מוקדי מחלות. בנוסף, חומרים אלו מגרים את דרכי הנשימה להפריש ריר (ליחה), העלול לגרום לחסימתן באופן חלקי או מלא. שיעול הבוקר של המעשנים הוא ניסיון לנקות את הריר החוסם את דרכי הנשימה.

- **הגברת חילוף החומרים -** הניקוטין מאיץ את תהליכי חילוף החומרים במנוחה ומעלה את רמת ההורמונים נוראפינפרין ואפינפרין שמגבירה את השימוש בחומצות שומן לצורך הפקת אנרגיה. הגברת חילוף החומרים בכלל והגברת השימוש בחומצות שומן בפרט מעלות את צריכת החמצן של המעשן.

עישון ואוורור ריאתי במאמץ

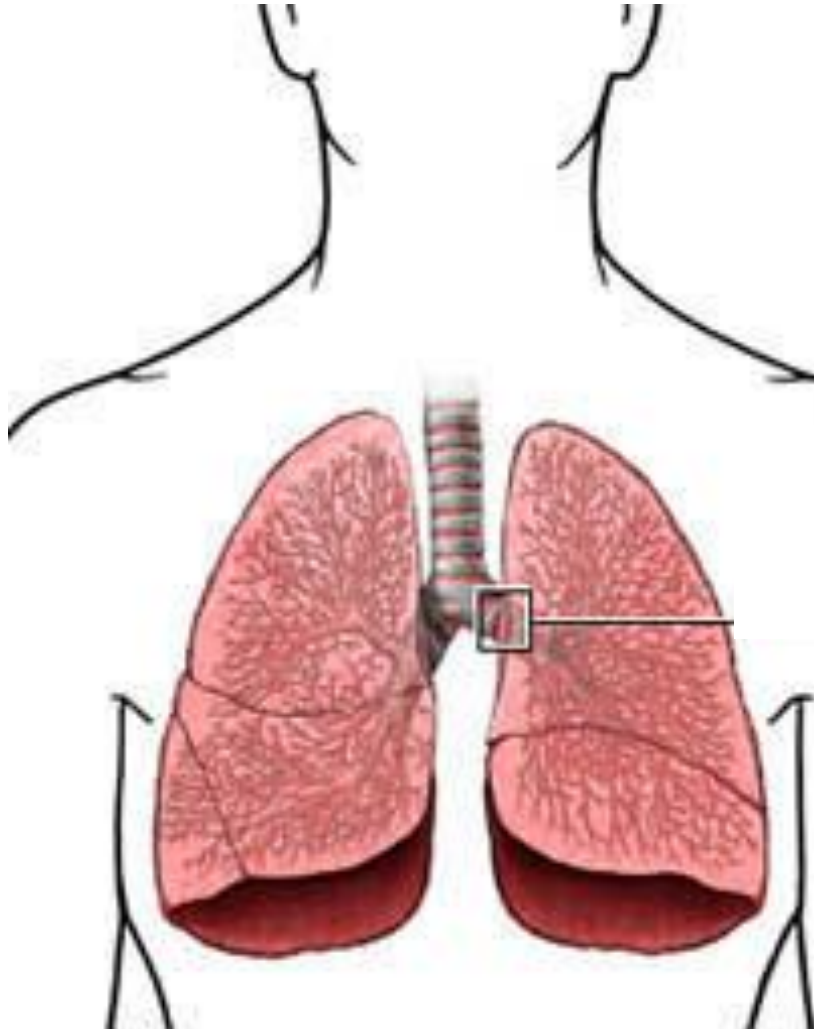
- עישון גורם לעלייה בהתנגדות דרכי הנשימה שנובעת מההפרשה המוגברת של הליחה ומהתכווצות השרירים החלקים בדרכי הנשימה. עקב כך שרירי הנשימה צריכים לעבוד קשה יותר במטרה לאוורר את הריאות בכמות נתונה של אוויר.
- להמוגלובין זיקה גבוהה יותר לקשור פחמן חד-חמצני בהשוואה לזיקתו לחמצן. במצב שבו נוכחים גם חמצן וגם פחמן חד-חמצני כמו בעת עישון סיגריה, הפחמן החד-חמצני ייקשר לאתר הקישור של החמצן להמוגלובין וימנע את היקשרות החמצן. היקשרות הפחמן החד-חמצני אצל מעשנים כרוניים כבדים יכולה להפחית עד 10% את יכולת הנשיאה של החמצן בדם. הפחמן החד-חמצני נקשר גם למיוגלובין שבשריר ופוגע ביכולת של השריר לאגור חמצן ולמצות את החמצן מהדם.

