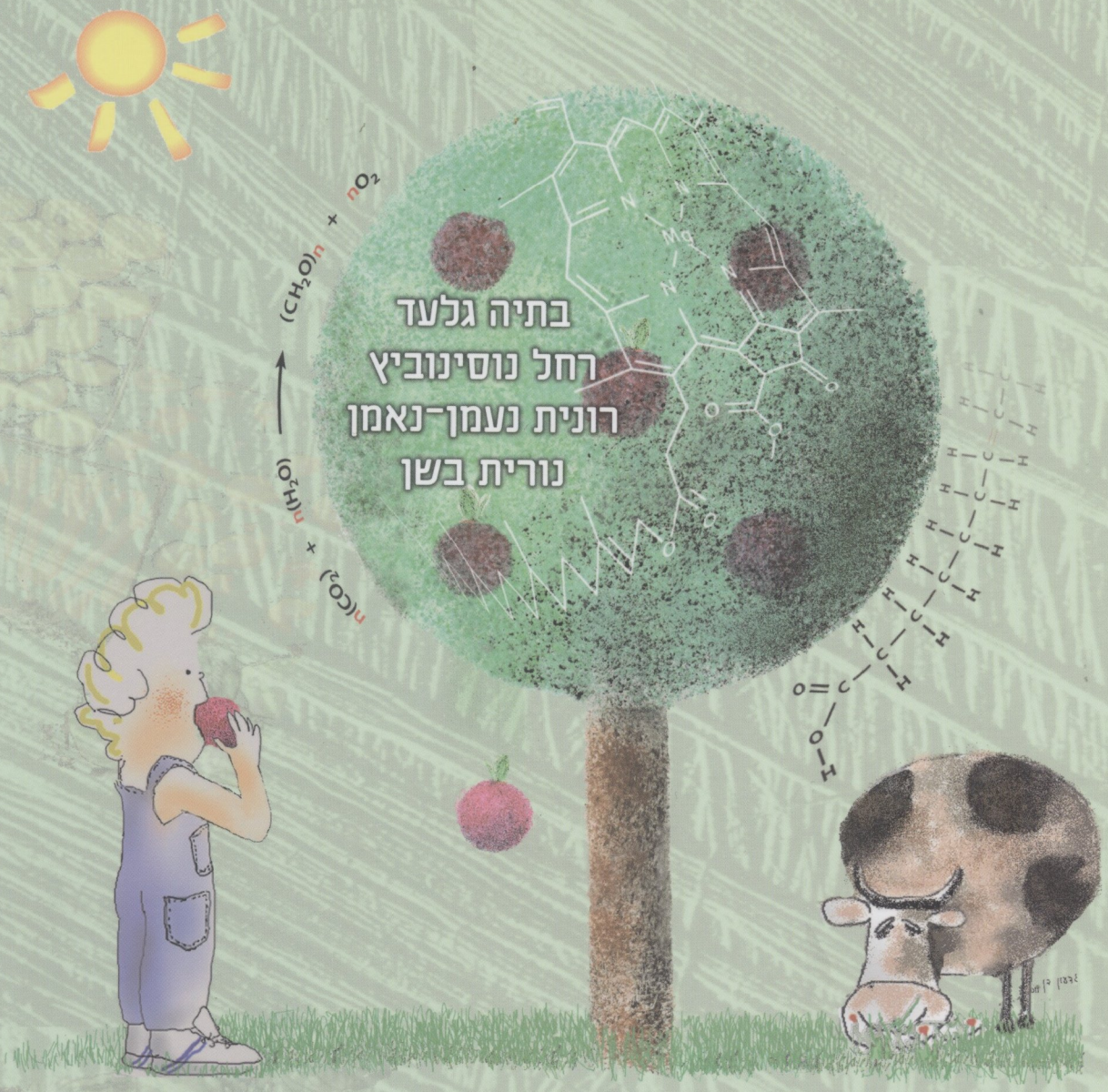
ה ז נ ה

בצמחים ובבעלי חיים



בתיה גלעד
רחל נוסינוביץ
רונית נעמן-נאמן
נורית בשן

האוניברסיטה העברית בירושלים, המרכז להוראת המדעים

משרד החינוך, המזכירות הפדגוגית, האגף לתכנון ולפיתוח תכניות לימודים

מינהלת מל"מ, המרכז הישראלי לחינוך מדעי-טכנולוגי ע"ש עמוס דה-שליט

תשע"א 2011

משרד החינוך
מאגר לימוד
מאושר
אישור מס': 4279
אושר בתאריך: 20.2.11

הזנה
בצמחים ובבעלי חיים

בתיה גלעד
רחל נוסינוביץ
רונית נעמן־נאמן
נורית בשן

© כל הזכויות שמורות למשרד החינוך

יצא לאור במימון האגף לתכנון ולפיתוח תכניות לימודים במשרד החינוך
ומינהלת מל"מ, המרכז לחינוך מדעי־טכנולוגי ע"ש עמוס דה־שליט.

האוניברסיטה העברית בירושלים, המרכז להוראת המדעים

משרד החינוך, המזכירות הפדגוגית, האגף לתכנון ולפיתוח תכניות לימודים

מינהלת מל"מ, המרכז הישראלי לחינוך מדעי־טכנולוגי ע"ש עמוס דה־שליט

תשע"א 2011

משרד החינוך
אישור מס' 4279
אושר בתאריך 20.2.11

■ **צוות הכתיבה:**

בתיה גלעד, רחל נוסינוביץ, רונית נעמן־נאמן, נורית בשן

■ **ייעוץ מדעי:**

פרופ' אהוד זיו, בית הספר לרפואה, האוניברסיטה העברית בירושלים – פרק ה (נשימה תאית).
פרופ' אברהם מ. מאיר ז"ל, האוניברסיטה העברית בירושלים – פרק ג (פוטוסינתזה).
פרופ' זכריה מדר, הפקולטה למדעי החקלאות המזון ומדעי הסביבה, האוניברסיטה העברית בירושלים – פרקים ב, ד (רכיבי המזון ועיכול באדם).
פרופ' בטי שוורץ, הפקולטה למדעי החקלאות המזון ומדעי הסביבה, האוניברסיטה העברית בירושלים – פרק ו (תזונה ובריאות האדם).
פרופ' חיים תגרי, הפקולטה למדעי החקלאות המזון ומדעי הסביבה, האוניברסיטה העברית בירושלים – פרק ד (מעלי גירה).

■ **עריכת לשון:** ליאורה הרציג.

■ **עריכת מגדר:** שרה אופק.

■ **איורים, עיצוב והפקה:** נעמי אפשטיין, יוליה אגרנוביץ', אלי רטנר – סטודיו גדעון דן.

■ **איורי אווירה:** גדעון דן.

■ **תחקיר תמונות:** רונית נעמן־נאמן.

■ **טיפול בזכויות יוצרים:** רונית נעמן־נאמן, שושנה הראל.

■ **מלבה"ד:** שושנה הראל.

■ **ריכוז הניסוי:** רונית נעמן־נאמן.

■ **זר של תודות**

לאלה שקראו, העירו והאירו בשלבים השונים של הכתיבה:
ד"ר רות אמיר, המרכז להוראת המדעים, האוניברסיטה העברית בירושלים.
ד"ר נעה אבולעפיה, האגף לתכנון ולפיתוח תכניות לימודים, משרד החינוך.
ד"ר נטע עורבי, האגף לתכנון ולפיתוח תכניות לימודים, משרד החינוך.
גב' מיכל אונגר, פסיכולוגית קלינית, על ההערות בנושא הפרעות אכילה.

למורי הניסוי ותלמידיהם שסייעו לנו להפיק לקחים למהדורה הסופית:
סילבי אבן, שרה זילברפלד (מקיף יהוד), יעל אוסטר (ישיבת בני עקיבא מודיעין, מכבים רעות), נורית בשן (תיכון גבעת גונן, ירושלים), הילית אורן (חקלאי, הכפר הירוק, רמת השרון), נטע דגן (אמי"ת, כפר בתיה, רעננה), מורין סהר (מקיף ערד), רותי קליין, שלומית רובין (תיכון אלדד, נתניה).

לצלמים שהתמונות שצילמו מעטרות את דפי הספר (פירוט השמות בסוף הספר).
לצוות פיתוח יישומי מחשב בהוראת המדעים והחקלאות, הפקולטה למדעי החקלאות המזון ומדעי הסביבה, על אישור להשתמש בחומרים שפיתחו (פירוט הפעילויות בסוף הספר).
לאגף לתכנון ולפיתוח תכניות לימודים, על אישור להשתמש בחומרים שפיתחו (פירוט בסוף הספר).

© כל הזכויות על החומרים ממקורות חיצוניים ששובצו בספר זה שמורות לבעליהן.

אין לשכפל, להעתיק, לצלם, לתרגם או לאחסן במאגרי מידע, בכל דרך ובכל אמצעי אחר כל חלק שהוא מהחומר בספר זה.

אל הקוראים

כל האורגניזמים החיים זקוקים לאספקה מתמדת של חומרים לקיומם, אותם הם משיגים בתהליך ההזנה. הספר "הזנה בצמחים ובבעלי חיים" מדגים את האחידות והשוני בין האורגניזמים השונים מבחינת דרך השגת החומרים.

הספר מתאר את החומרים המזינים את האורגניזמים ואת דרכי ההזנה שלהם: בצמחים – תהליך הפוטוסינתזה וקליטת מינרלים ובבעלי החיים – קליטת המזון ועיכולו, וכן את הדרכים בהן מנוצלים חומרי המזון להפקת אנרגיה בתאים. הספר מסתיים בפרק נרחב על תזונה ובריאות באדם.

הנושא הזנה מזמן עיסוק בתהליכים המתרחשים בכל רמות הארגון הביולוגי: החל בתהליכים המתרחשים בתאים, דרך תהליכים המתרחשים באיברים ובאורגניזם השלם ועד לתהליכים המתרחשים ברמת המערכת האקולוגית. בספר יש התייחסות נרחבת למעורבות האדם בהזנה של צמחים ובעלי חיים.

לאורך הספר מופיעים מדורים קבועים ובהם קטעי הרחבה וכן תכנים הקשורים **באופן ישיר** לתוכנית הלימודים ומדגימים את הרלבנטיות של הנושאים הנלמדים:


"אשנב למחקר" – קטעי מחקר עדכניים רבים, מלווים בשאלות המפנות לניתוח תוצאותיהם.


"סיפורו של גילוי" – סיפורים מעניינים על תגליות חשובות הקשורות לנושא הנלמד.


"על קצה המזלג" – סיפורים המקשרים בין הנושא הנלמד לחיי היום–יום.


"הרחבה" – תכנים שהם מעבר לנדרש בתכנית הלימודים.


"שאלות" – במגוון רחב של רמות חשיבה המזמנות שימוש במגוון מיומנויות חשיבה.


"דילמות ביואתיות" – העולות מן התכנים הנלמדים והדורשות הכרעה ערכית תוך שימוש במיומנות טיעון ומידענות.


עיקרי הנושאים בפרק


מושגים חשובים בפרק


קשר לנושא

קישור החומר הנלמד לנושאי הליבה.


רעיון מרכזי

קישור החומר הנלמד לרעיונות מרכזיים בביולוגיה.

עוד על

הפניה לנושאים המורחבים בהמשך הספר.

הדגשה **בצבע** – מושגים מתוכנית הלימודים (מופיעים גם ברשימה בסוף כל פרק).

אנו מקווים שהספר יאפשר לכם הלומדים להרחיב את ידיעותיכם על הזנה בטבע ועל תזונת האדם, שיעורר את סקרנותכם המדעית ושיעודד אתכם לחשיבה ביקורתית על נושא ההזנה בטבע בכלל ועל המזון שבא אל פיכם בפרט.

קריאה מהנה ולימוד פורה!

צוות הפיתוח

תוכן העניינים

9 **א ההזנה כתופעת חיים**

10 א1. הזנה – צורך משותף לכולם

11 א2. על משמעות המושג "מזון"

11 א3. דרכי הזנה: מנין מקבלים האורגניזמים את החומרים הנחוצים לקיומם?

12 א4. גורל חומרי המזון באורגניזמים

13 א5. אנרגיה בתהליכי ההזנה

14 עיקרי הנושאים הפרק

14 מושגים חשובים בפרק

15 **ב רכיבי המזון – אבני הבניין של האורגניזמים**

חומרים אורגניים

17 ב1. פחמימות

18 **ב1.1** חד־סוכרים

19 **ב1.2** דו־סוכרים

21 **ב1.3** רב־סוכרים

25 ב2. ליפידים

25 **ב2.1** חומצות שומן – אבני הבניין של הליפידים

27 **ב2.2** טריגליצרידים – שומנים (fats) ושְמנים (oils)

28 **ב2.3** פוספוליפידים

28 **ב2.4** סטרואידים

29 ב3. חלבונים

33 ב4. ויטמינים

חומרים אי־אורגניים

38 ב5. מינרלים

41 ב6. מים

43 עיקרי הנושאים בפרק

44 מושגים חשובים בפרק

45 **ג** תהליך הפוטוסינתזה – ייצור חומרים אורגניים בצמח

46 ג.1 מבט־על על תהליך הפוטוסינתזה

49 ג.2 איך יודעים? צעדים ראשונים בחקר הפוטוסינתזה

51 ג.3 התאמת הצמח לביצוע פוטוסינתזה

51 ג.1.3 התאמת הצמח לקליטה מֵרבית של אור

53 ג.2.3 התאמת העלה לקליטת CO_2 וצמצום איבוד מים

56 ג.4 כלורופלסטים וקליטת אור

56 ג.1.4 כלורופלסטים

57 ג.2.4 כלורופיל

57 ג.3.4 על כלורופיל ובליעת אור

60 ג.5 שלבים בתהליך הפוטוסינתזה

60 ג.1.5 שלב קליטת אנרגיית האור והמרתה לאנרגיה כימית

63 ג.2.5 שלב קיבוע ה־CO_2

65 ג.6 תוצרי הפוטוסינתזה: הובלה, אגירה וניצול על ידי הצמח

69 ג.7 גורמים המשפיעים על תהליך הפוטוסינתזה

69 ג.1.7 השפעת עוצמת האור על קצב הפוטוסינתזה

70 ג.2.7 השפעת CO_2 על קצב הפוטוסינתזה

72 ג.3.7 השפעת הטמפרטורה על קצב הפוטוסינתזה

72 ג.4.7 השפעת כמות המים בקרקע ולחות האוויר על קצב הפוטוסינתזה

73 ג.8 מעורבות האדם: הגברת תהליך הפוטוסינתזה על ידי שינוי גורמי סביבה

74 ג.9 הזנה מינרלית וחיוניותה להתפתחות הצמח ולקיום הפוטוסינתזה

77 ג.1.9 השפעת המינרלים על תפקוד הצמח

79 ג.2.9 הזנת הצמח בחקלאות – זיבול ודישון

83 ג.10 קליטת מים ומינרלים על ידי שורשי הצמח

83 ג.1.10 התאמת מערכת השורשים לקליטה מֵרבית של מים ומינרלים

84 ג.2.10 קליטת המים והמינרלים מהקרקע

86 עיקרי הנושאים בפרק

87 מושגים חשובים בפרק

89 **ד** הזנה ועיכול באורגניזמים הטרוטרופים

90 ד.1 עקרונות המבנה והתפקוד של מערכת העיכול

96 ד.2 מערכת העיכול של האדם

96 ד.2.1 העיכול בפה

98 ד.2.2 מעבר המזון בוושט

99 ד.2.3 העיכול בקיבה

103 ד.2.4 העיכול במעי הדק

105 ד.2.5 הספיגה במעי הדק

108 ד.2.6 פעילויות במעי הגס

110 ד.3 חילוף החומרים של תוצרי העיכול

110 ד.3.1 הכבד – צומת מרכזי בתהליכי חילוף החומרים בגוף

112 ד.3.2 חילוף החומרים בתאים

115 ד.4 העיכול במעלי גירה

115 ד.4.1 מבנה ותפקוד מערכת העיכול במעלי גירה

118 ד.4.2 התהליכים הייחודיים המתרחשים בכרס

125 ד.5 ייעול ההזנה בפרת החלב

125 ד.5.1 סוגי מזונות להזנת מעלי הגירה

126 ד.5.2 ייעול ייצור החלב – האיזון העדין

130 עיקרי הנושאים בפרק

132 מושגים חשובים בפרק

133 **ה** מחומרים אורגניים לאנרגיה זמינה – נשימה תאית

134 ה.1 מבט־על על הנשימה התאית

135 ה.2 ATP כמתווך במעברי אנרגיה המתרחשים בתאים

138 ה.3 השתתפות ה־ATP בתהליכים צורכי אנרגיה

140 ה.4 מסלולים להפקת אנרגיה בתאים

141 ה.4.1 גליקוליזה – פירוק גלוקוז לחומצה פירובית

142 ה.4.2 מסלול 1: הפקת אנרגיה בהשתתפות חמצן – נשימה תאית אווירנית

150 ה.4.3 מסלול 2: הפקת אנרגיה ללא השתתפות חמצן – תהליכי תסיסה ונשימה תאית אל־אווירנית

157 ה.5 פוטוסינתזה היא לא נשימה של הצמח

160 עיקרי הנושאים בפרק

161 מושגים חשובים בפרק

163 **1** תזונה ובריאות האדם

164 1.1 מאזן אנרגיה

164 1.1.1 כשאוכלים – קולטים אנרגיה

166 1.1.2 כשחיים – מנצלים אנרגיה

169 1.1.3 על איזון בין קליטת אנרגיה וניצולה

171 1.2 יסות צריכת המזון

171 1.2.1 מרכז הרעב ומרכז השובע

172 1.2.2 גורמים המשפיעים על צריכת המזון

175 1.3 תזונה נבונה ומאוזנת

175 1.3.1 האם יש נוסחה ל"תזונה נכונה"?

176 1.3.2 פירמידת המזון

183 1.3.3 תרומת פעילות גופנית לחיים בריאים

187 1.4 בעיות תזונה בעולם של מחסור ושפע

187 1.4.1 תת־תזונה

189 1.4.2 השמנה – המגפה של המאה ה־21

192 1.4.3 הסכנות הטמונות בעודף משקל

195 1.4.4 הפחתת משקל – דיאטה דלת־אנרגיה

196 1.4.5 הפרעות אכילה

198 עיקרי הנושאים בפרק

199 מושגים חשובים בפרק

200 נספח

טבלה 1: הוויטמינים באדם – תפקודיהם בגוף, מקורותיהם והשפעות של חסר או עודף בוויטמינים

טבלה 2: היסודות המינרלים החיוניים בבעלי־חיים ובאדם – מקורותיהם, תפקודיהם וסימני חסר או עודף במינרלים.

204 מילון מונחים

222 מפתח

228 מקורות וזכויות

א

ההזנה כתופעת חיים

א1. הזנה – צורך משותף לכולם
א2. על משמעות המושג "מזון"
א3. דרכי הזנה: מַיִן מקבלים האורגניזמים את החומרים הנחוצים לקיומם?
א4. גורל חומרי המזון באורגניזמים
א5. אנרגיה בתהליכי ההזנה
עיקרי הנושאים בפרק
מושגים חשובים בפרק



פרק א: ההזנה כתופעת חיים

א1. הזנה – צורך משותף לכולם

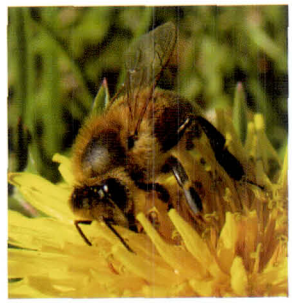
כל האורגניזמים – צמחים, בעלי חיים, פטריות וחיידקים, זקוקים לחומרים לשם גדילה, התפתחות ותפקוד. החומרים משמשים להפקת אנרגיה לתהליכי החיים, כחומר גלם לבניית תאים ורקמות ולקיום התקין של התהליכים הביוכימיים המתרחשים באורגניזם. האנרגיה נחוצה לאורגניזם לביצוע פעולות החיים השונות: בניית חומרים חדשים, תנועה, העברת חומרים דרך קרומי התאים, העברת מסרים במערכת העצבים ועוד.

בכל אורגניזם מתרחשים שינויים רבים כל העת, ולמרות זאת נשמרת בו סביבה פנימית יציבה – **הומיאוסטאזיס** – ונשמרים בו ארגון וסדר פנימיים. גם לשמירה על הומיאוסטזיס ועל סדר וארגון פנימיים נחוצים **חומרים ואנרגיה**.

התהליך שבאמצעותו אורגניזמים משיגים את החומרים הדרושים להם נקרא **הזנה**, והוא צורך המשותף לכל האורגניזמים – בין אם מדובר בחיידקים, בפטריות, בצמחים או בבעלי חיים.

קשר לנושא

הביולוגיה של האדם:
הומיאוסטזיס, סביבה פנימית וחיצונית.











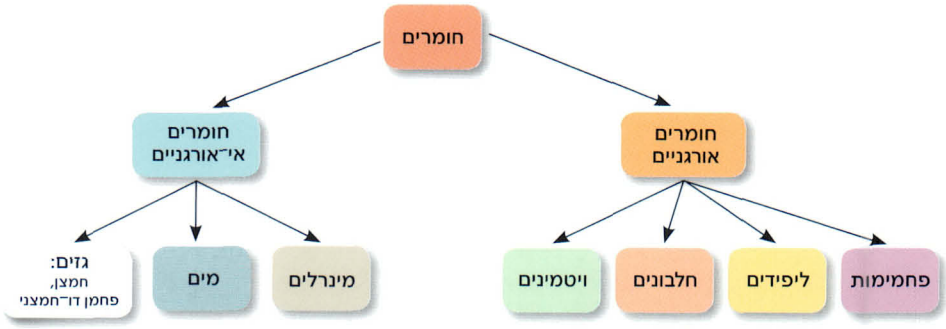




את החומרים הנחוצים לקיומם של האורגניזמים נהוג לחלק לשתי קבוצות: חומרים אורגניים וחומרים אי־אורגניים (אנאורגאניים).

חומרים אורגניים בנויים משלד של אטומי פחמן, שאליו קשורים אטומי מימן ובדרך כלל גם אטומי חמצן. בחלק מהחומרים האורגניים יש יסודות נוספים, כמו חנקן, זרחן וגופרית. לחומרים האורגניים משתייכים: פחמימות, ליפידים (הנקראים בשפת יומיום שומנים), חלבונים, חומצות גרעין וויטמינים. (גם חומצות גרעין משתייכות לחומרים אורגניים, אולם היות והן נבנות מתוצרי פירוק של חומרים אורגניים אחרים לא נהוג למנות אותן בין רכיבי המזון).

חומרים אי־אורגניים הם כל החומרים בטבע שאינם תרכובות של פחמן ומימן: מינרלים, מים וגזים באוויר לדוגמה, פחמן דו־חמצני וחמצן (ראו איור א–1).



איור א–1: החומרים הנחוצים לקיומם של האורגניזמים.

א2. על משמעות המושג "מזון"



המילה **מזון** מוכרת לכולנו במשמעות היומיומית שלה: זהו ה"דבר" שאנו מקבלים מסביבתנו, קונים במרכול ואוכלים אותו. בדומה לנו, גם בעלי החיים צריכים להשיג מזון – באכילת צמחים, בטריפת בעלי חיים אחרים, או בהסתמכותם על האדם שיספק אותו.

לגבי הצמחים, למושג "מזון" יש משמעויות שלעתים נדמות כסותרות האחת את האחרת: נוהגים לומר ש"הצמחים (וכמוהם חיידקים מסוימים) מייצרים את מזונם בעצמם". מצד שני, ידוע שחיוני להשקות צמחים בתמיסה של מינרלים שונים הנקראת "תמיסת מזון".

כדי להבין סתירה לכאורה זו, נבדוק מהו, אם כך, "מזון".

מזון הוא כל מה שמשמש לאורגניזם מקור לחומרי בנייה, לגדילה, לתפקוד ולהפקת אנרגיה: חומרים אורגניים וחומרים אי־אורגניים. התהליך שבאמצעותו אורגניזמים שונים משיגים את מזונם נקרא **הזנה**.

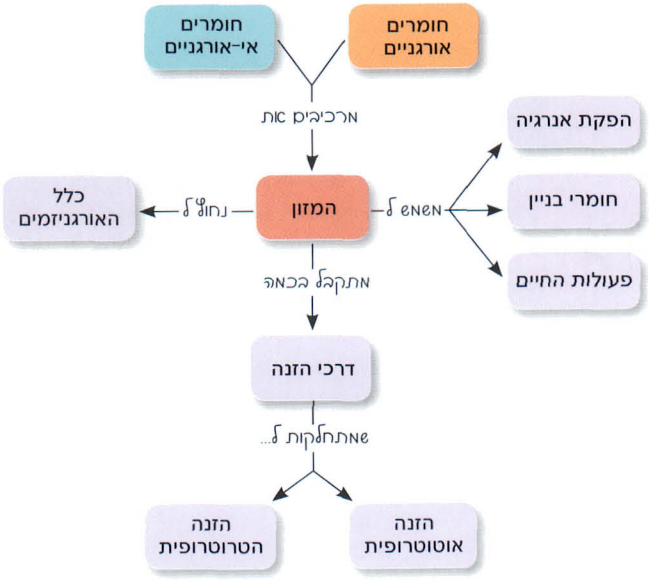
בהמשך נלמד שתהליך ההזנה של הצמח מבוסס על ייצור עצמי של חומרים אורגניים, המחייב גם קליטה של מים ומינרלים מהקרקע.

א3. דרכי הזנה: מַיִן מקבלים האורגניזמים את החומרים הנחוצים לקיומם?

כל האורגניזמים קולטים מהסביבה את **החומרים האי־אורגניים** – מים, מינרלים וגזים. במה שנוגע לדרך קבלת **החומרים האורגניים** נחלקים האורגניזמים לשתי קבוצות: האורגניזמים **האוטוטרופים**, מייצרים בעצמם, לרוב בתהליך הפוטוסינתזה, חומרים אורגניים מחומרים אי־אורגניים. לעומתם, האורגניזמים ה**הטרוטרופים** אינם מסוגלים ליצור חומרים אורגניים מחומרים אי־אורגניים פשוטים, ולכן הם חייבים לקבל חומרים אורגניים במזונם.

קשר לנושא

התא – מבנה ופעילות: *מבנה תאים ותהליכים בתא.*
אקולוגיה: *דרכי הזנה, יצרנים, צרכנים.*



איור א-2: הקשר בין חומרי המזון, שימושיהם ודרכי השגתם.

צמחים וחיידקים מסוימים הם אורגניזמים אוטוטרופים, בעוד האדם ובעלי חיים אחרים וכן פטריות ורוב החיידקים הם הטרוטרופים.

לפיכך, על אף שהאורגניזמים זקוקים לאותם החומרים, ובתאיהם מתקיימים תהליכים דומים – הם נבדלים אלה מאלה בדרכי ההזנה שלהם- אוטוטרופית או הטרוטרופית ובסוג החומרים שהם צריכים לקבל מהסביבה.
מפת המושגים באיור א-2 ממחישה את הקשר בין חומרי המזון, שימושיהם ודרכי השגתם.

א4. גורל חומרי המזון באורגניזמים

רעיון מרכזי

אחידות ושוני:
על אף השוני בגודל, בצורה, בדרך החיים או במקום גידולם, האורגניזמים השונים בנויים מאותן אבני בניין.

לתפקוד התקין של התאים, נחוצה אספקה שוטפת של חומרים אורגניים ואי־אורגניים.
חומרי מזון רבים בנויים ממולקולות אורגניות גדולות ומורכבות, שאינן יכולות לחדור לסביבה הפנימית של הגוף ולתאים כפי שהן. המולקולות הגדולות צריכות לעבור תחילה פירוק לאבני הבניין שמהן הן בנויות: החלבונים – לחומצות אמיניות, הליפידים – לחומצות שומן וגליצרול והרב־סוכרים – לחד־סוכרים. בצורה זו יכולים חומרי המזון לחדור דרך קרום התא.

כך יוצא שמגוון גדול של מולקולות אורגניות המרכיבות את מזונו של אורגניזם מסוים, מתפרקות בגופו למספר מצומצם של אבני בניין, מהן נבנות בתאיו מולקולות אורגניות חדשות הייחודיות לו.

האדם לדוגמה אינו יכול לנצל את חלבוני חלב הפרה כפי שהם לבניית התאים בגופו. חלבוני חלב הפרה מתפרקים במערכת העיכול של האדם לחומצות אמיניות, ומהחומצות האמיניות נבנים החלבונים הייחודיים לאדם.
יתר על כן, חומרים אורגניים מקבוצה אחת יכולים להפוך בגוף האורגניזם לחומרים אורגניים מקבוצה אחרת. לדוגמה: מהפחמימות שבמזון יכולים להיבנות שומנים, והרי כולנו יודעים שאם אוכלים הרבה ממתקים – זה עלול להסתיים בהשמנה.

גם בצמחים חומרים אורגניים מקבוצה אחת הופכים לחומרים אורגניים מקבוצה אחרת. מהפחמימות הנוצרות בתהליך הפוטוסינתזה וממינרלים הנקלטים מהסביבה, הצמח בונה את כל החומרים האורגניים הדרושים לו.

א5. אנרגיה בתהליכי ההזנה

כאמור, החומרים האורגניים שבמזון – פחמימות, שומנים וחלבונים – מספקים לאורגניזם את אבני הבניין הדרושות לו ואת החומרים השונים המסדירים את פעולותיו, אך לא פחות חשוב מכך, גם מקור ל**הפקת האנרגיה** הדרושה לו לקיום תהליכי החיים.

מהי אנרגיה? מקורה של המילה "אנרגיה" ביוונית ומשמעותה "עשייה", "פעילות". למרות חשיבותו של המושג אנרגיה להבנת תהליכים המתבצעים בכל רמות הארגון בטבע, אין הגדרה אחת מוסכמת לגביו. אחת ההגדרות הקיימות היא הכושר לבצע עבודה, אך לא כולם מסכימים עם הגדרה זו.

אנרגיה מופיעה בטבע בצורות שונות כגון: אנרגיית חום, אנרגיה כימית, אנרגיית אור ואנרגיית תנועה. צורת אנרגיה אחת יכולה להשתנות לצורה אחרת ושינוי כזה נקרא **המרת אנרגיה**.

בחלק מהתהליכים שבהם נעסוק בספר זה, מתרחשות המרות אנרגיה: בתהליך הפוטוסינתזה בצמחים מומרת אנרגיית אור לאנרגיה כימית בפחמימות; בתאי שריר מומרת אנרגיה כימית לאנרגיית תנועה ולאנרגיית חום.

מעברי אנרגיה מגוף לגוף או מחומר לחומר יכולים להתקיים גם בלי שצורת האנרגיה תשתנה. לדוגמה: בתהליכי הפקת האנרגיה המתקיימים בכל אחד מתאי הגוף, האנרגיה הכימית שבמולקולות גלוקוז מועברת לאנרגיה כימית במולקולות ATP.

כפי שלמדתם, ובספר זה נרחיב על כך, מולקולות ה־ATP משמשות מתווך אנרגטי ומאפשרות ביצוע תהליכים שונים בתא שלהתרחשותם נחוצה אנרגיה (בניית חומרים, העברת חומרים דרך קרום התא, התכווצות תאי שריר ועוד).

האורגניזמים החיים מהווים באופן זה מערכת של המרות ומעברים של אנרגיה: מאנרגיית אור המנוצלת בפוטוסינתזה לאנרגיה כימית בחומרי המזון, לאנרגיה כימית במולקולות ATP ולצורות אנרגיה נוספות – כמו אנרגיית תנועה ואנרגיית חום.

שאלה א–1:

עבור כל אחד מזוגות המושגים הבאים, כִּתבו משפט או שניים המתארים את הקשר שביניהם:

1. חומרים אורגניים – היסוד פחמן.
2. אוטוטרופים – פוטוסינתזה.
3. הטרוטרופים – שרשרת מזון.
4. חומרים אורגניים ואי־אורגניים – הגדרה של מזון.
5. תהליכי עיכול – סביבה פנימית.
6. מעברי אנרגיה – ATP.
7. המרות אנרגיה – אנרגיית חום.

בספר זה נעסוק בשאלות הקשורות להזנה ולמזון, למשל:

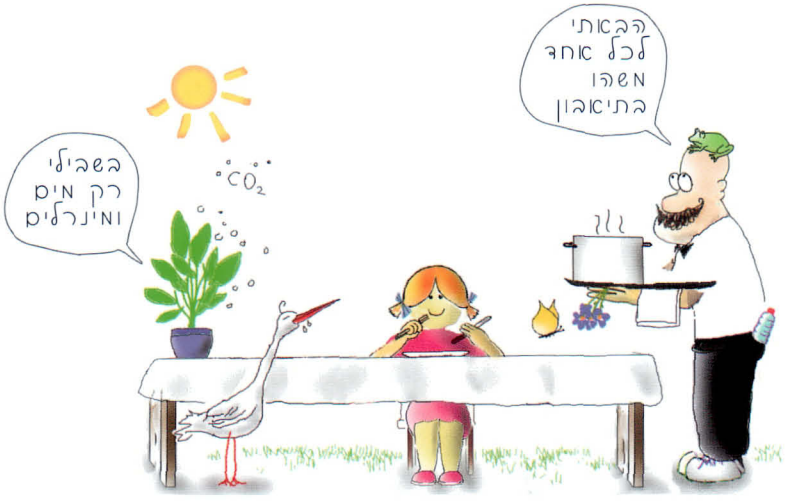
- לְמה משמשים חומרי המזון בבעלי חיים ובצמחים ומה קורה בעת מחסור בחומרי מזון?
- באיזה תהליך בצמח מיוצרים חומרים אורגניים מחומרים אי־אורגניים? אלו גורמים משפיעים על תהליך זה?
- מהו התהליך המאפשר לחומרי המזון המורכבים ממולקולות גדולות להיכנס לתאי הגוף?
- כיצד מזון צמחי עשבוני יכול להוות מקור אנרגיה מספק לבעלי חיים צמחוניים בעלי מסה גדולה (כמו פרות וגמלים)?
- כיצד יכול האדם להשפיע על הזנת צמחים ובעלי חיים?
- מהו התהליך המשותף לצמחים ובעלי חיים, המאפשר הפקת אנרגיה זמינה לצורכי התא מחומרי מזון?
- כיצד כמותו ואיכותו של המזון משפיעות על בריאות האדם?

עיקרי הנושאים בפרק

- חומרי המזון משמשים מקור להפקת אנרגיה לתהליכי החיים, חומר גלם לבניית תאים ורקמות, והם חיוניים לקיום התקין של תהליכים ביוכימיים שונים.
- הזנה היא תהליך שבאמצעותו אורגניזמים שונים משיגים חומרי מזון החיוניים לקיומם.
- חומרי המזון נחלקים לשניים: לחומרים אורגניים, הבנויים משלד של אטומי פחמן שאליו קשורים אטומי מימן ולרוב גם חמצן – פחמימות, ליפידים, חלבונים, ויטמינים; ולחומרים אי־אורגניים, שאינם בנויים מפחמן ומימן – מים, מינרלים, חמצן ופחמן דו־חמצני.
- האורגניזמים נחלקים לשתי קבוצות לפי הדרך שבה הם מקבלים את חומרי המזון האורגניים: אורגניזמים הטרוטרופים (צרכנים) שחייבים לקבל תרכובות אורגניות מוכנות בתהליך ההזנה, ואורגניזמים אוטוטרופים (יצרנים) שיכולים לייצר בתהליך הפוטוסינתזה חומרים אורגניים (פחמימות ואחרים) מחומרים אי־אורגניים.
- לאחר פירוק החומרים האורגניים לאבני הבניין שמהן הם מורכבים, הם יכולים להפוך בגוף האורגניזם לחומרים אורגניים אחרים, המרכיבים את התאים.
- אנרגיה מופיעה בטבע בצורות שונות – אנרגיית חום, אנרגיה כימית, אנרגיית אור ואנרגיית תנועה. צורת אנרגיה אחת יכולה להיות מומרת לאחרת. לדוגמה, בתהליך הפוטוסינתזה מומרת אנרגיית אור לאנרגיה כימית.
- בתהליכי הפקת אנרגיה בתאים, אנרגיה כימית מועברת מחומרים אורגניים לאנרגיה כימית במולקולות ATP. מולקולות ATP מאפשרות קיום של תהליכים צורכי אנרגיה בתאים.

מושגים חשובים בפרק

אורגניזמים אוטוטרופים	המרת אנרגיה	מזון
אורגניזמים הטרוטרופים	חומרים אורגניים	מעברי אנרגיה
הזנה	חומרים אי־אורגניים	



2 רכיבי המזון - אבני הבניין של האורגניזמים

חומרים אורגניים

ב1. פחמימות

ב2. ליפידים

ב3. חלבונים

ב4. ויטמינים

חומרים אי־אורגניים

ב5. מינרלים

ב6. מים

עיקרי הנושאים בפרק

מושגים חשובים פרק



פרק ב: רכיבי המזון – אבני הבניין של האורגניזמים

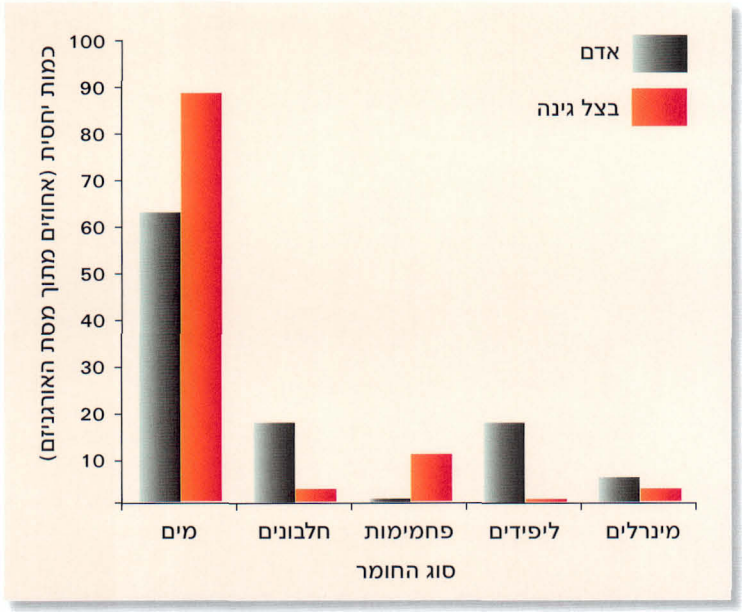
קשר לנושא

אקולוגיה:
שרשרות מזון.

