

תזונת ספורט ופיזיולוגיה של המאמץ

מערכות אנרגיה, אימון, תזמון נוטריינטים, הידרציה ותוספים

כרך נושאי



תזונת ספורט ופיזיולוגיה של המאמץ

מערכות אנרגיה, אימון, תזמון נוטריינטים, הידרציה ותוספים

ספר למידה מקיף בעברית: הסבר תיאורטי, מנגנונים, טבלאות השוואה, תרשימי זרימה, מפות גוף, מבנים מולקולריים, מקרים קליניים ומחקר עדכני.

לפני שמתחילים

⚠ הבהרה

הספר הוא חומר לימודי והעשרתי בלבד. המידע בו אינו מהווה ייעוץ רפואי, אבחון או המלצה לטיפול, ואינו מחליף התייעצות עם רופא או מטפל מוסמך. אין להפסיק או לשנות טיפול תרופתי ללא התייעצות עם הרופא המטפל. צמחי מרפא ותוספי תזונה עלולים לגרום לתופעות לוואי ולאינטראקציות עם תרופות, במיוחד בהריון, בהנקה, בילדים ובמחלות כרוניות.

כל הדוגמאות והמקרים בספר בדויים ונועדו להמחשה בלבד. הסימון • ליד צמח מציין שקיימת עליו מונוגרפיה מלאה.

איך להשתמש בספר

כל פרק בנוי מנושאים מרכזיים, ובתוכם הסבר תיאורטי, מנגנונים, טבלאות השוואה, תרשימי זרימה, מפות גוף ומבנים מולקולריים. בסוף הנושאים – עזרי למידה, ובסוף כל פרק – מפת פרק, סיכום, מילון מונחים ושאלות לחזרה.

📌 דגש קליני / טיפ לימודי

נקודות חשובות לקליניקה ולמבחן.

🔬 מנגנון פיזיולוגי / מחקרי

הסבר המנגנון ותוצאות מחקרים.

🧐 מה אומר המחקר העדכני

סיכומי ראיות מסקירות שיטתיות והנחיות רשמיות, עם ציון המקור.

🧠 טריק לזכירה

עוגנים, ראשי תיבות ואנלוגיות.

🔄 מקרה קליני

תרגול יישומי עם פתרון.

✅ בדקי את עצמך

שאלות קצרות עם תשובות.

תוכן העניינים

פיזיולוגיה של המאמץ ותזונת ספורט	
4	מבוא: פעילות גופנית, כושר גופני ובחירת אימון 🏆
56	עקרונות האימון 📊
62	מערכות האנרגיה: ATP ושלושת המסלולים ⚡
65	צריכת חמצן במאמץ, EPOC, צח"מ ודופק 📈
67	התעייפות, התאוששות, כאבי שרירים ואימון יתר 🔥
71	המערכת ההורמונלית במאמץ ו-mTOR 🧠
76	האימון האירובי 🏃
82	אימון כוח / התנגדות 🏋️
95	הוצאה אנרגטית אצל מתאמנים: מרכיבים, הערכה ומדידה 📊
96	הרכב גוף, אחוזי שומן והיקף מותניים 🦴
97	מאקרו־נוטריינטים לספורטאים ופחמימות בספורט 🍷
99	
4	חלבון ולאוצין בספורט 🐟
62	שומן, MCT, אומגה 3 ומערכת העיכול באימון 🥑
65	תזמון נוטריינטים (Nutrient timing) 🕒
67	מים והידרציה בפעילות גופנית 💧
71	נוגדי חמצון, רדיקלים חופשיים ומיוקינים 🛡️
76	פעילות גופנית בבריאות ובחולי 🩸
82	תוספי תזונה בספורט 💊
95	מפת הפרק 🗺️
96	סיכום הפרק בעמוד אחד 📌
97	מילון מונחים 📖
99	שאלות לחזרה 📝



פיזיולוגיה של המאמץ ותזונת ספורט

פרק זה עוסק בגוף האדם בזמן תנועה, ובתזונה שמאפשרת לו לנוע טוב יותר, להתאושש ולהסתגל. נפתח בהגדרות היסוד – מהי פעילות גופנית, מהו כושר גופני ומהם עקרונות האימון – ונעבור לפיזיולוגיה של המאמץ: שלושת מסלולי הפקת האנרגיה (א-לקטי, לקטי ואירובי), צריכת החמצן לפני המאמץ, במהלכו ואחריו (גרעון חמצן, מצב יציב, EPOC), צריכת חמצן מרבית (צח"מ), דופק מטרה ודופק מרבי, התעייפות והתאוששות, כאבי שרירים, אימוני יתר והמערכת ההורמונלית (כולל mTOR). לאחר מכן נלמד לעומק את האימון האירובי ואת אימון הכוח/ההתנגדות, נכיר את מרכיבי ההוצאה האנרגטית ושיטות להערכתה, ואת שיטות מדידת הרכב הגוף ואחוזי השומן (אנתרופומטריה במאמץ). החלק השני של הפרק מוקדש לתזונת הספורט: חלוקת מאקרו-נוטריינטים לספורטאים, פחמימות (יומיות, העמסה, לפני ובמהלך מאמץ), חלבון ולאוצין, DIAAS, טבעונות, שומן, MCT ואומגה 3, מערכת העיכול באימון ותזמון נוטריינטים; מים והידרציה; נוגדי חמצון, רדיקלים חופשיים ומיוקינים; פעילות גופנית בבריאות ובחולי; ולבסוף תוספי תזונה ארגוניים – מה עובד (קריאטין, קפאין, ביקרבונט, בטא-אלאנין, אבקות חלבון) ומה לא. זהו פרק מעשי מאוד: נטורופתית מלווה מטופלים שרבים מהם מתאמנים, ועליה לדעת לתרגם פיזיולוגיה להמלצה תזונתית מדויקת, מבוססת, ביקורתית ובטוחה.