עלות אנרגטית של האורור הריאתי
(מילימטר חמצן/ליטר אורור)



**העלות האנרגטית של
האורור הריאתי אצל
לא מעשנים ומעשנים**

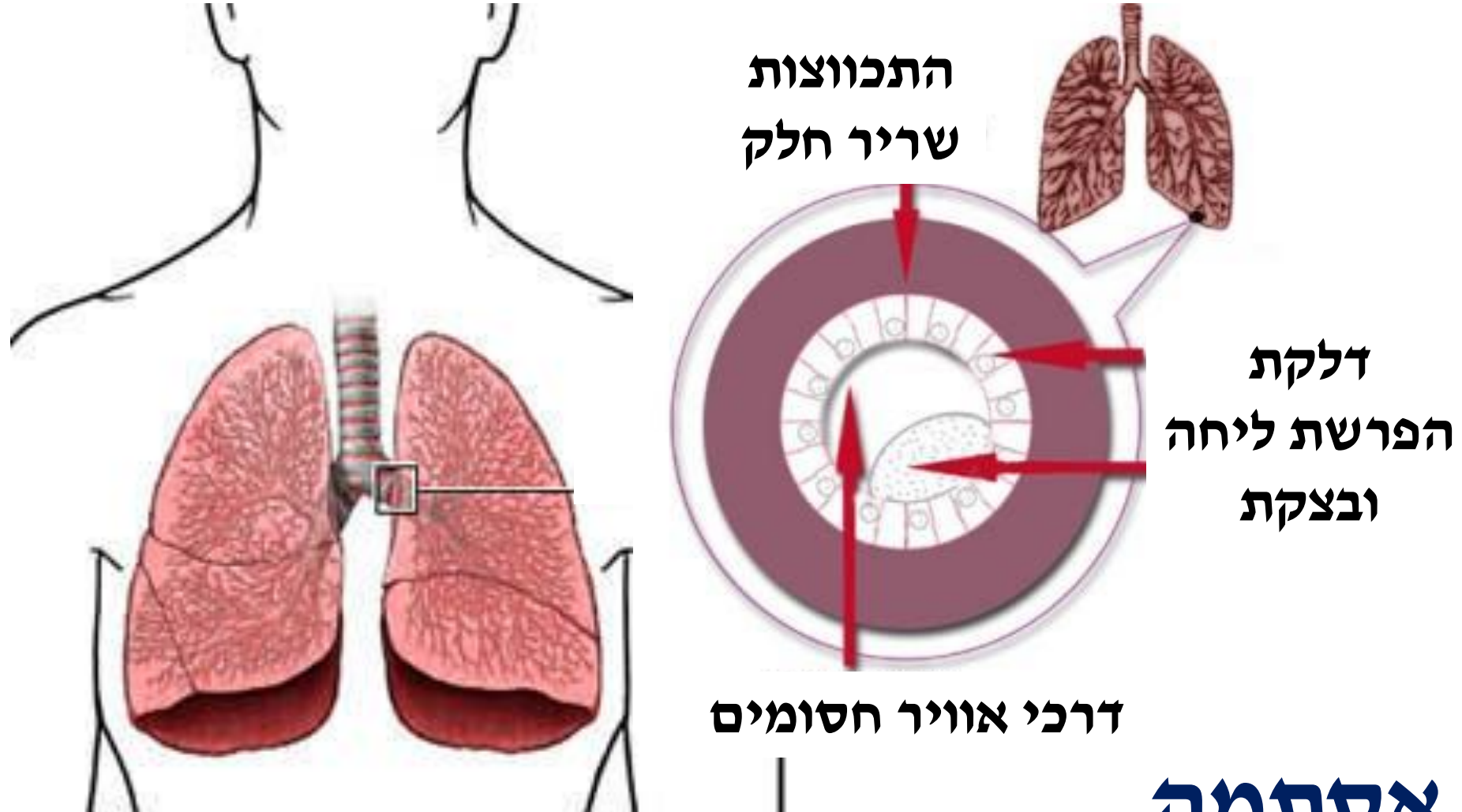
אסתמה - מחלה חסימתית נשימתית