בסביבות החיים השונות מתקיימים זה בצד זה בעלי חיים שונים, צמחים שונים, חיידקים ופטריות. חומרים הבונים את גופו של יצור אחד משמשים מזונו של האחר.
בפרק זה נכיר את החומרים הבונים את גופם של **כל** האורגניזמים החיים – את המבנה הכימי הבסיסי שלהם ואת תפקודיהם באורגניזמים.

חשוב לשים לב שבאורגניזמים ההטרוטרופים יש הקבלה רבה בין קבוצות החומרים המרכיבים את גופם ובין רכיבי מזונם. יחד עם זאת חשוב לזכור שרכיבי המזון אינם משמשים את האורגניזמים כפי שהם מגיעים במזון, אלא מתפרקים לאבני בניין שמהם בונה האורגניזם את רכיבי גופו.

מאלו חומרים בנויים אורגניזמים ?!





איור ב–1: החומרים העיקריים המרכיבים את האורגניזמים (אדם ובצל הגינה כדוגמא) והיחסים הכמותיים ביניהם.

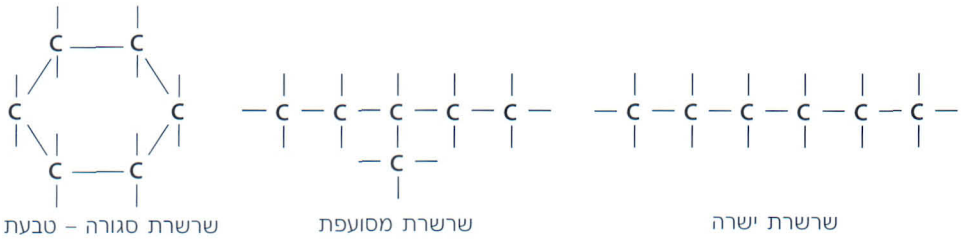
רעיון מרכזי

אחידות ושוני:
האורגניזמים השונים מורכבים מאותם חומרים.

איור ב–1 מראה לנו את קבוצות החומרים המרכיבים את גופו של אדם כמייצג של בעלי חיים ואת בצל הגינה כמייצג צמחים. מהאיור רואים שהאורגניזמים השונים מורכבים מאותן קבוצות חומרים, אך היחסים הכמותיים ביניהן שונים.

חומרים אורגניים

החומרים האורגניים הם תרכובות המבוססות על תכונותיו המיוחדות של אטום הפחמן. הפחמן הוא מרכיב חשוב באורגניזמים והוא מהווה יותר ממחצית החומר היבש בהם (חומר יבש הוא כלל החומרים באורגניזם למעט המים). יכולות הקישור הייחודיות של אטום הפחמן הן שמקנות לו את מקומו המרכזי באורגניזמים חיים. כל אטום פחמן מסוגל ליצור ארבעה קשרים יציבים. הקשרים יכולים להיות קשרים יחידים, כפולים או משולשים, דבר המגדיל את מגוון המבנים שהוא מסוגל ליצור. בנוסף, אטומי פחמן הנקשרים זה לזה מסוגלים ליצור שרשראות, לעיתים ארוכות ביותר. שרשראות אלו יכולות להסתעף או ליצור מבנים מיוחדים (כמו טבעות) כפי שניתן לראות באיור ב–2. השרשראות והטבעות משמשות שלד שאליו נקשרים אטומי מימן, חמצן ויסודות אחרים, וכך הופך מספר המבנים לכמעט אין־סופי. כיום ידועות כ־10 מיליון תרכובות אורגניות בעלות מבנה שונה, וכל הזמן מתגלות תרכובות חדשות.



איור ב–2: מבנים שונים של תרכובות פחמניות: כל אטום פחמן נקשר לארבעה אטומים אחרים ויוצר שרשרות ישרות, שרשרות מסועפות וטבעות.

בסעיפים הבאים נכיר את מגוון הסוגים של החומרים האורגניים ואת תכונותיהם.

ב1. פחמימות







ברוב התרבויות מרכיב התזונה העיקרי של האדם הוא פחמימות: אורז בסין, פסטה באיטליה וסוגי לחם שונים בכל העולם.

היעזרו באיור ב–1 והעריכו מהי המסה שמהוות הפחמימות מתוך מסת גופו של אדם. האם הופתעתם?

כפי שראיתם, הפחמימות מהוות מרכיב קטן יחסית בגופו של האדם. אם כך, להיכן "נעלמות" הפחמימות? רובן הגדול של הפחמימות שאנו, כמו יתר בעלי החיים, צורכים משמש מקור להפקת אנרגיה זמינה (ATP) בתהליך הנשימה התאית.

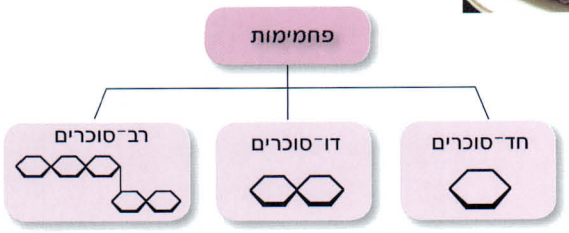
הפחמימות (carbohydrates) הן התרכובות האורגניות הנפוצות ביותר בטבע. הפחמימות מהוות מרכיב מרכזי במבנה דופן התא, ולכן הן מהוות מרכיב משמעותי במשקלם היבש של הצמחים והחיידקים (בצמח: 60%–70%). (משקל יבש נמדד אחרי ייבוש מוחלט של הרקמה בתנור, והוא מדד למשקלו של האורגניזם ללא המים שהוא הכיל.)

לעומת זאת, בבעלי חיים, ובכלל זה האדם, כמות הפחמימות ביחס לכלל המשקל היבש של הגוף קטנה בהרבה מזו של הצמחים.



נוסף להיותן המקור העיקרי להפקת אנרגיה זמינה בכל היצורים החיים, הפחמימות משמשות גם חומר תשמורת. בצמחים הן נאגרות כעמילן ובבעלי חיים – כגליקוגן. כמו כן, הפחמימות מהוות חלק ממבנה חומצות הגרעין (DNA ו־RNA) והן גם קשורות לליפידים (שומנים) או לחלבונים במבנים שונים בתא.

הפחמימות מורכבות מהיסודות פחמן, מימן וחמצן. הנוסחה הכללית של הפחמימות היא $C_x(H_2O)_y$ וממנה ניתן ללמוד על היחסים הכמותיים בין היסודות: היחס בין אטומי המימן לאטומי החמצן הוא כמו במולקולת המים, ומכאן גם נובע השם: פחמימה – פחמן ומים. הפחמימות נחלקות לשלוש קבוצות עיקריות על פי מספר יחידות הסוכר הבסיסיות המרכיבות אותן (איור ב–3).



איור ב–3: שלוש הקבוצות העיקריות של הפחמימות.

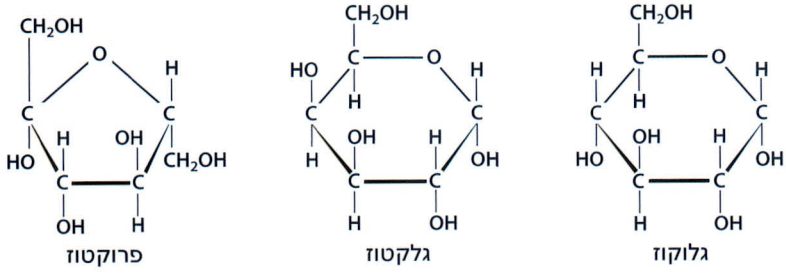
ב1.2 חד־סוכרים

ה**חד־סוכרים** הם אבני הבניין של הפחמימות. לחד־סוכרים הנפוצים ביותר יש שלד של 5 או 6 אטומי פחמן, שמסודרים במרחב כטבעות מחומשות או משושות (במבנה הטבעת אחד האטומים הוא חמצן והשאר אטומי פחמן). החד־סוכרים הם בעלי מבנה גבישי, טעמם מתוק והם מתמוססים היטב במים.

לשלושה חד־סוכרים נודעת חשיבות תזונתית: *גלוקוז*, *גלקטוז* ו*פרוקטוז*. הנוסחה הכללית של שלושתם זהה – $C_6H_{12}O_6$, אך הם שונים זה מזה בצורה שבה מסודרים האטומים במולקולה, כפי שניתן לראות באיור ב–4.







איור ב–4: נוסחאות המבנה של שלושת החד־סוכרים הנפוצים.

הידוע והנפוץ ביותר מבין החד־סוכרים הוא גלוקוז (סוכר ענבים). הוא משמש מקור אנרגיה עיקרי בתהליך הנשימה התאית הן בתאי צמחים והן באלו של בעלי חיים.

גלוקוז מצוי בצורה חופשית בפירות שונים, בעיקר בענבים, בתאנים ובתמרים וכן בדבש.

הגלוקוז מהווה אבן בניין לפחמימות מורכבות יותר וחומר מוצא לתרכובות אחרות.

גלקטוז אינו מצוי בטבע כחד־סוכר בפני עצמו, אלא הוא מהווה מרכיב של סוכר החלב – לקטוז (שהוא דו־סוכר).

פרוקטוז מצוי בדבש, בפירות, בירקות ובצוף הפרחים. פרוקטוז הוא הסוכר המתוק ביותר (פי 1.5 מגלוקוז).

במרבית האורגניזמים קיימים אנזימים המסוגלים לשנות את הגלקטוז והפרוקטוז לגלוקוז ובכך לנצלם כמקור אנרגיה.

על קצה המזלג...

על חיוניות הגלוקוז למוח האדם

בעוד רוב התאים בגופם של בעלי חיים מסוגלים להפיק אנרגיה הן מפירוק וחמצון גלוקוז והן מפירוק וחמצון חומצות שומניות, תאי מערכת העצבים מסוגלים לנצל אך ורק גלוקוז כמקור אנרגיה. מחסור באספקת גלוקוז למוח גורם לאבדן ההכרה תוך דקות ולמוות. יש לדעת שגם עודף גלוקוז בדם גורם נזקים שונים. לכן, לשמירה על רמת הגלוקוז בדם נודעת חשיבות גדולה.

רעיון מרכזי

ויסות והומיאוסטזיס:
רמת הגלוקוז בדם נשמרת בטווח ערכים צר.

שאלה ב–1:

אחד הסימנים לירידה קיצונית ברמת הגלוקוז בדם (היפוגְלִיקֶמְיָה) הוא בלבול.

א. מדוע, לדעתכם, רמת גלוקוז נמוכה בדם גורמת לבלבול?

ב. כיצד תמליצו לטפל באדם המגלה סימנים של היפוגליקמיה?

חד־סוכרים נפוצים אחרים, השונים מעט במבנה הכימי שלהם מאלה שתיארנו קודם, הם הריבוז והדאוקסיריבוז הנוצרים בכל תא חי ומהווים מרכיב חשוב במבנה חומצות הגרעין. הריבוז מהווה מרכיב גם בתרכובות אחרות בעולם החי, דוגמת ה־ATP.

ב2.1 דו־סוכרים



דו־סוכרים מורכבים משתי יחידות של חד־סוכרים הקשורות ביניהן. לכולם טעם מתוק והם מסיסים במים.

הסוכרוז הוא אחד מהדו־סוכרים הנפוצים בטבע, וכשאנו אומרים בשפת היומיום "סוכר", אנו מתכוונים אליו. הסוכרוז מורכב מהחד־סוכרים גלוקוז ופרוקטוז. הסוכרוז מצוי בשפע בקנה סוכר, בסלק סוכר, ברוב הפירות, בגזר וכן בנוזל המופרש מעץ האדר (שממנו מייצרים סירופ מייפל).

על קצה המזלג...

על הדבש ועל העוקץ

צוף הפרחים מכיל סוכרים שונים ובהם סוכרוז. כדי לייצר 0.5 ק"ג דבש, הנחוץ להזנת הזחלים והדבורים הבוגרות של המושבה בחודשי החורף, 160,000 דבורים אוספות צוף מ־2 מיליון פרחים. אנזימים מיוחדים המצויים ברוק הדבורים וב"קיבת" הדבורים מפרקים את הסוכרוז שבצוף לפרוקטוז וגלוקוז. רוב הצוף המפורק מועבר בחזרה "מקיבת הדבש" דרך הוושט אל הפה ומשם לתאי חלת הדבש (מיעוטו משמש להזנת הדבורה). הצוף המפורק שהועבר הוא מימי, וקבוצת דבורים מיוחדת מנפנפת בכנפיה ומאדה את המים עד שמתקבלת תמיסה בעלת ריכוז גבוה של סוכרים. הריכוז הגבוה תורם למניעת התפתחות חיידקים שעלולים לגרום נזק לדבש.



מלטוז הוא דו־סוכר המצוי בזרעים שונים של צמחים בשלבי נביטה וכן בבעלי חיים כתוצר ביניים בפירוק העמילן. ה**מלטוז** מורכב משתי יחידות של גלוקוז.

דו־סוכר הנמצא בבעלי חיים הוא ה**לקטוז** או סוכר החלב, המצוי בחלב של יונקים. הלקטוז משפר את ספיגת הסידן מתוך החלב במערכת העיכול.

עיכול הלקטוז מזורז על־ידי האנזים לקטאז, הנמצא במעי ומפרק את הלקטוז למרכיביו – גלוקוז וגלקטוז.



אשנב למחקר

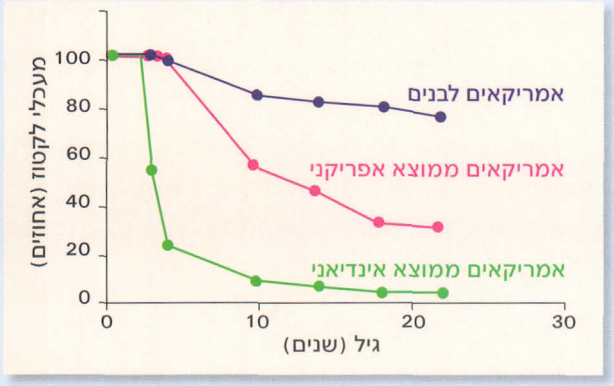
אי־סבילות לסוכר החלב

באוכלוסיות שונות של בני אדם מוכרת תופעה של אי־סבילות ללקטוז.

אצל אנשים בעלי תופעה זו יש חסר חלקי או מוחלט של האנזים לקטאז אשר מפרק את סוכר החלב. אם בתזונה של אנשים אלו יש מרכיבים המכילים לקטוז (כמו מוצרי חלב) הם יסבלו מהפרעות בעיכול, הכוללות שלשול וגזים. הלקטוז שלא פורק מעלה את הלחץ האוסמוטי במעי וגורם להצטברות מים שגורמת לשלשול. בנוסף, הלקטוז שלא פורק ומגיע בשלמותו למעי הגס, עובר תהליכי פירוק על־ידי חיידקי המעיים, ותוצרי הפירוק הם גזים שגורמים אי־נוחות ואף כאב. לאנשים הסובלים מאי־סבילות ללקטוז, מומלץ להפחית את צריכת החלב ומוצריו, להשתמש בתחליפים (כמו חלב סויה, מוצרי טופו), או להשתמש במוצרים דלי לקטוז כמו יוגורט, בהתאם לחומרת התופעה.

שאלה ב–2:

איור ב–5 מציג את אחוז מעכלי הלקטוז בשלוש אוכלוסיות שונות.



איור ב–5: אחוז מעכלי הלקטוז ב־3 אוכלוסיות בגילאים שונים.

א. על סמך איור ב–5, רשמו מהו המאפיין המשותף לכל סוגי האוכלוסייה בנוגע ליכולת לעכל את הלקטוז. מה החשיבות של מאפיין זה?

ב. מהם ההבדלים הניכרים בין האוכלוסיות השונות בגיל 20? הציעו הסבר אפשרי להבדלים אלה.

ג. האם, לדעתכם, ההבדלים שציינתם בסעיף ב נובעים בעיקר מגורמים תורשתיים או מגורמים סביבתיים של תזונה? הסבירו תשובתכם.

ד. האם ניתן, לדעתכם, לסייע לאנשים הלוקים בחסר באנזים לקטאז על־ידי אספקת האנזים לקטאז דרך הפה? הסבירו.

3.12 רב־סוכרים

רב־סוכרים הם מולקולות המורכבות מיחידות רבות מאוד של חד־סוכרים זהים או שונים הקשורים ביניהם.

בניגוד לחד־סוכרים ולדו־סוכרים, לרב־סוכרים אין טעם מתוק. מולקולות הרב־סוכרים אינן מסיסות במים, ולעומת זאת יש להן היכולת לספוח מולקולות מים. במצב זה – נפחן גדל.

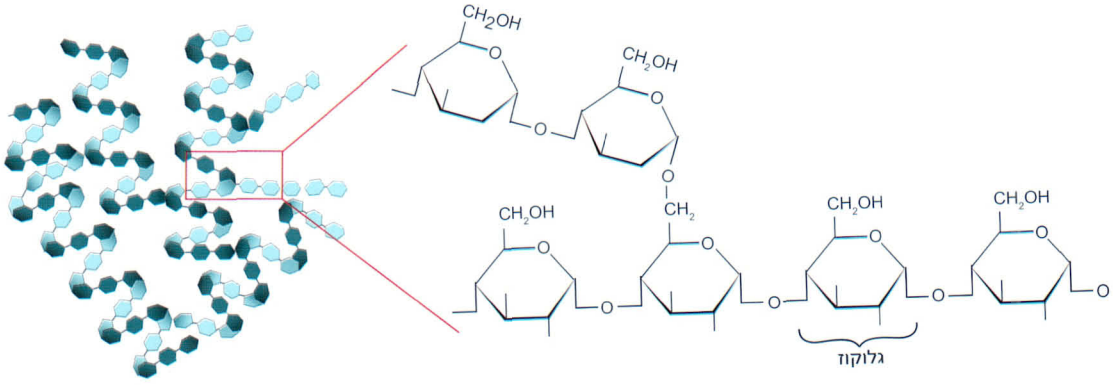
עם הרב־סוכרים, שאבן הבניין שלהם היא מולקולת הגלוקוז נמנים: **עמילן, גליקוגן ותאית**. רב־סוכרים אלו נבדלים זה מזה בסוג הקשר הכימי בין אבני הבניין או בצורת ההסתעפות של השרשרת. הרב־סוכרים הנפוצים באורגניזמים נחלקים על פי תפקודם לשתי קבוצות:

רב־סוכרים המשמשים חומרי תשמורת ורב־סוכרים המשמשים חומרי מבנה.

רב־סוכרים המשמשים חומרי תשמורת

חומר תשמורת הוא חומר הנבנה על־ידי אורגניזמים, נאגר בהם ומשמש בעת הצורך, לאחר פירוקו, מקור לחומרי בנייה ולאנרגיה עבורם.

גליקוגן הוא חומר תשמורת בבעלי חיים. הגליקוגן מורכב מיחידות רבות של גלוקוז הקשורות ביניהן בשרשרת מסועפת (איור ב–6).



איור ב–6: משמאל: קטע משרשרת מסועפת של גליקוגן, המורכבת מיחידות רבות של גלוקוז. שימו לב למבנה הסלילי. **מימין:** הגדלה של קטע מהשרשרת.

בגוף האדם קיים מאגר קטן של חומר התשמורת גליקוגן. הגליקוגן אגור בצורת גרגירים בציטופלסמה של התא. כמותו גדולה בעיקר ברקמות הצורכות אנרגיה רבה, כמו הכבד, השרירים והכליות. הגליקוגן יכול להוות 3%–5% מהמסה של רקמת הכבד ו־0.5%–1% מהמסה של רקמת השריר.

כאשר רמת הגלוקוז בדם יורדת, למשל כמה שעות לאחר הארוחה, הגליקוגן מתפרק ליחידות של גלוקוז ויוצא אל הדם.

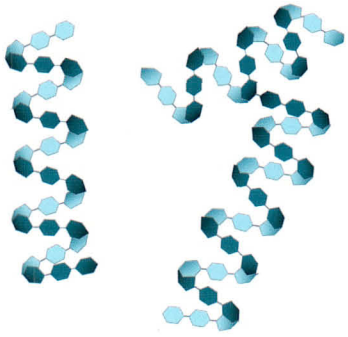
שאלה ב–3:

באדם ידועה הפרעה גנטית נדירה ביותר המכונה "תסמונת אגירת גליקוגן". במחלה זאת מצטבר גליקוגן, אך לגוף אין יכולת לפרקו. אנשים הלוקים בתסמונת זאת חייבים לנקוט משטר קפדני של אכילת גלוקוז מדי מספר שעות, ובזמן שינה הם חייבים להיות מחוברים לצינור הזנה המזרים לגופם גלוקוז. ללא צינור זה הם עלולים למות בשנתם. הסבירו את החשיבות בשמירה על משטר חיים זה ללוקים בתסמונת. התייחסו בהסבר לתפקוד הגלוקוז.

עמילן הוא חומר תשמורת בצמחים. בדומה לגליקוגן, גם העמילן הוא רב־סוכר, המורכב מיחידות רבות של גלוקוז הקשורות ביניהן בשרשרות סלילוניות. חלק משרשרות העמילן מסועפות (בדומה לשרשרות הגליקוגן) וחלקן אינן מסועפות (איור ב–7).

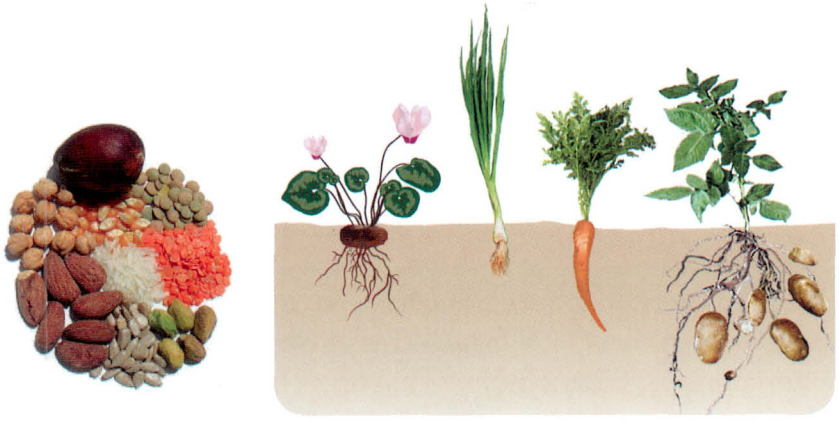
העמילן מצטבר בתאים ומשמש כמקור לגלוקוז זמין לצמח בשעות הלילה שבהן תהליך הפוטוסינתזה אינו מתקיים. העמילן מצטבר גם בחלקים שונים של הצמח המהווים אברי אגירה, והוא נאגר בהם בעיקר באברוני אגירה תוך־תאיים.

חומרי תשמורת נאגרים גם בזרעים ומשמשים את העוּבָּר בדור הבא. לעתים, חומרי התשמורת בזרעים כוללים לא רק רב־סוכר כי אם גם שומן או חלבון. איור ב–8 מראה לנו אברי אגירה וזרעים שונים.



איור ב–7: קטע משרשרת מסועפת ומשרשרת לא מסועפת של עמילן. השרשרות מורכבות מיחידות רבות של גלוקוז והן בעלות מבנה סלילי.

בתזונת האדם עמילן הוא מרכיב מרכזי, ובמדינות מפותחות הוא מהווה כ־60%–70% מצריכת הפחמימות היומית.



איור ב–8: אברי אגירה שונים. מימין לשמאל: פקעות של תפוח אדמה, גזר, בצל ורקפת וכן זרעים של צמחים שונים.

שאלה ב–4:

כידוע לכם, הצמח הוא יצור אוטוטרופי, כלומר מייצר בעצמו חומרים אורגניים מחומרים אי־אורגניים. מדוע, אם כן, עוּבָּר הצמח המצוי בזרע, זקוק למאגר מזון?

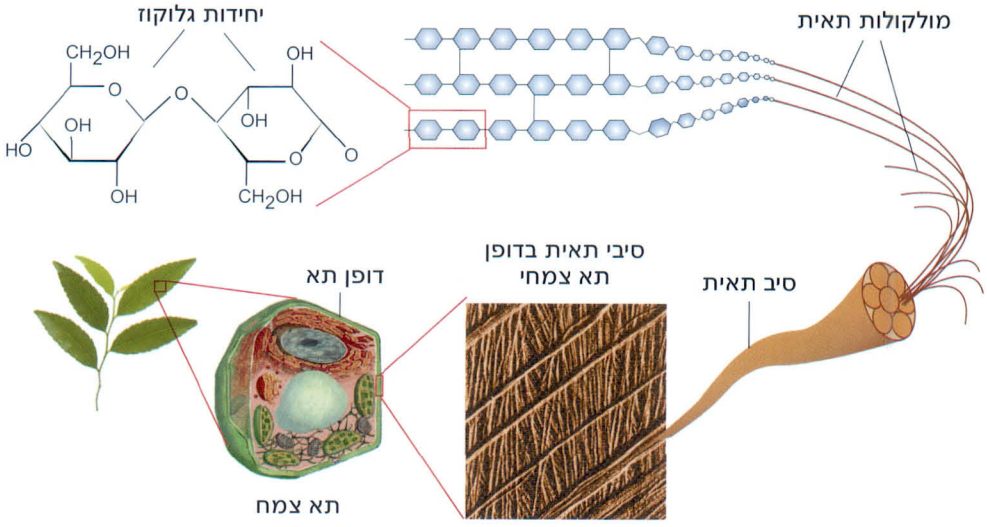
מהן התכונות שהודות להן העמילן והגליקוגן מתאימים לשמש חומרי תשמורת ?!

היתרונות של העמילן והגליקוגן כחומרי תשמורת נובעים מהמבנה המולקולרי שלהם:

- שניהם בנויים כשרשרת של יחידות גלוקוז המאורגנת במרחב במבנה סלילי. המבנה הסלילי ניתן לאריזה בנפח קטן.
- הם אינם מסיסים במים ולכן הם לא משפיעים על הריכוז האוסמוטי בתא.
- בעזרת אנזימים הם יכולים להתפרק בקצב מהיר לאבני הבניין שלהם – מולקולות גלוקוז.

רב־סוכרים המשמשים חומרי מבנה

תאית (צלולוזה) היא מולקולת רב־סוכר המהווה מרכיב עיקרי של דופן התא הצמחי, ולכן לא מפתיע שהיא התרכובת הפחמנית הנפוצה ביותר בטבע. כ־50% מהתכולה הכללית של הפחמן בביוספירה מצויה בתאית. מולקולות התאית הן מולקולות ארוכות ובלתי מסועפות המורכבת מיחידות רבות של גלוקוז וקשורות ביניהן בקשרי מימן. מולקולות התאית מאורגנות במבנים סיביים (איור ב–9) המקנים לדפנות של תאי הצמחים גמישות מצד אחד וחוזק ועמידות כימית ומכנית מצד שני.



איור ב–9: מבנים סיביים בצמח כפי שהם מתבטאים ברמות הארגון מהאורגניזם עד המולקולה. בקצה העליון: קטע ממולקולת תאית המורכבת מיחידות רבות של גלוקוז.

האדם ובעלי חיים רבים אחרים אינם מסוגלים לעכל תאית, משום שאין בגופם אנזימים הדרושים לפירוק הקשרים המיוחדים שבין יחידות הגלוקוז במולקולת התאית. לכן תאית, בניגוד לעמילן, לא יכולה להוות עבור האדם מקור לאספקת אנרגיה, או מקור לאבני בניין.

למרות העובדה שתאית אינה נעכלת על־ידי האדם, יש המלצה גורפת של ארגון הבריאות העולמי לצרוך מזון עשיר בסיבים בגלל תרומתם לבריאות האדם. סיבים אלו מכונים **סיבים תזונתיים** והם תערובת של רב־סוכרים צמחיים כגון תאית וליגנין.

לעומת האדם שאינו יכול לנצל תאית, תזונתם של מעלי גירה (כגון פרות) יכולה להתבסס בעיקר על מזון עשיר בתאית.

עוד על
חשיבות הסיבים בתזונת האדם:
בפרק ו, בסעיף פירמידת המזון, עמודים 177-178.
עיכול תאית:
בפרק ד, עמודים 118-119.

שאלה ב–5:

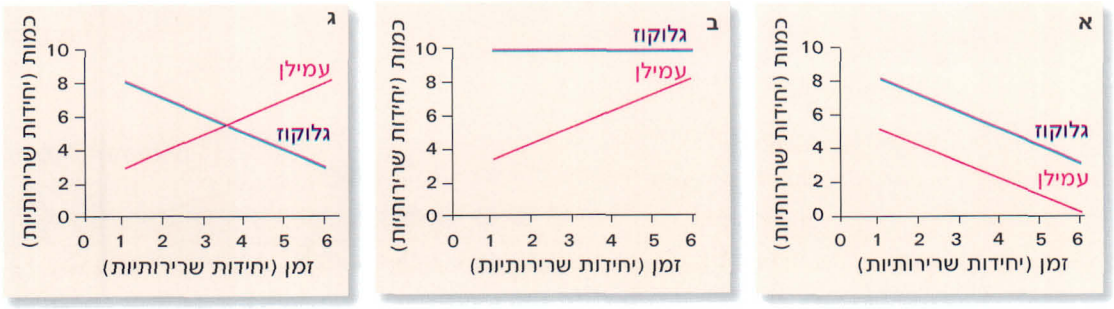
מהו היתרון לצמח מכך שסוכרים נאגרים בזרע כרב־סוכר ולא כחד־סוכר?

שאלה ב–6:

כיצד ניתן להסביר את נוכחות המלטוז בזרעים, למשל בזרעי הדגנים, דווקא בשלבי הנביטה?

שאלה ב–7:

רק אחד מהגרפים המוצגים באיור ב–10 מתאר נכון את השינויים החלים עם הזמן בכמות העמילן ובכמות הגלוקוז בתהליך האנזימטי של יצירת עמילן. מהו האיור הנכון? נמקו בחירתכם.



איור ב–10: השינויים החלים עם הזמן בכמות הגלוקוז והעמילן בתהליך אנזימטי של יצירת עמילן.
שימו לב! רק אחד מהגרפים נכון.

שאלה ב–8:

השוו בין תאית, מלטוז, פרוקטוז וגליקוגן על פי המאפיינים הבאים: סוג הפחמימה, מתיקותה (כן/לא), מסיסותה במים, הימצאותה בצמחים ובבעלי חיים ותפקודה. רכזו את המידע בטבלה.

שאלה ב–9:

בניסוי שתוצאותיו מוצגות באיור ב–11, חתכו קישואים לקוביות בגודל זהה. לכל אחת מ־6 מבחנות הוכנסו 10 קוביות. לשלוש מהמבחנות הוסיפו אבקת גלוקוז ולשלוש האחרות – אבקת עמילן באותה מסה.
לאחר שעה נמדד נפח הנוזל שהצטבר במבחנות.
התבוננו באיור וענו על השאלות הבאות:

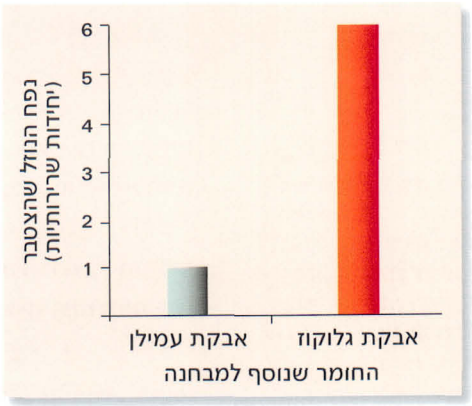
א. חברו כותרת מתאימה לאיור.

ב. תארו את תוצאות הניסוי.

ג. הסבירו את תוצאות הניסוי תוך שימוש במושגים מסיסות ואוסמוזה. התייחסו להבדלים בין עמילן וגלוקוז.

ד. האם, לדעתכם, במבחנה עם העמילן היה צפוי להתקבל נוזל? הציעו הסבר לנוכחות נוזל במבחנה זו.

ה. מדוע נדרשו 3 מבחנות לכל אחד מהטיפולים?



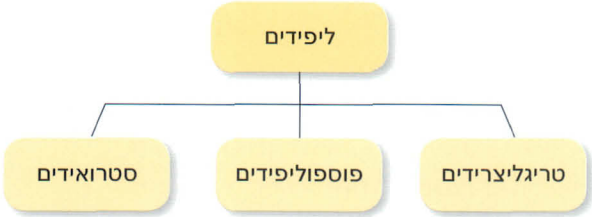
איור ב–11: תוצאות הניסוי.

ב.2 ליפידים

לליפידים, המכונים בשפת היומיום שומנים, קיים דימוי שלילי והם נתפסים אצל רובנו כחומר "לא בריא". חלק מהמוניטין השלילי אכן מוצדק – צריכה עודפת של ליפידים גורמת בין היתר השמנה ועלולה לגרום מחלות כלי דם ולב. ישנם אף מחקרים הקושרים צריכה עודפת של ליפידים להתפתחות סוגים שונים של סרטן.
עם זאת, חשוב לדעת שצריכת ליפידים במידה, הכרחית לבריאות, וגם כשעושים דיאטת הרזיה חיוני לכלול בה ליפידים. תזונה נטולת ליפידים לחלוטין מתבטאת בשלב הראשון בהתייבשות עור הפנים ובנשירת שיער. לאורך זמן, היא תפגע במערכת העצבים ובמערכת החיסון, תגרום בעיות בלחץ דם ועוד.

מיהם הליפידים?

כאמור, בשפת היומיום נהוג לכנות את ה**ליפידים** בשם שומנים, אך למעשה השומנים הם רק תת־קבוצה בתוך הקבוצה הרחבה המכונה ליפידים. ליפידים הם קבוצת חומרים אורגניים מגוונת מאוד מבחינת ההרכב והמבנה הכימי. התכונה המשותפת לכל הליפידים היא שהם אינם מסיסים במים (בלועזית: הידרופוביים hydro=מים, phobos=פחד). רוב הליפידים מורכבים משרשרות או מִטַבעות של אטומי פחמן ומימן והם מכילים יסודות נוספים כמו חמצן וזרחן.
הקבוצות העיקריות של הליפידים הן טריגליצרידים, פוספוליפידים וסטרואידים (איור ב–12).
לליפידים תפקידים מגוונים: הם משמשים מקור אנרגיה, חומר הגנה ובידוד, מרכיב של קרומי התאים והאברונים, ממס של ויטמינים מסוימים וחומר מוצא לחומרים שונים באורגניזמים חיים.
בהמשך נביא דוגמאות לתפקודים של קבוצות הליפידים השונות, אך תחילה נכיר את אבני הבניין של מרבית הליפידים.



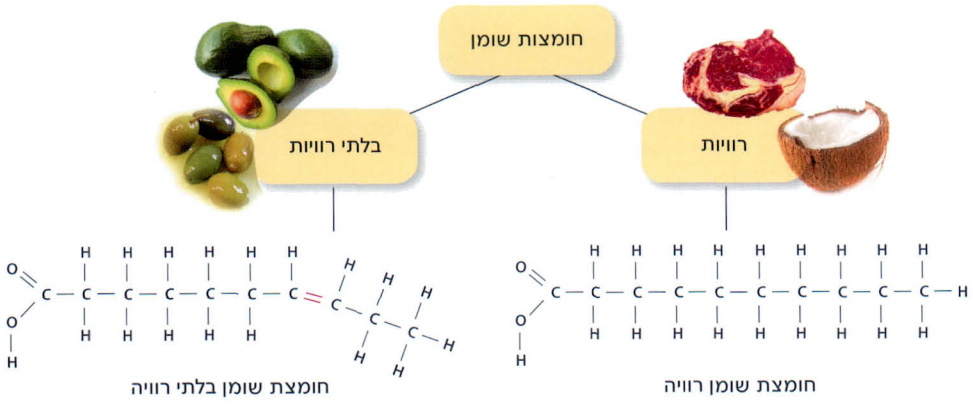
איור ב–12: הקבוצות העיקריות של הליפידים.

ב.1.2 חומצות שומן – אבני הבניין של הליפידים

אבני הבניין של ליפידים רבים הן מולקולות של **חומצות שומן**. מולקולות אלה אינן מצויות בדרך כלל בטבע בצורתן החופשית, אלא הן קשורות לתרכובות אחרות.
חומצות השומן בנויות משלד ובו 2 עד 36 אטומי פחמן הקשורים ביניהם. לפחמן הקיצוני בשרשרת קשורה קבוצה קרבוקסילית (COOH), ולחלק או לכל אתרי הקישור הנותרים באטומי הפחמן קשורים אטומי מימן (ראו איור ב–13).

חומצות השומן נחלקות לשתי קבוצות: **חומצות שומן רוויות** ו**חומצות שומן בלתי רוויות**. בחומצת שומן רוויה, לכל אטומי הפחמן בשלד (חוץ משני אטומי הפחמן שבקצוות) קשורים שני מימנים כלומר, היא רוויה בכל אטומי המימן האפשריים. מולקולות של חומצות שומן רוויות הן בעלות מבנה ישר. בחומצת שומן בלתי־רוויה, בין שני אטומי פחמן צמודים קיים קשר כפול. חומצות שומן בלתי רוויות יכולות יכולות להכיל יותר מקשר כפול אחד, והן מתאפיינות במבנה מכופף. לחלק מחומצות השומן הרוויות נודעת השפעה שלילית על בריאות האדם.

עוד על
חומצות שומן רוויות והשפעותיהן השליליות על בריאות האדם:
בפרק ו עמודים 192-193.



איור ב–13: חומצות שומן רוויות (שרשרות ישרות) ובלתי־רוויות (שרשרות כפופות).

חומצות שומן חיוניות

את רוב חומצות השומן גוף האדם מסוגל לייצר בעצמו מחומרים אחרים. מדוע, אם כן, תזונה נטולת ליפידים לחלוטין עלולה לפגוע בתפקוד גוף האדם, גם אם היא מגוונת ומכילה מספר קלוריות מספק?

הסיבה לכך היא שקיימות שתי חומצות שומן שגוף האדם אינו מסוגל לבנות בעצמו והוא חייב לקבלן מן המוכן במזון. חומצות אלה מכונות **חומצות שומן חיוניות**. שתי חומצות השומן החיוניות הן החומצה הלינולאית והחומצה הלינולנית. שתי חומצות אלה הן חומצות שומן בלתי רוויות וזכו לכינויים אומגה־6 ואומגה־3 בהתאמה (אומגה מסמל את מיקומו של הקשר הכפול בשרשרת הפחמנים).