מבוא: פעילות גופנית, כושר גופני ובחירת אימון

תחום הפעילות הגופנית ותזונת הספורט נשען על כמה הגדרות יסוד, ובלעדיהן אי אפשר להבחין בין סוגי אימון, לבחור אימון מתאים למטופל או להתאים לו תזונה. הנושאים המרכזיים בתחום הם **אנתרופומטריה, הערכה מדויקת יותר של ההוצאה הקלורית, התאמת ההמלצות התזונתיות למתאמנים, יסודות בפיזיולוגיה של האימון ותוספים**. כרקע מומלץ לרענן את עקרונות התזונה במעגלי החיים ואת הביוכימיה של המסלולים ליצירת אנרגיה (ולמי שאינה מכירה אותם, הם מוסברים בהמשך הפרק).

בחלק זה נגדיר מהי פעילות גופנית, נסקור את סוגי הפעילות ואת מטרותיה, נציג את המלצות ה-WHO ונתונים על היקף הפעילות בישראל, ונראה כיצד בוחרים סוג פעילות מתאים.

הגדרות יסוד

מושג	הגדרה	הערות
פעילות גופנית (Physical Activity)	כל תנועה של הגוף שמבוצעת על ידי שרירי השלד ומביאה להוצאת אנרגיה.	כולנו עוסקים בפעילות גופנית במידה כלשהי; ההבדל בין אנשים הוא בהיקף שלה.
כושר גופני – לאדם שאינו ספורטאי	אוסף של תכונות גופניות שקובעות עד כמה אדם מסוגל לבצע את מטלות היום-יום ואת תפקודיו בחינויות ובערנות.	במילים אחרות: היכולת לעמוד בדרישות של חיי היום-יום, של שעות הפנאי וכדומה.
כושר גופני – לספורטאי	אוסף של תכונות גופניות שקובעות את יכולתו של ספורטאי להגיע להישגים בענף הספורט שבו הוא עוסק.	להבחנה בין "ספורטאי" (Athlete) ל"מתאמן" (Exerciser) ראו את מאמר ה-ACC משנת 2016.
תרגול גופני / אימון (Training)	פעילות גופנית מתוכננת ומובנית, שחוזרת על עצמה, ומטרתה לשפר או לשמר מרכיב אחד או יותר של הכושר הגופני.	אימון גופני הוא תהליך שלם, הכולל את התרגול עצמו, את המנוחה וההתאוששות ואת התזונה הנלווית.

מיהו המתאמן?

השאלה הראשונה בליווי תזונתי היא "מיהו המתאמן שמולי?". הדרך הפשוטה ביותר להבחין היא לשאול: **האם הוא מתאמן לתחרות (בתוך איגוד) – או לא?** ואם לא – יש לבצע הערכה מול ההוצאה האנרגטית וסוג האימון. ההבחנה חשובה, כי רבות מההמלצות בהמשך הפרק (טעינת פחמימות, תזמון אכילה, חלק מהתוספים) רלוונטיות בעיקר לספורטאים תחרותיים ולא לציבור המתאמן הרחב.

אילו פעילויות קיימות – ואיך מבדילים ביניהן?

בין סוגי הפעילות הנפוצים: ריצה, שחייה, רכיבה על אופניים, הרמת משקולות, התעמלות, יוגה, ספינינג, פילאטיס וטריאתלון ("איש/אשת ברזל"). כדי להבחין ביניהם נעזרים בשלושה צירים:

- **מערך מטבולי** – כיצד מגיעה האנרגיה להניע את הפעולה? האם בעיקר מהמסלול האנאירובי, או בעיקר מהאירובי?
- **עצימות** – האם הפעילות בעצימות נמוכה, בינונית או גבוהה? (בפיזיולוגיה נרחיב על העצימות ועל כמות החמצן הדרושה כדי ליצור די אנרגיה).
- **מרכיבי כושר** – האם האימון נועד לשפר סבולת? לכוון בעיקר לעליית מסת שריר (היפרטרופיה)? אולי לגמישות? האם אפשר הכול יחד?

פעילות אחת יכולה לערב מספר רכיבים מכל אחת מהקטגוריות, אך תהיה לה דגש עיקרי.

דוגמאות

דוגמה 1 – אימון משקולות קלאסי מבוסס סטים: בעיקרו אנאירובי בעת הפעילות; לרוב יתכוונן לעבודה על רכיבי הכוח ומסת השריר, בעצימות בינונית-גבוהה בעת ביצוע הפעולות; אך עם מנוחה אירובית, מעט שיפור בגמישות וכו'.