דרכי אוויר פתוחים

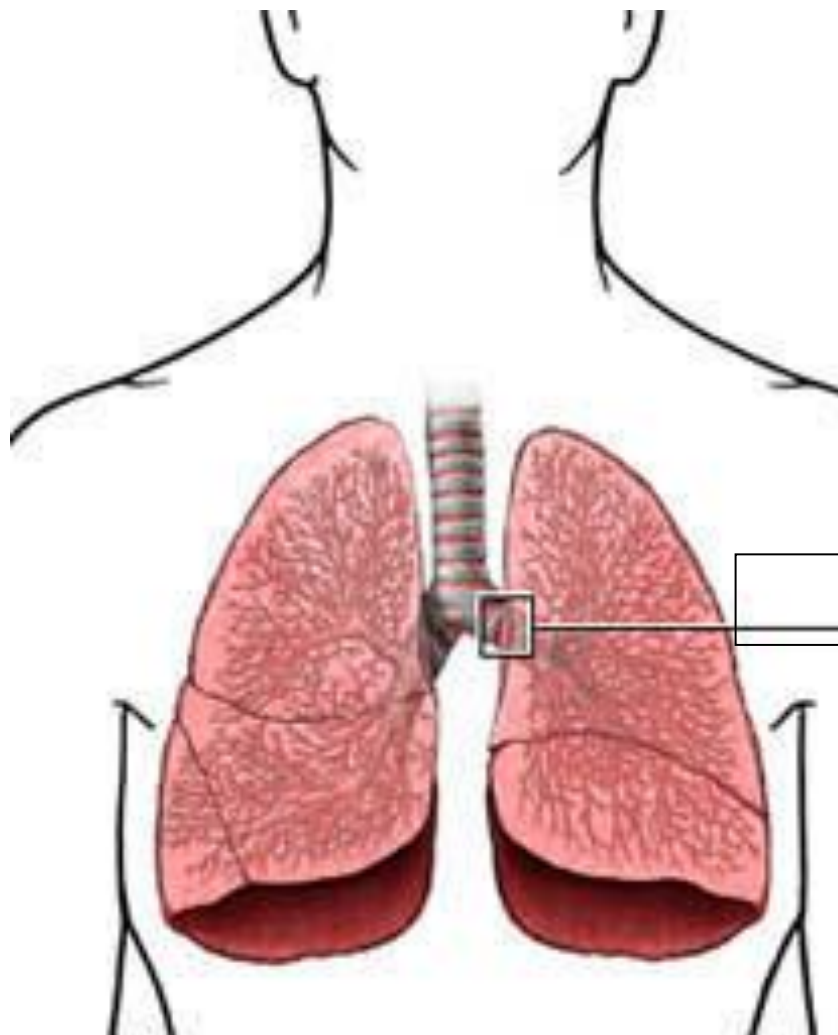
מצב תקין

אסתמה - מחלה חסימתית נשימתית



התקף אסתמה

אסתמה - מחלה חסימתית נשימתית



התקף אסתמה

(אנימציה)