לחומצות השומן החיוניות תפקיד חשוב ביצירת הורמונים, בקרישת דם, בשמירה על לחץ דם תקין, בבניית קרומי תאים ועוד, ובהיעדרן ייפָּגע תפקוד הגוף. חלב אֵם מכיל כמויות נכבדות של חומצות שומן חיוניות, מה שמצביע על חשיבותן הרבה להתפתחותו התקינה של הפעוט. ואכן, מחקרים הראו כי מחסור בחומצות שומן חיוניות אצל ילדים וחיות צעירות גורם לעיכוב בגדילה ולנזק בלתי הפיך למערכת העצבים.

חומצה לינולאית – שייכת כאמור לקבוצת חומצות שומן שמכונה אומגה־6, והיא נמצאת בשְמנים צמחיים כמו שמן תירס, שמן חריע, שמן חמניות, אבוקדו ועוד.

חומצה לינולנית – שייכת לקבוצת חומצות שומן שמכונה אומגה־3, והיא נמצאת בעיקר בדגי מעמקים כגון סלמון (אלתית) וטונה, באגוזי מלך (אגוזי קליפורניה), בשמן פשתן ובשמן קנולה.

התזונה המערבית כוללת כמויות גדולות מאוד של חומצות אומגה־6 וכמויות קטנות של חומצות אומגה־3. מחקרים הראו כי לצורך פעילות תקינה של הגוף חשוב לשמור על יחס מאוזן בין צריכת חומצות אומגה־3 וחומצות אומגה־6. חוסר איזון בין שתי חומצות שומן אלה פוגע בתפקוד מערכת העצבים, הלב והעור. לפיכך תזונאים ממליצים כיום להעשיר את התזונה במזונות המכילים חומצות אומגה־3 ולצמצם במזונות העשירים באומגה־6.

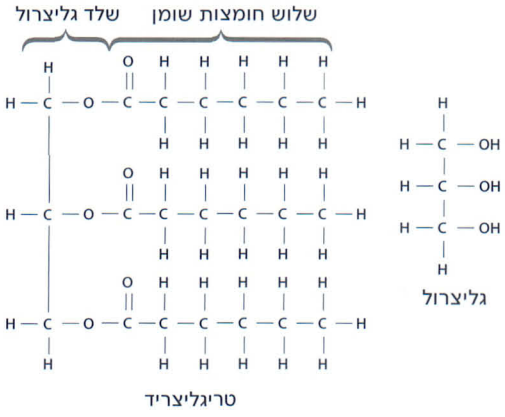
שאלה ב–10:

את רוב חומצות השומן גוף האדם מסוגל לייצר בעצמו בעזרת אנזימים מתאימים המצויים בגופנו.

על פי מה שלמדתם עד כה, מאלו חומרי מוצא יכול הגוף לבנות חומצות שומן? הסבירו את תשובתכם.

ב2.2 טריגליצרידים - שומנים (fats) ושְמנים (oils)

כפי שראינו, בשפת היומיום נהוג לכנות את כל הליפידים – שומנים, אך כפי שנלמד בסעיף זה, מבחינה מדעית המונח שומנים מתייחס רק לחלק מה**טריגליצרידים** (שהיא אחת משלוש הקבוצות העיקריות של הליפידים). הטריגליצרידים (טרי=שלוש) הם הקבוצה הנפוצה ביותר בקרב הליפידים. כפי שניתן לראות באיור ב–14, הטריגליצרידים מורכבים משלד של גליצרול שאליו קשורות שלוש חומצות שומן.



איור ב–14: מבנה של גליצרול (מימין) ודוגמה למבנה של טריגליצריד (משמאל).

כל הטריגליצרידים מכילים חומצות שומן משני הסוגים (רוויות ובלתי רוויות), אולם ביחסים שונים. הרכב חומצות השומן הבונות את הטריגליצרידים קובע את תכונות הטריגליצריד:
רוב של חומצות שומן רוויות גורם לכך שהחומר יהיה מוצק בטמפרטורת החדר, ואז הוא מכונה **שומן**. לעומת זאת, רוב של חומצות שומן בלתי רוויות גורם לכך שהחומר יהיה נוזלי בטמפרטורת החדר, ואז הוא מכונה **שמן** (איור ב–15).
השומנים מצויים בעיקר במזון מן החי כגון בשר, ביצים ומוצרי חלב, ביניהם חמאה, אך גם בצמחים אחדים כמו בפירות של הקוקוס או הדקל.
השְמנים מצויים בעיקר בצמחים, למשל פירות הזית והאבוקדו, אך גם בבעלי חיים, כמו עופות ודגים.
כמעט בכל האורגניזמים, טריגליצרידים משמשים מאגרי אנרגיה ארוכי טווח. בבעלי חיים נאגרות כמויות גדולות של טריגליצרידים בצורת טיפות שומן בתאי רקמת השומן. בחלק מהצמחים, כמו בוטנים, אגוזים ושקדים, הטריגליצרידים מהווים את רוב חומרי התשמורת לעובר שבזרע.



איור ב–15: איור סכמטי של חומצות שומן בשמן (שמן זית) ובשומן (חמאה).

ההתאמה של הטריגליצרידים לתפקודם כמאגרי אנרגיה נובעת מ:
- ערכם האנרגטי הגבוה – כמות האנרגיה המופקת מגרם של טריגליצרידים (שמן או שומן) גדולה בהרבה מזו המופקת מגרם של עמילן או של גליקוגן.
- אי מסיסותם במים – הטריגליצרידים, בדומה לרב־סוכרים, אינם מסיסים במים ולכן הם אינם משנים את הריכוז האוסמוטי בתאים.

לטריגליצרידים תפקודים נוספים ברקמות השומניות בבעלי חיים: הגנה על רקמות ואיברים פנימיים בגוף מפני פגיעות פיזיות; בידוד מפני טמפרטורות סביבה נמוכות באמצעות רקמת שומן המצטברת מתחת לעור (אצל בעלי חיים בבתי גידול קרים מאוד, כמו לווייתן ודוב הקוטב).

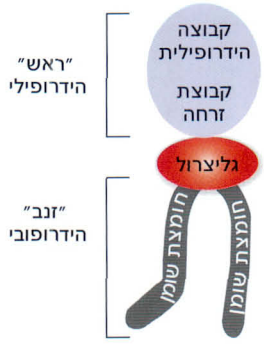
עוד על
הערך האנרגטי של ליפידים:
בפרק ו, עמוד 165.

שאלה ב–11:
באלו מצבים צפוי פירוק של טריגליצרידים בגוף האורגניזמים? תנו דוגמה אחת בצמחים ואחת בבעלי חיים.

שאלה ב–12:
חומר התשמורת העיקרי בצמחים הוא עמילן, ואילו בבעלי חיים הוא ליפידים. הסבירו מהו היתרון לבעלי חיים בליפידים כחומר תשמורת.

3.2ב פוספוליפידים

הפוספוליפידים משמשים מרכיב עיקרי במבנה של קרומים ביולוגיים: קרומי תאים וקרומי אברונים תוך־תאיים.
כפי שניתן לראות באיור ב–16, הפוספוליפידים בנויים משלד של גליצרול, שאליו קשורות מצד אחד שתי חומצות שומן המהוות "זנב הידרופובי", ומצד שני – קבוצת זרחה (פוספט) וקבוצה כימית נוספת המהוות "ראש הידרופילי".



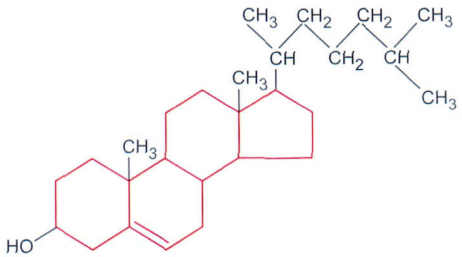
איור ב–16: מבנה סכמתי של פוספוליפיד.

קשר לנושא

התא - מבנה ופעילות:
קרומים ביולוגיים בנויים משכבה כפולה של פוספוליפידים.

4.2ב סטרואידים

קבוצה נוספת של ליפידים היא **הסטרואידים**. בניגוד לטריגליצרידים ולפוספוליפידים, חומרים אלה אינם כוללים חומצות שומן. לכל הסטרואידים שלד קשיח המורכב מארבע טבעות פחמניות מלוכדות, והם נבדלים זה מזה בקבוצות הקשורות לשלד ובעמדות שקבוצות אלו קשורות אליהן.
עם הסטרואידים נמנים חומרים שונים, כמו כולסטרול, ויטמין D והורמוני מין. הסטרואיד השכיח ביותר ברקמות בעלי חיים הוא ה**כולסטרול**. באיור ב–17 מוצג המבנה שלו. חשוב לדעת שצמחים אינם מכילים כולסטרול (מכאן שכולסטרול מצוי רק במזונות שמקורם מן החי).
לכולסטרול יצא שם רע, והוא נקשר אצלנו למחלות כלי דם ולב. מחקרים רפואיים מצביעים על קשר בין רמת כולסטרול גבוהה בדם לעלייה בסיכון ללקות בהתקף לב. אך האמת היא שרמה נמוכה מדי של כולסטרול בדם גם היא מאוד לא רצויה.



איור ב–17: נוסחת מבנה של כולסטרול. השלד הסטרואידי מודגש בצבע.

עוד על

כולסטרול והקשר שלו לבריאות האדם:
בפרק ו, עמודים 192-193.

לכולסטרול תפקודים חשובים בגוף האדם –

- הוא מרכיב של קרומי התא ויש לו תפקיד בוויסות הגמישות שלהם.
- הוא חומר מוצא לייצור חומרים רבים, בהם הורמונים סטרואידים (דוגמת הורמוני המין אסטרוגן וטסטוסטרון), ויטמין D ומלחי מרה.

על קצה המזלג...

סטרואידים בספורט וברפואה

כאשר מזכירים סטרואידים בהקשר לספורט, מדובר על חומרים סינתטיים הדומים בהרכבם להורמוני המין הגבריים (סטרואידים אנבוליים). חומרים אלו מעודדים צמיחה של שרירים ומגבירים סימני מין מִשְׁניים "גבריים".
ברפואה נעשה שימוש בסטרואידים אלה במקרים שבהם גופו של הגבר אינו מייצר מספיק טסטוסטרון. חשוב לדעת שכאשר משתמשים בסטרואידים אלה ללא פיקוח רפואי הם עלולים לגרום לתופעות לוואי שונות, כמו עצירת הגדילה בבני נוער, ניוון האשכים בגברים, הופעה חיצונית "גברית" בנשים, גידולים שונים, פגיעה בשריר הלב ועוד.
ברפואה משתמשים גם בקבוצה אחרת של תרופות סטרואידיות, המשפיעות על מערכת החיסון וחוסמות יצירה של מרכיבים הקשורים לתגובות אלרגיות כמו אסטמה, ולתגובות דלקתיות כמו דלקות פרקים.



שאלה ב–13:

א. סכמו את התכונות המשותפות לכל הליפידים.

ב. לגבי כל אחת מקבוצות הליפידים, סכמו מהן יחידות המבנה שלהן ומהם תפקודיהן העיקריים בצמחים ובבעלי חיים. ערכו את תשובתכם בטבלה.

ב3. חלבונים

על מקומם המרכזי של החלבונים ביצורים חיים מעיד השם של חלבון בלועזית – protein – שמקורו ביוונית ופירושו ראשון או ראשוני. חשיבותם העצומה של החלבונים לאורגניזם מומחשת באמצעות הנזק הרב שעלול לגרום אי־תפקודו של חלבון בודד. למרות שבגוף פועלים עשרות אלפי חלבונים שונים בדרך כלל לא ניתן לחפות על אי־תפקודו של חלבון מסוים, וזאת בשל התפקוד הייחודי של כל חלבון.

החלבונים ממלאים תפקודים רבים ביצורים חיים. כמעט בכל פעילות המתרחשת בתאים של יצורים חיים, מעורבים חלבון אחד או יותר. מגוון החלבונים בטבע הוא עצום, ובתא אחד קיימים זה לצד זה אלפי חלבונים שונים.

רוב המסה של החלבונים בגופם של בעלי חיים הם **חלבונים מבניים**. הם משמשים לבניית תאי הגוף ורקמותיו כדוגמת קולגן בגידים, בעור, בעצמות ובסחוס וקרטין בצִפורניים ובשֵׂער. שאר המסה של החלבונים הם **חלבונים תפקודיים** המשמשים לפעולות מגוונות ביצורים חיים. בעת מחסור בפחמימות ובשומנים, החלבונים משמשים גם מקור אנרגיה.

קשר לנושא

התא - מבנה ופעילות:
אנזימים, תעלות, נשאים.

החלבונים התפקודיים העיקריים הם אלה:

- **אנזימים** הפועלים כזרזים ביולוגיים, המאפשרים את התרחשותן של תגובות כימיות במערכות ביולוגיות בקצב מתאים, למרות התנאים המתונים השוררים בהן.
- **הורמונים וחלבונים מווסתים** אחרים, המהווים אותות לשינוי ברמות של פעילויות בתאים, או קולטנים (רצפטורים) לאותות שונים.
- **תעלות ונשאים** הנמצאים בקרום התא ובקרומים של אברונים תוך־תאיים ומשמשים למעבר של חומרים דרך הקרומים.
- **נוגדנים** המשתתפים בהגנה על הגוף מפני גורמים זרים ותאים סרטניים.
- **חלבוני הובלה** המעבירים חומרים מאיבר לאיבר (כדוגמת המוגלובין).
- **חלבוני קרישת דם** התורמים למניעת איבוד דם בעת פציעה על־ידי עצירת הדימום (בהם גורמי קרישה ופיברינוגן).
- **חלבונים מתאמי תנועה** המעניקים לתאים ולבעלי חיים את היכולת להתכווץ, לשנות צורה ולזוז (כדוגמת אקטין ומיוזין).
- **חלבונים המשתתפים בשמירת הריכוז האוסמוטי של הדם** ושל הנוזל הבין־תאי. האחראי העיקרי לכך הוא החלבון אלבומין.

על קצה המזלג...

תת־תזונה ומחסור בחלבון אלבומין

בקרב שבטים מסוימים באפריקה, בעיקר אצל ילדים צעירים, נפוצה מחלה הנובעת ממחסור בחלבון בתזונה. ילדים הלוקים במחלה זאת ניכרים בבטן נפוחה מאוד. המחלה מופיעה בדרך כלל כמה חודשים לאחר הגמילה המאולצת של הילדים מחלב האם, לרוב עקב לידת תינוק נוסף, ומעבר לתזונה עתירת פחמימות ודלה בחלבונים. ילדים הלוקים במחלה יסבלו מפיגור בגדילה, מבעיות במערכת החיסון בגלל אי־יצירת נוגדנים ומבעיות של הצטברות נוזלים המתבטאות גם בהתנפחות הבטן.

מדוע מצטברים נוזלים?

במצבים של מחסור בחלבונים בתזונה, נוצר בגוף מעט אלבומין. כתוצאה מכך הריכוז האוסמוטי של הדם יורד. כתוצאה מכך קטַן הפרש הריכוזים בין הנוזל שבתוך כלי הדם והנוזל שמחוץ לכלי הדם, ומים מצטברים בחללים הבין תאיים. מים אלה יוצרים בצקות, ולאורך זמן הם אלה שאחראים לתופעת הבטן התפוחה שרואים בילדים מוכי רעב.



רעיון מרכזי

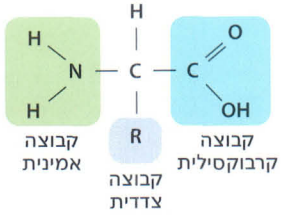
אחידות ושוני: *מגוון החלבונים הגדול מבוסס על מספר קטן של חומצות אמיניות.*

אבני הבניין של החלבונים הן **חומצות אמיניות**. כל החלבונים בכל האורגניזמים – בעלי חיים, חיידקים, פטריות וצמחים – בנויים בסך הכול מ־20 חומצות אמיניות שונות.

לכל החומצות האמיניות מבנה משותף. כמו שרואים באיור ב–18, הן מורכבות מאטום פחמן מרכזי שאליו קשורות קבוצה קרבוקסילית (COOH), קבוצה אמינית (NH_2), אטום מימן (H) וקבוצה צדדית, המסומנת באיור באות R.

שימו לב! החומצות האמיניות מורכבות מאטומי פחמן, מימן וחמצן, כמו הגלוקוז וחומצות השומן, אך נוסף לאלה יש בכל חומצה אמינית לפחות אטום **חנקן** אחד.

החומצות האמיניות שונות זו מזו בקבוצות הצדדיות שלהן. הקבוצות הצדדיות נבדלות זו מזו במבנה, בגודל, במטען החשמלי שהן נושאות, ביכולת שלהן ליצור קשרים כימיים ובפעילותן הכימית. כוחות המשיכה והדחייה בין הקבוצות הצדדיות בחלבון הם שקובעים, למעשה, את המבנה המרחבי של החלבון.



איור ב–18: מבנה כללי של חומצה אמינית.

הצמחים מסוגלים לייצר את כל 20 החומצות האמיניות מהפחמימות שנוצרות בפוטוסינתזה, בצירוף של חנקן שמתקבל מחנקות מן הקרקע (תרכובות חנקן וחמצן). לעומת זאת, האנזימים בגופם של בני אדם ובעלי חיים אחרים מסוגלים לייצר רק חלק מהחומצות האמיניות. את החומצות האמיניות האלה מסוגל גופם של בני האדם ובעלי חיים אחרים לייצר בעצמו מחומרי ביניים הנוצרים בתהליכי הנשימה התאית ובמסלולים ביוכימיים אחרים. לפיכך הן אינן חייבות להיכלל במזון. שמונה מתוך 20 החומצות האמיניות אינן מיוצרות בגוף בשל העדר האנזימים הנחוצים לייצורן. החומצות האמיניות שהגוף **אינו יכול** לייצר בעצמו נקראות **חומצות אמיניות חיוניות**. שאר החומצות האמיניות נוצרות בגוף האדם ומכונות חומצות **אמיניות בלתי חיוניות**.

חשוב לציין שלבניית חלבוני הגוף דרושות **כל** 20 החומצות האמיניות, והמושג "חיוני" מתייחס רק לצורך לקלוט אותן מתוך המזון.

רוב סוגי המזון שמקורם מן החי (בשר, ביצים ומוצרי חלב) מכילים את כל החומצות האמיניות החיוניות. חומצות אמיניות חיוניות קיימות גם במזונות מהצומח, אך בכל אחד מסוגי המזון הצמחי חסר חלק מהחומצות האמיניות החיוניות. כדי שאנשים שתזונתם צמחונית או טבעונית יקבלו את כל החומצות האמיניות החיוניות, עליהם לשלב מזון ממקורות שונים.

שאלה ב–14:

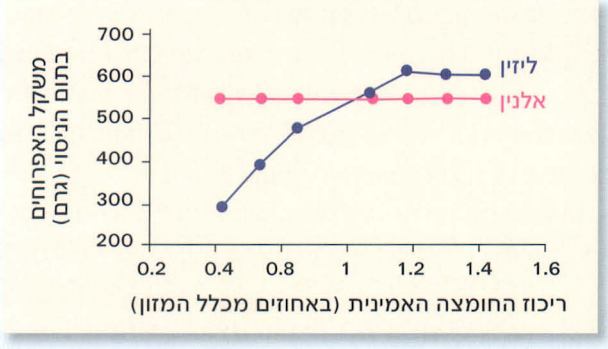
במעונות יום נהוג לתת לילדים תזונה צמחונית. במעונות אלה תכלול ארוחת הצהריים קטניות ודגנים בצירוף מוצרי חלב (למשל בורגול, עדשים ויוגורט). הסבירו מדוע.

אשנב למחקר

כדי לבדוק את השפעתן של שתי חומצות אמיניות (ליזין ואלנין) על התפתחות אפרוחים, נערך הניסוי הבא:

ל־7 קבוצות, שבכל אחת מהן 10 אפרוחים, נתנו תערובות מזון השונות זו מזו בריכוז הליזין, ול־7 קבוצות נוספות נתנו תערובות מזון השונות זו מזו בריכוז האלנין.

כל שאר תנאי הניסוי נשמרו זהים: גיל האפרוחים (שבוע), המשקל ההתחלתי שלהם, הערך הקלורי של המזון ומרכיביו הנוספים ותנאי המחיה של האפרוחים. לאחר חמישה שבועות מתחילת הניסוי נשקלו האפרוחים. תוצאות הניסוי מוצגות באיור ב–19.



איור ב–19: השפעת ריכוזים שונים של ליזין ואלנין בתערובת המזון על משקל האפרוחים.

שאלה ב–15:

א. מדוע הקפידו החוקרים שבכל קבוצת ניסוי יהיו 10 אפרוחים ולא הסתפקו באפרוח אחד?

ב. באחת מקבוצות האפרוחים שלהן הוסיפו ליזין היה אפרוח אחד שמשקלו כמעט לא עלה במהלך הניסוי, לעומת משקלם של שאר תשעת האפרוחים בקבוצה שעלה במידה דומה. האפשרויות העומדות בפני החוקר הן:

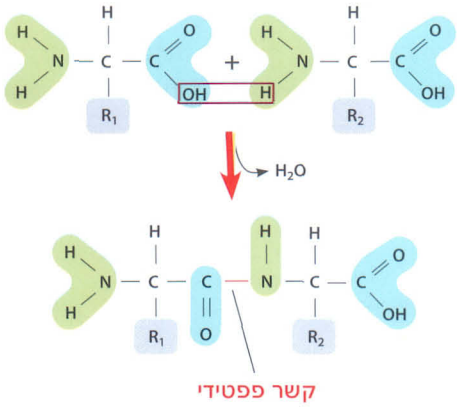
1. להוציא את נתוני האפרוח מחישוב הממוצע.
2. לכלול את נתוניו בחישוב הממוצע.

בחרו באפשרות הנראית לכם נכונה ונמקו את בחירתכם.

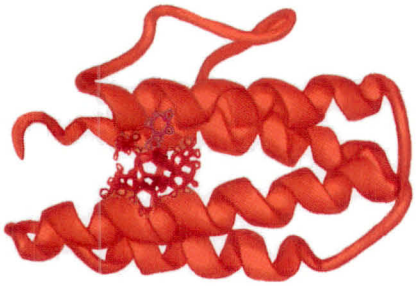
ג. מהי החשיבות בשמירה על תנאים אחידים בכל קבוצות הניסוי פרט לתכולת החומצה האמינית במזון?

ד. על סמך תוצאות הניסוי, שערו מי מבין החומצות האמיניות – ליזין או אלנין היא חומצה אמינית חיונית לאפרוחים? הסבירו את קביעתכם.

ה. איזה ריכוז כדאי להוסיף מהחומצה הנחוצה? כיצד הגעתם למסקנה זו?



איור ב–20: היווצרות קשר פפטידי בין שתי חומצות אמיניות.



איור ב–21: מבנה מרחבי של חלבון

חלבון הוא שרשרת של חומצות אמיניות הקשורות זו לזו ב**קשרים פפטידיים** (איור ב–20). למולקולת החלבון מבנה מרחבי מורכב, המתקבל מפיתולים, מקיפולים ומכיפופים של השרשרת (ראו איור ב–21). המבנה המרחבי נקבע על פי הרכב החומצות האמיניות בשרשרת והוא מעוצב ומיוצב על ידי קשרים ביניהן (נוסף לקשרים הפפטידיים).

קשר לנושא

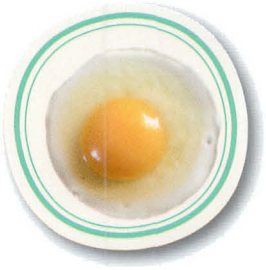
התא - מבנה ופעילות:
מבנה מרחבי של חלבון חיוני לתפקודו. לדוגמה אנזימים.

פעילותם של החלבונים התפקודיים (אנזימים, נוגדנים, רצפטורים, נשאים) תלויה במבנה המרחבי שלהם ובהתאמה בין החלבון לבין החומר שעליו הוא פועל: אנזים מתאים בצורה ייחודית למצע (סובסטרט) מסוים; נוגדן מתאים לסוג מסוים של אנטיגן. גם התכונות של חלבונים מבניים תלויות במבנה המרחבי שלהם. במילים אחרות, כמעט כל שינוי במבנה החלבון יגרור שינוי בתפקודו.

רעיון מרכזי

התאמה בין המבנה לתפקוד:
מבנה מרחבי תקין של חלבון הוא תנאי חשוב לפעילותו.

לתנאי הסביבה שבה מצוי החלבון השפעה רבה על המבנה המרחבי שלו. בתנאי סביבה קיצוניים, כמו טמפרטורה גבוהה, ריכוז מלחים גבוה ושינויים בדרגת החומציות, החלבון מאבד את המבנה המרחבי הטבעי שלו וברוב המקרים גם את פעילותו הביולוגית. איבוד המבנה המרחבי הטבעי של החלבון נקרא **דנטורציה**. לדוגמה, כשמבשלים ביצה, החלבון אלבומין, הנמצא בתמיסה הנוזלית השקופה, עובר דנטורציה ונקרש למוצק לבן.



שאלה ב–16:
הסבירו כיצד רצף החומצות האמיניות בחלבון משפיע על תִפקודו.

קשר לנושא

התא - מבנה ופעילות:
הקוד הגנטי כמידע לבניית חלבונים.

שאלה ב–17:
כל החלבונים בכל האורגניזמים בנויים מאותן חומצות אמיניות. מהן המשמעויות של עובדה זו:

א. מבחינת היכולת של האורגניזמים להיות ניזונים האחד מהאחר?

ב. כיצד יכול האדם להפיק תועלת מהעובדה שהקוד הגנטי לבניית חלבונים זהה בכל האורגניזמים? הביאו דוגמה אחת לפחות.

ב.4. ויטמינים

ב-2003 הופיעו כותרות ענק בכל העיתונים בארץ: "מחלה מסתורית פגעה בכ-10 תינוקות באזורים שונים בארץ". כל התינוקות הפגועים סבלו מתסמינים דומים, שהתבטאו בתחילה במה שנראה כמו פגיעה במערכת העיכול ובשלב מאוחר יותר – בפרכוסים, בבעיות במיקוד עיניים, באדישות ובתופעות עצביות (נוירולוגיות) נוספות.
רופאה נוירולוגית שטיפלה באחד התינוקות, חשדה על פי התסמינים שהתינוק סובל ממחלת "ברי-ברי" הנובעת ממחסור ב**ויטמין** B_1 (תיאמין). זוהי מחלה הידועה כבר למעלה מ-1,000 שנים, שהייתה נפוצה בעיקר בדרום-מזרח אסיה והפילה מיליוני חללים. המחלה נקראת בסינהליז (שפתה של ציילון) "ברי-ברי" שפירושה חולשה קיצונית.
הרופאה החלה להזריק לתינוק ויטמין B_1 וכבר לאחר הזריקה הראשונה מצב התינוק השתפר בצורה דרמתית. בחקירת התופעה התברר שתינוק זה, כמו שאר התינוקות שנפגעו במחלה המסתורית, ניזון מתחליף חלב אם ממקור צמחי של חברה מסויימת.
ממצאי בדיקה של תכולת תחליף החלב העידו על מחסור מוחלט בוויטמין B_1, למרות שעל התווית צוין במפורש שהוא מכיל ויטמין זה ברמה מספקת.
מקרה זה מבטא את ההשפעה המכרעת של ויטמינים על תפקודו, בריאותו ואף חייו של האורגניזם.

מהם ויטמינים ומדוע הם חיוניים כל כך לבריאות האורגניזם ?!

הוויטמינים, הם קבוצה של כ-13 חומרים אורגניים הדרושים לבעלי חיים בכמויות מזעריות (vita – משמעו בלטינית חיים; amin – מקורו בהנחה מוטעית מהעבר שכל הוויטמינים שייכים לקבוצה הכימית של החומצות האמיניות).

בניגוד לפחמימות, שומנים וחלבונים, הוויטמינים אינם משמשים מקור אנרגיה או אבני בניין לתאים ולרקמות, אך הם חיוניים למהלך התקין של תהליכים ביוכימיים רבים המתרחשים בגוף האורגניזם. זאת למדנו ממצב התינוקות שחלו כתוצאה מחסר ממושך באחד הוויטמינים.
כיום ידוע שלכל אחד מסוגי הוויטמינים פעילות ייחודית (תוכלו לקרוא על כך בטבלה 1 בנספח בסוף הספר). מחסור לאורך זמן בוויטמין כלשהו, או עודף גדול שלו, עלולים לגרום להפרת התפקוד התקין של תאים ורקמות בגוף.

הוויטמינים דרושים לצמחים כמו לבעלי חיים. אך בעוד הצמחים מייצרים בעצמם את הוויטמינים מחומרי מוצא שונים, בעלי החיים (ובכללם האדם) אינם יכולים לייצר בעצמם את רוב הוויטמינים. את מיעוטם בעלי החיים אמנם מייצרים, אך בכמויות בלתי מספיקות. אי-לכך חובה לכלול ויטמינים במזונם.

מהו מקורם של הוויטמינים בתזונת האדם ובעלי החיים ?!

המקור של רוב הוויטמינים לבעלי חיים הוא מן הצומח (איור ב-22). הוויטמינים מצויים בעיקר בעלים ירוקים ובתוך קליפות של פירות וירקות ופחות באברי האגירה של הצמח.
יוצא דופן הוא ויטמין B_{12}, שמקורו אינו בצומח וניתן לקבלו רק ממוצרים מן החי כמו כבד, בשר, דגים, עוף, ביצים וחלב ומוצריו.



איור ב-22: מקורם העיקרי של רוב הוויטמינים הוא בצומח.

צמחונים וטבעונים המקבלים כמויות קטנות של הוויטמין בתזונתם, זקוקים לעתים קרובות לתגבור באמצעות כדורים או זריקות. כאשר התזונה מגוונת, אין צורך בתוספת ויטמינים במזון או בתוספי מזון תעשייתיים. במדינות שתזונת האוכלוסייה בהן דלה ובלתי מאוזנת, מוסיפים ויטמינים למוצרי מזון נפוצים, כמו קמח, דגני בוקר, חלב ושמני מאכל. בארץ מוסיפים ויטמינים לחלב דל שומן, למרגרינה ולמוצרים רבים נוספים.

הוויטמינים שונים מאוד זה מזה מבחינת המבנה הכימי. נוהגים לחלק אותם לשתי קבוצות בהתאם לתכונת המסיסות שלהם: ויטמינים שמסיסים בשומן (ויטמינים A, D, E ו־K) וויטמינים שמסיסים במים (ויטמינים מקבוצת B וויטמין C). תכונת המסיסות קובעת את תפוצתם של הוויטמינים במזונות השונים, את אופן ספיגתם בגוף, את המטבוליזם שלהם ואת צורת אחסונם בגוף.
הוויטמינים המסיסים במים אינם יציבים מבחינה כימית. הם עשויים להתפרק בחום, באוויר או באור, ולכן צריך לנקוט אמצעים מיוחדים כדי לשמור עליהם. ויטמינים אלה, אינם נצברים בדרך כלל בגוף, ולכן חשוב לצרוך באופן קבוע מזונות המכילים אותם ואף להגביר את צריכתם בתקופת הגדילה ובהיריון. היות וויטמינים מסיסים במים כמעט ולא נצברים בגוף, לא שכיחות בעיות של הצטברות יתר שלהם.



על קצה המזלג...

ויטמינים ומומים בעובר

החומצה הפולית (ויטמין B_9) שייכת גם היא, כמו התיאמין (ויטמין B_1), לקבוצת ויטמינים B – ויטמינים המסיסים במים. מינהל התרופות והמזון האמריקאי (ה־FDA) פרסם הנחיה למתן תוספת של חומצה פולית לנשים בגיל הפוריות ובמיוחד במהלך היריון. ההמלצה להעשיר מזונות שונים בוויטמין זה הקטינה באופן דרמתי את מספר ההפלות שנבעו מאי־סגירה של חוט השדרה העוברי. מסתבר שמום זה נובע ישירות ממחסור בחומצה פולית.



שאלה ב–18:

היעדרו של ויטמין B_1 בתחליף החלב ממקור צמחי השפיע בעיקר על תינוקות רכים (עד גיל מספר חודשים) ופחות על פעוטות בני שנתיים שלוש, שגם הם ניזונו מתחליף חלב זה. מהי הסיבה לכך?



שאלה ב–19:

המחלה שממנה סבלו התינוקות נקראת ברי־ברי. מחלה זו הייתה נפוצה מאוד באסיה במאה ה־19 ובתחילת המאה ה־20. היעזרו במידע המצוי ברשת האינטרנט והסבירו את הסיבה לעלייה בשכיחות המחלה באותה תקופה.



שאלה ב–20:

בניסוי שנעשה בצמח ארבידופסיס (תודרנית לבנה) התגלו צמחים חריגים שהתאפיינו בצמיחה מואטת ובפריחה מעטה ומאוחרת. בניסיון להבין את הבעיה נבדקו חומרים שונים בצמחים החריגים בהשוואה לצמחים הרגילים. ההבדל היחיד שנמצא היה תכולה נמוכה של ויטמין C בצמחים שגדילתם אִטית. החוקרים שיערו שהבעיה בצמחים נובעת ממוטציה ולא מחסר סביבתי. על מה התבססה השערת החוקרים?



ארבידופסיס (תודרנית לבנה)

הוויטמינים המסיסים בשומן יציבים יותר מאלו המסיסים במים ובדרך כלל אינם מתפרקים בחום, באוויר או באור. ויטמינים אלו נספחים אל השומנים בכל תהליכי העיכול, הספיגה, ההובלה והאגירה בגוף. הם נאגרים בגוף בכמויות גדולות יותר מהוויטמינים המסיסים במים. בתקופה שהמזון דל בוויטמינים המסיסים בשומן, הגוף יכול לנצל במשך שבועות ואף חודשים את המלאי שנאגר.

במקרים של מחסור מתמשך בוויטמינים אלה, מופיעות תופעות חסר. עם זאת, הצטברות־יתר שלהם עלולה לגרום לנזקים חמורים.

ויטמינים A ו־D הם דוגמה לוויטמינים המסיסים בשומן.

ויטמין D

ויטמין D מסייע בשמירה על רמות תקינות של סידן וזרחן בדם. מחסור ממושך בוויטמין זה מוביל לרמות נמוכות מדי של סידן וזרחן בדם, וכתוצאה מכך מתחילים תהליכי פירוק בעצמות. אצל ילדים מצב זה מביא להתפתחות לא תקינה של עצמות (רככת), ואצל מבוגרים המחלה גורמת לכאבי גב, לחולשת שרירים וכן לכאבים ולשברים בעצמות.

רוב הכמות של ויטמין D הדרושה לגופם של בעלי חיים נוצרת מנגזרת של כולסטרול המצויה בעור בהשפעת קרינה על־סגולה מהשמש. לכן, חשוב להיחשף מדי פעם לשמש, למרות סכנת סרטן העור. במקביל, חשוב לקבל גם במזון ויטמין זה, שכן ברוב המקרים הכמות הנוצרת בגוף בהשפעת קרינת השמש אינה מספקת.

מקורות לוויטמין D במזון: כבד, חלמון ביצה, מוצרי חלב, דגים כמו סרדינים, סלמון וטונה (איור ב–23).



איור ב–23: מקורות לוויטמין D.
שימו לב: במרגרינה ובדגני בוקר מוסיפים את הוויטמין בתהליך הייצור.

שאלה ב–21:

שירה היא אשת מחשבים חרוצה בת 35 העובדת בהייטק. היא עובדת כל יום מבוקר עד ערב. בסופי שבוע היא בעיקר נחה בבית. שירה מודעת מאד לגזרתה וכמעט שאינה אוכלת מזון מהחי או מזון עתיר שומן. לאחרונה היא החלה לסבול מכאבים בעצמות ובמיוחד בגב.

שירה הגיעה לרופאה ששלחה אותה לבדיקות רבות. בסופן של הבדיקות התברר שרמות הסידן בדמה של שירה נמוכות, והרופאה חשדה שהיא סובלת ממחסור בוויטמין D.

א. מה גרם לרופאה לחשוד ששירה סובלת ממחסור בוויטמין D?

ב. היכן בעולם צפויה להימצא אוכלוסייה שיש בה אחוז גבוה של אנשים הסובלים מתופעות של מחסור בוויטמין D? כדי לענות על השאלה מומלץ להיעזר במידע המצוי בשפע ברשת האינטרנט.

שאלה ב–22:

בבדיקות שנערכו נמצא שכמות ויטמין D בחלב שמשווק בחורף קטנה בכ־50% מכמות ויטמין D בחלב המשווק בקיץ. הסבירו ממצא זה.

עוד על
ויטמינים:
בפרק ו בסעיף פירמידת המזון, עמודים 178-179 ובנספח בעמודים 200-201.

ויטמין A

גם **ויטמין A** מסיס בשומן. הוא חיוני לראייה בכלל, ולראייה בחושך בפרט. ויטמין A גם חיוני להתמיינות תאי אפיתל ומכאן שהוא חיוני לתפקוד העור ולתפקודן של הרקמות הריריות המצפות את מערכת העיכול ומערכת השתן. לוויטמין A גם השפעה על הגדילה, הרבייה והתגובה החיסונית. כמו כן, ויטמין A ונגזרותיו מגינים על מרכיבי הגוף מפני השפעתם של חומרים מחמצנים (מכאן שהוא שייך לחומרים המוגדרים נוגדי חמצון).



איור ב–24: מזונות עשירים בוויטמין A וב־ß קרוטן.

המקורות של ויטמין A במזון נחלקים לשניים (איור ב–24):

מזונות מן החי – ויטמין A בצורתו הפעילה נמצא במזונות מן החי שתכולת השומן בהם גבוהה, כגון כבד, כליות, שומן חלב (שמנת וחמאה) וביצים.

מזונות מן הצומח – ויטמין A נמצא בצורה לא פעילה כ**פרו־ויטמין**, בעיקר כ־ß קרוטן. ß קרוטן מצוי בעיקר בירקות ופירות כתומים, כמו גזר, בטטה, דלעת, מִשמש ומלון, וכן בירקות בעלי צבע ירוק כהה, כמו תרד, ברוקולי ופטרוזיליה.