דוגמה 2 – ספינינג: האימון מפתח בעיקר סבולת. כשהוא ארוך דיו הוא נשען בבירור על המטבוליזם האירובי, אבל פרצי המאמץ שבו הם אנאירוביים במהותם. השפעתו על מסת השריר בדרך כלל זניחה, אם כי במקרים מסוימים היא עשויה להיות משמעותית.

מרכיבי הכושר הגופני

גמישות טווח תנועה במפרקים	מהירות ביצוע תנועה בזמן קצר	כוח יכולת לגבור על התנגדות	סבולת יכולת להתמיד במאמץ לאורך זמן
		זריזות שינוי כיוון מהיר ומבוקר	קואורדינציה ושיווי משקל שליטה ותיאום תנועה

(ההסברים הקצרים בכרטיסים הם הגדרות עזר. להבנת הפיזיולוגיה של השריר מומלץ להיעזר גם בסרטוני הסבר מונפשים.)

למה כדאי לעשות פעילות גופנית? (כל כך הרבה סיבות!)

מחקרים רבים תיעדו את התרומות של פעילות גופנית לבריאות, ובהן:

1. מניעה והקלה על כאבי גב תחתון.
2. הפחתת הסיכון לסרטן.
3. הפחתת הסיכון לתמותה כללית, לתמותה לבבית ולהשמנת יתר.
4. העלאת מסת שריר – החשובה בגיל המבוגר.
5. חיזוק מסת העצם.
6. שיפור המצב הנפשי.
7. הפחתת הסיכון למחלות אוטואימוניות.

ויש עוד סיבות רבות נוספות. על המנגנונים נרחיב בחלק "פעילות גופנית בבריאות ובחולי".

כמה עדיף להתאמן? המלצות WHO ומשרד הבריאות

2 בשבוע אימוני כוח בנוסף	≤ 10 דק' ברצף בכל פעם	150 דק'/שבוע או פעילות מתונה	75 דק'/שבוע פעילות מאומצת (בני 18–64)
------------------------------------	---------------------------------	--	---

ארגון הבריאות העולמי (WHO) ומשרד הבריאות ממליצים למבוגרים בני 18–64 על אחת משתי האפשרויות: 75 דקות שבועיות של פעילות מאומצת, או 150 דקות שבועיות של פעילות מתונה (במקטעים של 10 דקות רצופות לפחות), או שילוב ביניהן. בנוסף מומלצים 2 אימוני כוח בשבוע. רוב ארגוני הבריאות מדברים על 150 דקות בשבוע, ואף 300 דקות, של הליכה או פעילות אירובית, לצד 2 אימוני כוח לפחות. ובכל מקרה, הפעילות הטובה ביותר היא זו שמצליחים להתמיד בה.

כמה מתאמנים בישראל? סקר חברתי 2017

לפי הסקר החברתי של הלמ"ס (2017), זה שיעור בני 20 ומעלה שעוסקים בפעילות גופנית בהיקף המומלץ, בחלוקה לפי מאפיינים נבחרים:

קבוצה	שיעור העוסקים בפעילות לפי המלצות (%)
סך הכול	32
גברים / נשים	27 / 37
גיל 20–44 / 45–64 / 65 ומעלה	29 / 30 / 34
יהודים / ערבים	17 / 35
הכנסה נכנסת: עד 2,000 ש"ח / 2,001–4,000 ש"ח / מעל 4,000 ש"ח	42 / 28 / 17

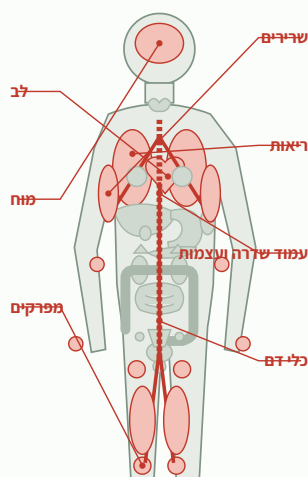
מה לומדים מהתרשים

רק כשליש מהמבוגרים בישראל עומדים בהמלצות. הפערים בולטים במיוחד לפי מגדר (נשים פחות), לפי קבוצת אוכלוסייה (ערבים 17% לעומת יהודים 35%) ובעיקר לפי הכנסה – פי 2.5 בין המעמד הנמוך (17%) לגבוה (42%). מכאן שקידום פעילות גופנית הוא גם סוגיה של צדק בריאותי ונגישות.

איך בוחרים איזה אימון מתאים לי?

בבחירת פעילות כדאי לשאול שתי שאלות, בסדר הזה: **קודם, ממה אני נהנה ומה מתחשק לי? ורק אחר כך, מה המטרה שלי?** (ירידה במשקל, הגדלת מסה, רוגע, בריאות, כוח או מהירות). להלן ההתאמה המקובלת בין מטרה לסוג פעילות:

מטרה	מה מומלץ
הרזיה	גרעון קלורי (מה שאומר שלא חשוב מה), אימוני כוח (לאצירת מסת השריר והעלאתה), אולי אירובי (לא חובה ממש).
העלאת מסת גוף / רכיב הכוח	אימוני כוח, קרוספיט ואימונים ספציפיים לחוויה הרצויה (המשמעות של "מהיר" או "חזק" משתנה מאדם לאדם).
להירגע	כל מה שיגרום להרגיש מדיטיבי – בין אם ברוגע, אירובי, אנאירובי או קרוספיט. בעצם הכול: מה עושה לך רגוע?
אורח חיים בריא באופן כללי	הכול. העיקר – להתמיד.