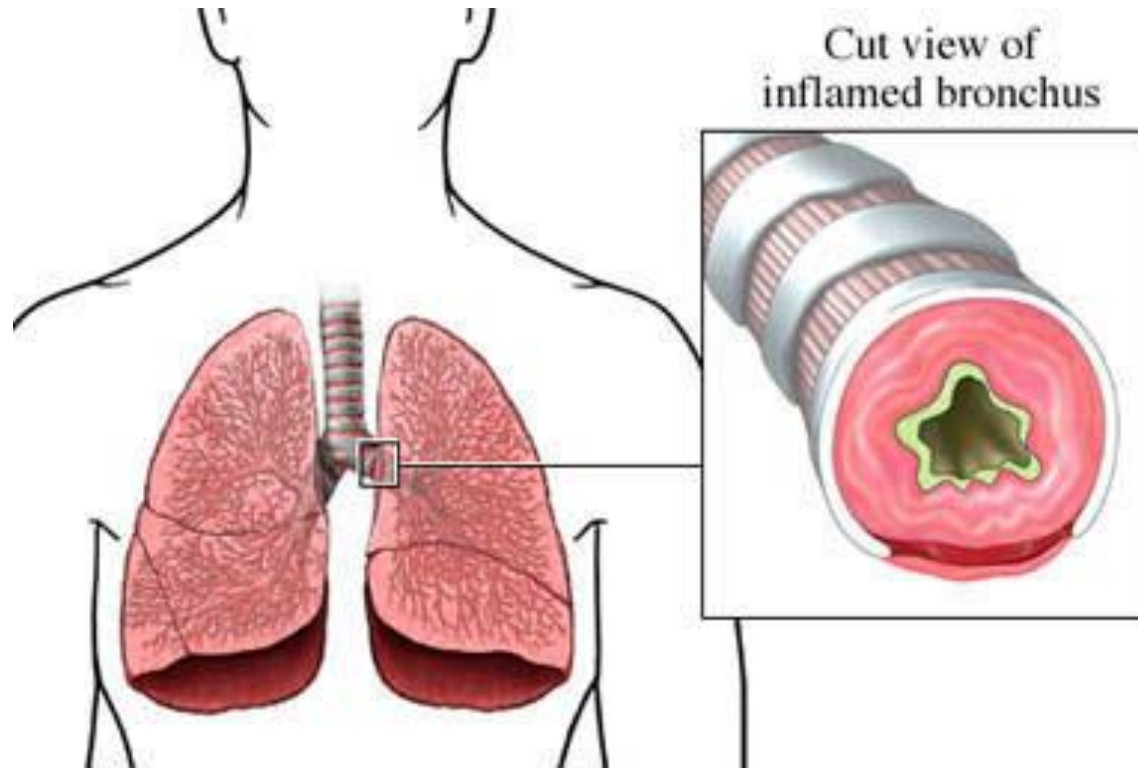


סימני התקף אסתמה:

• קוצר נשימה

• קולות צפצוף

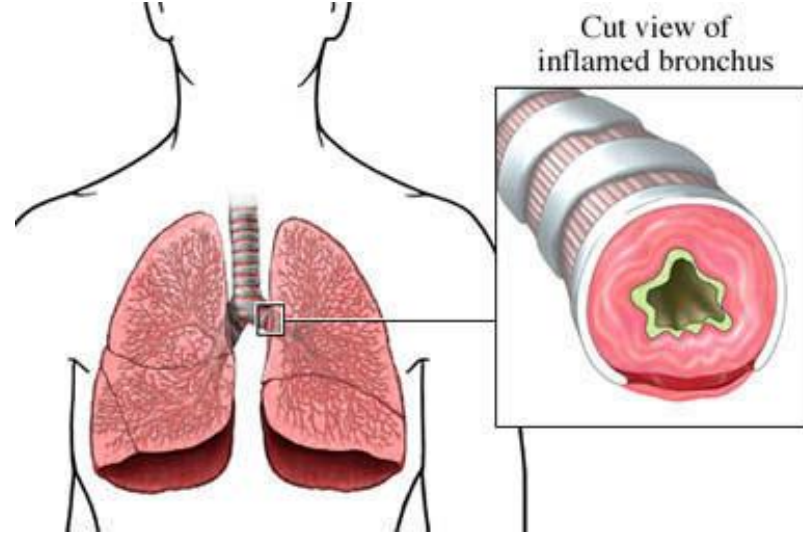
• תחושת חנק



גורמי המחלה - תגובה אלרגית ורגישות יתר של הסמפונות לגירויים



מאמץ גופני



אבקני פריחות

קרדית האבק



שינויים רגשיים

חומרים
כימיים



חומרים
שבפרוות
חיות

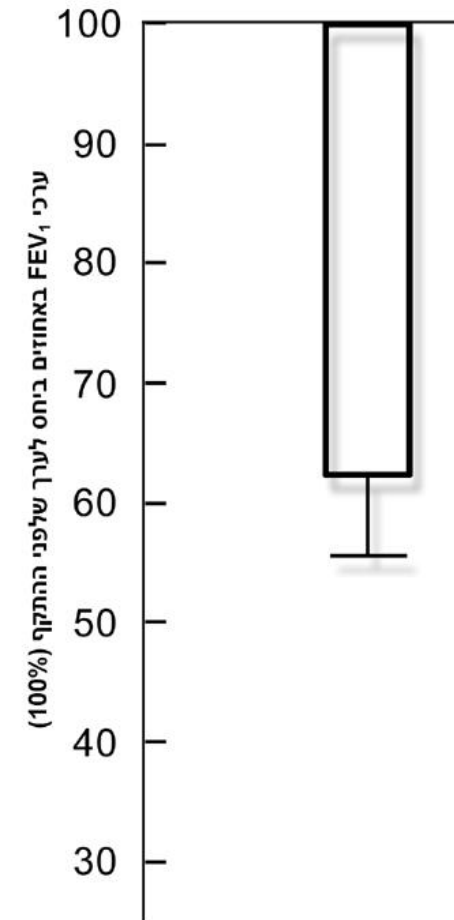
FEV1 - מדד להערכת חומרת התקף האסתמה



FEV1/FVC

80%-85% - נורמה

70% < - חסימה



**השינוי ב- FEV1 אצל ילדים
חולי אסתמה בעקבות התקף**

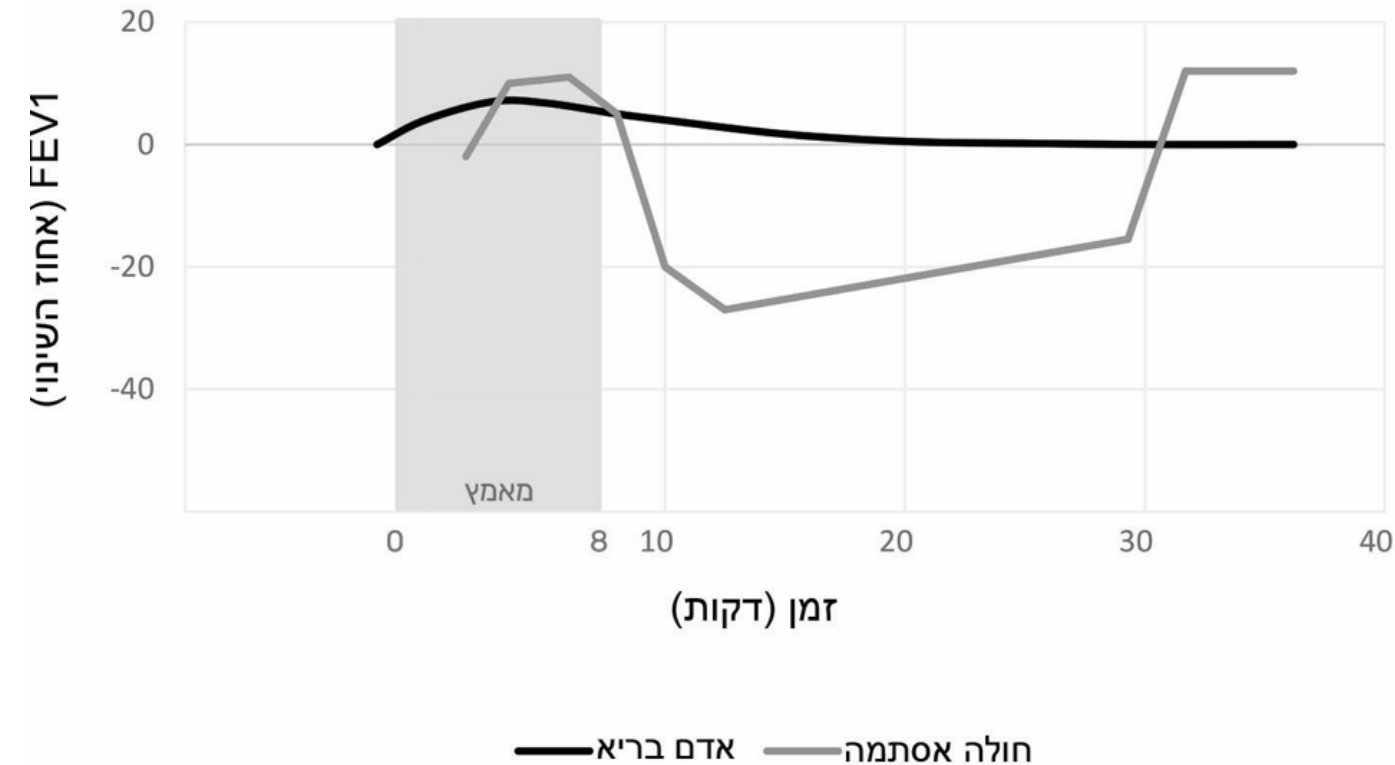
טיפול תרופתי מיידי במחלה



חומרים מרחיבי סמפונות



התקף אסתמה בעקבות מאמץ גופני (EIA)