בתהליכים אנזימטיים המתרחשים במערכת העיכול הופך ה־ß קרוטן לוויטמין פעיל.

על קצה המזלג...

על עיוורון לילה וויטמין A

השפעתו של ויטמין A על ראייה בחושך קשורה להיותו מרכיב בפיגמנט הנקרא רודופסין, הנמצא בעין בתאים האחראים על ראייה בחושך. האור המגיע אל הרשתית נבלע על ידי פיגמנט הרודופסין וגורם לשרשרת של תהליכים המובילים לפירוקו. בעת מחסור בוויטמין A נפגעת הראייה בלילה.

היות וויטמין A הוא חומר שנוטה להתפרק עם הזמן, יש צורך למלא את החסר על ידי הספקה מתמדת שלו במזון.

בעבר המליץ משרד הבריאות בארץ להוסיף למזונם של תינוקות עד גיל שנה את הוויטמינים A ו־D. החל משנת 2007 מומלץ על תוספת של ויטמין D בלבד, לאור ממצאי מחקרים שלפיהם תינוקות מקבלים כמות מספקת של ויטמין A במזונם.

מחסור בוויטמין A מהווה בעיה רפואית חמורה באזורים נרחבים של העולם השלישי (מדינות עניות). מעריכים שכל שנה מתעוורים במדינות אלו כחצי מיליון ילדים כתוצאה ממחסור בוויטמין A. מכיוון שמחסור בו גורם גם לפגיעה במערכת החיסון, מעריכים שכמיליון עד 3 מיליון ילדים מתים בכל שנה במדינות אסיה כתוצאה עקיפה ממחסור בוויטמין A.

שאלה ב-23:

חוקרים העלו רעיון להעשיר אורז ב־ß קרוטן בשיטות של הנדסה גנטית. ההערכה הייתה שהחדרת הגן של ß קרוטן לצמחי האורז תגרום ליצירת מוגברת של ß קרוטן ולהפחתה של כ־25% ממקרי המוות הנגרמים ממחסור בוויטמין A.

א. אלו רכיבי מזון חסרים, לדעתכם, במדינות העולם השלישי בהן נפוץ מחסור בוויטמין A?

ב. מדוע, לדעתכם, נבחר דווקא צמח האורז לביצוע שינויים גנטיים?

שאלה ב-24:

בתפריט ישראלי אופייני, כמות ויטמין C היא גבוהה, אך אין המלצות של משרד הבריאות להגביל את צריכתו. לעומת זאת המליץ משרד הבריאות להפסיק את מתן ויטמין A לתינוקות. מהי, לדעתכם, הסיבה להבדל בהתייחסות של משרד הבריאות לשני הוויטמינים?

שאלה ב-25:

מומלץ להכין סלט ירקות סמוך ככל האפשר למועד האכילה, לא לקצוץ את הירקות דק דק, ולא לקלף אותם. הסבירו המלצה זאת.

האם כל בעלי החיים זקוקים לאותם ויטמינים ?!

בעלי חיים נבדלים זה מזה במיני הוויטמינים שעליהם לקבל במזונם. כך, למשל, ויטמין C דרוש לאדם, לקוף ולחזיר הים, ואילו שאר בעלי החיים מסוגלים כנראה, לייצר אותו בעצמם.

מעלי גירה זקוקים לוויטמינים A ו־E במזונם, אך את ויטמין K, החשוב לתהליך קרישת הדם ואת מרבית הוויטמינים מקבוצת B (כולל ויטמין B_{12}) מספקים להם המיקרואורגניזמים המצויים בכרס שלהם.

בבעלי חיים שאינם מעלי גירה (כולל האדם), נוצרים ויטמין B_{12} וכן ויטמין K על־ידי מיקרואורגניזמים. אך כמות הוויטמינים שהגוף מקבל בדרך זו אינה מספיקה שכן המיקרואורגניזמים מצויים במעי הגס שהספיגה ממנו אל הדם היא מועטה בלבד ולכן יש לקבלם במזון.

שאלה ב-26:

בין בעלי החיים לבין המיקרואורגניזמים החיים במעי הגס מתקיימים יחסי גומלין מסוג הדדיות. הסבירו היגד זה, תוך פירוט התרומה של כל אחד מהשותפים.

מחסור חמור או צריכה מופרזת של ויטמינים עלולים לשבש את האיזון העדין הדרוש לתפקוד תקין של הגוף ולבריאות טובה. על הנזקים של עודף וחסר של ויטמינים שונים תוכלו ללמוד מטבלה 1 בנספח (עמודים 200-201).

חומרים אי־אורגניים

ב.5. מינרלים

כ־10 ילדים מבקרים מדי שבוע בממוצע ביחידה ההמטו־אונקולוגית בבית חולים לילדים במרכז הרפואי לניאדו שבנתניה. הילדים סובלים מסימפטומים של אנמיה, האטה בהתפתחות, הפרעות קשב וריכוז וזיהומים חוזרים. הגורם המשותף לכל הסימפטומים האלה הוא מחסור חמור בברזל. מספרם הרב של המטופלים אינו מפתיע: נמצא ש־40%–60% מכלל הילדים במדינת ישראל סובלים במידה כזו או אחרת ממחסור בברזל. שכיחות המחסור בברזל עולה ככל שהמצב החברתי־כלכלי של המשפחה נמוך יותר.

הצורך בברזל אופייני לא רק לבעלי החיים ובכללם האדם אלא גם לצמחים. מחסור מתמשך בברזל בצמח, יגרום לפגיעה בכלורופיל, שלברזל יש תפקיד בייצורו. עליו של הצמח יאבדו בהדרגה את צבעם הירוק עד להלבנה כמעט מוחלטת (ראו איור ב–25). צמח כזה, לא יוכל לבצע פוטוסינתזה, ויאבד בהדרגה את היכולת ליצור חומרים אורגניים. מחסור ממושך בברזל יגרום למות הצמח.



איור ב–25: עלים מצמחי שעועית שגודלו באדמה עם ריכוזי ברזל שונים.

הברזל משתייך ל**מינרלים**, שהם יסודות או תרכובות אי־אורגניות פשוטות החיוניות להתפתחות התקינה של האורגניזמים. המקור הראשוני של המינרלים בכדור הארץ הוא המחצבים, ולכן הם מצויים בשפע בסלעים, בקרקעות, באוקיאנוסים ובימים שבמעטפת כדור הארץ.

קשר לנושא

אקולוגיה:
שרשרות מזון.

הצמחים קולטים את המינרלים מהקרקע (שנוצרה מהתפוררות של סלעים) בעזרת השורשים, ומטמיעים אותם ברקמותיהם. האדם ובעלי החיים קולטים את המינרלים השונים ממזונם – מצמחים ומבעלי חיים שהטמיעו ברקמותיהם את המינרלים. אפשר אם כן לראות בצמחים חולייה מקשרת בהעברת מינרלים מן הקרקע לבעלי החיים ולאדם.

המינרלים בצמחים מהווים כ־4% מהמשקל היבש (היסודות פחמן, מימן וחמצן מהווים 96% מהחומר היבש), ובבעלי חיים כ־7% מהמשקל היבש.

בניגוד לפחמימות, שומנים וחלבונים, ובדומה לוויטמינים, המינרלים דרושים לאורגניזמים בכמויות קטנות יחסית, אך האורגניזמים לא יכולים לתפקד בהיעדרם.

מהי החשיבות של המינרלים באורגניזמים ?!

- **מינרלים מהווים חומרי בניין:** החנקן, למשל, הוא מרכיב בחומצות אמיניות ובחומצות גרעין. זרחן הוא מרכיב בחומצות גרעין, בחלבונים אחדים ובפוספוליפידים. בבעלי חיים, סידן, זרחן, מגנזיום ופלואור בונים שיניים ועצמות.

- מינרלים הם חלק מתרכובות בעלות חשיבות פיזיולוגית: זרחן ב־ATP, ברזל בהמוגלובין ומגנזיום בכלורופיל.
- מינרלים דרושים להפעלת שרירים והובלת גירויים עצביים: בפעילויות אלו משתתפים סידן, נתרן ואשלגן.
- מינרלים דרושים לביצוע תגובות ביוכימיות: נחושת, למשל, מפעילה אנזימים הקשורים בתהליכי חמצון־חיזור.
- מינרלים תורמים לריכוז האוסמוטי בתאים וברקמות וליחסי חומצה־בסיס: בצמחים תפקיד זה חשוב גם לשמירה על לחץ הטורגור הדרוש ליציבות הצמח ולתנועות מסוימות בצמח, כמו למשל פתיחת פיוניות.

נוהגים לחלק את המינרלים לשתי קבוצות על פי הכמות הנצרכת מכל אחד מהם:
מיקרומינרלים – מינרלים הדרושים בכמויות זעירות. מינרלים בקבוצה זו חשובים בעיקר בהפעלת תגובות ביוכימיות והורמונליות.
מַקרומינרלים – מינרלים הדרושים בכמויות קצת יותר גדולות. מינרלים בקבוצה זו משתתפים בעיקר במבנה האורגניזם.
למרות החלוקה של המינרלים בהתאם לכמויות הנדרשות מהם, אין להבין שקיים קשר בין כמות החומר לבין חשיבותו לקיום התקין של האורגניזם. לדוגמה: כל החומצות האמיניות מכילות חנקן. לבניית החומצה האמינית מתיונין דרוש אנזים שאבץ חיוני להפעלתו. בעזרת מולקולה אחת של אנזים, נבנות אלפי מולקולות של החומצה האמינית מתיונין. מכאן שכמות האבץ הנדרשת קטנה פי כמה מזו של החנקן. יחד עם זאת, חסר באבץ יפגע בפעילות של האנזים, ובלעדיו לא תיבנה החומצה האמינית (גם אם יהיה חנקן בשפע).
החלוקה למַקרומינרלים ולמיקרומינרלים שונה בבעלי חיים ובצמחים.

כמו הוויטמינים, גם רוב המינרלים חיוניים לפעילות התקינה של הגוף, אך כאשר צורכים אותם בכמויות גדולות מדי הם עלולים להזיק. הנתרן, למשל, הוא מינרל חיוני והוא אחד ממרכיביו של מלח השולחן. הוא מעורב במאזן המים והמלחים בגוף ובפעילות השרירים והעצבים. ואולם, צריכה מופרזת של נתרן עלולה לגרום ליתר לחץ דם, ומחסור חמור עלול לגרום לעוויתות בשרירים. לכן, בדומה להמלצה לגבי ויטמינים, מומלץ להקפיד על תזונה מגוונת שתכיל את כל המינרלים הנחוצים ולא לצרוך מהם כמויות גדולות ללא פיקוח רפואי.
בטבלה 2 שבנספח מפורטים המקורות, התפקודים וההשפעות של חסר או של עודף במינרלים החיוניים לאדם ולבעלי החיים.

שאלה ב–27:
יוד הוא מינרל חיוני לפעילות ההורמונים של בלוטת התריס. מחסור חמור ביוד מתבטא בהגדלתה של בלוטת התריס, תופעה הקרויה זַפֶּקֶת.
חפשו בנספח שבספר וברשת האינטרנט מידע על היוד כמינרל חיוני בתזונה.
א. ציינו 2 תופעות נוספות הקשורות למחסור של יוד בתזונה?
ב. מאלו מקורות מקבל האדם יוד?
ג. מהן הדרכים שנוקטים למניעת מחסור ביוד באוכלוסייה?

שאלה ב–28:
ציינו לפחות 3 סיבות מדוע ממליצים להרבות באכילת ירקות?

עוד על
תפקוד המינרלים בצמחים:
בפרק ג סעיף הזנה מינרלית עמודים 74-76.

אשנב למחקר

אצל כל בעלי החוליות, סידן מהווה מרכיב מרכזי בעצמות, וצריכתו משתנה בהתאם לגיל ולשלב ההתפתחותי. בעופות, למשל, רמות הסידן שיש לספק לאפרוחים שונות מאלה שיש לספק למטילות ולתרנגולות בוגרות. אספקה לקויה של סידן גורמת לתופעות של מחסור בסידן בגוף העוף: עצמות העוף נעשות שבירות, האכילה פוחתת וחל ניוון כללי. אצל מטילות, קליפת הביצה נעשית שבירה ודקה, ומחסור חמור של סידן מוביל להפסקה מוחלטת של ההטלה.

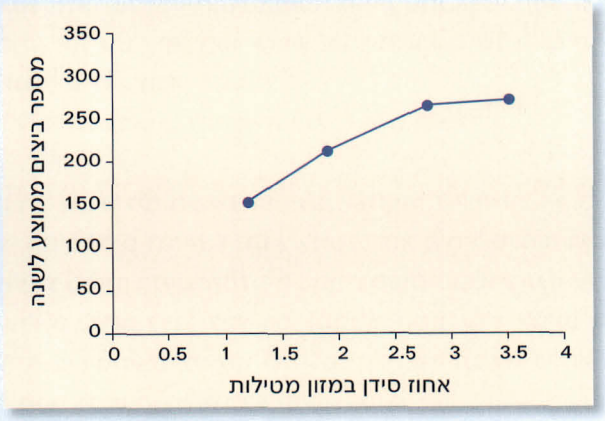
שאלה ב–29:

חוקרים בדקו את השפעת אחוז הסידן במזון מטילות על מספר הביצים השנתי הממוצע. תוצאות הניסוי מובאות באיור ב–26:

א. תארו את הקשר בין אחוז הסידן במזון מטילות לבין ממוצע הביצים השנתי.

ב. חוקרים טענו שכאשר אחוז הסידן במזון נמוך מ־3% הוא גורם מגביל בהטלה. האם תוצאות הניסוי איששו את טענתם? על מה התבססה טענת החוקרים?

ג. שערו מה יכול להיות הגורם המגביל את ממוצע הביצים השנתי כאשר ריכוז הסידן הוא מעל 3%?



איור ב–26: השפעת אחוז הסידן במזון מטילות על ממוצע הביצים השנתי.

שאלה ב–30:

בגיל ההתבגרות (מגיל 9 עד גיל 18) המנה היומית המומלצת של סידן לנערים ולנערות היא כ־1,300 מ"ג. באותם גילאים צריכת הברזל המומלצת לנער היא 8–11 מ"ג ליום ולנערה – 15 מ"ג ליום.

א. האם ניתן להסיק מהמלצות אלו שהסידן חשוב לגוף יותר מהברזל? נמקו תשובתכם.

ב. מדוע צריכת הברזל המומלצת לנערה גבוהה מזו המומלצת לנער?

ג. צריכת הברזל המומלצת בזמן היריון כפולה מזו המומלצת לנשים בגילאי 19–50. הסבירו מדוע צריכה גבוהה של ברזל חשובה במיוחד בתקופת ההיריון.

ב6. מים

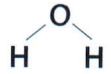
באחד מן הפורומים ברשת האינטרנט, העוסקים בהלכות דת, הגיעה השאלה הבאה:
"אנו קבוצת חיילים בוגרי ישיבות הסדר הנמצאים בתעסוקה מבצעית בבקעת הירדן, ונשהה פה גם במשך תענית ט' באב (חודש יולי). במשך יום הצום תימשך, מן הסתם, הפעילות היומיומית, הכוללת סיורים רגליים וממונעים, תצפיות שונות וכדומה. לדעת הרופא אנו חייבים לשתות כמויות גדולות של נוזלים במשך היום. נבקשך להורות לנו אם מותר לנו לשתות לפני שמתגלים בנו סימני חולשה, ומהו שיעור השתייה המותר".
התשובה שהתקבלה:
"הנמצאים בבקעת הירדן רשאים לשתות במשך הצום, אפילו אינם עושים שום פעילות, ואפילו אין להם שום מיחוש, באם השתייה נחוצה לדעת הרופא בשל הסכנה לחיים".

מדוע מחסור במים עלול להוות סכנה כה חמורה, שההלכה מתירה במקרים מסוימים שתיית מים אפילו ביום צום ?!

המים הם משאב חיוני לאורגניזמים, ומחסור חמור בהם יכול לגרום לעקה ואף למוות. חשיבותם של המים נובעת, קודם כול, מהיותם המרכיב העיקרי בגופם של **כל** האורגניזמים. הסביבה הפנימית של האורגניזמים היא בעיקרה סביבה מימית – המים הם המרכיב העיקרי של הנוזל המקיף כל תא, של הנוזל בתוך התא ושל מערכות ההובלה של האורגניזמים. מים מהווים עד 90% ממשקלם של צמחים מסוימים, וכ־60%–70% ממשקל גוף האדם (ראו איור ב–1). רק אורגניזמים מעטים מסוגלים לשרוד תקופות ארוכות יחסית ללא מים, אבל אז הם מקיימים פעילות מטבולית מצומצמת מאוד (לדוגמה: חיידקים במצב של נבג וזרעי צמחים).

תפקודי המים באורגניזמים

המים הם חומר אי־אורגני בעל מבנה פשוט מאוד (איור ב–27). כל מולקולת מים מורכבת משני אטומי מימן הקשורים לאטום חמצן אחד בקשר חזק.



איור ב–27: נוסחת מבנה של מולקולת מים.

- **מים כממֵס:** תגובות כימיות רבות המתרחשות בתאים מתבצעות כאשר החומרים מצויים בתמיסה מימית. גם מעברם של חומרים ממקום למקום בתוך התא עצמו או דרך קרומי התאים מתאפשר רק כשהם מומסים במים.
- **המים כמובילים:** באורגניזמים הרב־תאיים הגדולים והמפותחים מועברים חומרים ממקום למקום באמצעות מערכות הובלה המבוססות על תמיסות מימיות. באמצעות המים ומערכת ההפרשה מסולקים חומרים מזיקים לגוף.
- **תפקוד מטבולי של המים:** בחלק מהתהליכים הכימיים המתקיימים בתאים המים משתתפים כחומר מגיב או כתוצר.
- **שמירה על סביבה קבועה:** המים ממלאים תפקיד בשמירה מפני תנודות בלחץ האוסמוטי וב־pH הודות ליכולתם לעבור דרך קרומי התאים בהתאם למפל הריכוזים.

קשר לנושא

ביולוגיה של האדם: *העברת תוצרי עיכול, נוגדנים וחומרי פסולת בגוף האדם מתרחשת בסביבה מימית במערכת ההובלה.*



איור ב–28: צמח זקוף (מימין) וצמח במצב כמישה (משמאל).

- **תפקוד בתמיכה ובשמירה על יציבות:** באיברים הצעירים של הצמחים, התפתחות רקמות התמיכה מצומצמת יחסית, וזקיפותם תלויה במידה רבה במים הממלאים את החלולית (הווקואולה) התופסת חלק גדול מנפח התא. קל להבחין בחשיבות המים כאשר מתבוננים בצמחים שלא הושקו והם כמושים ונבולים (איור ב–28).
- **ויסות טמפרטורת הגוף:** המים ממלאים תפקיד מרכזי בוויסות טמפרטורת הגוף בבעלי חיים. הוויסות מתבצע הן באמצעות תהליך האידוי של המים מהעור (הזעה) וממערכת הנשימה (בנשיפה), והן באמצעות קליטת החום במקומות שבהם הוא נוצר, הובלתו בנוזל הדם אל פני השטח של הגוף, שם החום משתחרר אל הסביבה החיצונית. גם בצמחים ממלאים המים תפקיד חשוב בשמירה מפני עלייה יתרה של טמפרטורת הצמח באמצעות תהליך הדִּיוּת.

עוד על
ויסות טמפרטורה בצמח: *בפרק ג, עמוד 53 (על הדיות).*

קליטה ואיבוד מים על ידי אורגניזמים

בעלי החיים קולטים את המים הדרושים להם בשתייה ומהמזון, ומאבדים מים באידוי מהעור (הזעה) וממערכת הנשימה (בנשיפה), וכן בהפרשות שתן וצואה. יש בעלי חיים שמאבדים מים בדרך של הלחתה (אידוי מים מהלשון), כחלק ממנגנון שמירת טמפרטורת גוף קבועה. הצמחים קולטים את רוב המים הדרושים להם ישירות מהקרקע באמצעות השורשים. רוב המים מתאדים אל האוויר, בעיקר דרך הפיוניות בתהליך הדיות.

חלק מהמים שהאורגניזם צורך מיוצרים על ידי האורגניזם עצמו, כתוצר לוואי של תהליכי חילוף החומרים (המטבוליזם).

שאלה ב–31:

בעבר היה נהוג לנקוט בצבא ב"משמעת מים", כלומר הגבלת כמות המים שחייל רשאי לשתות. נוהג זה הופסק לאחר מקרים רבים של חיילים שנפגעו מ"מכת חום" – מצב מסוכן שבו טמפרטורת הגוף עולה מעל $40^{0}C$. בהתייחס לתפקודי המים, הסבירו מדוע הופסק נוהג זה.

שאלה ב–32:

ידוע לכול שצריך להרבות בשתיית מים, ומומלץ לשתות 8–12 כוסות נוזלים ליום, אך במצבים נדירים, בשתיית מים בכמויות גדולות בהרבה מאלה, עלולה להיגרם "הרעלת מים". במצב זה חודרים מים מצינורות הדם לתוך איברים כמו ריאות ולתוך תאים. הסבירו תופעה זאת.

שאלה ב-33:

האם, לדעתכם, בעלי חיים מימיים שותים? נמקו תשובתכם.

שאלה ב-34:

מהי חשיבות ההשקיה בגידולים חקלאיים?

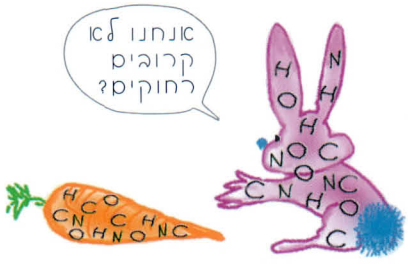
עיקרי הנושאים בפרק

- הפחמימות הן התרכובות הנפוצות ביותר בטבע. הן בנויות מאטומי פחמן, מימן וחמצן.
- הפחמימות נחלקות לחד־סוכרים, דו־סוכרים ורב־סוכרים.
- הגלוקוז (חד־סוכר) משמש מקור אנרגיה עיקרי בתהליך הנשימה התאית בצמחים ובבעלי חיים.
- חד־סוכרים הם אבני הבניין של כל הפחמימות. דו־סוכרים מורכבים משתי יחידות של חד־סוכרים. החד־סוכרים והדו־סוכרים הם כולם מתוקים ומסיסים במים.
- רב־סוכרים בנויים מיחידות רבות של חד־סוכרים. הם אינם מסיסים במים ואינם מתוקים. רב־סוכרים מסוימים משמשים חומרי תשמורת כדוגמת עמילן בצמחים וגליקוגן בבעלי חיים. רב־סוכרים אחרים משמשים חומר בניין תאי, למשל תאית המרכיבה את דופן התא הצמחי.
- הליפידים הם תרכובות מגוונות מאוד, המכילות אטומי פחמן, מימן וחמצן. התכונה המשותפת לכל הליפידים היא היעדר מסיסות במים.
- שלוש הקבוצות העיקריות של הליפידים הן: טריגליצרידים, פוספוליפידים וסטרואידים. אבני הבניין של רוב הליפידים הן חומצות שומן. חומצות שומן נחלקות לשתיים: חומצות שומן רוויות וחומצות שומן בלתי רוויות.
- גוף האדם מסוגל לייצר בעצמו את רוב חומצות השומן מלבד שתי חומצות השומן החיוניות ומכאן כינויין.
- טריגליצרידים (שומנים ושמנים) מורכבים משלד של גליצרול שאליו קשורות שלוש חומצות שומן.
- שומנים מורכבים מטריגליצרידים, המכילים בעיקר חומצות שומן רוויות ומקורם לרוב במזון מן החי. הם מוצקים בטמפרטורת החדר.
- שְׁמנים מורכבים מטריגליצרידים, המכילים בעיקר חומצות שומן בלתי רוויות ומקורם לרוב במזון מהצומח. הם נוזליים בטמפרטורת החדר.
- פוספוליפידים בנויים משלד של גליצרול, שאליו קשורות שתי חומצות שומן (זנב) וקבוצה הידרופילית (ראש). הפוספוליפידים הם המרכיב העיקרי של קרומים.
- סטרואידים בנויים מארבע טבעות פחמניות. הם מצויים בקרומים של תאים איקריוטים ומהווים חומרי מוצא לחומרים שונים, בהם הורמונים.
- החלבונים ממלאים תפקידים רבים באורגניזמים הן כחלבונים מבניים והן כחלבונים תפקודיים.
- אבני הבניין של כל מגוון החלבונים הן 20 חומצות אמיניות. החומצות האמיניות מורכבות מאטומי פחמן, מימן וחמצן, ותמיד מצוי בהן לפחות אטום חנקן אחד.
- צמחים מסוגלים לייצר את כל סוגי החומצות האמיניות מתוצרי הפוטוסינתזה ומחנקות (תרכובות חנקן־חמצן) מהקרקע. האדם אינו מסוגל לייצר בעצמו שמונה מבין החומצות האמיניות. חומצות אמיניות אלו מכונות חומצות אמיניות חיוניות, והוא חייב לקבלן מהמזון.

- למולקולת חלבון יש מבנה מרחבי הנקבע על ידי רצף החומצות האמיניות המרכיבות אותו והקשרים הנוצרים בין הקבוצות הצדדיות של חומצות אמיניות קרובות ורחוקות זו מזו. פעילות החלבון תלויה במבנה המרחבי שלו.
- ויטמינים הם חומרים אורגניים החיוניים לקיום תהליכים ביוכימיים באורגניזם. יש ויטמינים המסיסים במים (למשל ויטמינים מקבוצה B וויטמין C) ויש ויטמינים המסיסים בשומן (למשל ויטמין A וויטמין D) צמחים יכולים ליצר ויטמינים בעצמם, בעלי חיים צריכים לקבל את רוב סוגי הוויטמינים מהמזון.
- מינרלים הם יסודות או תרכובות אי־אורגניות החיוניות לתפקוד כל האורגניזמים – חלקם כחומרי בניין, חלקם לביצוע תגובות ביוכימיות וחלקם לשמירה על ריכוז אוסמוטי ויחסי חומצה־בסיס.
- חלק מהמינרלים דרושים בכמויות גדולות יחסית – מַקרומינרלים, וחלק דרושים בכמויות מזעריות – מיקרומינרלים. המקור הראשוני של המינרלים הוא מחצבים באדמה.
- מים הם המרכיב העיקרי בגופם של כל האורגניזמים. הם משמשים באורגניזמים כממיסים, מובילי חומרים ומשתתפים בתהליכים ביוכימיים רבים. כמו כן הם משמשים בשמירה על לחץ אוסמוטי ו־pH תקינים, בוויסות טמפרטורה ובצמחים גם בשמירה על יציבות.

מושגים חשובים בפרק

גלוקוז	חלבונים
גליצרול	טריגליצרידים
דו־סוכרים	כולסטרול
ויטמינים (ויטמין A, ויטמין D)	ליפידים
חד־סוכרים	מים
חומצות אמיניות (חיוניות ובלתי חיוניות)	מינרלים
חומצות שומן חיוניות	פחמימות
חומצות שומן (רוויות ובלתי רוויות)	פחמן
חומרי תשמורת	רב־סוכרים
חומרים אורגניים	רכיבי מזון
חומרים אי־אורגניים	תאית



ג

תהליך הפוטוסינתזה - ייצור חומרים אורגניים בצמח

ג1. מבט-על על תהליך הפוטוסינתזה
ג2. איך יודעים? צעדים ראשונים בחקר הפוטוסינתזה
ג3. התאמת הצמח לביצוע פוטוסינתזה
ג4. כלורופלסטים וקליטת אור
ג5. שלבים בתהליך הפוטוסינתזה
ג6. תוצרי הפוטוסינתזה: הובלה, אגירה וניצול על ידי הצמח
ג7. גורמים המשפיעים על תהליך הפוטוסינתזה
ג8. מעורבות האדם: הגברת תהליך הפוטוסינתזה על ידי שינוי גורמי סביבה
ג9. הזנה מינרלית וחיוניותה להתפתחות הצמח ולקיום הפוטוסינתזה
ג10. קליטת מים ומינרלים על ידי שורשי הצמח
עיקרי הנושאים בפרק
מושגים חשובים בפרק

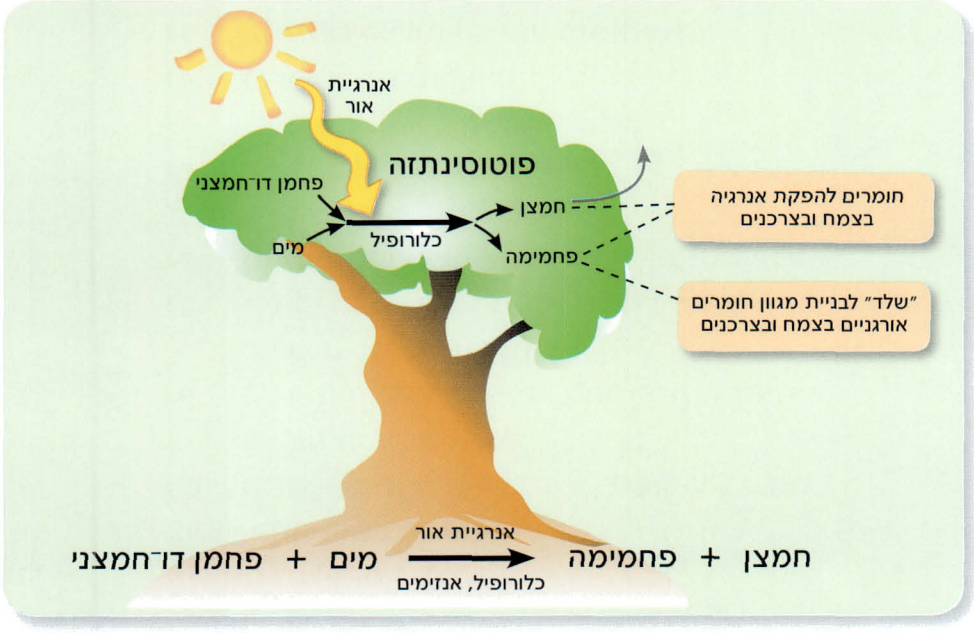


פרק ג: תהליך הפוטוסינתזה - ייצור חומרים אורגניים בצמח

ג1. מבט־על על תהליך הפוטוסינתזה

כפי שלמדנו בפרק א, כל האורגניזמים זקוקים לחומרים אורגניים לקיומם. כזכור, הצמחים הם אוטוטרופים, כלומר הם מייצרים בעצמם את החומרים האורגניים, בניגוד לאורגניזמים ההטרוטרופים שצריכים לקבל חומרים אורגניים ממקור חיצוני – במזונם.

בתהליך **הפוטוסינתזה** (פוטו=אור, סינתזה=הרכבה), אורגניזמים אוטוטרופים – צמחים, אצות וחלק מהחיידקים – יוצרים מחומרים אי־אורגניים פשוטים (מים ו־CO_2) חומרים אורגניים (פחמימות) וחמצן תוך ניצול אנרגיית האור הנקלטת בכלורופיל שבתאים הירוקים (איור ג–1). האורגניזמים ההטרוטרופים (הצרכנים) ניזונים גם הם מהחומרים האורגניים שנוצרים בתהליך הפוטוסינתזה.



איור ג–1: חשיבות הפוטוסינתזה לעולם החי.
בתהליך הפוטוסינתזה חומרים אי־אורגניים הופכים, תוך ניצול אנרגיית האור, לחומרים אורגניים המשמשים לבנייה ולהפקה של אנרגיה. בתהליך נוצר גם חמצן המשתתף בנשימה תאית אווירנית.

לדעת רבים, תהליך הפוטוסינתזה הוא התהליך החשוב ביותר על פני כדור הארץ. החשיבות והייחודיות באות לידי ביטוי בשלושת ההיבטים הבאים:

1. המרת אנרגיית אור לאנרגיה כימית.
2. הרכבת "שלד פחמני".
3. פליטת חמצן.

1. המרת אנרגיית אור לאנרגיה כימית: האור הוא מקור אנרגיה ראשוני למערכות החיים על פני כדור הארץ. יש לו יתרון חשוב: לפחות בטווח הזמן הנראה לעין, אור השמש הוא "משאב בלתי מתכלה". מעריכים שהתהליכים הגרעיניים המתרחשים בשמש יוסיפו להתרחש עוד מיליוני שנים.

לאור, כמקור אנרגיה לאורגניזמים, גם כמה חסרונות ברורים:

- כמעט לכל התהליכים הביוכימיים המתרחשים בתאים, האור אינו מתאים כמקור אנרגיה ישיר. צורת האנרגיה המתאימה לתהליכים בתא היא אנרגיה כימית (ATP).
- לאורגניזמים ההטרוטרופים אין מנגנונים להמרת אנרגיית אור לאנרגיה כימית.
- האור לא תמיד זמין: במהלך היממה יש שעות של חושך וגם בעונות השנה השונות יש תנודות בזמינות האור ובעוצמתו, בעוד שהצורך באנרגיה הוא רצוף ותמידי.
- אי־אפשר לאגור אנרגיית אור לאורך זמן, בעוד אנרגיה כימית נאגרת בחומרים כמו נפט, סוכר או קמח (עמילן).

מחסרונות אלו נובעת החשיבות של המרת אנרגיית האור לאנרגיה כימית. בניגוד לאנרגיית האור, האנרגיה הכימית היא מקור שניתן לנצלו זמן רב אחרי שנוצר ובמקום אחר. כלומר, תהליך הפוטוסינתזה משחרר את האורגניזמים מתלות במקור האנרגיה הראשוני – האור, ומספק להם מקור אנרגיה שניתן להשתמש בו **בזמן** אחר **ובמקום** אחר.

לדוגמה, בני האדם ניזונים באופן ישיר או עקיף מחומרים שנוצרו קודם לכן בצמחים בתהליך הפוטוסינתזה. זרע שנובט, משתמש במאגר של חומרים שנוצרו בתהליך הפוטוסינתזה בצמח שבו התפתחו הפירות והזרעים זמן רב לפני שהחל לנבוט. כך גם השימוש שנעשה בימינו בחומרי דלק (נפט ופחם) שמקורם בתהליך הפוטוסינתזה שהתרחש בעידנים ומקומות רחוקים.

מעניין לדעת שרק 1%–2% מכלל אנרגיית האור המגיעה מהשמש, מומרים לאנרגיה כימית בפוטוסינתזה. די בשיעור קטן זה כדי לספק חומרים אורגניים לרוב־רובם של האורגניזמים החיים על פני כדור הארץ.

2. הרכבת "שלד פחמני": תוצר תהליך הפוטוסינתזה הוא פחמימה, המשמשת "שלד פחמני" לבניית הפחמימות השונות וחומרים אורגניים אחרים כמו חלבונים, שומנים וחומצות גרעין. תוצרי הפוטוסינתזה משמשים קודם כול את היצרנים – האורגניזמים שבהם נוצרו לבנייה ולהפקת אנרגיה. אך הם משמשים גם את כל מי שניזונים מהם במארג המזון – הצרכנים למיניהם והמפרקים.

קשר לנושא

אקולוגיה:
יצרנים, צרכנים ומפרקים במארג המזון.

היכולת להשתמש בשלד הבסיסי, שנוצר בתהליך הפוטוסינתזה, כדי לייצר ממנו את רקמות השריר של האריה או את חלב הפרה, מצביעה על האחידות הרבה הקיימת בהרכב הכימי של עולם החי. מספר סוגי התרכובות האורגניות בגופם של האורגניזמים הוא קטן, ולכן מתאפשרת הזנת האורגניזמים על ידי אכילתם זה את זה.

רעיון מרכזי

אחידות ושוני:
מיעוט סוגי תרכובות, שמהן נבנה מגוון עצום של חומרים.

3. פליטת חמצן: החמצן המולקולרי (O_2) שמשתחרר בתהליך הפוטוסינתזה, מאפשר הפקה מרבית של אנרגיה זמינה (בצורת ATP) מחומרים אורגניים **בתהליך הנשימה התאית האווירנית**, שעליו נלמד בפירוט בפרק ה. ללא חמצן ניתן להפיק רק מעט אנרגיה זמינה מהחומרים האורגניים. רוב האורגניזמים (מלבד מספר קבוצות של חיידקים ופטריות) אינם יכולים להתקיים ללא חמצן. ריכוז החמצן באטמוספרה הוא השני בגודלו – הוא מהווה כ־21% ממנה. מעניין לדעת שמקורו של רוב החמצן שבאוויר כיום הוא במים, המהווים מגיב בתהליך הפוטוסינתזה.

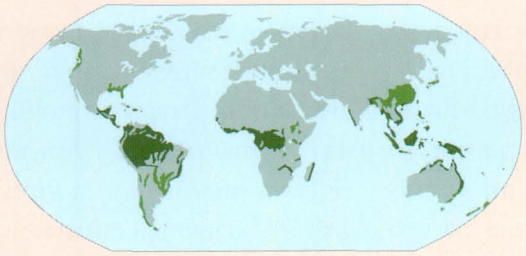
היבט נוסף של הפוטוסינתזה הוא השפעתה על מאזן ה־CO_2 באטמוספרה. CO_2 נפלט בתהליך הנשימה התאית של מרבית האורגניזמים וכן בעקבות שריפת דלקים. אלמלא קלטו הצמחים CO_2 והשתמשו בו להרכבת השלד הפחמני, ריכוז ה־CO_2 באוויר היה עולה. לעלייה כזאת יש השלכות סביבתיות שיוזכרו בהמשך (עמוד 71).

על קצה המזלג...

יערות הגשם – הריאות הירוקות של העולם

צמצום שטחי יערות הגשם מעורר בעיה כלל עולמית. יער הגשם הוא אחת המערכות האקולוגיות המורכבות ביותר על פני כדור הארץ. שטחם הכולל של יערות הגשם הוא כ־20 מיליון קמ"ר והם מרוכזים בשלושה גושים עיקריים (אמריקה הדרומית, מערב אפריקה ודרום־מזרח אסיה) כפי שרואים באיור ג–2.

קצב **כריתת היערות** בשנים האחרונות של המאה ה־20 היה כ־20 אלף קמ"ר בשנה (קצת פחות משטחה של מדינת ישראל). עד תחילת המאה ה־20 כיסו יערות הגשם כ־14% מהשטח היבשתי של כדור הארץ, כיום הם מהווים רק 6% ממנו.



איור ג–2: תפוצת יערות הגשם בעולם.
שימו לב! שלושת הגושים הם באזור קו המשווה.