איפה מרגישים את תרומת הפעילות הגופנית? השרירים והעצמות (מסת שריר ועצם, השלד והמפרקים), עמוד השדרה (מניעה והקלה על כאבי גב תחתון), הלב, כלי הדם והריאות (תמונה לבבית, סבולת לב-ריאה), והמוח (מצב נפשי). אלה האיברים שמאחורי רשימת "למה כדאי לעשות פעילות גופנית" שבפרק.

מה אומר המחקר העדכני

עדכון/השוואה למחקר: בהנחיות WHO המעודכנות (2020) הומלץ למבוגרים על **150-300 דקות** בשבוע של פעילות אירובית בעצימות מתונה, או **75-150 דקות** בעצימות נמרצת (או שילוב), ועל פעילות לחיזוק שרירים **ביומיים או יותר** בשבוע. מעבר לטווחים אלה יש תועלת נוספת (המלצה מותנית).

שינוי חשוב לעומת ההמלצה הוותיקה ("לפחות 10 דקות ברצף"): ההנחיות החדשות **ביטלו במפורש את דרישת 10 הדקות** – פעילות בינונית-נמרצת בכל משך שהוא נחשבת. עוד הודגש שיש להפחית זמן ישיבה, ושהחלפת ישיבה בפעילות בכל עצימות (גם קלה) מועילה. למבוגרים מגיל 65 נוספה המלצה לפעילות רב-רכיבית המדגישה שיווי משקל וכוח תפקודי, 3 ימים או יותר בשבוע, למניעת נפילות.

מקור: Bull FC ועמ', World Health Organization 2020 guidelines on physical activity and sedentary behaviour, British Journal of Sports Medicine, 2020

טריק לזכירה

ששת מרכיבי הכושר כ"מכונית": **סבולת** = גודל מיכל הדלק (כמה זמן נוסעים); **כוח** = כוח הסוס של המנוע; **מהירות** = מהירות מרבית; **גמישות** = זווית ההיגוי של ההגה (טווח התנועה); **קואורדינציה ושיווי משקל** = הנהג; **זריזות** = היכולת לבצע פנייה חדה בלי להחליק. כל אימון "משדרג" חלק אחר של המכונית – ולכן גם בוחרים אימון לפי המטרה.

1. מה ההבדל בין "פעילות גופנית" ל"אימון"? (תשובה: פעילות גופנית היא כל תנועה של שרירי השלד שמוציאה אנרגיה; אימון הוא פעילות מובנית, מתוכננת וחוזרת שמטרתה לשפר/לשמר מרכיב כושר, וכוללת גם מנוחה ותזונה)
2. לפי סקר הלמ"ס 2017, איזו קבוצה רחוקה ביותר מההמלצות? (תשובה: בעלי הכנסה נמוכה (17%) והאוכלוסייה הערבית (17%))
3. מהן שתי השאלות המנחות בבחירת אימון, ובאיזה סדר? (תשובה: קודם – מה כיף לי/מה אני רוצה; אחר כך – מה המטרה שלי)
4. מטופלת רוצה בעיקר לרדת במשקל. מה המרכיב ההכרחי? (תשובה: גרעון קלורי; אימוני כוח לשימור מסת השריר; אירובי – לא חובה)

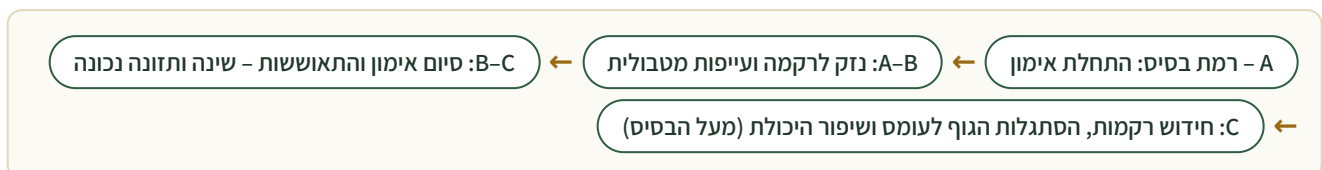
הגנטיקה והאימונים הם המשפיעים על היכולת הגופנית – אבל **האימון הוא הגורם היחיד שעליו ניתן להשפיע** כדי לשפר את היכולת הגופנית. האימון הוא התערבות מכוונת: מפעילים על הגוף עומס, הגוף מגיב בעייפות ובנזק מבוקר לרקמה, ובתקופת המנוחה הוא מתקן ומסתגל – לעתים מעבר לרמה ההתחלתית. כמה עקרונות מנחים את התהליך.

1. עקרון עומס היסך (Overload)

הגוף מסתגל לעומס שמוטל עליו, ולכן כדי לשפר את הכושר צריך להתאמן בעומס גבוה מזה שהגוף כבר רגיל אליו. את העומס מעלים רק אחרי שהגוף הסתגל לעומס הקודם, תהליך שאורך בדרך כלל **2-6 שבועות**.