השינויים בערכי FEV1 במאמץ ואחריו

- 1-3 דק': התרחבות דרכי הנשימה

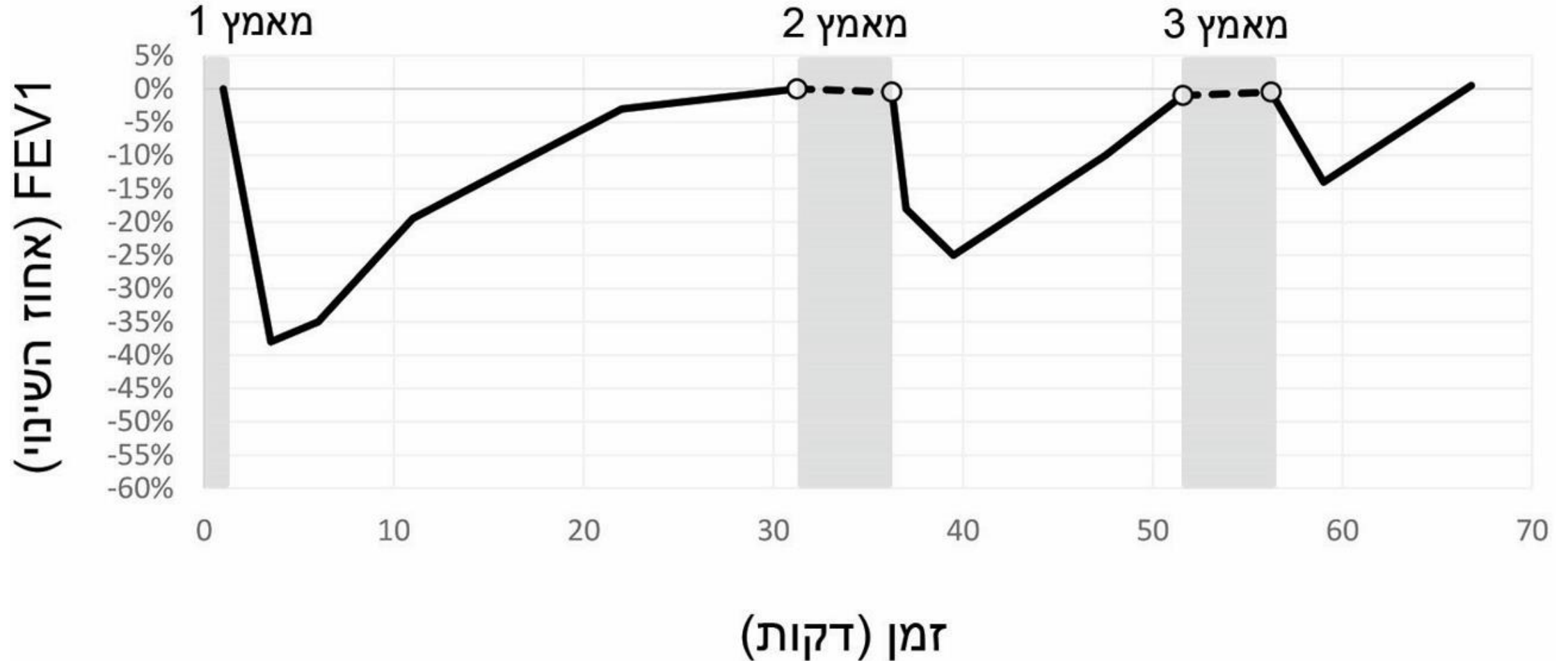
- החל מדק' 3-4 הצרות שמגיעה

לשיאה 5-10 דק' מסיום המאמץ

ההתקפים החזקים נגרמים עקב מאמצים עצימים (80%-100%) שנמשכים 6-10 דק'

תקופת עמידות בעקבות התקף שלאחר מאמץ

(1-2 שעות לאחר התקף)