שאלה ג–1:

קצב כריתת היערות הוא מקור דאגה לכל העוסקים באיכות הסביבה. כִּתבו ארבע תוצאות אפשריות של צמצום שטחי היערות.

שאלה ג–2:

כדי להבין את החשיבות של תהליך הפוטוסינתזה לתזונת האדם, ערכו רשימה מפורטת של התפריט היומי שלכם.

א. אלו מהמזונות שאתם אוכלים מבוססים באופן ישיר על תהליך הפוטוסינתזה? הביאו 4 דוגמאות.

ב. אלו מהמזונות שאתם אוכלים, מבוססים באופן עקיף על תהליך הפוטוסינתזה? הביאו 4 דוגמאות והסבירו את הקשר שלהם לתהליך הפוטוסינתזה.

הזנה אוטוטרופית – עם אור וללא אור (כימוסינתזה)

האורגניזמים האוטוטרופים נחלקים לשתי קבוצות על פי מקור האנרגיה שהם מנצלים:

1. אורגניזמים המנצלים את האור כמקור לאנרגיה. בקבוצה זו נכללים צמחים, אצות וחיידקים מסוימים, והם מכונים **פוטואוטוטרופים**.
2. אורגניזמים אשר אינם משתמשים באור כמקור אנרגיה להרכבת החומרים האורגניים, אלא בתרכובות אי־אורגניות המצויות בסביבתם, כגון: אמוניה (NH_3), ומימן גפרי (H_2S). בקבוצה זו נכללת קבוצה קטנה של חיידקים, והם מכונים **כימואוטוטרופים**. תהליך הרכבת החומרים האורגניים תוך ניצול אנרגיה מתרכובות אי־אורגניות נקרא **כימוסינתזה**.

שימו לב! מקור הפחמן לתרכובות האורגניות בשתי הקבוצות הוא ה־CO_2 שבאוויר.

ג2. איך יודעים?
צעדים ראשונים בחקר הפוטוסינתזה

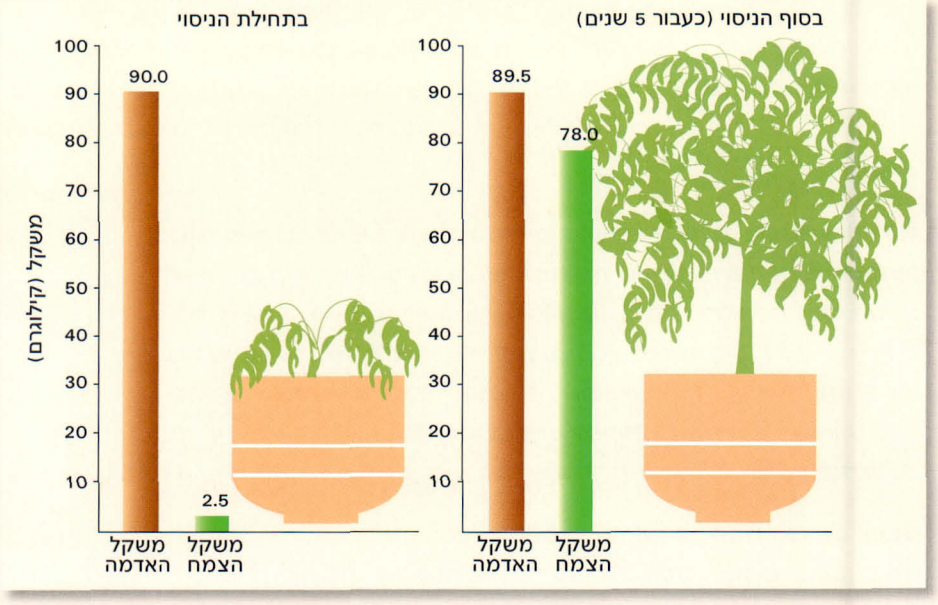
על אף שתהליך הפוטוסינתזה שהוצג באיור ג–1 נראה פשוט, זהו תהליך מורכב ביותר. שנים רבות של מחקר נדרשו כדי לגלות את פרטי התהליך, וגם היום עדיין חוקרים את תהליך הפוטוסינתזה.

בעולם הקדום סברו שהצמחים מקבלים את מזונותיהם מהקרקע. דעה זו הייתה מבוססת על ניסיון החיים של בני האדם: הצמחים הרי גדלים בקרקע. יתר על כן, היה ידוע שצמחים זקוקים למים לגידולם. לעומת זאת, לא היה ידוע דבר על הרכבו הכימי של האוויר, ולכן לא יכלו להניח ש"משהו" מן האוויר משמש לייצור חומרים בצמח.

סיפורו של גילוי

מזון מן הקרקע?

החוקר הבלגי־פלמי ***ואן־הֶלְמונט*** (Van Helmont 1577–1644) נחשב לראשון שביצע ניסוי שמטרתו לברר את מקור החומרים שמהם בנוי עץ. בניסוי שנערך בשנת 1636 ואשר מתואר באיור ג–3, שקל ואן־הלמונט שתיל אחד של עץ ערבה ושתל אותו בכלי שגם כמות האדמה שבו נשקלה. לאחר חמש שנים הוציא ואן־הלמונט את עץ הערבה מהכלי ושקל אותו, ובמקביל שקל גם את האדמה שבכלי.



איור ג–3: הניסוי שערך ואן־הלמונט במטרה לחקור את מקור החומר של העץ.

תוצאות הניסוי של ואן־הלמונט מוצגות באיור ומהן הוא הסיק כי *"75.5 ק"ג של עץ, שעם ושורשים התקבלו ממים בלבד."*

מסקנה זו אמנם אינה נכונה, אולם מאות השנים שחלפו מאז ביצע ואן־הלמונט את ניסויו לא הקטינו את חשיבות המסקנה הנוספת, הנובעת אף היא מהניסוי שביצע: **הקרקע אינה המקור של חומר העץ!**



כל זה רק ממים?
(ואן הלמונט חשב שכן)

שאלה ג–3:

א. מה הייתה שאלת המחקר של ואן־הלמונט? מה הייתה השערתו? בססו תשובתכם על תיאור הניסוי.

ב. על סמך אילו תוצאות הסיק ואן־הלמונט את מסקנותיו? הסבירו.

ג. האם הניסוי שערך ואן־הלמונט הוא כמותי או איכותי? הסבירו את קביעתכם.

ד. האם הניסוי של ואן־הלמונט עומד בקריטריונים של ניסוי מדעי בימינו? נמקו טענתכם בהתייחס למרכיבים הדרושים בניסוי מדעי.

ה. כיצד הייתם מציעים לשפר את הניסוי? הסבירו את הצעתכם.

מסקנתו של ואן־הלמונט שהמים הם מקור החומר של העץ לא עמדה במבחן הזמן. הידע על היסודות הכימיים מבהיר לנו שאין שום אפשרות לייצר ממימן ומחמצן, המרכיבים את המים, חומרים אורגניים המכילים גם את היסוד פחמן (C).

למעלה מ־100 שנים נוספות חלפו עד שבשנת 1873 גילה חוקר אחר שהצמח משתמש ב־CO_2 מהאוויר לייצור החומרים האורגניים.

סיפורו של גילוי

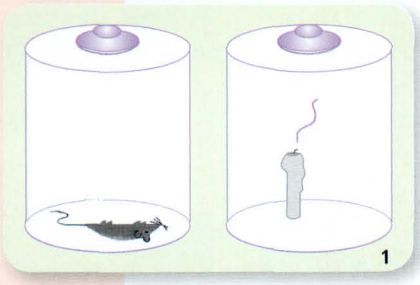
צמחים מתקנים אוויר "מקולקל"

החוקר האנגלי ***ג'וזף פריסטלי*** (Joseph Priestley 1733–1804) תרם גם הוא תרומה חשובה להבנת חשיבותו של תהליך הפוטוסינתזה. פריסטלי חקר את תכונות האוויר וכמה מניסוייו מתוארים באיור ג–4. בניסוי הראשון הוא מצא שכאשר מבעירים נר בתוך צנצנת סגורה האוויר שבתוכה "מתקלקל" ואינו מאפשר לנר להמשיך ולבעור. כך קורה גם אם מכניסים לצנצנת במקום נר בעל חיים קטן כמו עכבר.

פריסטלי כתב:

"ברור שבטבע צריכים להיות הסדרים כלשהם למניעת תקלה זו (קלקול האוויר) וכן הסדרים להפיכת האוויר למתאים שוב לבעירת הנר. אני גאה על שגיליתי את הדרך בה משיג הטבע תכלית זו. ...ב־17 לאוגוסט 1771 הנחתי צמח נענע בכלי שהכיל אוויר שדלק בו נר וכבה. מצאתי כי ב־27 באותו חודש כשחזרתי והכנסתי נר דולק לאותו כלי, המשיך הנר לבעור יפה. חזרתי על ניסוי זה במשך הקיץ עוד שמונה פעמים לפחות. ...בדרך כלל מצאתי כי די היה בחמישה או בשישה ימים כדי שלאוויר תחזורנה תכונותיו הקודמות."

בניסויים נוספים הראה פריסטלי, כי גם עכבר שהוכנס לכלי שבו גדל צמח נענע לא הראה סימני מצוקה.





איור ג–4: ניסוייו של ג'וזף פריסטלי.

1. נר שהוכנס לכלי כבה לאחר זמן קצר. עכבר שהוכנס לכלי מת לאחר זמן קצר.

2. צמח הוכנס לכלי שבו דלק נר וכבה. כעבור כמה ימים הודלק בכלי נר והוא דלק לאורך זמן, וכן הוכנס לכלי עכבר (במקום נר) והוא לא הראה סימני מצוקה.

שאלה ג–4:

א. התייחסו לציטוט מפי פריסטלי, וכתבו מהי ההשערה שפריסטלי בדק לפי חלק 2 באיור ג–4?

ב. על סמך תוצאות הניסוי המוצגות באיור, הסבירו כיצד הסיק פריסטלי שלצמחים יש יכולת "לתקן אוויר שהתקלקל"?

ג. האם ניתן היה להסיק מסקנה אחרת? בססו את טענתכם על סמך תוצאות הניסוי כפי שהן מופיעות באיור.

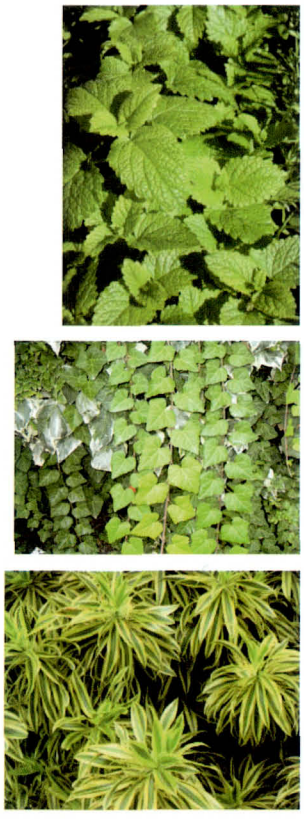
לתגלית של פריסטלי יש משמעות רבה משום שמה שקורה בתוך צנצנת סגורה שבה מניחים נר, עכבר או צמח קורה גם בביוספרה: הנר והעכבר צורכים חמצן ופולטים CO_2. גם הצמח, כמו הנר והעכבר, צורך חמצן ופולט CO_2. אולם לעומתם, **בהיותו חשוף לאור**, הצמח קולט CO_2 ופולט חמצן, בכמות גדולה יותר מזו שהוא צורך בתהליך הנשימה שלו המתקיים במקביל. מחקרים נוספים שתרמו להבנת תהליך הפוטוסינתזה, יוצגו במהלך הפרק.

ג3. התאמת הצמח לביצוע פוטוסינתזה

שתי נקודות מרכזיות מאפיינות את המבנה ואת אורח החיים של צמחים:

1. הצמח קבוע במקומו ואינו יכול "לחפש" באופן פעיל את מה שנחוץ לו: אנרגיה וחומרים.
2. המשאבים שצמח החי ביבשה זקוק להם אינם נמצאים בסביבתו בשפע: בכל ליטר של אוויר יש פחות מ־0.5 מ"ל CO_2. המים לא תמיד זמינים בסביבתו המידית של הצמח וגם האור אינו זמין בכל שעות היממה ועצמתו משתנה עם עונות השנה.

התכונה הבולטת ביותר במבנה הצמח, המתאימה אותו לאיסוף המשאבים הנחוצים לביצוע פוטוסינתזה – אור, מים ו־CO_2, היא קיומם של אברים שמתפרשים במרחב, בעלי שטח פנים גדול מאוד ביחס לנפחם. העלים והשורשים מדגימים יפה את העקרונות המבניים הללו.
על התאמת העלים לביצוע הפוטוסינתזה נלמד בהמשך סעיף זה, ואילו על התאמת השורשים נלמד בסוף הפרק בסעיף ג1.10 (עמוד 83).



איור ג–5: מגוון סידורי עלים בצמח.

ג1.3 התאמת הצמח לקליטה מֵרבית של אור

אם נתבונן סביבנו נראה שברוב הצמחים מבנה הצמח וסידור עליו מותאמים לקליטה מֵרבית של אור.

מה משותף לסידור העלים על פני הגבעול בצמחים השונים ?!

כפי שמודגם באיור ג–5, סידור העלים על הגבעול אינו אקראי. העלים מסודרים באופן שלא יחסמו אור זה לזה. הם ערוכים בזווית המתאימה לקליטה מֵרבית של אור בשטח פנים מרבי ולמשך זמן מרבי ביממה.

שאלה ג–5:

ביערות גשם טרופיים יש מגוון מינים גדול של צמחים מטפסים ושל צמחים בעלי עלים גדולים מאוד. הסבירו את היתרונות שמקנות תכונות אלה לצמחים הגדלים בבית גידול זה.

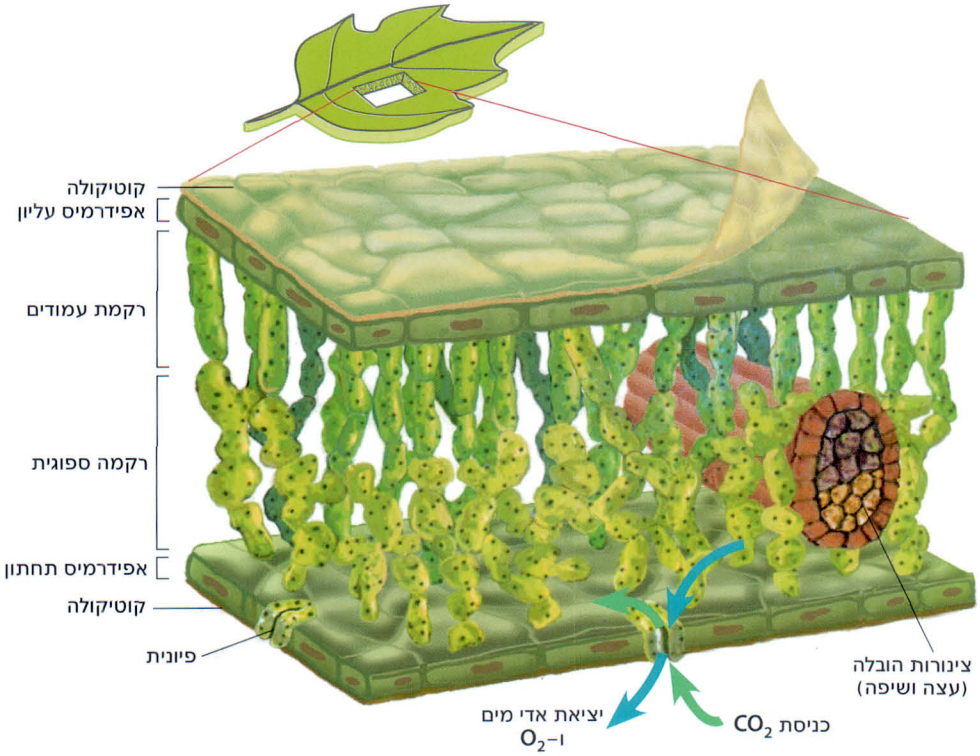
רעיון מרכזי

אחידות ושוני:
בצמחים שונים סידור העלים שונה, אך מותאם לקליטה מרבית של אור.

כיצד מותאם מבנה העלה לקליטת אור ?!

שתי תכונות בולטות מאפיינות את רוב העלים וניתן להבחין בהן ללא מאמץ או מכשור מיוחד: תכונה אחת היא מבנה שטוח היוצר **שטח פנים גדול ביחס לנפח**, ותכונה שנייה היא הצבע הירוק המוקנה לצמחים על ידי הצבען **כלורופיל** שבו נעסוק בהמשך. שתי תכונות אלה חיוניות לקליטת האור – מקור האנרגיה לתהליך הפוטוסינתזה.

הסתכלות בתוך העלה (איור ג–6), מגלה שגם המבנה הפנימי שלו מותאם לקליטת אור ולתהליכים הקשורים לפוטוסינתזה.



איור ג–6: חתך סכמטי בחלק מעלה, וחילופי הגזים בין העלה לסביבתו.

שימו לב! החצים באיור מייצגים רק את כיוון תנועת הגזים הנובע מהפוטוסינתזה והדיות, ואינם מייצגים את הכיוון הנגדי שנובע מהנשימה.

פני העלה במרבית צמחי היבשה מכוסים שכבת שעווה, **קוטיקולה**. שכבה זו שקופה לאור וכמעט אינה חדירה למים. שקיפותה של הקוטיקולה מאפשרת קליטה יעילה של האור. היותה אטומה חשובה למניעת איבוד מים משטח פני העלה. מתחת לקוטיקולה נמצאת שכבת התאים החיצונית הנקראת **אפידרמיס**, ולרוב זוהי שכבת תאים אחת. תאי האפידרמיס צפופים ושקופים, השקיפות מאפשרת חדירה טובה של אור. תאי האפידרמיס הם שמפרישים את הקוטיקולה. מתחת לאפידרמיס העליון מצויה שכבה של תאים דמויי עמודים, ומכאן שמה **רקמת עמודים**. תאים אלה עשירים בכלורופלסטים ובהם מתרחש תהליך הפוטוסינתזה. מתחת לרקמה זו נמצאת רקמת תאים שלהם צורה לא אחידה וביניהם חללים גדולים המקנים לרקמה את שמה: **רקמה ספוגית**. החללים מאפשרים חילוף גזים יעיל של התאים עם הסביבה והתאים עצמם מכילים כלורופלסטים רבים. בחתך הסכמטי בעלה רואים צרור צינורות הובלה. רקמת ההובלה בצמח בנויה משני סוגי צינורות:

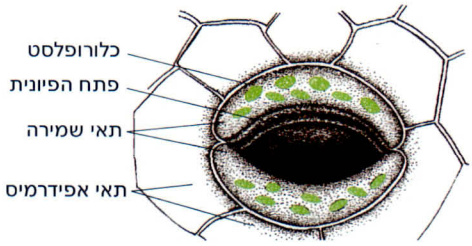
עוד על
הובלת מים ומינרלים:
בסעיף ג1.0, עמוד 83.

עצה ושיפה. בצינורות העצה מובלים מים ומינרלים מהשורשים אל כל חלקי הצמח, ובצינורות השיפה מובלים תוצרי הפוטוסינתזה לאיברים שאינם פוטוסינתטיים או לאגירה. מערכת ההובלה פְּרושה בכל חלקי הצמח ומקשרת ביניהם.

ג2.3 התאמת העלה לקליטת CO_2 וצמצום איבוד מים

שלא כמו אצל בעלי חיים רבים, בצמחים אין מערכת ייעודית להובלת גזים. תנועת האוויר בין הצמח לסביבתו ובתוך הצמח נעשית בדיפוזיה.

חילוף הגזים בין הצמח לסביבתו (איור ג–6) מתרחש דרך פתחים הנמצאים ברקמת האפידרמיס והנקראים **פיוניות**. כל פיונית מוקפת בשני תאי שמירה (איור ג–7), המווסתים את מידת פתיחתה. כאשר שני תאי השמירה מלאים מים, פתח הפיונית פתוח, וכאשר חסרים בהם מים, פתח הפיונית נסגר.



איור ג–7: פיונית פתוחה.

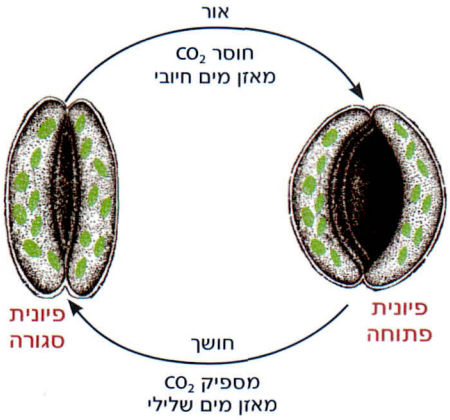
בתוך העלה, בין תאי רקמת העמודים ותאי הרקמה הספוגית, קיימת מערכת רציפה של חללים מלאים אוויר. חללים אלו מקושרים לסביבה באמצעות הפיוניות.

בחללים הבין־תאיים הלחות גבוהה (קרובה ל־100%). כל עוד פתחי הפיוניות פתוחים, CO_2 נקלט דרכם, אך בה־בעת נפלטים דרכם אדי מים בהתאם למפל הריכוזים, בתהליך הנקרא **דִּיות**. כאשר הפיוניות סגורות, אדי מים אמנם אינם נפלטים, אך גם CO_2 אינו נקלט וקצב הפוטוסינתזה קטן. זו למעשה ה"צרה" הגדולה של הצמחים: קליטתו של משאב נדיר אחד – CO_2, כרוכה באיבוד של משאב יקר אחר – מים.

חשוב לדעת ש־90% מהמים שהצמח קולט מתאדים דרך הפיוניות למרות שהן תופסות רק 1% משטח העלה (כאמור, הקוטיקולה מצמצמת במידה ניכרת את התאדות המים משטח פני העלה).

הגורמים העיקריים המווסתים את פתיחת הפיוניות הם רמת ה־CO_2 בחללים הבין־תאיים בעלה, האור ומאזן המים בצמח (כמות המים שהצמח קולט בשורשיו לעומת כמות המים שהוא מאבד בדיות). ברוב הצמחים הפיוניות נפתחות כשיש אור, כשרמת ה־CO_2 בעלה נמוכה, וכשמאזן המים בצמח חיובי. לעומת זאת, הפיוניות נסגרות בחושך, או כאשר רמת ה־CO_2 בעלה גבוהה, או כאשר מאזן המים בצמח הוא שלילי (איור ג–8).

יוצא אם כן שהבקרה על הפתיחה והסגירה של הפיוניות היא פשרה בין הצורך לקלוט CO_2 לבין הצורך לצמצם את איבוד המים.



איור ג–8: השפעת גורמים שונים על פתיחת הפיוניות.

הפיוניות מסייעות לשמירה על מאזן המים בצמחי יבשה, שבהם המים הם משאב נדיר, ובכך הן תורמות לשמירה על ההומיאוסטזיס בצמח.

בסביבות יבשות קיימות התאמות נוספות של העלה לצמצום איבוד מים: **עלים קטנים**, מיקום הפיוניות בעיקר באפידרמיס התחתון, פיוניות שקועות ו**שְׁעִירוּת** של העלה באזור הפיוניות.

תהליך הדיות עלול להצטייר כרע הכרחי – מין תופעת לוואי שגורמת לאיבוד מים עם פתיחת הפיוניות לקליטת CO_2. אך לדיות יש תפקיד חשוב בצמח בהיותו הכוח העיקרי המאפשר את תנועת המים והמינרלים מהשורשים אל חלקי הצמח העל־אדמתיים ללא השקעת אנרגיה (ראו סעיף ג4.7, עמוד 72). התאדות המים מאפשרת גם פליטת חום ושמירה על הטמפרטורה הפנימית של הצמח.

קשר לנושא
אקולוגיה:
התאמות לחיים בסביבה יבשה.

טבלה ג–1 מפרטת את חלקיו הפנימיים של העלה ואת תפקודם בפוטוסינתזה.

טבלה ג–1: חלקי העלה ורקמותיו ותפקודיהם בפוטוסינתזה

חלק מהעלה או מהרקמה	תיאור	תפקוד
קוטיקולה (בצמחי יבשה)	• שכבה של חומר אטום למים ולגזים המכסה את שטח פני העלה • הקוטיקולה שקופה	• הקטנת איבוד המים והגנה על פנים העלה מהתייבשות • מאפשרת קליטה מֵרבית של אור
אפידרמיס	• תאים צפופים, שקופים וחסרי צבעונים (פרט לתאי הסגירה של הפיוניות) • פתחים – פיוניות	• חדירת אור מֵרבית • קליטת CO_2
רקמת עמודים	• ממוקמת בצד העליון של העלה ומאופיינת בתאים דמויי עמוד המכילים כלורופלסטים רבים	• קליטה מֵרבית של אור וביצוע פוטוסינתזה
רקמה ספוגית	• תאים ובהם כלורופלסטים רבים • חללי אויר גדולים בין התאים	• קליטה מרבית של אור וביצוע פוטוסינתזה • חילוף גזים והצטברות CO_2 שחדר דרך הפיוניות
רקמת הובלה	צינורות הובלה משני סוגים: • צינורות עֵצָה • צינורות שִיפָה	• הובלת מים ומינרלים מהשורש אל תאי העלה • הובלת תוצרי הפוטוסינתזה מהעלים לאברים אחרים של הצמח

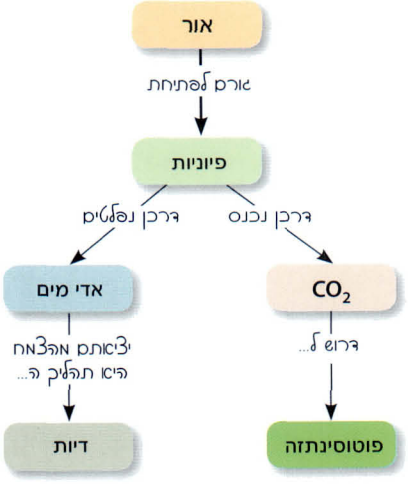
רעיון מרכזי

ויסות והומיאוסטזיס: *ויסות מאזן המים בצמח ושמירה על הומיאוסטזיס באמצעות הפיוניות ותהליך הדיות.*

התאמה בין מבנה ותפקוד: *התאמת הצמח לתנאי יובש.*

שאלה ג–6:

באיור ג–9 מוצג הקשר בין דיות לבין פוטוסינתזה. נסחו משפט המתאר קשר זה.



איור ג–9: מפת מושגים: הקשר בין דיות ופוטוסינתזה.

פוטוסינתזה עם פיוניות סגורות

ויסות פתיחת הפיוניות הוא פתרון לצמצום בעיית איבוד המים בעת קליטת CO_2. אולם, כאמור, יעילותו של פתרון זה מוגבלת כיוון שסגירת הפיוניות מקטינה את קצב הפוטוסינתזה (איור ג–8).

פתרון ייחודי לצמצום איבוד המים בעת קליטת CO_2 קיים אצל קבוצת צמחים מצומצמת הנקראת **צמחי CAM**. צמחים אלו מותאמים לתנאי חום ויובש ולכן הם שכיחים יותר באזורים מדבריים. לקבוצה זו משתייכים צמחים בשרניים שונים: צבר מצוי, טבורית, אהל האצבעות ועוד.



אהל האצבעות

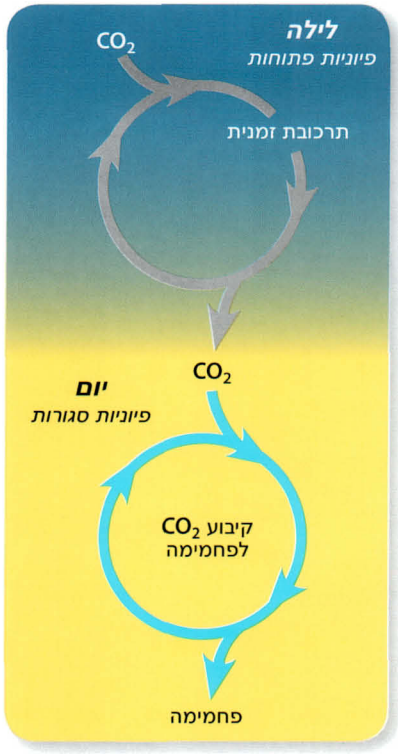


צבר מצוי

הייחוד של צמחי CAM הוא שהפיוניות שלהם נפתחות רק בלילה, כשהלחות גבוהה יחסית והטמפרטורה נמוכה יחסית, וכך הם מאבדים פחות מים בדיות. ה־CO_2 שנקלט בלילה דרך הפיוניות הפתוחות נקשר באופן זמני לתרכובת המצטברת בחלולית התא (איור ג–10).

ביום, בשעות האור, הפיוניות נסגרות, ה־CO_2 משתחרר מהתרכובת המיוחדת שאליה הוא נקשר בלילה ונכנס לכלורופלסט. בכלורופלסט, בתהליך ביוכימי שעליו נלמד בהמשך (מעגל קלווין), ה־CO_2 עובר תהליך קיבוע והופך להיות חלק ממולקולה אורגנית, פחמימה.

למעשה, כמו בכל הצמחים, גם בצמחי CAM תהליך הפוטוסינתזה מתקיים ביום, אך בעוד שבמרבית הצמחים סגירת הפיוניות מפסיקה את תהליך הפוטוסינתזה הרי שבצמחי CAM התהליך מתקיים למרות הפיוניות הסגורות. הדבר מתאפשר בזכות ההפרדה בזמן בין קליטת ה־CO_2 וקשירתו הראשונית המתקיימים בלילה כשהפיוניות פתוחות, לבין התהליך עצמו המתקיים ביום כשהפיוניות סגורות.



איור ג–10: תהליך הפוטוסינתזה בצמחי CAM במשך היממה.

שאלה ג–7:

הַשוו בין המתרחש ביום ובלילה בצמחי CAM על פי המאפיינים הבאים:
מצב הפיוניות, מידת איבוד מים, קליטת CO_2 מהסביבה, התהליך בו משתתף CO_2 וקיום תהליך הפוטוסינתזה.

שאלה ג–8:

הציעו מבנה של עלה אידיאלי המותאם: א. לתנאי מדבר; ב. ליער טרופי סבוך. בהצעתכם התייחסו למבנה העלה, למיקום הפיוניות, לתכולת המים בעלה, לתוספות שונות עליו ולסידור העלים בצמח. נמקו מדוע המבנה שהצעתם מקנה לעלה התאמה מֵרבית לסביבתו.

ג.4 כלורופלסטים וקליטת אור

ג.1.4 כלורופלסטים

רעיון מרכזי

אחידות ושוני:
תאי כל האורגניזמים הם בעלי מאפיינים משותפים, אך לתאים שונים מבנים ייחודיים המותאמים לתפקודם.

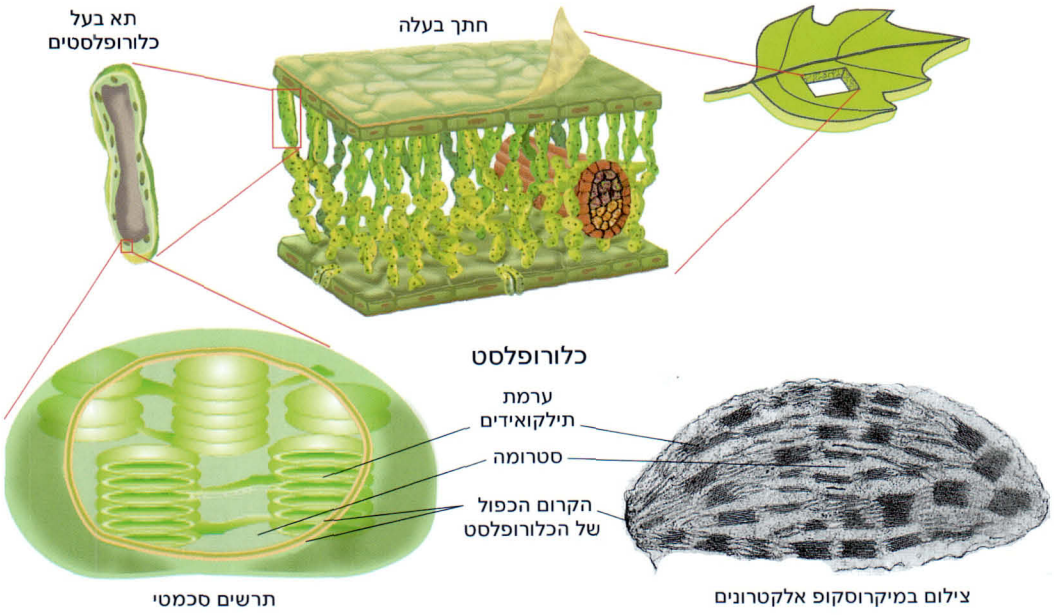
כידוע, אחד ההבדלים בין תא צמח לתא בעל חיים הוא קיומם של אברונים מיוחדים הנקראים כלורופלסטים. **הכלורופלסטים** הם אברונים בעלי צבע ירוק, המצויים בתאי העלה ובתאי החלקים הירוקים האחרים של הצמח, ובהם מתרחש תהליך הפוטוסינתזה. אורכם של הכלורופלסטים הוא כ־5–7 מיקרומטר ורוחבם כ־2 מיקרומטר. מספרם נע בין 50 ל־200 בכל תא.

רעיון מרכזי

התאמה בין מבנה ותפקוד:
מידור בכלורופלסט והגדלת שטח הפנים של הקרומים ביחס לנפח.

לכלורופלסטים מבנה פנימי מורכב, שהתברר רק כאשר הצליחו לצפות בו בעזרת מיקרוסקופ אלקטרונים. הכלורופלסט מוקף מעטפת של שני קרומים בררניים, המווסתים את תנועת המולקולות פנימה והחוצה. הקרום הפנימי מקיף תמיסה מימית המכילה מרכיבים שונים, בהם אנזימים המשתתפים בתהליך הפוטוסינתזה. תמיסה זו נקראת סטרומה. בתוך הסטרומה מצויים מבנים קרומיים – מעין שקיקים סגורים ושטוחים – המסודרים בערמות ומקושרים ביניהם. שקים אלו נקראים תילקואידים (איור ג–11).

כפי שניתן להבחין, קיים **מידור** במבנה הכלורופלסט: מדור אחד נמצא בתוך התילקואידים ומדור שני הוא הסטרומה המקיפה אותם. כפי שנראה בהמשך, בכל מדור מתרחש שלב אחר של תהליך הפוטוסינתזה. המידור יוצר סביבות נפרדות ושונות, ומאפשר ביצוע יעיל של התהליכים השונים במקביל.



איור ג–11: מבנה הכלורופלסט ומקומו ברמות הארגון של הצמח.
למטה מימין: צילום במיקרוסקופ אלקטרונים (הגדלה בערך פי 10,000).
משמאל: תרשים סכמטי.

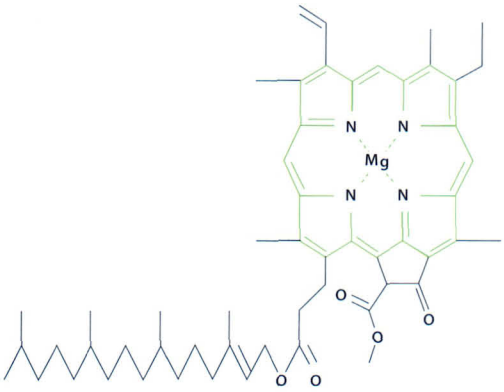
הצבע הירוק של הכלורופלסטים, ולמעשה של כל החלקים הירוקים בצמח, נובע ממולקולות של ה**צבען (פיגמנט) כלורופיל** המצויות בהם.

2.4ג כלורופיל

כפי שניתן לראות באיור ג–12, מולקולת הכלורופיל בנויה משני חלקים: "ראש" ו"זנב". הראש מורכב מטבעות הכוללות אטומי פחמן וחנקן, כשבמרכז המבנה מצוי אטום **מגנזיום** המייצב אותו.

הזנב מורכב משרשרת של אטומי פחמן. ה"ראש" משתתף בקליטת האור וה"זנב" מעגן את הכלורופיל לקרומי התילקואידים, כך שהוא פונה אל פנים התילקואיד. שטח הפנים הגדול שיוצרים שקי התילקואידים מאפשר קשירה של מולקולות כלורופיל רבות.

מולקולת הכלורופיל היא תרכובת אורגנית ולכן גם היא עצמה מהווה תוצר עקיף של תהליכי הפוטוסינתזה בצמח.



איור ג–12: מבנה סכמתי של מולקולת כלורופיל: ראש (צבוע בירוק) וזנב (בשחור).

על קצה המזלג...

על כלורופלסטים, כלורופיל ותפוחי אדמה

כאשר משאירים תפוחי־אדמה זמן רב באור, תפוח האדמה החום הופך לירקרק. מה ההסבר לתופעה זו?

פקעת תפוח האדמה היא למעשה גבעול תת־קרקעי מעובה שתאיו מכילים אברונים המשמשים לאגירת עמילן, המכונים עמילופלסטים. הכלורופלסט והעמילופלסט הם שניים ממשפחה גדולה של אברונים בצמח – פלסטידות. בתנאי סביבה מסוימים יכול סוג אחד של פלסטידה להפוך לסוג אחר של פלסטידה השונה במבנה, בתכולת הצבענים ובתפקוד. כאשר פקעת תפוח האדמה נחשפת לאור, העמילופלסטים הופכים לכלורופלסטים ומתחילים לייצר כלורופיל, המקנה לפקעת תפוח האדמה את הצבע הירקרק.

מעניין לדעת שחשיפת פקעות תפוחי אדמה לאור מגבירה גם את היווצרותו של חומר רעיל – סולנין. הסולנין מצוי דרך קבע בפקעות תפוחי אדמה, אך ברמה שהגוף שלנו מסוגל להתמודד אתה. חשיפה לאור יכולה לגרום לעלייה ברמת החומר הרעיל עד פי 10. הסולנין מרוכז בעיקר סמוך לקליפה, ולכן בפקעות שצבען ירקרק יש להסיר מהקליפה שכבה עבה יותר לפני השימוש.