- דוגמאות לפיתוח סבולת: הגברת קצב / משך ריצה.
- לשיפור הכוח אפשר להגדיל את ההתנגדות, להוסיף חזרות או להוסיף אימון.

עקומת פיצוי-היסך (Supercompensation)



בגרף העקומה יורדת מתחת לקו הבסיס (B) בזמן האימון ועולה מעליו (C) בתום ההתאוששות, ואז דועכת בהדרגה חזרה לבסיס אם לא מגיע גירוי נוסף.

למה זה עובד

האימון עצמו אינו "משפר" – הוא מפרק. השיפור קורה בזמן ההתאוששות, כאשר הגוף בונה מחדש חלבוני שריר, ממלא מאגרי גליקוגן ומגייס תאמות עצביות ומטבוליות. לכן השינה והתזונה הנכונה הן חלק בלתי נפרד מהתהליך, והן מופיעות במפורש בשלב B-C בעקומה.

2. עקרון ההדרגתיות

העלאת העומס צריכה להיות הדרגתית, כדי שהגוף יספיק להתאושש עד האימון הבא ויגיב בפיצוי-יסך ושיפור; קפיצה חדה מדי לא תוביל לשיפור. לדוגמה, באימון סבולת מתחילים ב-**2 ק"מ ריצה ולא ב-5**, ובאימון כוח מי שרגיל להרים **10 ק"ג יעבור ל-12 ולא ל-20**.

3. עקרון הספציפיות

ככל שהפעילות באימון תדמה לפעילות שאותה מעוניינים לשפר, כך יעילות התהליך תהיה גבוהה יותר. דוגמה: **שחיין צריך לשחות בעיקר**.

4. עקרון הגיוון

כדי ליצור שיפור עקבי ומתמשך ביכולת יש לגוון בתהליך האימון את התוכנית, השיטות והעומסים: שינוי שיטות העמסה, החלפת תרגיל לאותה קבוצת שריר, שילוב אימונים קבוצתיים (ואפילו החלפת מוזיקה).

5. עקרון ההפיכות (Reversibility)

עקרון ההפיכות הוא תמונת הראי של פיצוי-היסף: כשמפסיקים להתאמן, הגוף מסתגל מחדש להיעדר העומס והגירוי, והיכולת הגופנית יורדת. כושר גופני אינו נצבר ואינו נשמר לאורך זמן בלי להמשיך להתאמן. המסקנה: תוכנית אימונים טובה היא תוכנית רציפה ועקבית.

6. ההשפעה המעוכבת

- השיפור ביכולת אינו מגיע לשיאו מיד בסוף האימון, אלא מאוחר יותר.
- שיא השיפור משתנה מאדם לאדם, ותלוי בעצימות של כל אימון ובתדירות האימונים ובמרווחים ביניהם.
- אימון עצים יותר טומן בחובו פוטנציאל שיפור גדול יותר, בתנאי שמלווה אותו מנוחה מספקת.
- ספורטאי הישג מפחיתים את עצימות האימונים לקראת תחרות, כדי לנצל את פיצוי-היסף במלואו (בספרות: Tapering).

7. חוק התמורה הפוחתת

גודל פיצוי-היסף עומד ביחס הפוך לרמת הכושר: ככל שהמתאמן מאומן יותר, השיפור שלו קטן יותר, והוא זקוק לעומס גדול יותר כדי להשיג אותו. (מתחילים משתפרים מהר; מתאמנים ותיקים משתפרים לאט וזקוקים לגירוי חזק יותר.)

עיקרון	משמעות פיזיולוגית	יישום מעשי (דוגמאות)
עומס היסף	הגוף מסתגל רק לגירוי גבוה מהרגיל	העלאת עומס אחרי 2-6 שבועות הסתגלות; קצב/משך ריצה; התנגדות/חזרות
פיצוי-היסף	תיקון והסתגלות מעל רמת הבסיס בזמן המנוחה	שינה ותזונה נכונה בשלב ההתאוששות
הדרגתיות	מאפשרת התאוששות עד האימון הבא	2 ק"מ ולא 5; 10 ק"ג – 12 ולא 20
ספציפיות	ההסתגלות תואמת את סוג הגירוי	שחיין צריך לשחות בעיקר
גיוון	גירוי חדש מונע קיפאון	החלפת תרגילים, שיטות העמסה, אימון קבוצתי, מוזיקה
הפיכות	אובדן ההסתגלויות בהפסקת אימון	תוכנית עקבית ורציפה
השפעה מעוכבת	השיפור מגיע אחרי ההתאוששות	הורדת עצימות לפני תחרות
תמורה פוחתת	מתאמן מיומן משתפר פחות	ציפיות מותאמות; עומסים גבוהים יותר

🧠 טריק לזכירה

עקרונות האימון כ"חשבון בנק": האימון הוא **משיכה** (נזק ועייפות – ירידה מתחת לבסיס), ההתאוששות (שינה ותזונה) היא **הפקדה** **עם ריבית** – פיצוי-היסף. אם מושכים שוב לפני שהריבית נכנסה – נכנסים ל"מינוס" (אימון-יתר). אם מפסיקים להפקיד – הריבית נשחקת (הפיכות). ומי שיש לו כבר הרבה כסף בחשבון מרוויח פחות מכל הפקדה (תמורה פוחתת).