עוצמות התקפי האסתמה לאחר שלושה מאמצים שבוצעו במהלך שעה אחת



**סוגי מאמץ שגורמים
להתקפים חזקים**

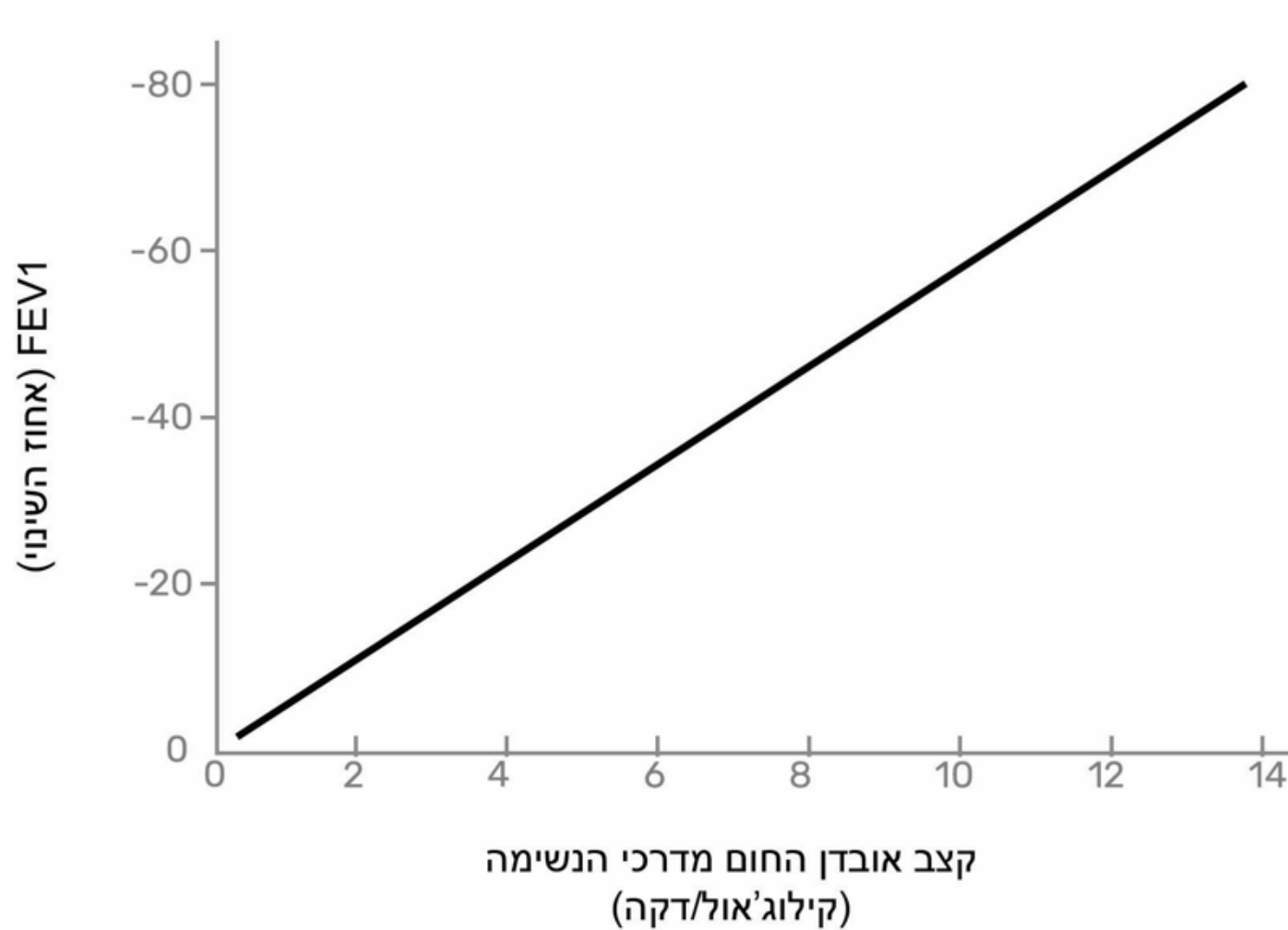


**סוגי מאמץ שגורמים
להתקפים חלשים**

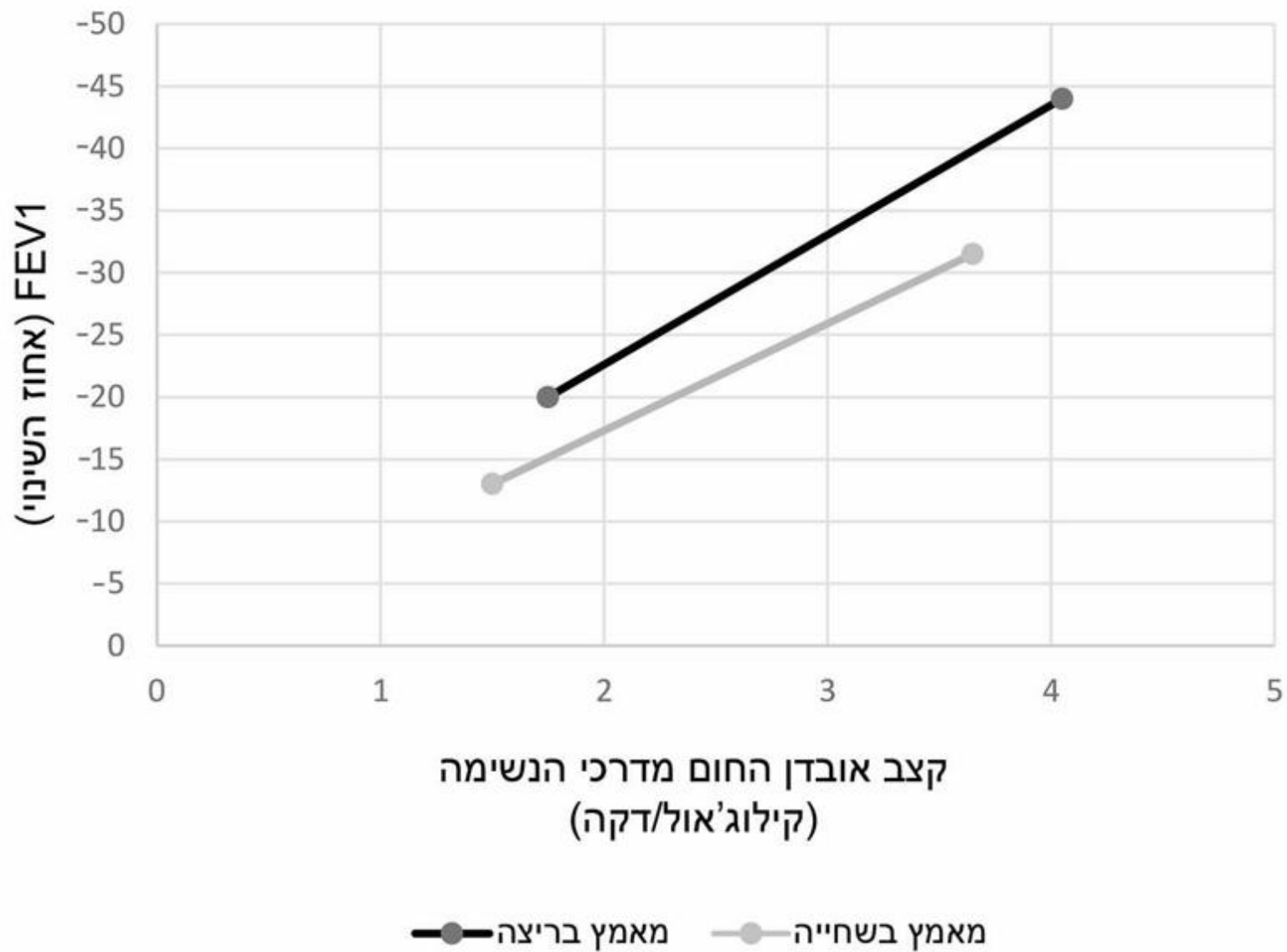


ההתקפים החזקים נגרמים במאמצים עצימים (80%-100%) שנמשכים 6-10 דק'

מאמץ גופני כטריגר להתקף אסתמה



הקשר שבין אובדן החום מדרכי הנשימה במאמץ לעוצמת התקף האסתמה



עוצמת התקפי האסתמה בעקבות מאמצי ריצה ושחייה שנעשו תוך נשימת אוויר יבש ואוויר לח

יתרונות האימון הגופני לחולה אסתמה

- הקטנת האוויר הריאתי במאמץ נתון = העלאת סף המאמץ שיביא להתקף
- שיפור הדימוי העצמי והביטחון העצמי

ענפים בסיכון גבוה



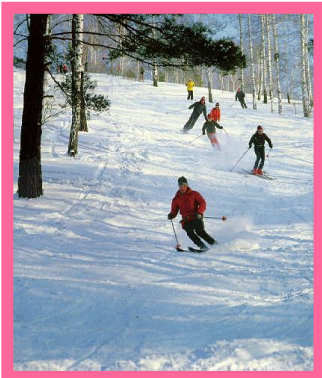
רכיבה



ריצה



הוקי



סקי

ענפים בסיכון נמוך



גולף



כדורעף



שחייה



סופטבול



כדורגל



טניס