3.4ג על כלורופיל ובליעת אור

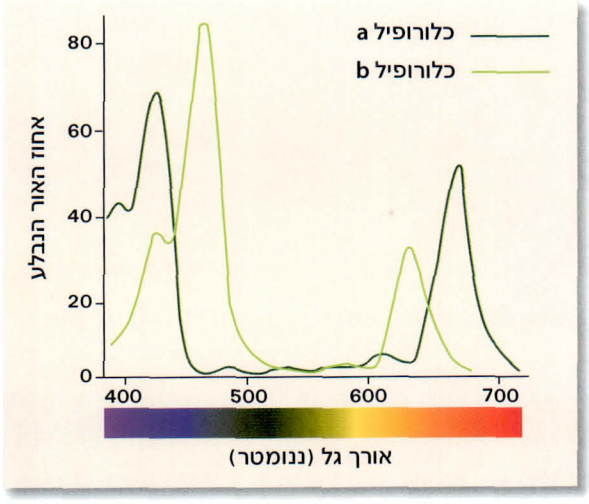
כאמור, אנרגיית האור היא תנאי הכרחי לקיום תהליך הפוטוסינתזה. מקורה של אנרגיית האור הוא בקרינת השמש והיא מתפשטת בחלל כגלים.

כאשר קרן אור, הנראית לעין האדם חסרת צבע, עוברת דרך מנסרה היא מתפצלת ונפרדת לשלל צבעים. הצבעים השונים הם למעשה גלים, השונים זה מזה באורכם ובאנרגיה שלהם. רצף אורכי הגל נקרא **ספקטרום**. פס הצבעים (ואורכי הגל) בתחתית איור ג–13 הוא הספקטרום של האור הנראה.

כל צבען בולע גלי אור באורכי גל ייחודיים לו ומחזיר או מעביר גלי אור באורכי הגל האחרים. צבע הצבען נקבע למעשה על ידי אורכי הגל המוחזרים, והם אלה המגיעים לעינינו. בליעת האור על ידי הכלורופיל, כמו על ידי כל צבען, היא ייחודית. בליעת אור על ידי מולקולת הכלורופיל גורמת לשינוי כימי במולקולה והיא השלב הראשון בתהליך הפוטוסינתזה.

כאשר מאירים תמיסת כלורופיל שמיצינו מעָלֶה, אפשר לראות באמצעות מכשיר הנקרא ספקטרופוטומטר אלו מאורכי הגל (צבעי האור) נבלעים בתמיסה ואלו אינם נבלעים. התמונה המתקבלת מכונה **ספקטרום הבליעה**. על פי הגרף של ספקטרום הבליעה של הכלורופיל (איור ג–13), המראה את שיעור הבליעה לפי אורכי גל, אפשר להסיק מַהם הצבעים שהכלורופיל בולע ומהם הצבעים שהוא מחזיר (המקנים לו את צבעו).

שימו לב! כפי שרואים באיור ג–13 יש שני סוגים עיקריים של כלורופיל בצמחים: כלורופיל a וכלורופיל b. הם נבדלים במקצת במבנה שלהם ולכן גם בספקטרום הבליעה שלהם.



איור ג–13: ספקטרום הבליעה של כלורופיל a וכלורופיל b בתמיסה.
מתחת לציר X – ספקטרום הצבעים של האור הנראה

שאלה ג–9:

התבוננו באיור ג–13 ורשמו:

א. באלו אורכי גל בליעת האור על ידי הכלורופיל היא מרבית? מהם צבעי האור באורכי גל אלו?

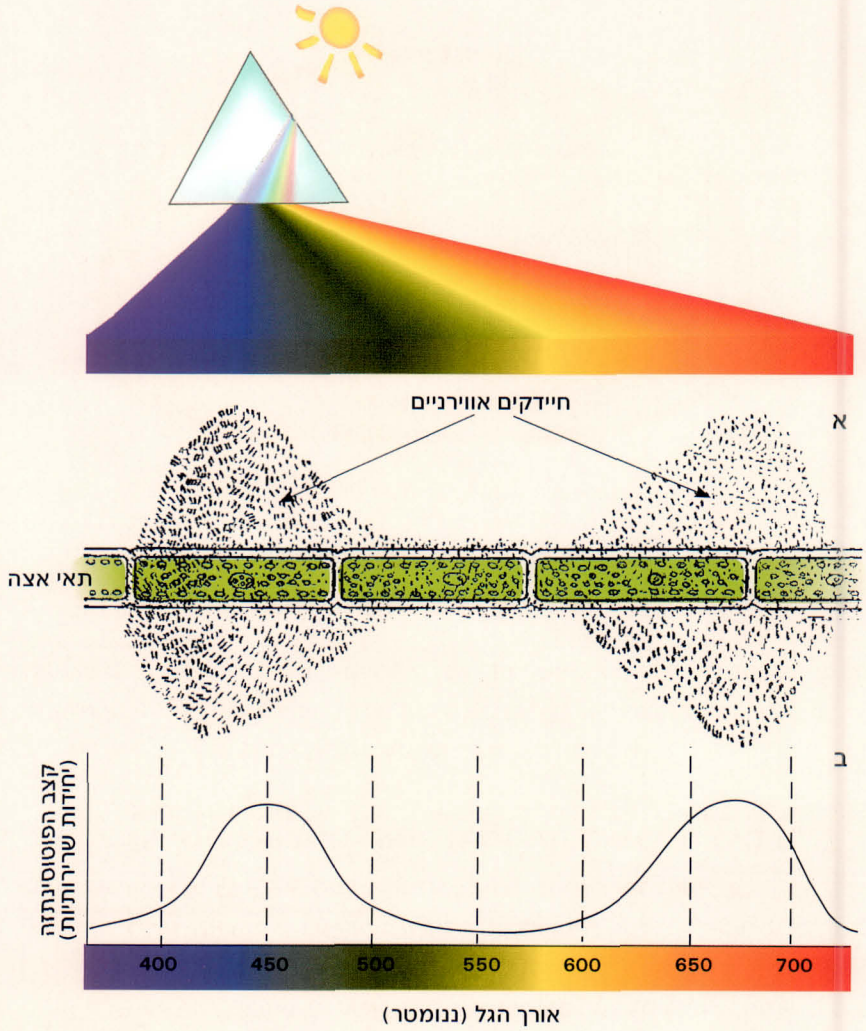
ב. אלו אורכי גל כמעט אינם נבלעים? מהם צבעי האור באורכי גל אלו? כיצד עובדה זו באה לידי ביטוי בצבע העלה?

סיפורו של גילוי

האם גלי האור הנבלעים על ידי הכלורופיל (ספקטרום הבליעה) הם אותם גלי אור הפעילים בתהליך הפוטוסינתזה (ספקטרום הפעולה)?

החוקר הגרמני ***תיאודור אנגלמן*** (Theodor Engelmann) הוא שהראה בשנת 1882 את הקשר בין אורכי הגל הנבלעים על ידי הכלורופיל לבין גלי האור הפעילים בתהליך הפוטוסינתזה. אנגלמן חקר את רמת הפעילות הפוטוסינתטית באצה ירוקה שתאיה מסודרים בשורה אחת כחוט. האצה הארוכה הוארה באור שעבר דרך מנסרת זכוכית, כך שהאור הופרד למרכיביו, וחלקים שונים של האצה הוארו בגלי אור בצבעים שונים. אנגלמן ידע שבפוטוסינתזה נפלט מהצמחים חמצן ולכן הוא בחר בו כעדות לקיום התהליך. לזיהוי החמצן הוא הוסיף למערכת חיידקים אווירניים הזקוקים לחמצן לגדילתם ונעים לאזורים בהם כמות החמצן גדולה. ריכוז

החיידקים סביב התאים שימש דרך למדידת קצב תהליך הפוטוסינתזה. תוצאות הניסוי מתוארות בחלק א של איור ג–14 ומהן הסיק אנגלמן שבפוטוסינתזה פעילים בעיקר גלי האור בתחום האדום והכחול. אורכי הגל שפעילים בפוטוסינתזה נקראים **ספקטרום הפעולה**. אנגלמן מצא שיש התאמה בין ספקטרום הבליעה (אורכי הגל הנבלעים על ידי הכלורופיל) לבין ספקטרום הפעולה (אורכי הגל שבהם קצב פליטת החמצן מהתאים גבוה). התאמה זו מעידה שהכלורופיל הוא אכן הפיגמנט הפעיל בתהליך הפוטוסינתזה.



איור ג–14: א. תוצאות הניסוי של אנגלמן; **ב.** ספקטרום פעולה של הפוטוסינתזה שנובע מתוצאות הניסוי.

שאלה ג–10:

א. מה היה קורה אילו השתמש אנגלמן באור לבן שלא הועבר דרך מנסרה? נמקו.

ב. הַציעו דרך נוספת לבדיקת ספקטרום הפעולה של הפוטוסינתזה.

ג. איזה יתרון יש לצמח שמכיל את שני סוגי הכלורופיל: a ו־b? בססו את תשובתכם על הניסוי של אנגלמן ועל איור ג–13.

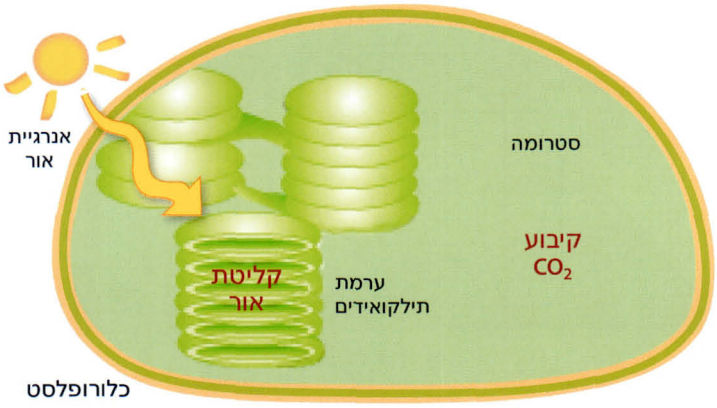
ד. כיצד צפוי לגדול צמח שיואר רק באור ירוק? הסבירו.

ג5. שלבים בתהליך הפוטוסינתזה

שנים רבות של מחקר (הנמשך גם כיום) סייעו לחוקרים להבין את השלבים העיקריים בתהליך הפוטוסינתזה ואת הקשר ביניהם. התברר שבתהליך הפוטוסינתזה שני שלבים המתרחשים בחלקים שונים של הכלורופלסט (ראו איור ג–15):

שלב 1: קליטת אנרגיית האור והמרתה לאנרגיה כימית (בתילקואידים).

שלב 2: קיבוע CO_2 בעזרת תוצרים של שלב קליטת האור (בסטרומה).



איור ג–15: שני השלבים של תהליך הפוטוסינתזה.
השלב הראשון, קליטת האור, מתרחש בתילקואידים בצמוד לקרומיהם.
השלב השני, קיבוע ה־CO_2, מתרחש בסטרומה.

כיום ידועים פרטים רבים על שני השלבים ובידינו תשובות לשאלות כמו: מה תפקיד האור בתהליך? לשם מה נחוצים המים? מהו מקור החמצן הנפלט בתהליך? איך נוצרות פחמימות מ־CO_2? כדי לענות על שאלות אלו, עלינו להכיר מעט יותר את שני השלבים.

1.ג5 שלב קליטת אנרגיית האור והמרתה לאנרגיה כימית

האור הוא מקור האנרגיה לתהליך הפוטוסינתזה, אולם תפקידו של האור מסתיים בשבריר של שנייה: כל פעולתו של האור היא ב**עירור מולקולת הכלורופיל**. בעקבות העירור, אלקטרון עוזב את מולקולת הכלורופיל. מולקולת הכלורופיל שנותרה עם אלקטרון אחד פחות היא בעלת נטייה חזקה למשיכת אלקטרונים (מחמצן חזק – ראו תיבת "על מושגים" בהמשך). מולקולות הכלורופיל המעוררות, מושכות אליהן אלקטרונים ממולקולות מים וגורמות לפירוקן ליוני מימן וחמצן:

$$2H_2O \longrightarrow 4H^+ + 4\bar{e} + O_2$$

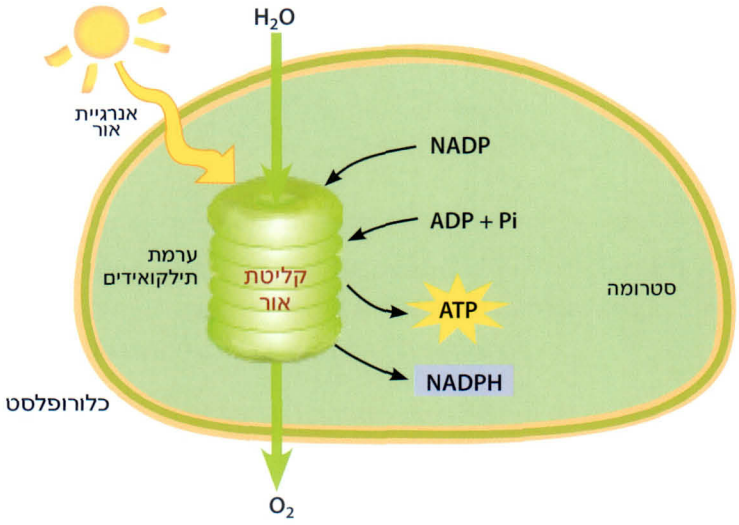
האלקטרונים ממולקולות המים עוברים למולקולות הכלורופיל, ובכך "משלימים" את האלקטרונים החסרים. במצב זה מולקולות הכלורופיל יכולות לקלוט מנה נוספת של אור.

האלקטרונים שהורחקו ממולקולות הכלורופיל עוברים דרך שרשרת של נשאים המצויים בקרום התילקואיד. מעבר האלקטרונים מנשא לנשא מלווה בשחרור הדרגתי של אנרגיה. האנרגיה המשתחררת במעבר האלקטרונים דרך שרשרת הנשאים משמשת ל**יצירת ATP** מ־ADP וזרחה (Pi).

בסופה של שרשרת הנשאים בקרום התילקואיד נקשרים האלקטרונים ויוני המימן שהשתחררו מן המים לנשאי מימנים – מולקולות NADP, שהופכות בעקבות הקישור ל־NADPH.

עוד על
נשאי מימנים ויצירת ATP:
בפרק ה, בסעיף ה4, עמוד 141.

בבניית ATP ו־NADPH הושלמה **המרת אנרגיית האור לאנרגיה כימית** כמוצג באיור ג–16. מכאן ואילך התקדמותו של תהליך הפוטוסינתזה תלויה בשני חומרים אלה וכן ב־CO_2 ובאנזימים.



איור ג–16: תיאור סכמטי של שלב קליטת אנרגיית האור והמרתה לאנרגיה כימית ב־ATP ובנשא מימנים מחוזר (NADPH) תוך פליטת חמצן. החמצן ויוני המימן הם תוצרי הפירוק של מולקולת המים.

על מושגים

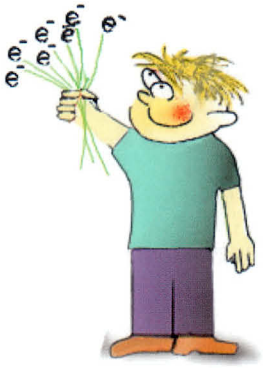
תהליכי חמצון־חיזור

חמצון וחיזור הם תהליכים שהולכים "יד ביד". ברבים מהתהליכים (אך לא בכולם) משתתף חמצן, ומכאן השם חמצון.
חמצון וחיזור יכולים להתרחש באחת מהדרכים הבאות:
1) קבלה ומסירה של אלקטרון. המקבל עובר תהליך חיזור והמוסר – תהליך חמצון.
2) קבלה ומסירה של מימן. המקבל עובר תהליך חיזור והמוסר – תהליך חמצון.
3) קבלה ומסירה של חמצן. הפעם המקבל עובר חמצון והמוסר – חיזור.

מחמצן הוא חומר המושך אלקטרונים ומחזר הוא חומר שמוסר אלקטרונים.
כאשר תרכובת אחת מחמצנת תרכובת אחרת, היא בעצמה מתחזרת, וההפך.
תהליכי חמצון־חיזור מלווים בשחרור אנרגיה.
פוטוסינתזה הוא תהליך של חיזור מולקולת ה־CO_2 בעזרת המימן של מולקולת המים.

נשא מימנים

בתהליכים ביולוגיים רבים של חמצון־חיזור מועבר מימן באמצעות חומר מתווך שכשמו כן הוא: **נשא של מימנים**. נשא המימנים קולט מימנים (מתחזר), מעביר אותם ליעדם ושם מוסר אותם (מחזר ומתחמצן בעצמו). כעת הוא מוכן לצאת שוב לדרך...
נשא המימנים בתהליך הפוטוסינתזה הוא NADP.



המחזר הוא זה שתמיד נותן את הפרחים ($\bar{e}$)

מה קורה עם החמצן שהתקבל בפירוק מולקולת המים?!

עוד על
נשימה תאית אווירנית: *בפרק ה סעיף ה2.4, עמוד 142–150.*

החמצן (O_2) המתקבל מפירוק המים יוצא בתהליך של דיפוזיה ממקום היווצרותו בכלורופלסט אל הציטופלסמה, וממנה לחללים הבין־תאיים. מהחללים הוא מפעפע החוצה לאטמוספרה דרך הפיוניות, בהתאם למפל הריכוזים. החמצן מנוצל על ידי האורגניזמים ב**נשימה התאית האווירנית**.

פירוק מים בעזרת אור אינו משימה של מה בכך: כל־כך הרבה מים נמצאים סביבנו ובגופם של האורגניזמים, ובכל זאת אור השמש אינו גורם ישירות לפירוקם. עובדה זו מעידה על חשיבותו הרבה של הכלורופיל בתהליך זה.

סיפורו של גילוי

מקור החמצן הנפלט בתהליך הפוטוסינתזה

מהו מקורו של החמצן הנפלט בתהליך הפוטוסינתזה? הרי גם במים וגם ב־CO_2, שני המגיבים בתהליך הפוטוסינתזה, יש אטומים של חמצן. מי מהם הוא המקור לחמצן, שהוא אחד מתוצרי הפוטוסינתזה? שאלה זו העסיקה חוקרים רבים.

כדי לענות על השאלה ערכו החוקרים ***רובן וקָמן*** (Ruben & Kamen) ב־1941 ניסויים, שבהם גידלו אצות במים עם חמצן "כבד" (משקלו המולקולרי הוא 18 ולא 16 כבחמצן רגיל). במעקב אחר החמצן הכבד במכשירים מיוחדים, התברר שהחמצן הנפלט מהאצות הוא חמצן "כבד" (איור ג–17). *לעומת זאת, כאשר סיפקו לאצות CO_2 שבו החמצן הוא "כבד",* החמצן הנפלט היה חמצן רגיל.

המסקנה הייתה שמקור החמצן הנפלט הוא המים.

$$n(CO_2) + 2n(H_2O^{*18}) \xrightarrow[\text{כלורופיל, אנזימים}]{\text{אנרגיית אור}} (CH_2O)_n + nO_2^{*18} + n(H_2O)$$

איור ג–17: נוסחה כללית של תהליך הפוטוסינתזה שבה מודגש החמצן ה"כבד".

שימו לב! בנוסחה המוצגת באיור ג–17 מים מופיעים גם כמגיב וגם כתוצר. החמצן המסומן מאפשר לנו "לראות" שאלו לא אותן מולקולות, ולכן הן צוינו משני צדי הנוסחה. בנוסחה המקובלת של תהליך הפוטוסינתזה משמיטים את מולקולות המים בתוצרים, ובהתאם מפחיתים את מספר מולקולות המים במגיבים, כנהוג בנוסחאות כימיות.

הנוסחה המקובלת לתיאור תהליך הפוטוסינתזה נכתבת, אם כן כך:

$$n(CO_2) + n(H_2O) \xrightarrow[\text{כלורופיל, אנזימים}]{\text{אנרגיית אור}} (CH_2O)_n + nO_2$$

שאלה ג–11:

א. באיזה מהתוצרים היה מופיע החמצן הכבד אם החמצן המסומן היה ב־CO_2?

ב. הסבירו את תוצאות הניסוי של רובן וקָמן בעזרת מה שלמדתם על שלב קליטת האור.

2.ג שלב קיבוע ה־CO_2

ה־ATP וה־NADPH שנוצרו בשלב קליטת האור משמשים בשלב השני של תהליך הפוטוסינתזה – שלב קיבוע פחמן דו־חמצני.

איך נוצרות פחמימות מ־CO_2?!

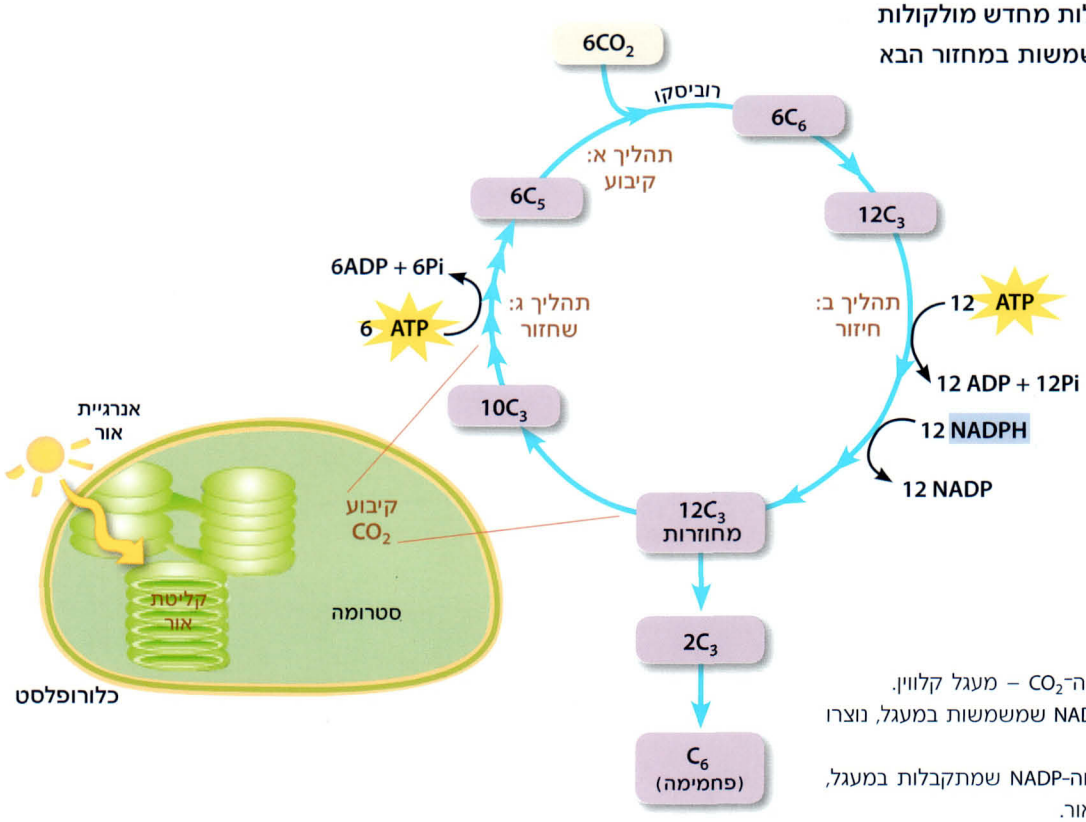
במחקרים שנערכו בשנות החמישים של המאה ה־20 הצליחו החוקרים לברר את השלבים שבהם נוצר "שלד פחמני" ממולקולות CO_2, שבו מחוברים זה לזה כמה אטומי פחמן. זהו תהליך מעגלי הנקרא "מעגל קלווין", על שם החוקר שגילה אותו – ***מלווין קלווין*** (Melvin Calvin 1911–1997), והוא מתקיים בסטרומה שבכלורופלסט.

את רצף התגובות במעגל קלווין ניתן לחלק לשלושה תהליכים עיקריים: קיבוע CO_2, חיזור ושחזור. חשוב לציין שבפועל קיימים שלבי ביניים רבים. כמו לכל מעגל, למעגל קלווין אין התחלה ואין סוף, אך לצורך ההסבר נתחיל בתהליך הקיבוע (ראו איור ג–18).

התהליך הראשון במעגל הוא תהליך **קיבוע ה־CO_2**, שבו נקשרת מולקולה של CO_2 למולקולה של סוכר בת 5 פחמנים. תהליך זה מזורז על ידי אנזים ייחודי שנקרא **רוּבִּיסְקוֹ**. המולקולה בת 6 פחמנים מתפרקת מיד ל־2 מולקולות בנות 3 פחמנים כל אחת.

התהליך השני במעגל הוא תהליך **החיזור**, שבו נשא מימנים מחוזר (NADPH) מוסר מימנים למולקולות בנות 3 פחמנים. התוצר של שני השלבים הראשונים הוא מולקולות מחוזרות בנות 3 אטומי פחמן. שתיים מהן עוזבות את המעגל ומתחברות ליצירת חד־סוכר בן 6 פחמנים. שאר המולקולות המחוזרות ממשיכות לתהליך הבא.

התהליך השלישי במעגל הוא תהליך **השחזור**, שבו מתקבלות מחדש מולקולות בנות 5 פחמנים המשמשות במחזור הבא של המעגל.

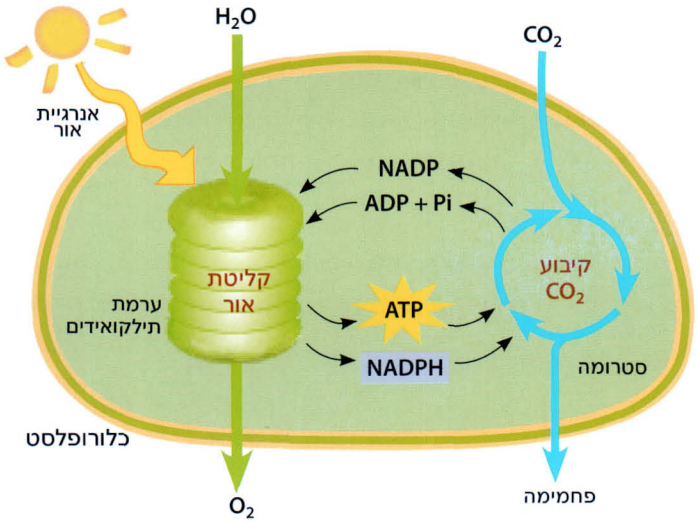


איור ג–18: שלב קיבוע ה־CO_2 – מעגל קלווין.
מולקולות ה־ATP וה־NADPH שמשמשות במעגל, נוצרו בשלב האור.
מולקולות ה־ADP, ה־Pi וה־NADP שמתקבלות במעגל, חוזרות לשמש בשלב האור.

באיור ניתן לראות גם את התהליכים שבהם התוצרים של שלב קליטת האור – ATP ו־NADPH, מנוצלים במעגל קלווין. ה־NADPH מנוצל בתהליך החיזור של המולקולות ה־3 פחמניות. תהליכי החיזור והשחזור הם תהליכים צורכי אנרגיה והם מתרחשים בצמוד לפירוק מולקולות ATP. ה־NADP, ה־ADP וה־Pi (קבוצת הזרחה) המתקבלים פנויים לשימוש חוזר בשלב קליטת האור.

מעגל קלווין מתקיים בכל האורגניזמים הפוטוסינתטיים, החל בחיידקים וכלה בצמחים העילאיים. האנזים המקבע את ה־CO_2, הרוביסקו, הוא אנזים ייחודי למעגל קלווין ונחשב לחלבון הנפוץ ביותר בטבע: בעלים ירוקים מהווה אנזים זה 65% מכלל החלבונים המסיסים.

כעת נוכל לסכם את שני שלבי תהליך הפוטוסינתזה (איור ג–19):



איור ג–19: שלבי הפוטוסינתזה בתוך הכלורופלסט.

שלב 1: שלב קליטת האור והמרתו לאנרגיה כימית ב־ATP ובנשא מימנים (NADPH) תוך פירוק מים ופליטת חמצן (O_2).
שלב 2: שלב קיבוע CO_2 תוך ניצול תוצרי השלב הראשון ויצירת פחמימה חדשה.

האם נחוץ אור לשלב קיבוע ה־CO_2?!

ניסויים שונים הראו שהתהליכים של קיבוע CO_2 אינם תלויים ישירות באור כמקור אנרגיה. אולם חשוב לזכור שתוצרי שלב קליטת האור מנוצלים בשלב קיבוע ה־CO_2, ולכן ללא תוצרים אלו שלב זה לא יתקיים. נמצא גם שהאור דרוש להפעלת חלק מהאנזימים הפועלים בשלב קיבוע ה־CO_2, ולכן גם שלב זה אינו יכול להתקיים לאורך זמן בחושך.
תהליך הפוטוסינתזה מתנהל כרצף אחד: שני שלבי הפוטוסינתזה מתרחשים בו זמנית וקיום כל אחד מהם תלוי בקיומו של השני.

שאלה ג–12:

מהו מקורה של האנרגיה המשמשת לבניית מולקולות ה-ATP בשלב הראשון של הפוטוסינתזה? לאיזה חומר "מתגלגלת" האנרגיה בסופו של תהליך הפוטוסינתזה?

שאלה ג–13:

מהם התוצרים של שלב קליטת האור? אלו מהם משתתפים בשלב קיבוע הפחמן הדו־חמצני?

שאלה ג–14:

בתהליך הפוטוסינתזה מתפרקות מולקולות מים. הסבר מהי חשיבות הפירוק לגבי:

א. קיום תהליך הפוטוסינתזה.

ב. קיום מערכות אקולוגיות.

שאלה ג–15:

מולקולת הפחמימה הנוצרת בתהליך הפוטוסינתזה מכילה פחמן, מימן וחמצן. מהו המקור של כל אחד מהיסודות?

שאלה ג–16:

באיור הסכמטי ובצילום של מבנה הכלורופלסט (איור ג–11) רואים קרומים רבים. מהם היתרונות במבנה זה לתפקוד הכלורופלסט?

ג6. תוצרי הפוטוסינתזה: הובלה, אגירה וניצול על ידי הצמח

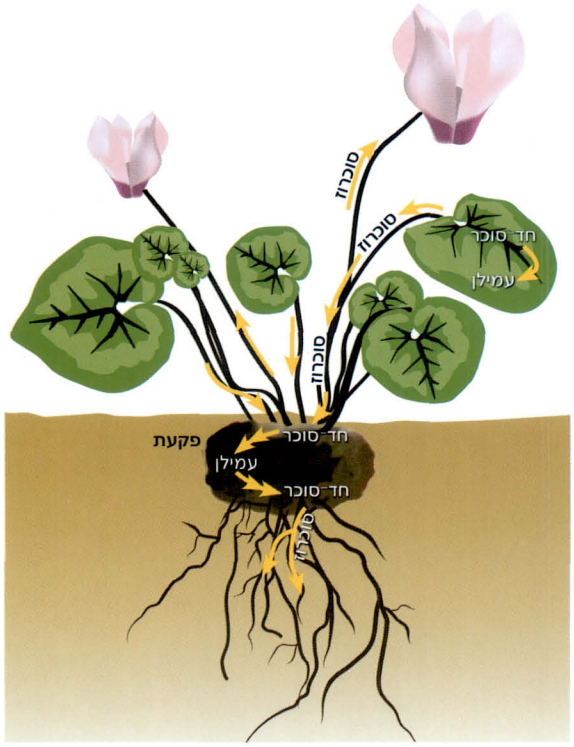
קשר לנושא

התא - מבנה ופעילות: *הפקת אנרגיה זמינה בנשימה תאית אווירנית.*

כאמור, התוצר הישיר של הפוטוסינתזה הוא חד־סוכר 6 פחמני. בדרך כלל מולקולה זו מנוצלת לבניית הפחמימות המשמשות כבר בתאים בהן נוצרו להפקת אנרגיה זמינה, לבנייה של התאים ולאגירה. בתאים הפוטוסינתטיים נוצר בכלורופלסטים מאגר זמני.

הפחמימות שאינן מנוצלות בתאים הפוטוסינתטיים מועברות כתמיסת סוכרוז ב**צינורות השיפה** (ראו איור ג–20). הסוכרוז מועבר מהאזורים בהם הוא נוצר – עלים וגבעולים ירוקים, אל חלקי צמח שבהם אין ייצור או שהייצור קטן מהנדרש: קודקודי צמיחה ו**ניצנים**, **פרחים**, עלים צעירים, עלים מוצלים, גבעולים, שורשים, **פירות** ו**איברי אגירה** כמו: פקעות, שורשים מעובדים, בצלים ו**זרעים**. גם ברקמות אלה הפחמימות משמשות חומר מוצא להפקת אנרגיה זמינה, לבנייה של התאים ולאגירה. באברים אלו האגירה היא לטווח ארוך.

הפחמימה המשמשת לאגירה היא עמילן שנוצר מפחמימות פשוטות יותר ומהווה חומר תשמורת עיקרי בצמח.

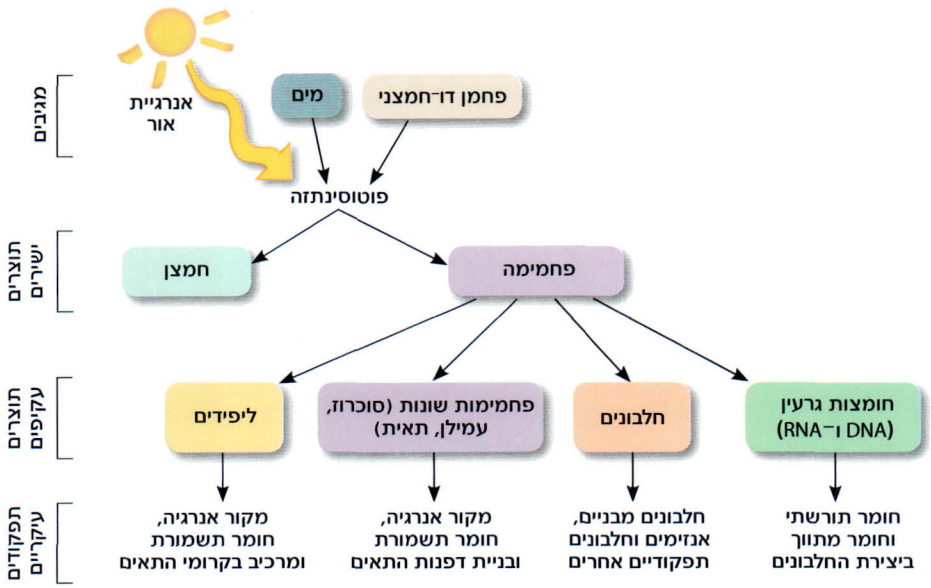


איור ג–20: הובלת תוצרי הפוטוסינתזה ואגירתם בצמח.

בתקופות שונות בחיי הצמח, יכולים אברי האגירה להפוך למקור של חומרי הזנה לחלקים אחרים בצמח. למשל, הבצל והפקעת בגיאופיטים קולטים בשלב מסוים פחמימות מהעלים ובשלב אחר משמשים מקור לחומרי מזון לשאר חלקי הצמח.

כאשר כמות החומר האורגני הנוצר בתהליך הפוטוסינתזה מוגבלת, קיימת תחרות בין האיברים השונים שבצמח על חומרים אלו. החקלאים מנצלים ידע זה לשיפור איכותו של התוצר הרצוי להם. החקלאים מפחיתים את התחרות ומכוונים את החומרים האורגניים לפרי או לאיבר אגירה באמצעים שונים, בהם דילול פירות, גיזום ועוד.

כאמור, מקצת הפחמימות שנוצרות בפוטוסינתזה עוברות שינויים ומשמשות לבניית חומרים אורגניים נוספים בהם ליפידים, חלבונים וחומצות גרעין. בניית החומרים האורגניים מהפחמימות מתרחשת הן ברקמות הפוטוסינתטיות בהן נוצרו והן ברקמות אליהן הגיעו. באיור ג–21 מתוארים התוצרים העקיפים העיקריים של הפוטוסינתזה ותפקודיהם המרכזיים.



איור ג–21: התוצרים העקיפים העיקריים של הפוטוסינתזה בצמח ותפקודיהם.
שימו לב! לרוב התוצרים דרושים גם מינרלים הנקלטים מהקרקע.

על קצה המזלג ...

מי עוד נהנה מהתוצרים האורגניים של הפוטוסינתזה?

מקצת חומרי התשמורת שנוצרו בצמח הם ההשקעה של הצמח בדור הבא ובהצלחתו: חומרי התשמורת בזרע מספקים לנבט את צרכיו בשלבים ראשונים של הנביטה והגידול. החומרים שבפירות הם מזון עשיר ומפתה לכל אלה הניזונים מהם ומפיצים אגב כך את הזרעים. קיימות דוגמאות רבות לכך שאכילת הפרי לא רק שאינה פוגעת ביכולתו של הזרע לנבוט אלה אף מסייעת בכך. זוהי דוגמה ליחסי גומלין מסוג הדדיות: אוכלי הפרי נהנים, וזרעי הצמח מופצים למרחק (ובכך קטנה התחרות עם צמח האם וגדלה האפשרות לאכלוס שטחים חדשים) ולעתים גם זוכים לטיפול "מזרז נביטה" (למשל על ידי ריכוך הקליפה). חומרי התשמורת של הצמח בפרי ובזרע מסייעים אפוא בהפצתו ומבטיחים את ההמשכיות בין הדורות.

ההשקעה של הצמח בדור הבא מנוצלת על ידי האדם ליצירת מזונות בחקלאות. שדות החיטה, האורז והתירס, כרי המרעה ומטעי הפירות והכרמים הם "בתי־חרושת" פוטוסינתטיים מהם מתקבל יבול של צמחים וחלקי צמחים (עלים, פקעות, פירות, זרעים), המשמשים מזון לאדם ולבעלי החיים שהוא מגדל.

קשר לנושא

אקולוגיה:
יחסי גומלין מסוג הדדיות.

שאלה ג–17:

בגידול מסחרי של פירות מסוימים, כגון ענבים, צברים, אפרסקים ותמרים, נוהגים חקלאים לבצע דילול (הפחתת מספר הפירות) בפירות הצעירים. בניסוי שנערך במצרים נבדקה השפעת מידת דילול פירות התמר שבועיים לאחר ההפריה על משקל פרי התמר הבודד ועל ריכוז הסוכר בו. התוצאות מוצגות בטבלה ג–2:

טבלה ג–2: השפעת דילול פירות התמר על משקל הפרי הבודד ועל ריכוז הסוכרים בו

דילול הפירות (%)	משקל פרי בודד (גרם)	ריכוז סוכרים (%)
0	15.2	30
10	16.3	32.6
20	16.8	33.4
30	18.2	35

א. מה ניתן ללמוד מהנתונים על הקשר שבין מספר הפירות לגודלם ולריכוז הסוכר בהם?