שלושה תרחישי תזמון של האימון הבא על עקומת פיצוי-היסף – הדגמה לשילוב עקרונות ההדרגתיות, ההשפעה המעוכבת וההפיכות

רון, בן 35, לא התאמן שנים. החליט "לחזור לכושר" ורץ 6 ק"מ ביום הראשון, ושוב למחרת. ביום השלישי הוא סובל מכאבי שרירים חזקים, מותש ומחליט להפסיק לגמרי.

שאלה: אילו עקרונות אימון הופרו, ומה הייתה ההמלצה הנכונה?

פתרון: הופרו עקרון ההדרגתיות (מתחילים ב־2 ק"מ ולא ב־5) ועקרון עומס היסף המבוקר – העומס היה גבוה מדי, והאימון הבא הגיע לפני שהגוף התאושש (שלב B-C בעקומה). המלצה: להתחיל במרחק קצר (ואפילו בהליכה/ריצה לסירוגין), להעלות עומס רק אחרי 2-6 שבועות של הסתגלות, ולשלב ימי מנוחה, שינה ותזונה. הפסקה מלאה טוביל להפיכות – אובדן ההסתגלויות.

בדקי את עצמך

1. אחרי כמה זמן מעלים את העומס לפי עקרון עומס היסף? (תשובה: אחרי שהגוף הסתגל לעומס הנתון – 2-6 שבועות)
2. באיזה שלב בעקומת פיצוי־היסף מתרחש השיפור בפועל? (תשובה: בשלב ההתאוששות (B-C), לא בזמן האימון עצמו)
3. מדוע ספורטאים מורידים עצימות לפני תחרות? (תשובה: בשל ההשפעה המעוכבת – כדי לאפשר פיצוי־יסף מרבי (Tapering))
4. מתאמנת ותיקה משתפרת לאט יותר ממתחילה. איזה עיקרון מסביר זאת? (תשובה: חוק התמורה הפוחתת)

מערכות האנרגיה: ATP ושלושת המסלולים ⚡

מה קורה בגוף בזמן פעילות גופנית? הוא צורך יותר אנרגיה, כי השרירים עובדים קשה יותר (מתכווצים, נמתחים וכו'); הוא צורך יותר חמצן כדי לייצר את האנרגיה הזו; הוא מייצר יותר חומצה לקטית, כי הוא מפרק יותר גלוקוז ויוצר יותר פירובט; הוא מפריש הורמונים רבים ומגוונים; והשרירים הפועלים עלולים לכאוב, ממקורות ומסיבות שונים. נבין את התהליכים שלב אחר שלב.

מה זה ATP?

נעבור על הנושא בהדרגה: ATP; שלושת המסלולים להפקת אנרגיה (אנאירובי א-לקטי, אנאירובי לקטי ואירובי); גליקוליזה, מעגל קרבס, חמצון בטא וגלוקונאוגנזה; החומצה הפירובית (פירובט); ואספקת האנרגיה במנוחה ובמאמץ.

ATP – אדנוזין (A), טרי (T), פוספט (P). מולקולה המשותפת לרוב היצורים החיים, ותפקידה להתפרק ל-ADP + Pⁱ; כאשר בפירוק זה משתחררת אנרגיה זמינה לשימוש. בלי ATP היינו צריכים פתרון אחר (קבוע או משתנה) לבעיית צורכי האנרגיה של הגוף – שכן רוב התהליכים בפיזיולוגיה אינם ספונטניים, ולכן הם חייבים מקור אנרגיה שיאפשר את הפעילות. אנו זקוקים לאספקה קבועה של מולקולה זו על מנת להתקיים.

ATP (אדנוזין טרי-פוספט) ← ADP + Pⁱ ← אנרגיה זמינה להתכווצות, הובלה, סינתזה

- בתאי השריר מאוחסנת כמות קטנה של ATP, המסוגלת לספק אנרגיה לכמה שניות בלבד.
- ATP אינו יכול לעבור מתא לתא או מרקמה לרקמה, ולכן כל תא צריך למחזר כל הזמן את המאגר הקטן שלו.
- בניית ATP דורשת אנרגיה, והיא מגיעה מפירוק חומרים בשלושה מסלולים כימיים שונים בגוף. שלושת המסלולים הללו הם חלק מהמטבוליזם.
- שני מסלולים אינם דורשים חמצן (אנאירוביים) ומסלול אחד דורש חמצן (אירובי).

אנאירובי אלקטי: ATP נטו (CP) | אנאירובי לקטי: גלוקוז/פירובט | אירובי: חומצות שומן, גלוקוז, פירובט

שלושת מסלולי האנרגיה "בגדול" – והדלק העיקרי של כל אחד

מסלול 1: אנאירובי אלקטי (מסלול ATP-CP / קריאטיין פוספט / המסלול הפוספגני)

חלק מהאנרגיה המופקת במסלול זה מקורה במאגרי ה-ATP הזמינים הקיימים בשריר. ה-ATP החופשי הזמין בשריר נמצא בכמות קטנה, ויותר האנרגיה המופקת במסלול זה אצורה בחומר הנקרא **קריאטיין פוספט**. הקשר בין הקריאטיין והפוספט הוא קשר עתיר באנרגיה. גם הוא מאוחסן בתאי השריר, וכמותו גדולה פי 3-5 מכמות ה-ATP בשריר.

קריאטיין פוספט + ADP ← קריאטיין + ATP

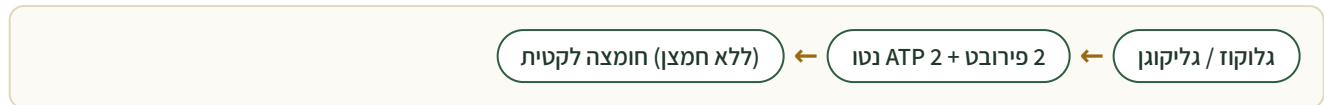
התגובה מזורזת ע"י האנזים קריאטיין קינאז

מסלול זה מאופיין ב:

- מהירות תגובה מיידית לדרישה אנרגטית של מאמץ נתון.
- כמות האנרגיה שהוא מפיק ביחידת זמן גבוהה מאוד (הספק אנרגטי גבוה).
- כמות האנרגיה שהוא מסוגל להפיק מוגבלת מאוד – הנובעת ממאגר דלק מטבולי מצומצם ביותר (ATP-CP – קריאטיין פוספט הקיימים בתא).

מסלול 2: אנאירובי לקטי (גליקוליזה אנאירובית)

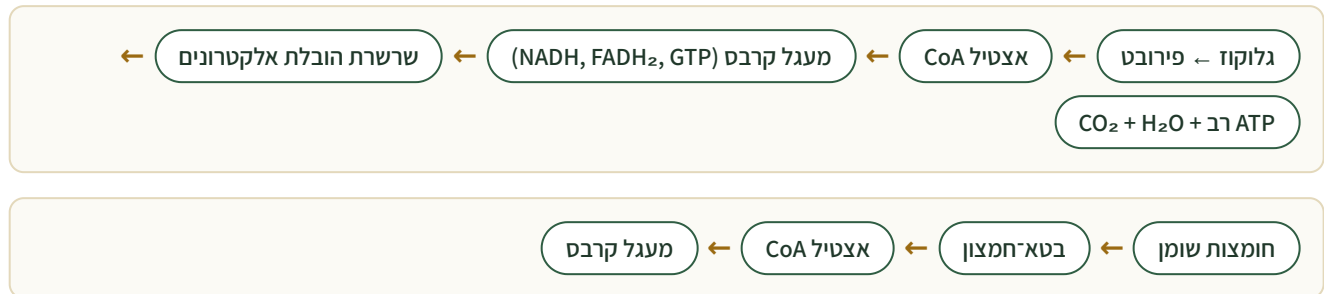
המסלול מתחיל בגליקוליזה, שבסופה נוצרות 2 מולקולות פירובט. בהיעדר חמצן הפירובט הופך לחומצת חלב (לקטט), ולכן התהליך נקרא גליקוליזה אנאירובית. הדלק היחיד כאן הוא גלוקוז (סוכרים אחרים צריכים קודם להפוך לגלוקוז). הצטברות של חומצה לקטית מעכבת את הגליקוליזה, וכך מקטינה את ההספק האנרגטי, גורמת לעייפות ומאטה את קצב הביצוע.



במסלול זה מופקת אנרגיה בכמות מוגבלת: יכולתו להשתמש רק בפחמימות כדלק מטבולי, שכמותן מוגבלת בגוף; ויכולתן המוגבלת של הפחמימות להפיק אנרגיה במסלול זה ($1/18$ בלבד מהפוטנציאל האנרגטי של הפחמימה). מאופיין ב: כמות האנרגיה שהוא מפיק ביחידת זמן רבה (הספק אנרגטי גבוה); מהירות תגובה גבוהה לדרישה האנרגטית של מאמץ נתון; זמן פעולה קצר עד הגעה להתעייפות.

מסלול 3: האירובי

הגליקוליזה מסתיימת בהפיכת הפירובט לאצטיל קוא-A במיטוכונדריה; הוא מצטרף לאוקסלואצטט וממשיך במעגל קרבס, שם נוצרים GTP ובעיקר הרבה NADH. משם ה-NADH נכנס לשרשרת הובלת האלקטרונים (זרחון חמצוני) על הקריסטות של המיטוכונדריון, ונוצר הרבה מאוד ATP. מסלול זה משתמש הן בפחמימות דרך הפירובט והן בשומן דרך בטא-חמצון – בשני המקרים יש הפיכה לאצטיל קוא-A ושימוש במעגל קרבס. כלומר, זו הדרך העיקרית שבה מנצלים שומן ליצירת אנרגיה. (הנושא מורכב, ומומלץ לחזור עליו גם בלימודי הביוכימיה).