ב. מהו ההסבר הביולוגי שעליו מתבסס טיפול הדילול?

שאלה ג–18:

ציינו מספר דוגמאות למזונות הנפוצים על שולחננו שבהם יש עמילן. בכל דוגמה ציינו מאיזה צמח התקבל המזון ובאיזה איבר של הצמח נאגר העמילן.

דילמה

פוטוסינתזה לייצור דלק – בעד או נגד?

בשנת 2008 יצא מטוס לטיסה מסחרית כשאחד ממנועיו מופעל על ידי תערובת של דלק רגיל עם דלק שהופק מצמח נוי הגדל בדרום אמריקה ואפריקה (הקרוי ג'טרופה). הטיסה עברה בהצלחה.

מתוצרי הפוטוסינתזה של צמחים מפיקים "דלק ביולוגי" (אתנול) כתחליף לגז ולנפט. בעבר כבר הופק "דלק ביולוגי" מצמחים כמו סויה או תירס, אך היתרון של צמח הג'טרופה הוא העובדה שגידולו קל והוא אינו זקוק לכמויות רבות של מים, או לדישון רב.

הצורך במציאת מקור צמחי כחלופה לדלק פוסילי (דלק שנוצר לפני מיליוני שנים משרידים של יצורים זעירים) כמו נפט, פחם וגז טבעי, נובע מהידלדלות מאגרי הדלק התת־קרקעיים, שמקורם בתהליכי פוטוסינתזה שהתרחשו בזמנים קדומים.

לשימוש ב"דלק הביולוגי" כמה יתרונות בולטים, אך גם לא מעט היבטים שליליים.



שאלה ג–19:

יש הטוענים שצריך לעבור לשימוש ב"דלק ביולוגי" (המכונה גם "דלק ירוק" או "ביוגז") ולצמצם את השימוש בדלק פוסילי. המתנגדים למעבר כזה טוענים שיש להמשיך להשתמש בדלק פוסילי כל עוד הוא זמין.

א. חפשו ברשת האינטרנט נימוקים בעד המעבר ל"דלק ביולוגי" ונימוקים נגד מעבר כזה. נסחו טיעון אחד בעד השימוש בדלק ביולוגי וטיעון אחד נגד.

ב. מהי עמדתכם האישית בנושא זה? הציגו אותה כטיעון שיסייע לכם לשכנע את המתנגדים לעמדה זו.

על מושגים – דילמה וטיעון

דילמה היא סוגיה המעוררת ויכוח שמקורו בהתנגשות בין ערכים שונים.

טיעון הוא היגד הבא לשכנע את האחר בצדקת עמדת הטוען.

הטיעון מורכב משני חלקים:

– **טענה** (או מסקנה) – שהיא הנקודה העיקרית שהטוען רוצה להביע.

– **נימוק** – הסבר מבוסס התומך בטענה (או במסקנה).

טיעון יכול להכיל יותר מנימוק אחד, ובמידת האפשר עליו להתבסס על ראיות.

לעתים הטיעון נועד לשכנע מישהו לשנות את דעתו. במקרה כזה הטוען מתמודד עם טענות נגד בצורה שקולה וביקורתית. הטיעון יכול להפריך את הטיעון הנגדי, תוך הבאת נימוק המערער את התאמת נימוקי הצד המתנגד, או להביא נימוקים וראיות נוספים שיחזקו את עמדתו. להלן כמה דוגמאות:

- טיעון בעד פיתוח כביש חוצה ישראל:
  כדאי להמשיך לפתח את כביש חוצה ישראל (טענה) כי הוא "יקרב" את הפריפריה למרכז ויתרום לכלכלה ולשיפור רמת החיים (נימוק).
- טיעון נגד פיתוח כביש חוצה ישראל:
  לא כדאי לסלול כביש זה (טענה) כי ייפגעו צמחים ובעלי חיים בבתי הגידול בהם הוא יעבור (נימוק).
- טיעון להפרכת טיעון המתנגדים:
  חשוב להמשיך לפתח את כביש חוצה ישראל (טענה), אך צריך למצוא פתרונות שיצמצמו למינימום את הפגיעה בצמחים ובבעלי החיים (נימוק להפרכה).

ג.7 גורמים המשפיעים על תהליך הפוטוסינתזה

חשיבות תהליך הפוטוסינתזה בכלל, וחשיבותו לחקלאות, בפרט, הביאו רבים לחקור את השפעותיהם של גורמים שונים על קצב הפוטוסינתזה. מחקרים אלה הובילו להבנה טובה יותר של עיקרי התהליך, של הגורמים המשפיעים עליו ובעיקר להבנה שהגורמים פועלים בעת ובעונה אחת.

הגורמים המשפיעים על תהליך הפוטוסינתזה הם **גורמים פנימיים וגורמים חיצוניים – סביבתיים**.

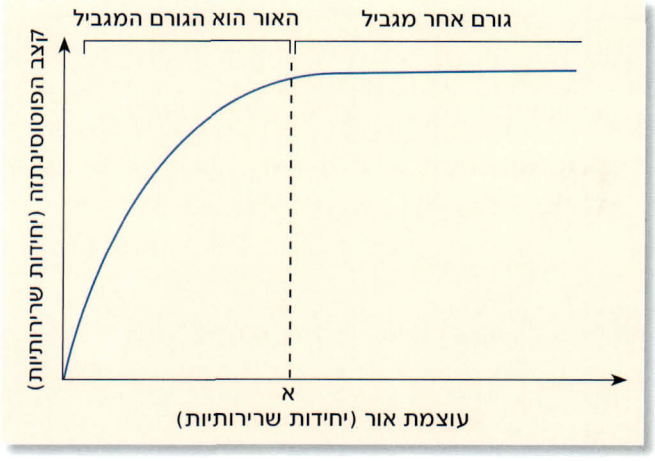
הגורמים הפנימיים הם, למשל, מספר הכלורופלסטים בעלה, כמות הכלורופיל בעלה, מבנה העלה, צפיפות הפיוניות ומיקומן בעלה, גיל העלה.

הגורמים הסביבתיים העיקריים הם: עוצמת האור וטיבו, ריכוז ה־CO_2, הטמפרטורה, ובעקיפין גם כמות המים ולחות האוויר. בהמשך נלמד שגם המינרלים הזמינים לצמח משפיעים על תהליך הפוטוסינתזה.

ג.7.1 השפעת עוצמת האור על קצב הפוטוסינתזה

האור הוא מקור אנרגיה לתהליך הפוטוסינתזה. ניתן לשאול: האם ככל שנגביר את עוצמת האור יגדל קצב הפוטוסינתזה ונקבל כמות גדולה יותר של תוצרים?

כשבודקים את ההשפעה של עוצמות אור על קצב הפוטוסינתזה בצמחים שונים (כאשר כל הגורמים האחרים נשמרים קבועים), מתקבל עקום כדוגמת זה המוצג באיור ג–22.



איור ג–22: קצב הפוטוסינתזה בעוצמות אור שונות.
העקום הוא דגם כללי ולכן לא מופיעות בו יחידות. לצמחים שונים מתקבלים ערכים שונים.

באיור ג–22 רואים שבעוצמות אור נמוכות (עד נקודה א), עלייה בעוצמת האור מגבירה את קצב הפוטוסינתזה. בעוצמות אור גבוהות (מעבר לנקודה א), הגברת האור לא משפיעה על קצב הפוטוסינתזה, והקצב נשאר קבוע עד גבול מסוים.

איך נסביר זאת? ההסבר הוא על פי עקרון **הגורם המגביל**. בעוצמות אור נמוכות (עד נקודה א), האור הוא הגורם המגביל בתהליך (אין מספיק אור), ולכן עלייה בעוצמת האור מגבירה את קצב התהליך. בעוצמות אור גבוהות (מעבר לנקודה א), האור אינו גורם מגביל (יש די אור), ולכן קצב התהליך אינו עולה גם כאשר מעלים את עוצמת האור. מנקודה זו ואילך, גורם אחר (מאחד הגורמים המשפיעים על תהליך הפוטוסינתזה) מהווה גורם מגביל (רמתו נמוכה).

קשר לנושא

אקולוגיה:
תנאים, משאבים וגורמים מגבילים.

מה יכול להיות הגורם שכמותו אינה מספקת, ואיך נדע שכעת הוא הגורם המגביל?
הדרך הפשוטה לענות על השאלה היא להוסיף את הגורם אשר משערים שרמתו נמוכה מדי ולבחון את השפעת ההוספה. כך למשל: אם בשלב שבו תוספת אור לא מגבירה את התהליך (מנקודה א באיור ג–22 ואילך), תוספת של CO_2 כן מגבירה את קצב הפוטוסינתזה, ניתן להסיק שה־CO_2 היה הגורם שהגביל את התהליך למרות עוצמת האור הגבוהה.

שאלה ג–20:

באלו בתי גידול עוצמת האור עשויה להיות גורם מגביל בפוטוסינתזה?

ג2.7 השפעת CO_2 על קצב הפוטוסינתזה

CO_2 הוא מגיב מרכזי בתהליך הפוטוסינתזה. הוא הבסיס לשלד הפחמני של החומרים האורגניים שמקורם בפוטוסינתזה. באיור ג–22 ראינו, שבעוצמות מסוימות האור הוא גורם מגביל לתהליך הפוטוסינתזה. כך גם לגבי השפעת ריכוז ה־CO_2 על קצב הפוטוסינתזה: כאשר העלאת ריכוז ה־CO_2 מגבירה את התהליך, פירוש הדבר שה־CO_2 הוא גורם מגביל. לעומת זאת, כאשר העלאת ריכוז ה־CO_2 אינה מגבירה את התהליך, פירוש הדבר שה־CO_2 אינו גורם מגביל, ושיש להניח שגורם אחר מגביל את התהליך – למשל טמפרטורה, אור או מינרלים מסוימים.

אשנב למחקר

כדי לבדוק את השפעת ריכוז ה־CO_2 באוויר על קצב הפוטוסינתזה, ערכו ניסוי שבו גידלו צמחי תירס בריכוזי CO_2 שונים. הצמחים גודלו בכלים סגורים שקופים, שהיו חשופים לשינויים טבעיים של יום ולילה. בכל כלי גידלו כ־30 שתילים בתנאים זהים, פרט לריכוז ה־CO_2 באוויר שהוזרם לתוכם. במשך הניסוי נבדק קצב הפוטוסינתזה של צמחי התירס. תוצאות הניסוי מוצגות בטבלה ג–3.

טבלה ג–3: השפעת ריכוז CO_2 על קצב הפוטוסינתזה של צמחי התירס

ריכוז CO_2 שהוזרם לכלי (מ"ג CO_2 לליטר)	קצב הפוטוסינתזה של צמחי התירס (מ"ג CO_2 שנקלט ב־100 סמ"ר שטח עלים לשעה)
100	15
200	32
300	46
400	49
600	53
700	53

שאלה ג–21:

א. הציגו בגרף את הנתונים שבטבלה ג–3. מה היתרון בהצגה הגרפית?

ב. תארו את התוצאות שהצגתם בגרף בסעיף א והסבירו אותן בעזרת המושג "גורם מגביל".

ג. על סמך הנתונים והידוע לכם על תהליך הפוטוסינתזה, הציעו הסבר להשפעת ריכוז ה־CO_2 שהוזרם לכלי, על קצב הפוטוסינתזה של צמחי התירס.

ד. לאחר כחודש בדקו את המשקל היבש של צמחי התירס. משקל יבש הוא משקל כל החומר שמכילה הרקמה הצמחית ללא המים. נמצא שהמשקל היבש הגבוה ביותר היה של צמחים שגדלו בכלי שהוזרם אליו ריכוז ה־CO_2 המֵרבי. הסבירו את התוצאות שהתקבלו.

ה. מדוע נבדק המשקל היבש ולא המשקל הכולל של הצמחים?

ו. CO_2 הוזרם לכלים בקצב קבוע לאורך היממה. למרות זאת, בדיקות של ה־CO_2 בשעות שונות של היממה הראו שריכוזו באוויר בתוך הכלים לא נשאר קבוע. הסבירו ממצא זה.

ז. הציעו דרך נוספת למדידת קצב הפוטוסינתזה בניסוי זה.

על קצה המזלג...

פוטוסינתזה, ריכוז ה־CO_2 באטמוספרה ואפקט החממה

אפקט החממה היא תופעה הנובעת מההילכדות של אנרגיית חום באטמוספרה. קרינת חום מפני כדור הארץ מוחזרת אליו בגלל הימצאותם של גזים שונים באטמוספרה, בהם פחמן דו־חמצני ומתאן. אפקט החממה יוצר תנאי טמפרטורה נוחים על פני כדור הארץ.

בשנים האחרונות מדברים על **הגברת אפקט החממה** כתוצאה מעלייה בריכוזי גזים שונים באטמוספרה. ההשפעות המזיקות של עלייה בטמפרטורה הממוצעת בכדור הארץ מעוררות דאגה.

CO_2 נחשב לאחד הגורמים המגבירים את אפקט החממה. ריכוז ה־CO_2 באטמוספרה עלה מ־0.0275% בעידן הקדם־תעשייתי, ל־0.0380%–0.0400% בשנות ה־2000, בעיקר כתוצאה משרפת דלקים על ידי האדם ומכריתת יערות, המפחיתה את הכמות הגלובלית של CO_2 הנקלטת על ידי הצמחים, ובמקרים בהם שורפים את העצים – אף מוסיפה CO_2 לאטמוספרה.

שימו לב! אחוזי ה־CO_2 באוויר בשני העידנים, הקדם־תעשייתי ובימינו, הם נמוכים מאוד ולכאורה אינם שונים כל־כך זה מזה (בשתי התקופות מדובר בהפרש של פחות מ־5 מאיות האחוז), אך למעשה זהו שינוי משמעותי ביותר! ריכוז ה־CO_2 כיום גבוה ב־30% ביחס לריכוזו בעידן הקדם־תעשייתי.

פוליטיקאים ומדענים בכל העולם קוראים להגביל את פליטת ה־CO_2 ממקורות תעשייתיים מזהמים.

לצד ההיבטים השליליים הברורים של הגברת אפקט החממה מעניין לדעת שיש גם רווח מסוים מעליית ריכוז ה־CO_2. מחקרים הוכיחו שריכוז ה־CO_2 באוויר מהווה גורם מגביל לתהליך הפוטוסינתזה וכי עלייה בריכוזו עשויה להביא לעלייה ביבול של צמחים שונים.

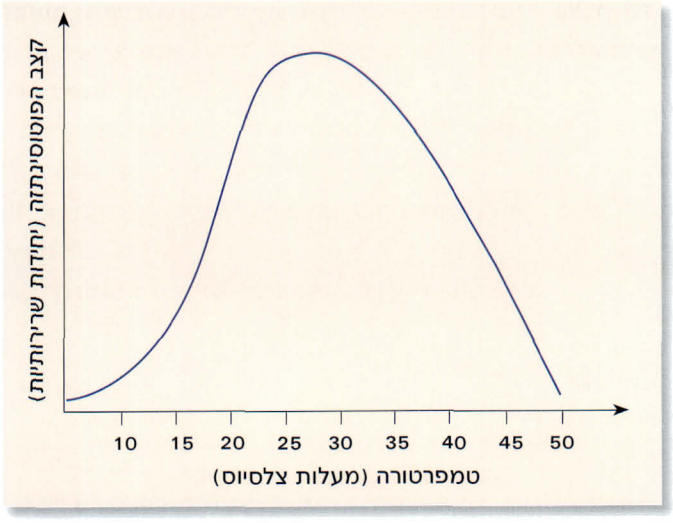


קשר לנושא

אקולוגיה:
האדם משפיע על סביבתו ומשנה אותה. גורמים אביוטיים משפיעים על הצמיחה.

3.ג השפעת הטמפרטורה על קצב הפוטוסינתזה

איור ג–23 מראה לנו שדגם ההשפעה של הטמפרטורה על קצב הפוטוסינתזה שונה מזה של עוצמת האור וריכוז ה־CO_2. בטמפרטורות גבוהות מאוד או נמוכות מאוד, קצב הפוטוסינתזה נמוך, ובין שני קוטבי הטמפרטורה יש טווח של טמפרטורה מיטבית (אופטימלית) שתלוי בסוג הצמח.



איור ג–23: השפעת הטמפרטורה על קצב הפוטוסינתזה.

קשר לנושא

התא – מבנה ופעילות: *השפעת טמפרטורה על פעילות האנזימים.*

השפעת הטמפרטורה על הפוטוסינתזה נובעת מהשפעתה על האנזימים הרבים המשתתפים בתהליך. כפי שלמדתם, טמפרטורה גבוהה מהטמפרטורה המיטבית משפיעה על המבנה המרחבי של חלבונים ולכן על תפקודם. בטמפרטורות נמוכות מהטמפרטורה המיטבית, המבנה המרחבי של האנזימים כמעט ואינו מושפע, אך קצב תנועת המולקולות הוא אִטי והסיכוי למפגש בין מולקולות האנזים והסובסטרט הוא נמוך, ולכן קצב התהליך הוא נמוך.

4.ג השפעת כמות המים בקרקע ולחות האוויר על קצב הפוטוסינתזה

כמות המים בקרקע ולחות האוויר משפיעות בעקיפין על תהליך הפוטוסינתזה.

כפי שראינו בסעיף ג2.3, תהליך הפוטוסינתזה תלוי בפתיחת הפיוניות. מאחר שפתיחת הפיוניות מושפעת ממאזן המים בצמח, ומאזן המים מושפע מכמות המים בקרקע ומלחות האוויר – גורמים אלה משפיעים בעקיפין גם על קצב הפוטוסינתזה.

כשלחות האוויר נמוכה – קצב הדיות דרך הפיוניות גבוה וכמות המים בצמח יורדת. במצב כזה הפיוניות נסגרות ותהליך הפוטוסינתזה מעוכב. ההסבר לקשר בין קצב הדיות ולחות האוויר הוא בעובדה הפיזיקלית שקצב הדיפוזיה של מים (ממשטח כלשהו) עולה ככל שקטֵן אחוז אדי המים באוויר שסביבו.

כשלחות האוויר גבוהה, קצב הדיות דרך הפיוניות נמוך באופן יחסי ומאזן המים נשאר חיובי. במצב כזה, הפיוניות נשארות פתוחות ותהליך הפוטוסינתזה נמשך.

כאשר נושבת רוח, היא מזרימה את האוויר הלח מסביבת הפיוניות ומביאה אוויר יבש יותר, קצב הדיות עולה, כמות המים בצמח יורדת, הפיוניות נסגרות וקצב הפוטוסינתזה קטן. כאשר בקרקע יש כמות גדולה של מים, הפיוניות נשארות פתוחות ותהליך הפוטוסינתזה יכול להימשך (חִזרו לאיור ג–8).

ראינו שעוצמת האור, ריכוז הפחמן הדו־חמצני, הטמפרטורה, כמות המים ולחות האוויר עשויים להיות גורמים מגבילים לביצוע תהליך הפוטוסינתזה. בהמשך נראה שגם לריכוז המינרלים בצמח יש השפעה על תהליך הפוטוסינתזה.

שאלה ג־22:

שני חקלאים, החיים באזורים שונים בארץ, זרעו בו זמנית זרעים שקנו מאותו מקור. להפתעתם הם גילו שהיה הבדל מאוד גדול בכמות היבול שהתקבל אצל כל אחד מהם. מה יכולות להיות הסיבות ליבול הנמוך של אחד החקלאים?

ג8. מעורבות האדם: הגברת תהליך הפוטוסינתזה על ידי שינוי גורמי סביבה

ישראל היא ארץ חצי־מדברית, ובחלקים ממנה היא אף מדברית. למרות נתוני פתיחה ירודים אלה, הגיעה החקלאות הישראלית ב־60 השנים מאז קום המדינה להישגים רבים: משנות החמישים לשנות האלפיים עלה יבול החיטה מ־200 ק"ג לדונם לשנה ל־800 ק"ג לדונם לשנה; יבול האבוקדו עלה מפחות מ־0.7 טון לדונם לשנה ללמעלה מ־2 טון לדונם לשנה; יבול העגבניות בשטח הפתוח עלה מ־3 טון לדונם לשנה ל־6–8 טון לדונם לשנה ויבול העגבניות בחממות מגיע ל־30 טון לדונם לשנה.

כל זה לא קורה מעצמו. מטרת החקלאות המודרנית (וישראל היא אחת המדינות המובילות בתחום), היא להגדיל את כמות היבולים ולהתאים אותם לצורכי השוק. החקלאות המודרנית מבוססת הן על עקרונות ומחקרים מדעיים והן על ידע שהצטבר מניסיונם של החקלאים.

קשר לנושא

אקולוגיה:
החקלאות היא סוג של מעורבות האדם בטבע.

אחד מהעקרונות המאפשרים לחקלאים להגדיל את היבול מכל יחידת שטח הוא הקטנת השפעתם של גורמים המגבילים את קצב הפוטוסינתזה על ידי יצירת תנאים מיטביים לביצועה.
אחת הדוגמאות לכך היא גידול ירקות ופרחים **בבתי צמיחה** המוכרים בשפת היום־יום בשם חממות.

מה היתרון בגידול בבתי צמיחה?!

בשדה הפתוח יכולותיהם של החקלאים להשפיע על הגורמים הסביבתיים המשפיעים על היבול היא מוגבלת. לעומת זאת, גידול בבתי צמיחה סגורים ושקופים מאפשר לחקלאים שליטה ובקרה על הגורמים האביוטיים המשפיעים על הצמיחה, כמו טמפרטורה, לחות האוויר, מספר שעות האור, ריכוז ה־CO_2 בחממה, כמות המים והמינרלים במצע הגידול. הבקרה על הגורמים הללו מאפשרת לחקלאים לא רק להגדיל את כמות היבול בבתי הצמיחה וטיבו, אלא גם לכוון את מחזור החיים של הצמח ובכלל זה את זמן ההבשלה של היבול. שליטה זו מאפשרת לחקלאים לשווק תוצרת טרייה של ירקות, פירות ופרחים בעונות שבהן הביקוש גבוה, גם כשמדובר בעונות הלא טבעיות של הגידול.



שאלה ג-23:

א. מהן המגבלות של גידול בבתי צמיחה לעומת גידול בשדה הפתוח?

ב. אלו סוגי צמחים לא יתאימו לגידול בבתי צמיחה? הסבירו תשובתכם.



ההשפעה על הגורמים המגבילים את קצב הפוטוסינתזה נעשית לא רק באמצעות גידול בבתי צמיחה, אלא גם בטיפולים שונים בשטחים הפתוחים.
לדוגמה: בפרדסים מתעוררת לעתים בעיה – דווקא כשעצי ההדר מגיעים לשלב שבו היבול צפוי להיות מרבי, הוא נמוך בהרבה מהמצופה. נמצא שהסיבה לכך היא צפיפות רבה של ענפים ועלים אשר מונעת מעבר אור.

הפתרון שנוקטים החקלאים הוא גיזום וחיתוך של ענפים כך שכמות גדולה יותר של אור תוכל לחדור לענפים הפנימיים של העץ. לאחר ביצוע פעולות אלה, עולה שוב כמות היבול.

כפי שלמדתם, צמחים זקוקים לכמות גדולה של מים לגידולם. החקלאים מנסים לייעל את אספקת המים הן על ידי השקיה בשיטות שונות – תעלות, ממטרות ומערכות טפטוף, והן על ידי חיפוי הקרקע להקטנת ההתאדות ממנה.

כפי שתלמדו בסעיף הבא, צמחים זקוקים לגידולם התקין גם למינרלים. מכיוון שבקרקעות חקלאיות המלאי הטבעי של היסודות המינרליים אינו מספיק, החקלאים מספקים לצמחים תוספת של מינרלים חיוניים.

שאלה ג-24:

לעתים היעד של החקלאים בהכוונת התערבויותיהם שונה מהצרכים הטבעיים של הצמח. הביאו שתי דוגמאות להיגד זה.

ג9. הזנה מינרלית וחיוניותה להתפתחות הצמח ולקיום הפוטוסינתזה

לביצוע תהליך הפוטוסינתזה, לגדילה ולתפקוד תקין הצמח זקוק בנוסף למים, ל-CO_2 ולאור גם למינרלים. לקליטת המינרלים מהקרקע והטמעתם בחומרים האורגניים בצמח קוראים **הזנה מינרלית**.

קיימים 13 יסודות מינרליים החיוניים להתפתחות הצמח. בלעדיהם הצמח לא יוכל להשלים את מחזור חייו, שכן הוא לא יוכל לבנות חומרים אורגניים נוספים מהשלד הפחמני שנוצר בתהליך הפוטוסינתזה ולא יוכל להפעיל תהליכים שונים.

לבניית החלבונים, למשל, דרוש לצמח חנקן; לבניית מולקולות הכלורופיל דרוש מגנזיום; לחיזוק דופנות התאים ולתהליכים בתא דרוש סידן. אשלגן וכלור דרושים לצמח להפעלת מערכות אנזימטיות בתהליך הפוטוסינתזה ולקיום הריכוז האוסמוטי התקין בצמח. היסודות הנחוצים בכמויות גדולות יחסית נקראים "מקרומינרלים" והיסודות הנחוצים בכמויות קטנות נקראים "מיקרומינרלים" או "יסודות קורט".

בשל חשיבותם הרבה של המינרלים ומשמעותם בחקלאות, נערכו מחקרים רבים על תרומתו של כל מינרל, על הנזק הנגרם לצמח בחסרונו, על הכמויות הדרושות מהם ועל העיתוי והדרך שבה מספקים אותם.

אחת הדרכים לאבחן מחסור במינרלים היא מראה הצמח. שני **סימני מחסור** נפוצים הם **כלורוזה וכתמים נקרוטיים**. הכלורוזה היא הצהבת עלים הנובעת מפגיעה ביכולת ייצור הכלורופיל, והיא מהווה סימן מחסור לכמה יסודות מינרליים. שימו לב! פגיעה בייצור הכלורופיל פוגעת ישירות בתהליך הפוטוסינתזה. כתמים נקרוטיים הם אזורים שבהם מתחיל הרס רקמות (נקרוזה), והופעתם מהווה סימן מחסור אופייני לכמה יסודות מינרליים.





איור ג–24: מימין: כלורוזה ונקרוזה בעלים של תות שדה כתוצאה ממחסור בברזל.
משמאל: עלה של תות שדה ללא סימני מחסור.

דרך נוספת שבאמצעותה ניתן לדעת אם חסרים מינרלים ואלו מינרלים חסרים, היא בדיקה כימית של מדגם עלים וקביעת ריכוז המינרלים בהם. בהתאם לתוצאות האבחון ניתן להשלים את המינרל החסר.

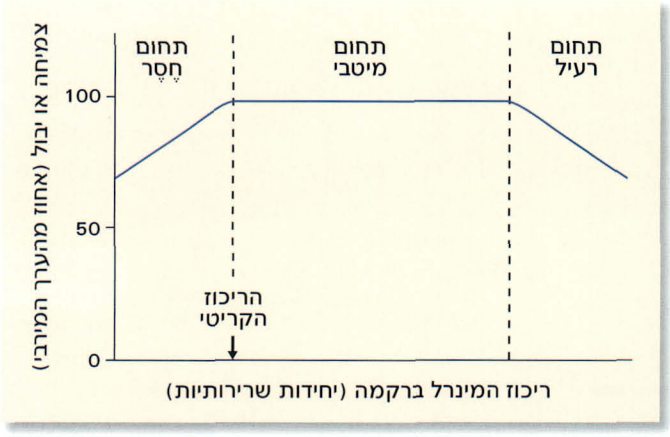
על המינרלים הדרושים לצמח, על חשיבותם ועל סימני המחסור בהם תוכלו ללמוד מטבלה ג–4. יש לדעת שברוב המקרים היסודות המינרליים נמצאים בקרקע כתרכובות, למשל החנקן נמצא בקרקע בעיקר כניטרט (NO_3^-).

טבלה ג-4: הפעילות של היסודות המינרליים החיוניים בצמח וסימני המחסור שלהם

היסוד המינרלי	תפקוד בצמח	סימני המחסור
מקרומינרלים - יסודות הדרושים בכמות גדולה יחסית		
תנקן (N)	מרכיב בחומצות אמיניות, בחלבונים, בנוקלאוטידים, בחומצות גרעין, בכלורופיל, ב־ATP, בהורמונים ובקואנזימים.	כלורוזה: במקרים חמורים העלים מצהיבים לגמרי, אחר כך הם משחימים ולבסוף מתים; לעתים, מצטברים על העלים פיגמנטים סגולים; הצמח אינו גדל, יש מעט עלים והם קטנים.
אשלגן (K)	מעורב בשמירה על פוטנציאל אוסמוטי תקין ועל מאזן יוני, וכן מעורב בבקרה על פתיחת הפיוניות וסגירתן; מפעיל אנזימים רבים.	כלורוזה; כתמים נקרוטיים בעיקר בשולי העלים; הגבעולים דקים וחלשים.
סידן (Ca)	מרכיב בדופנות תאים; דרוש לפעולת אנזימים; מעורב בבקרת תפקודי קרומים ואנזימים.	קדקודי נצר ושורשים מתים; עלים צעירים מתכופפים ולאחר מכן מתחילה תמותה של העלים מהשוליים שלהם; הצמח אינו גדל; במקרים רבים הפירות נפגעים.
מגנזיום (Mg)	מרכיב במולקולת הכלורופיל; מפעיל אנזימים רבים.	כלורוזה בעלים שמתחילה בין העורקים; לעתים, מופיעה התאדמות ויש כתמים נקרוטיים; שולי העלה מתקפלים כלפי מעלה; הגבעולים נעשים דקים.
גופרית (S)	מרכיב בחומצות אמיניות מסוימות, בחלבונים ובקואנזימים.	כלורוזה.
זרחן (P)	מרכיב במולקולות ATP ו־ADP, בחומצות גרעין, בקואנזימים ובשומנים (פוספוליפידים).	כלורוזה וכתמים נקרוטיים מופיעים בעלים; לעתים, צבע העלים משתנה לכחלחל, בעיקר, בצד התחתון של העלה; הצמח אינו גדל; העלים הבוגרים נעשים חומים כהים ולאחר מכן - מתים.
מיקרומינרלים - יסודות הדרושים בכמות קטנה יחסית		
כלור (Cl)	מעורב בשמירה על פוטנציאל אוסמוטי תקין ועל מאזן יוני; מעורב, כנראה, בתהליך שחרור החמצן בפוטוסינתזה.	כלורוזה וכתמים נקרוטיים מופיעים בעלים הבוגרים והם נובלים; לעלים יש צבע ברונזה (צבע צהוב־אפור מתכתי); חל עיכוב בהתארכות השורשים ונוצרת התעבות בקצותיהם.
ברזל (Fe)	דרוש ליצירת כלורופיל; מרכיב בנשאי אלקטרונים בפוטוסינתזה ובנשימה התאית.	מופיעה כלורוזה בין העורקים בעלים צעירים; לאחר שהעלה כולו מצהיב מופיעה נקרוזה; העורקים הראשיים ירוקים; צבענים (פיגמנטים) סגולים מצטברים בעלים; הגבעולים נעשים קצרים ודקים.
מנגן (Mn)	מפעיל אנזימים מסוימים; נחוץ לשלמות קרומי הכלורופלסט ולשחרור חמצן בפוטוסינתזה.	מופיעה כלורוזה בין העורקים בעלים צעירים, ומופיעים כתמים נקרוטיים.
בור (B)	משפיע על ניצול סידן, על יצירת חומצות גרעין ועל שלמות קרומים בתא.	התארכות השורשים נעצרת; העלים הצעירים ירוקים בהירים בבסיסם; במחסור חמור - העלים הצעירים מתעוותים, משחימים ומתים; ניצנים, פרחים ופירות צעירים נושרים.
אבץ (Zn)	מרכיב או מפעיל של אנזימים רבים; דרוש ליצירת הורמונים מסוימים.	פרקי הגבעול מתקצרים ושטח העלים קטן; שולי העלים מתעוותים; מופיעה כלורוזה בין העורקים.
נחושת (Cu)	מרכיב או מפעיל של אנזימים רבים, המעורבים בתהליכי חמצון־חיזור.	העלים הצעירים ירוקים כהים ומעוותים; מופיעים כתמים נקרוטיים; ניצנים קדקודיים מתים.
מוליבדן (Mo)	נחוץ למטבוליזם של החנקן.	כלורוזה בין העורקים ונקרוזה.

1.ג השפעת המינרלים על תפקוד הצמח

מטבלה ג–4 יכולנו ללמוד לא רק על חשיבות המינרלים אלא גם על העובדה שמחסור במינרל כלשהו עלול לפגוע בהתפתחות הצמח וביכולתו לייצר חומרים אורגניים בתהליך הפוטוסינתזה. עלינו לזכור שכאשר מדובר בגידולים חקלאיים, פגיעה שכזו היא למעשה פגיעה ברמת היבול ובאיכותו. איור ג–25 מתאר קשר כללי בין ריכוזו של מינרל כלשהו ברקמות הצמח לבין קצב הצמיחה של הצמח.



איור ג–25: קשר כללי בין ריכוז מינרל כלשהו בצמח לבין קצב הצמיחה שלו.

האיור מראה לנו שבריכוזים הנמוכים, ככל שריכוז המינרל ברקמות הצמח עולה, עד לריכוז מסוים (הריכוז הקריטי), גם קצב הצמיחה שלו עולה. בתחום זה, המכונה תחום החסר, המינרל מהווה גורם המגביל את קצב הצמיחה.

מעבר לריכוז הקריטי, עלייה בריכוז המינרל ברקמות הצמח אינה מביאה לעלייה בקצב הצמיחה. חלק זה של העקום מכונה התחום המיטבי. סביר להניח שבתחום זה קיים גורם אחר המגביל את הצמיחה.

כשריכוז המינרל ברקמה עולה מעבר לתחום המיטבי, קצב הצמיחה קטן בשל רעילותו של המינרל – התחום הרעיל. אפשר לומר שגם בתחום ריכוזים זה ריכוז המינרל מהווה גורם מגביל.

מחסור במינרלים בצמח יכול לנבוע ממיעוט של מינרלים בקרקע, או מתנאים מסוימים בקרקע שפוגעים בקליטת המינרלים על ידי הצמח. קרקעות שנשטפות בתדירות גבוהה הן לרוב עניות במינרלים. בקרקעות גירניות שבהן ה־pH גבוה (סביבה בסיסית), חל עיכוב בקליטת ברזל וניתן לראות סימני מחסור כמו כלורוזה גם אם הקרקע עשירה בברזל. גם אוורור לא תקין של הקרקע גורם בעיות בהזנה המינרלית של הצמח.

אשנב למחקר

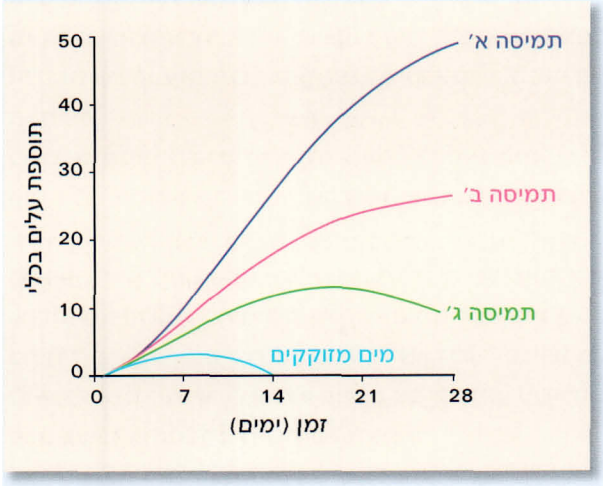
הצמח עדשת מים הוא צמח הגדל במקווי מים מתוקים, עליו צפים על גבי המים ושורשיו טבולים במים. הצמח מתרבה במהירות רבה ויכול להכפיל את הביומסה שלו בתוך ימים ספורים תוך כדי ניתוק ניצנים מצמח האם.

גדילתו של צמח זה נבדקה במספר מצעי מים הנבדלים זה מזה במינרלים שהם מכילים. במסגרת הניסוי חילקו החוקרים 80 צמחים צעירים של עדשת מים לארבע קבוצות שגודלו בארבעה כלים כמפורט בטבלה ג-5. המדד לגדילה בצמחי עדשת המים היה מספר העלים שהתפתחו במשך 4 שבועות הניסוי.

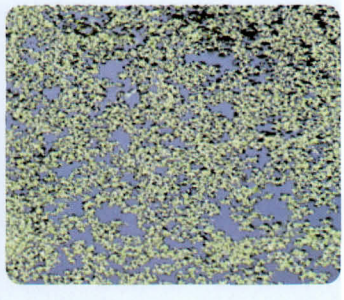
טבלה ג-5: ריכוז המינרלים במצעי הגידול השונים בניסוי

מספר סידורי	מצע הגידול	ריכוז מינרלים (מ"ג לליטר)					
		חנקן (N)	זרחן (P)	אשלגן (K)	סידן (Ca)	גופרית (S)	מגנזיום (Mg)
1	מים מזוקקים	0	0	0	0	0	0
2	תמיסה א	1000	300	400	800	200	200
3	תמיסה ב	4	0	1	78	10	24
4	תמיסה ג	4	0	3	467	1129	84

איור ג-26 מתאר את תוצאות הניסוי:







איור ג-26: מספר העלים שנוספו לצמחי עדשת המים בתמיסות גידול עם תכולת מינרלים שונה.
בתמונות הקטנות: ברֵכת גידול עם צמחי עדשת מים וצמח יחיד של עדשת מים.

שאלה ג-25:

א. מה הייתה מטרת הניסוי?

ב. מה היה המדד לגידול עדשת המים ומדוע השתמשו דווקא במדד זה?

ג. תארו את תוצאות הניסוי, התייחסו בפירוט לצמיחה בכל אחת מהתמסות.

ד. כמה עלים נוספו לצמחי עדשת המים בכל אחד מהטיפולים השונים, 14 יום לאחר תחילת הניסוי?

ה. איזה מינרל קיים בתמיסה א וחסר בכל התמיסות האחרות? מהם תפקודיו של מינרל זה בצמח?

ו. האם ייתכן שמחסור במינרל שציינתם בסעיף ה, הוא הגורם המגביל את הגדילה של צמחי עדשת המים בתמיסות האחרות? תכננו ניסוי שיענה על שאלה זאת.