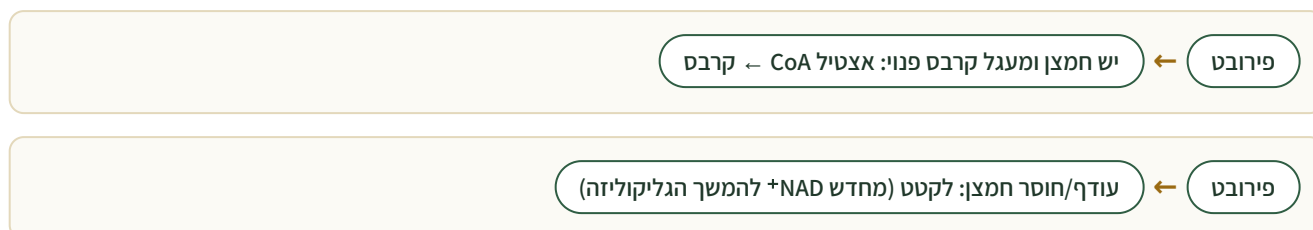
המסלול האירובי מאופיין ב:

1. כמות האנרגיה הבלתי מוגבלת שהוא מסוגל להפיק, הנובעת מיכולתו להשתמש בפחמימות, בשומנים ובחלבונים כדלק מטבולי.
2. יכולתו להפיק כמות אנרגיה רבה יחסית מכל 1 גרם של הדלקים הללו.
3. הוא מסוגל לספק אנרגיה לאורך זמן רב בלי שתופיע עייפות.
4. ההספק שלו נמוך, כלומר הוא מפיק מעט אנרגיה בכל יחידת זמן.

מאפיין	אנאירובי אלקטי	אנאירובי לקטי	אירובי
דלק	ATP ו-CP בשריר	גלוקוז/גליקוגן בלבד	פחמימות, שומנים (ומעט חלבונים)
מהירות תגובה	מיידית	גבוהה	איטית
הספק אנרגטי	גבוה מאוד	גבוה	נמוך
כמות אנרגיה	מוגבלת מאוד	מוגבלת	"בלתי מוגבלת"
תוצר לוואי	קריאטין	לקטט (חומצת חלב)	CO ₂ ומים
זמן עד עייפות	שניות (עד 6~)	קצר	ארוך

גורל הפירובט

- כל זמן שמעגל קרבס מצליח לקלוט את כל הפירובט שנוצר, המטבוליזם נשאר אירובי ברובו.
- כשמעגל קרבס כבר אינו מסוגל לקלוט את כל הפירובט והוא מתחיל להצטבר, גוברת הפיכתו לחומצת חלב.
- להפיכה הזו יש תפקיד: היא מונעת הצטברות של פירובט, שהייתה מאטה את הגליקוליזה. כלומר, יצירת חומצת החלב מאפשרת לגליקוליזה להמשיך לפעול.
- כשהדרישה לאנרגיה מתונה והאספקה מספיקה, שני התהליכים (האירובי והאנאירובי) פועלים יחד, והאירובי הוא העיקרי; רמת החומצה הלקטית נשארת אז נמוכה ויציבה.
- כשזרימת הדם לשריר נפגעת (למשל בחוסם עורקים או בהתכווצות חזקה וממושכת), השריר אינו מקבל די חמצן והתהליך האירובי מואט.



אספקת אנרגיה במנוחה ובמאמץ

פי 3-5 לעומת ATP בשריר CP	2/3 שומן • 1/3 פחמימה מקורות ה-ATP במנוחה	2.5 מול/דקה קצב ייצור ATP במאמץ (עד)	0.1 מול/דקה קצב ייצור ATP במנוחה
-------------------------------------	---	--	--

- ה-ATP הנחוץ לתהליכים הצורכים אנרגיה במנוחה מסופק כמעט בלעדית ע"י המסלול האירובי תוך פירוק שומנים ופחמימות (2/3 שומנים, 1/3 פחמימות). נובע מזמינות חמצן גבוהה.
- במנגנון האנאירובי הלקטי מיוצרת כמות זניחה של אנרגיה במנוחה.
- קצב ייצור ה-ATP במנוחה הוא כ-0.1 מול לדקה, בעוד שבמאמץ עלול להגיע ל-2.5 מול לדקה.
- ככל שהמאמץ עצים יותר, השריר זקוק להספק אנרגטי גבוה יותר כדי להתכווץ.
- שלושת מסלולי האנרגיה אינם פועלים בנפרד, וכל אחד מהם מספק בזמנו את מלוא האנרגיה הנדרשת – הם פועלים במקביל, בשיעורים משתנים.
- מסלול ATP-קריאטין פוספט מגיב מיד ומספק הספק גבוה מאוד, אבל כמות האנרגיה שהוא יכול לספק קטנה מאוד, משום שמאגרי הקריאטין פוספט וה-ATP בשריר קטנים.

אספקת אנרגיה לפי סוג המאמץ

- מאמצים קצרים ועצימים מאוד** (ספרינטים, קפיצה לרוחק): רוב האנרגיה תסופק ע"י מסלול ATP-קריאטין פוספט (יכול לאפשר ביצוע מאמצים עד 6 שניות).
- מקצועות הדורשים סבולת קצרה** (10 שניות-180 שניות): עיקר האנרגיה תסופק ע"י המסלולים האנאירוביים. בריצת 400 מ' הנמשכת ברמות הגבוהות כ-50 שניות, יגיעו מהמסלולים האנאירוביים.
- מקצועות המוגדרים סבולת בינונית** (3-20 דקות): תרומתו של המסלול האירובי גדלה עם העלייה במשך. בריצת 1500 מ' הנמשכת כ-4 דקות, מחצית מהאנרגיה תסופק מהמסלול האירובי; בריצת 5 ק"מ – 80% יסופקו ממסלול זה.