ז. במים מזוקקים אין מינרלים כלל. הסבירו את גדילת צמחי עדשת המים בשבעת הימים הראשונים של הניסוי והסבירו מה קרה לצמחים אלו בשבעת ימי הניסוי הנוספים.

ח. מה צפויות להיות תוצאות הניסוי אם צמחי עדשת המים היו גדלים במי גשם?

ג2.9 הזנת הצמח בחקלאות - זיבול ודישון

מדוע חייבים החקלאים לחדש את המינרלים בחלקותיהם בכל עונת גידול, בעוד שביערות העד ובשדות הבור יש צמיחה רבה גם ללא תוספת מינרלים?!

קשר לנושא

אקולוגיה:
מִפְרָקים, מחזור החנקן, שרשרת מזון.

בטבע מסיימים הצמחים את מחזור חייהם, נרקבים ומתפרקים. בתהליך פירוק הצמחים על ידי המפרקים, המינרלים המצויים בהם משתחררים אל הקרקע, וכך נשמר מאגר המינרלים בקרקע תוך כדי מִחזורו.

בשדות חקלאיים הצמחים קולטים, ככל הצמחים, את המינרלים מהקרקע. אך בניגוד לצמחים בטבע, היבול החקלאי נקצר ונאסף כמעט ללא מִחזור של המינרלים. כתוצאה מכך, הקרקע של השדה החקלאי נותרת דלה ביסודות מינרליים. לכן על החקלאי למלא את המאגר באופן יזום בכל עונת גידול. יתר על כן, קצב הצמיחה בשדה החקלאי גדול בהרבה מזה שבשדות הבור או ביערות העד, ולכן גם צריכת המינרלים בשדות החקלאיים גבוהה יותר.



הדרך המקובלת והנפוצה לשיפור ההזנה המינרלית של גידולים חקלאיים היא הוספת **דשן כימי** לקרקע. הדשן מכיל מלחים שונים בצורה מרוכזת ומסיסה. שלושת היסודות העיקריים המוספים לקרקע בצורת דשן הם: **אשלגן (K), זרחן (P) וחנקן (N)**. במקרים של חסר באחד המינרלים ניתן להוסיף אותו באמצעות ריסוס על חלקי הצמח (כמו עלים, גבעולים).

ניתן להעשיר את הקרקע במינרלים גם באמצעות **זבל אורגני**, שהוא תערובת שמקורה בהפרשות של בעלי חיים ובשאריות צמחים.

שימו לב! למרות הכינוי שלו, זבל אורגני אינו מקור לחומרים אורגניים לצמח, אלא הוא מקור למינרלים לצמח! פירוק התרכובות האורגניות על ידי מפרקים בקרקע משחרר את המינרלים לקרקע והופך את המינרלים זמינים לצמח.

לכל אחת משתי הדרכים לשיפור ההזנה המינרלית – זיבול או דישון, יתרונות וחסרונות.
בטבלה ג-6 מובאת השוואה בין זיבול ודישון.

טבלה ג–6: השוואה בין שתי שיטות לשיפור ההזנה המינרלית

	דישון	זיבול
אמצעי	דשן כימי	זבל אורגני
מקור	מלחים או תרכובות אי־אורגאניות אחרות שנוצרים באופן מלאכותי בתעשייה הכימית.	תרכובות אורגניות שמקורן בשרידים ובהפרשות מהחי, כמו זבל בקר, לשלשת עופות, או שאריות צמחים; פסולת אורגנית כקומפוסט.
מאפיין עיקרי	תערובת המספקת לצמח יסודות מינרליים חיוניים במצב מסיס וקליט.	חלק מהמינרלים מצויים במצב זמין וחלק מהווים חלק מתרכובות אורגניות. לכן הם בלתי זמינים בטווח המידי והם משוחררים לקרקע לאחר זמן רב יחסית.
יתרונות	• חומרי ההזנה מסיסים וזמינים מידית לצמח, לכן ההשפעה על הצמיחה מהירה. • מחירו נמוך מזה של זבל אורגני. • קיימת שליטה מלאה של היצרן על התכולה של כל מינרל.	• שחרור הדרגתי של מינרלים לקרקע ומניעת שטיפתם. • משפר את מרקם הקרקע המתבטא באחיזת מים טובה יותר ובאוורור טוב של הקרקע. • מהווה פתרון סביבתי למִחזור של חומרי פסולת אורגניים. • מאפשר פעילות של מיקרואורגניזמים ידידותיים בקרקע.
חסרונות	• עודפי מינרלים עלולים לגרום ל**זיהום הקרקע** שמתבטא, במקרה זה, בשינוי רמת המליחות והחומציות שלה. שינויים אלה עלולים לפגוע בכמות היבול ובערכו התזונתי. • מינרלים עודפים נשטפים על ידי מי הגשמים ומי ההשקיה, ועלולים להגיע למקורות מים ולזהם אותם. מינרלים אלה עלולים לגרום נזקים בריאותיים בעיקר לתינוקות וכן לפגיעה אקולוגית בנהרות ואגמים.	• קשה לשלוט בתכולת המינרלים היות והיא תלויה במקור החומר האורגני. • ריכוז מינרלים נמוך יחסית לדשן הכימי, ולכן נדרשת כמות גדולה יותר של זבל כדי לספק את כמות המינרלים הרצויה. • בגלל השחרור האטי, זמינות המינרלים לצמח אינה מידית ולעתים לא מספיקה לגידול חקלאי בקצב הנדרש. • שימוש ארוך טווח בזבל אורגני לא מטופל עלול לגרום להצטברות מתכות כבדות בקרקע ולפגיעה בצמחים ובמיקרואורגניזמים. • עשוי להכיל זרעים של עשבי בר, שעשויים לנבוט ולהוות תחרות לגידול החקלאי.

מִחזור פסולת אורגנית

מִחזור פסולת אורגנית והפנייתה לשימושים חקלאיים מהווה פתרון מועדף הן מבחינה כלכלית והן מבחינה סביבתית. החקלאים מסתייעים בפסולת להגברת הייצור החקלאי ובמקביל נחסכות הוצאות של פינוי וטיפול בפסולת, כולל חיסכון בדלק, ונמנע מטרד סביבתי. במילים אחרות – המטרד הופך למשאב.



קומפוסטר

אחת האפשרויות למִחזור פסולת אורגנית היא הפיכתה לקומפוסט. **קומפוסט** הוא זבל אורגני שנוצר בתהליכים של רקב ופירוק של חומר אורגני. פירוק הפסולת נעשה בעזרת שלשולים, חרקים, פיטריות וחיידקים, המפרקים אותה לחומרים אורגניים פשוטים יותר ולמינרלים. הזמן הדרוש ליצירת הקומפוסט תלוי בגורמים כמו: טמפרטורת הסביבה, לחות ומידת האוורור. לרוב נמשך התהליך מספר שבועות, ובסופו נפח ערֵמת הפסולת קטן למחצית. חיידקים גורמי מחלות וזרעים מושמדים עקב עליית הטמפרטורה. מתקבלת תערובת חומה, בעלת מרקם ומראה דומים לאלה של קרקע אווירית. להכנת הקומפוסט אפשר לנצל את כל סוגי הפסולת האורגנית, ובכללן שאריות של חומר צמחי, כמו פסולת חקלאית, פסולת עירונית וגזם, הפרשות בעלי חיים וכן בוצות ממכוני טיהור שפכים, שהם החומר האורגני המוצק השוקע באגני הטיהור. איכות הקומפוסט תלויה בין היתר במרכיביו וביחסים ביניהם.

דוגמה נוספת למִחזור מוצלח של פסולת אורגנית היא שימוש ב**לשלשת עופות** (המכילה אחוז גבוה של תרכובות חנקניות) לצורכי חקלאות: דישון קרקע והאכלת מעלי גירה. מִחזור זה רווח בימינו, אך ההכרה בחשיבות השימוש בלשלשת עופות לצורכי חקלאות אינה חדשה, כפי שמעיד הסיפור הבא.

על קצה המזלג...

על לשלשת עופות, מלחמות והסכמים

באמצע המאה ה־19 התחוללה מלחמה עקובה מדם בין פרו ובוליביה לבין צ׳ילה. המלחמה פרצה בגלל חומר המכונה גואנו, חומר המורכב בעיקר מלשלשת עופות ים וכן מצואת עטלפים וכלבי ים. השימוש בגואנו היה נהוג במשך מאות שנים בקרב ילידי אמריקה הלטינית לדישון קרקע חקלאית. הגואנו הוא הדשן הטבעי היעיל ביותר, אחוז החנקן שבו הוא פי 33 מאשר בזבל בהמות רגיל והוא עשיר בזרחן ובמינרלים רבים אחרים. מקורו של הגואנו האיכותי ביותר היה באיים סמוכים לחופי פרו. בגלל מיעוט הגשמים באזור נשמרו המינרלים ולא אבדו כתוצאה מחלחול או התאדות.

במאה ה־18 הכירו גם האירופאים בערכו של הגואנו לחקלאות, ומאז ועד לפיתוח הדשן המלאכותי במאה ה־20, הוא היווה סחורה מבוקשת. הביקוש לחומר זה היה כל כך רב, עד שהיה צורך בהסכם מיוחד להסדרת הכרייה והסחר בו. כיום התחדשה הדרישה לגואנו בשל השימוש בו כמקור דשן בחקלאות אורגנית.

שאלה ג–26:

לו אתם חקלאים, האם הייתם בוחרים להשתמש בדשן כימי או בזבל אורגני? כתבו טיעון עם 3 נימוקים להצדקת הבחירה.

שאלה ג–27:

מומלץ לזבל בזבל אורגני לפני השתילה או הזריעה ולא תוך כדי הגידול. הסבירו את הבסיס הביולוגי להמלצה זו.

שאלה ג–28:

מדוע צריך לשנות את הכמות וההרכב של הדשן המוסף לקרקע במשך עונת הגידולים החקלאיים?

שאלה ג–29:

אלו השלכות על המערכת האקולוגית צפויות מהוספת דשן בשדות חקלאיים?

שאלה ג–30:

מדוע יש להקפיד על מרווחים נאותים בעת זריעה או שתילה של גידולים חקלאיים?

שאלה ג–31:

המינרלים אשלגן, זרחן, וחנקן משמשים כדשן נפוץ. מה חשיבותו של כל אחד מהמינרלים האלה? תוכלו להיעזר בטבלה ג–4.

חקלאות אורגנית

בשנים האחרונות, עם עליית המודעות לשמירה על הסביבה, מצד אחד, ולנזקים הבריאותיים מחומרים המשמשים לדישון ולהדברה, מצד שני, גוברת הדרישה למוצרי חקלאות אורגנית.

חקלאות אורגנית היא שיטת ייצור לקבלת יבול מן החי ומן הצומח תוך צמצום השימוש בחומרים שעלולים לפגוע בסביבה. טבלה ג–7 מציגה כמה הבדלים עקרוניים בין החקלאות המודרנית ה"רגילה" לבין החקלאות האורגנית.

טבלה ג–7: השוואה בין מאפייני חקלאות אורגנית וחקלאות רגילה

	חקלאות "רגילה"	חקלאות אורגנית
אספקת מינרלים	שימוש בדשן כימי	• שימוש בזבל אורגני. • רוטציה: הגידולים מוחלפים בכל שנה. למשל גידולי קטניות ה"תורמים" חנקן לקרקע יוחלפו בלא־קטניות שייהנו מההעשרה בחנקן.
בקרת מזיקים	הדברה כימית	• הדברה ביולוגית – שימוש בבעלי חיים (למשל חרקים ועופות) כדי לנטרל מזיקים; רוטציה בגידולים שאינה מאפשרת למזיקים של גידול מסוים להתבסס בשטח למשך כמה עונות גידול.
מלחמה בעשבים	הדברה כימית	• עישוב ידני. • רוטציה בגידולים לדיכוי עשבים שוטים: למשל צמחים כמו תלתן ואספסת המסוגלים לדחוק עשבים פולשניים יוחלפו בגידולים הסובלים מעשבים פולשניים כמו מלון, עגבנייה. • חיפוי ערוגות – כיסוי הקרקע בחומרים ממקור צמחי (עלים, פיסות עץ, אצטרובלים) או אבנים. החיפוי שומר על לחות הקרקע ומצמצם צמיחת עשבים.
גידול חיות משק	• שימוש בתרופות ובאנטיביוטיקה. • שימוש בהורמונים להעלאת התפוקה והילודה. • מזון מרוכז ומעובד.	• שיטות למניעת מחלות המבוססות על תנאי גידול הולמים, כמו צפיפות ראויה. • הימנעות משימוש באמצעים מלאכותיים להגברת הילודה או רמת התפוקה. • מזון מן הטבע וגישה לשטחי מרעה.

על מושגים

השימוש במושג "אורגני"

בפרק זה מוזכרים המונחים **זבל אורגני** ו**חקלאות אורגנית**, ובפרסומים שונים מדובר גם על **ירקות ופירות אורגניים**.

המונחים **חומר אורגני** וזבל אורגני מבוססים על הקשר הישיר שלהם לאורגניזם החי. המונח חומר אורגני נובע מהעובדה שהיווצרות חומרים אלו בטבע תלויה בפעילות של אורגניזמים חיים. על הקשר בין זבל אורגני לאורגניזמים חיים למדתם בסעיף זה. השימוש במילה 'אורגני' במונחים "חקלאות אורגנית" ו"מזון אורגני" הוא שימוש מושאל, שמטרתו לשדר קשר לתהליכים טבעיים, עם מינימום מעורבות של האדם.

דילמה

חקלאות אורגנית או חקלאות "רגילה"

בד בבד עם הביקוש הגובר למוצרים אורגניים, קמו לחקלאות האורגנית מתנגדים רבים. הטיעון העיקרי של המתנגדים הוא שכמות היבול ביחס למשאבים נתונים קטנה בחקלאות

האורגנית יחסית לחקלאות ה"רגילה". לכן, אם כולם יעברו לחקלאות אורגנית לא יהיה די מזון להאכיל את כל אוכלוסיית העולם.

כל דילמה היא למעשה ויכוח המבוסס על התנגשות בין ערכים, ואכן גם תומכי החקלאות האורגנית וגם מתנגדיה מעלים טיעונים ערכיים כבדי משקל.

שאלה ג-32:

חקלאות אורגנית בהיקף נרחב – בעד או נגד?

לצורך הדיון בשאלה התחלקו לקבוצות של "מומחים", שיחפשו מידע ברשת האינטרנט על **חקלאות אורגנית** מנקודת הראות המקצועית שלהם:

- אנשי איכות הסביבה – השפעה על הסביבה.
- חקלאים – עלויות, השפעה על פוריות קרקע.
- אנשי רווחה – כמות התוצרת ועלותה.
- רופאים ותזונאים – השפעה כוללת על בריאות האדם.

א. התבססו על המידע שמצאתם ונסחו את טיעוני המומחים.

ב. הביעו את עמדתכם המנומקת בסוגיה זו בצורת טיעון.

ג. "דילמה" נחשבת להתנגשות בין ערכים. הגדירו לפחות 2 ערכים המתנגשים בדילמה זו.

ג.10 קליטת מים ומינרלים על ידי שורשי הצמח

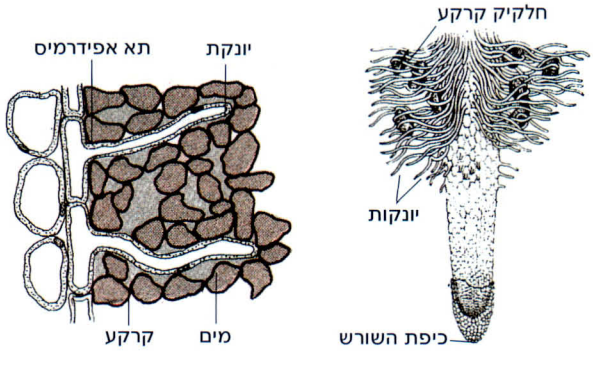
המים והמינרלים המומסים בהם אינם מפוזרים בקרקע בצורה אחידה: לעתים הם נמצאים רק בעומק הקרקע ולעתים בשכבות העליונות של הקרקע. הצמח "צריך לאסוף" את המים והמינרלים באשר הם. מערכת השורשים של הצמח היא האיבר דרכו קולט הצמח מים ומינרלים.

ג1.10 התאמת מערכת השורשים לקליטה מֵרבית של מים ומינרלים

יעילות פעולתה של מערכת השורשים מותנית בראש וראשונה במידת התפשטותה בקרקע ובמידת יעילות הקליטה של השורשים הבודדים. ככל ששטח הפנים של מערכת השורשים גדול יותר, קליטת המים והמינרלים רבה יותר.

עיקר קליטת המים והמינרלים מהקרקע נעשית בחלקים הצעירים שבקצות השורשים, שם מצויים תאים בעלי מבנים מיוחדים המכונים **יונקות** (איור ג-27). היונקות הן בליטות מוארכות של תאי האפידרמיס בשורש וצורתן כשערות דקיקות. מספרן בקצה כל שורש הוא גדול מאוד, וכאשר מדובר במערכת השורשים כולה, מספר היונקות עשוי להגיע למאות אלפים ואף יותר. היונקות הרבות מגדילות את שטח המגע עם מי הקרקע ובכך מגדילות מאוד את יכולת קליטת המים והמינרלים על ידי השורש. בהזדמנות זאת נזכיר שדרך היונקות מתבצעים גם חילופי הגזים בין השורש לבין סביבתו.

כיוון שעיקר קליטת המים נעשית קרוב לקצה השורש, ככל שהסתעפות מערכת השורשים גדולה יותר, גדֵל גם אזור הקליטה.



איור ג-27: איור סכמטי של יונקות השורש. **מימין:** קצה השורש עם היונקות. **משמאל:** מגע היונקות עם המים שבקרקע.

גם לאופן הפריסה של הסתעפויות השורש בקרקע יש השפעה על יעילות הקליטה. שורשים עמוקים הם יתרון חשוב כשהמים והמינרלים המומסים בהם מצויים בעומק הקרקע, בעוד שמערכת שורשים מסועפת הקרובה לפני השטח מקנה יתרון באזורים שבהם יש מים רבים בשכבות העליונות של הקרקע לפרקי זמן קצרים (שיטפונות במדבר למשל).
סיעוף מערכת השורשים ופריסתם בקרקע קשורים לגורמים תורשתיים ולגורמי סביבה כמו פיזור המים וריכוזי המינרלים בקרקע. כאשר בקרקע או בתמיסת הגידול יש מחסור ביסוד מינרלי חיוני, מתפתחת מערכת שורשים ענפה המאפשרת לשורשים "לאסוף" את הכמות הדרושה לצמח. לדוגמה, בצמח הגדל בסביבה דלה בחנקן, מערכת השורשים יכולה להגיע, במקרים קיצוניים, עד ל־90% מהמסה של הצמח כולו, לעומת כ־5% מן המסה של אותו מין צמח בסביבה עשירה בחנקן.

רעיון מרכזי

התאמה בין מבנה לתפקוד:
מבנה השורש מותאם לקליטה מרבית של מים ומינרלים.

2.10ג קליטת המים והמינרלים מהקרקע

יונקות השורש חודרות אל החללים הקטנטנים שבין גרגרי הקרקע ויונקות מהם את המים והמינרלים המומסים בהם. **קליטת מינרלים** על ידי הצמח מהקרקע נעשית במקביל לקליטת המים היות ורוב־רובם של המינרלים נמצאים בקרקע כאשר הם בצורת יונים מומסים במים שבקרקע. עיקר המים והמינרלים חודרים לשורש דרך הקרומים של תאי היונקות. המים והמינרלים נעים לרוחב השורש עד לצינורות העצה.

קליטת המים מהקרקע והמעבר הרוחבי עד לצינורות העצה נעשים באמצעות **אוסמוזה** בהתאם למפל הריכוזים.
קליטת המינרלים היא תהליך מורכב יותר. רוב המינרלים עוברים לתוך תאי היונקות **בקליטה סבילה (פסיבית)**, בהתאם למפל הריכוזים שלהם בין שני צדי קרום היונקות, ללא צורך בהשקעת אנרגיה מצד הצמח. יש יסודות מינרליים שהריכוז שלהם בצמח גבוה בהרבה מריכוזם בקרקע והם נכנסים לצמח באמצעות **קליטה פעילה (אקטיבית)** בניגוד למפל הריכוזים שלהם, תוך כדי השקעת אנרגיה. ההעברה הפעילה נעשית באמצעות "משאבות" ייחודיות למינרלים מסוימים, ולפעולתן נחוצות מולקולות ATP שהן תוצר של הנשימה התאית.
יש גם יסודות מינרליים שריכוזם בצמח נמוך בהרבה מריכוזם בקרקע. יסודות אלו נכנסים בדיפוזיה ומוּצָאִים באופן פעיל על ידי משאבות.
תכונת הברירנות, מאפשרת לצמח לשמור על סביבה פנימית תוך־תאית שונה מהסביבה החיצונית והיא חיונית להתפתחותו התקינה.
בקרקע מוצפת, מחסור בחמצן לשורשים עלול להוביל לפגיעה בייצור ATP בנשימה התאית האווירנית. הפגיעה תתבטא בין היתר בנזק לפעילות המשאבות, ועקב כך לפגיעה ביכולתו של הצמח לשמור על סביבה פנימית שונה מהחיצונית.

קשר לנושא

התא - מבנה ופעילות:
קליטת חומרים דרך קרומים.

ריכוז המומסים בתמיסה שבתאי יונקות השורש ובצינורות ההובלה שבמרכז השורש, משפיע על כניסת המים: ככל שריכוז המומסים בהם גבוה ייכנסו יותר מים והלחץ הנוצר בצינורות ההובלה יגרום להעלאתם אל החלקים העל־קרקעיים של הצמח.

גורם נוסף המשפיע על קצב קליטת המים והעלאתם לחלקים הגבוהים של הצמח הוא תהליך **הדיות**, ה"מושך" את המים כעמוד רציף בצינורות העצה הנמשכים מיונקות השורש ועד לעלים. עמוד המים נוצר בצינורות העצה הודות לכוחות משיכה בין מולקולות המים, והודות לכוחות משיכה בין המים לצינורות העצה. כאשר קצב הדיות מהיר, העלים מאבדים מים וכתוצאה מכך יותר מים נשאבים מהשורש אל החלקים העל־קרקעיים.

נוסף לקליטת מינרלים מתמיסת הקרקע, צמחים קולטים מינרלים גם בדרכים אחרות. אחת הדרכים היא באמצעות פטריות (מיקוריזה) או באמצעות חיידקים קושרי חנקן (ריזוביום), החיים על פני השורשים ביחסי גומלין של הדדיות; צמחים טפילים קולטים מינרלים מהצמח הפונדקאי; צמחי מים קולטים מינרלים ישירות מהסביבה המימית אל העלים והגבעולים; צמחים טורפים קולטים מינרלים מחרקים שהם לוכדים.

הרחבה

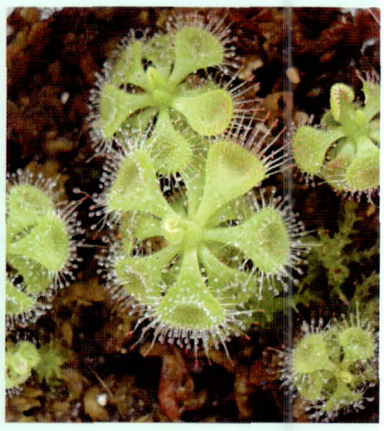
לצמחים טורפים יש יתרון בבתי גידול דלי מינרלים

עד תחילת המאה ה־19 מדענים לא הכירו בעובדה שיש צמחים שמסוגלים "לאכול" בעלי חיים. מקובל היה שרק בעלי חיים מסוגלים לטרוף, והרעיון שצמחים יעשו זאת נראה מופרך לחלוטין. בסוף המאה ה־19 כתב על התופעה ***צ'ארלס דרווין*** (Charles Darwin 1809-1882), אבי תורת האבולוציה, וגרם לכך שיכירו בה ויחקרו אותה.

צמחים טורפים הם צמחים שמבצעים תהליך פוטוסינתזה וקליטת חומרים מהקרקע כמו כל הצמחים. עם זאת יש להם את היכולת "ללכוד" בעלי חיים (בדרך כלל חרקים ואורגניזמים קטנים אחרים), להמית אותם, לפרק את החומרים המרכיבים אותם ולקלוט את אבני הבניין לתוך תאי הצמח.

צמחים אלו גדלים בעיקר בבתי גידול שבהם יש מחסור במינרלים. המחסור בתרכובות חנקניות ובמינרלים נוספים הדרושים לקיום הצמחים, הִקנה יתרון לצמחים שבהם התפתחו מנגנונים חלופיים להשגת חומרים אלו. המנגנונים כוללים אמצעי משיכה לבעלי החיים, לכידת בעל החיים, הפרשת מיצים לעיכול הטרף וניצול תוצרי הפירוק כאבני הבניין לצמח עצמו. מיצי העיכול מכילים אנזימים שונים המסוגלים לפרק את בעל החיים. תהליך העיכול יכול להימשך בין מספר שעות למספר ימים בהתאם למין הצמח ולטמפרטורה.

בין מנגנוני הלכידה ניתן למצוא מלכודות נפילה, מלכודות הדבקה ומלכודות סגירה.



מלכודת הדבקה



מלכודת סגירה



מלכודת נפילה

איור ג–28: מנגנוני לכידה בצמחים טורפים.

שאלה ג–33:

באזורי בִּיצה בארה"ב ניתן למצוא אחוז גבוה יחסית של צמחים טורפים.

א. אילו סוגים של חומרי מזון מספקים החרקים המפורקים לצמחים הטורפים?

ב. מדוע נמצא מגוון רב של צמחים טורפים דווקא באזורי ביצה?

ג. האם צמחים טורפים הם יצרנים או צרכנים? היעזרו בצילומים ונמקו תשובתכם.

שאלה ג–34:

לצמחי מדבר רבים יש מערכת שורשים שטוחה וקרובה לפני הקרקע. הסבירו את היתרון לצמח מדברי במערכת שורשים כזו.

שאלה ג–35:

מה צפוי לקרות כאשר טובלים שורשי צמח בתמיסה המכילה מינרלים וחומרים מעכבי נשימה תאית? הסבירו.

שאלה ג–36:

א. חוקרת טענה שבלי פוטוסינתזה לאורך זמן תפֵּגע קליטת המינרלים ובלי די מינרלים ייפגע תהליך הפוטוסינתזה. נסחו נימוקים אפשריים לטענת החוקרת.

ב. אותה חוקרת טענה שמחסור בחמצן לשורשים לאורך זמן יפגע בקליטת המינרלים. נסו להצדיק את טענת החוקרת, וציינו באילו תנאים יכול להיווצר מצב של מחסור בחמצן לשורשים.

שאלה ג–37:

ציינו שלושה גורמים שבהם תלוי קצב הקליטה הפסיבית (דיפוזיה) של מינרלים מהקרקע.

עיקרי הנושאים בפרק

- מקור כל החומרים האורגניים בטבע הוא חומרים הנוצרים בתהליך הפוטוסינתזה המתרחש בצמחים ובאורגניזמים פוטוסינתטיים אחרים, וכן בכימוסינתזה.
- בתהליך הפוטוסינתזה מומרת אנרגיית אור לאנרגיה כימית ומחומרים אי־אורגניים (מים ו־CO_2) נוצרים חומר אורגני (פחמימה) וחמצן.
- חקר תהליך הפוטוסינתזה החל עוד במאה ה־17 בְּניסויים המהווים אבני דרך במחקר המדעי בכלל, כמו אלו של ואן־הלמונט, פריסטלי ואנגלמן.
- מבנה הצמח וארגון איבריו מותאמים לקליטת המשאבים הדרושים לפוטוסינתזה ולביצוע התהליך: שטח פנים גדול בעלים מאפשר קליטה מיטבית של אור; ויסות פתיחת הפיוניות מאפשר קליטה מרבית של CO_2 ובקרה של משק המים; המבנה הפנימי של העלה מותאם לביצוע הפוטוסינתזה.
- בצמחי CAM מנגנון ייחודי לצמצום איבוד מים המבוסס על פתיחת הפיוניות בלילה.
- תהליך הפוטוסינתזה מתרחש בכלורופלסטים – אברונים המכילים את הצבען כלורופיל ומקנים לאיברי הצמח את צבעם הירוק. אורכי הגל הנבלעים על ידי הכלורופיל הם אלו הפעילים בפוטוסינתזה. במבנה הכלורופלסט קיים מידור, בכל מדור מתרחש שלב אחר של תהליך הפוטוסינתזה.
- השלב הראשון של תהליך הפוטוסינתזה הוא קליטת אנרגיית האור והמרתה לאנרגיה כימית. אנרגיית האור מאפשרת ביקוע מולקולת מים ליוני מימן ולחמצן. יוני המימן מועברים לנשא מימנים, והחמצן משתחרר לאוויר. האנרגיה המשתחררת בתהליך מנוצלת לבניית ATP.
- בשלב השני של תהליך הפוטוסינתזה מתרחש קיבוע פחמן דו־חמצני בתהליך מעגלי הנקרא מעגל קלווין. תהליך הקיבוע הוא תהליך צורך אנרגיה, ומנוצלים בו תוצרי השלב הראשון – מולקולות ATP ונשאי מימנים מחוזרים.
- פחמימות מועברות בצינורות השיפה אל חלקי הצמח שבהם לא מתקיים תהליך הפוטוסינתזה. חלק מהפחמימות שנוצרות בפוטוסינתזה משמשות לבניית חומרים אורגניים נוספים.
- קצב הפוטוסינתזה מושפע מגורמים פנימיים, כמו מספר הכלורופלסטים בעלה, ריכוז הכלורופיל בעלה, ריכוז הרוביסקו, מבנה העלה, צפיפות הפיוניות ומיקומן בעלה, גיל העלה; ומגורמים חיצוניים־סביבתיים, כמו עוצמת האור, ריכוז CO_2, טמפרטורה, מים וכן מכמות המינרלים בקרקע.
- חקלאים יכולים להשפיע על הייצור החקלאי על ידי שליטה בגורמים המשפיעים על תהליך הפוטוסינתזה. אחת הדרכים לעשות זאת היא על ידי גידול צמחים בבתי צמיחה תוך שליטה על התנאים האביוטיים.
- מינרלים חיוניים להתפתחות הצמח ולקיום הפוטוסינתזה. מחסור במינרלים עלול לגרום לעיכוב צמיחה. החקלאים מעשירים את הקרקע במינרלים על ידי דישון כימי או הוספת זבל אורגני.
- מים ומינרלים המומסים בהם, נקלטים מהקרקע על ידי יונקות שבקצות שורשי הצמח. ריבוי היונקות מגדיל את שטח המגע עם מי הקרקע. המינרלים נקלטים בתהליכי קליטה סבילה ופעילה.

מושגים חשובים בפרק

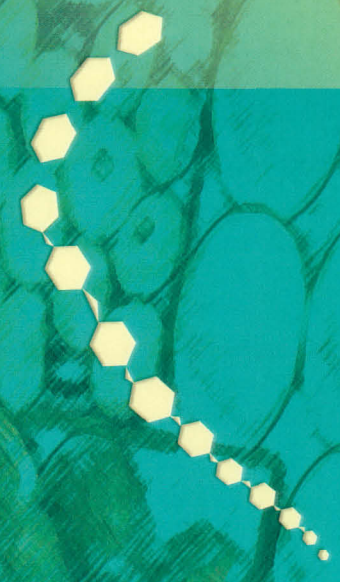
ATP, בנייה
אברי אגירה
אוטוטרופים (אורגניזמים)
אנרגיית אור
אנרגיה כימית
אפידרמיס
אפקט החממה
אשלגן (K)
בליעת אור
בתי צמיחה (חממות)
גורם מגביל
גורמים פנימיים
גורמים סביבתיים (חיצוניים)
דשן כימי
הובלת תוצרי פוטוסינתזה
הזנה מינרלית
המרת אנרגיה
התאמות לפוטוסינתזה
זבל אורגני
זיהום קרקע
זרחן (P)
חומרי תשמורת
חמצן (O_2)
חנקן (N)
חקלאות אורגנית
יונקות
כימוסינתזה
כלורופיל
כלורופלסט
כריתת יערות
מגנזיום
מִחזור פסולת אורגנית
מינרלים
מידור בכלורופלסט
סימני מחסור
ספקטרום בליעה
ספקטרום פעולה
עירור מולקולת הכלורופיל
עלים, מבנה
פוטוסינתזה
פחמן דו־חמצני (CO_2)
פיגמנט
פיוניות
צינורות הובלה
צמחי CAM
קוטיקולה
קומפוסט
קליטה אקטיבית
קליטה פסיבית
רקמה ספוגית
רקמת עמודים
שיפה
שלב קיבוע CO_2
שלב קליטת אנרגיית האור
תוצרים ישירים של הפוטוסינתזה
תוצרים עקיפים של הפוטוסינתזה

חוקרים:
אנגלמן, תיאודור
ואן־הלמונט
פריסטלי, ג'וזף
קלווין, מלווין



ד הזנה ועיכול באורגניזמים הטרוטרופים

ד1. עקרונות המבנה והתפקוד של מערכת העיכול
ד2. מערכת העיכול של האדם
ד3. חילוף החומרים של תוצרי העיכול
ד4. העיכול במעלי גירה
ד5. ייעול ההזנה בפרת החלב
עיקרי הנושאים בפרק
מושגים חשובים בפרק



פרק ד: הזנה ועיכול באורגניזמים הטרוטרופים

קשר לנושא

ביולוגיה של האדם:
מערכת העיכול.

המזון שאנו אוכלים – פירות, ירקות, בשר ומוצרי חלב, מכיל חומרים אורגניים וכן מים ומינרלים. חומרים אלה חיוניים לתפקודו התקין של הגוף – הם משמשים כמקור להפקת אנרגיה לתהליכי החיים, כחומר גלם לבניית רקמות הגוף, וחיוניים לקיום התקין של תהליכים שונים בגוף.

כידוע, האורגניזמים ההטרוטרופים חייבים לקבל את החומרים האורגניים מהמזון שהם אוכלים. כדי שאורגניזמים יוכלו לנצל את רכיבי המזון לצורכיהם, חומרים אלו צריכים להיכנס לתאים. כדי שרכיבי המזון, שהם מולקולות גדולות ומורכבות, יוכלו להיכנס לתאים, עליהם להתפרק תחילה למולקולות קטנות. החלבונים מתפרקים לחומצות אמיניות, מרבית הליפידים – לחומצות שומניות ולגליצרול והרב־סוכרים – לחד־סוכרים.

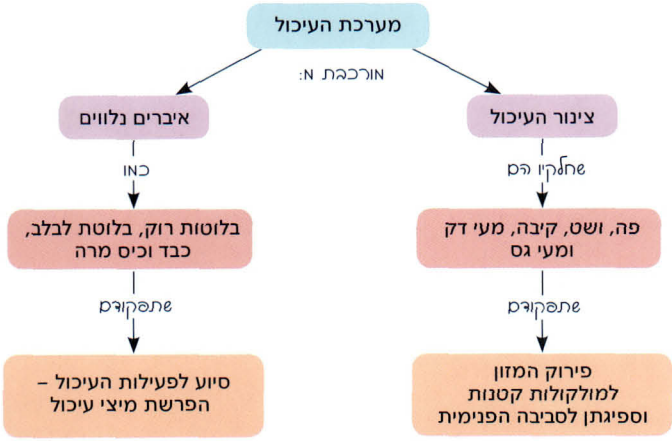
תהליך העיכול הוא כלל התהליכים שבהם המולקולות הגדולות והמורכבות של רכיבי המזון מפורקות למולקולות קטנות היכולות לחדור לתוך התאים. עם סיום הפירוק, נספגים תוצרי העיכול דרך תאי דופן המעי אל מערכת הדם ומובלים באמצעותה אל תאי הגוף.

ניתן לאפיין את תהליך ההזנה של האורגניזמים ההטרוטרופים בארבעה שלבים עיקריים: אכילה, עיכול, ספיגה ושילוב החומרים בפעילויות מטבוליות.

בפרק זה נדון בשלבי העיכול והספיגה כפי שהם מתרחשים במערכת העיכול של האדם, שמייצגת מערכת עיכול באורגניזמים בעלי חוליות.

1ד. עקרונות המבנה והתפקוד של מערכת העיכול

המבנה הבסיסי של מערכת העיכול באדם הוא של צינור ארוך ומפותל המתמשך מהפה עד לפי־הטבעת, שאליו מתקשרים איברים נלווים. אל צינור העיכול מופרשים **מיצי עיכול** מכמה בלוטות (רוק, לבלב וכבד) וכן מִתאים מפרישים המרפדים את דפנות המערכת. מיצי העיכול מכילים אנזימים, חומרים מווסתי pH וחומרים נוספים. החלוקה של אברי מערכת העיכול ותפקודיהם מוצגת באיור ד–1.



איור ד–1: רכיבי מערכת העיכול באדם ותפקודיהם.

על קצה המזלג...

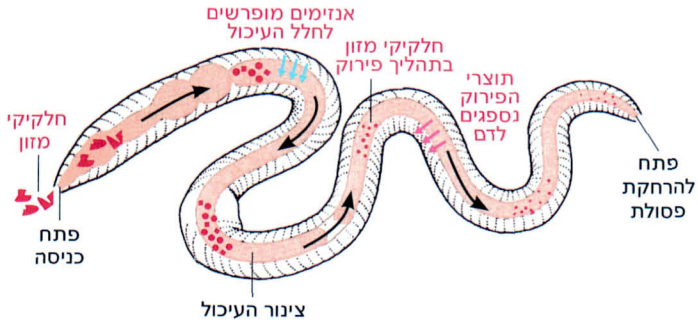
קצת מספרים במערכת העיכול

אורך צינור העיכול כ־9 מטר ושטח הפְּנים הפנימי שלו קרוב לזה של מגרש כדורגל! במהלך חיים ממוצע של אדם, עוברים בצינור זה כ־50 טון של מזון מוצק, וכ־300,000 ליטרים של נוזלים ומיצי עיכול המיוצרים ומופרשים לתוכו על ידי תאים מפרישים ובלוטות שונות.

לפני שנכיר את מבנה מערכת העיכול ופעילותה, נאפיין כמה מעקרונות המבנה והפעילות שלה.

א. העיכול מתבצע בסביבה החיצונית – עיכול חוץ־תאי

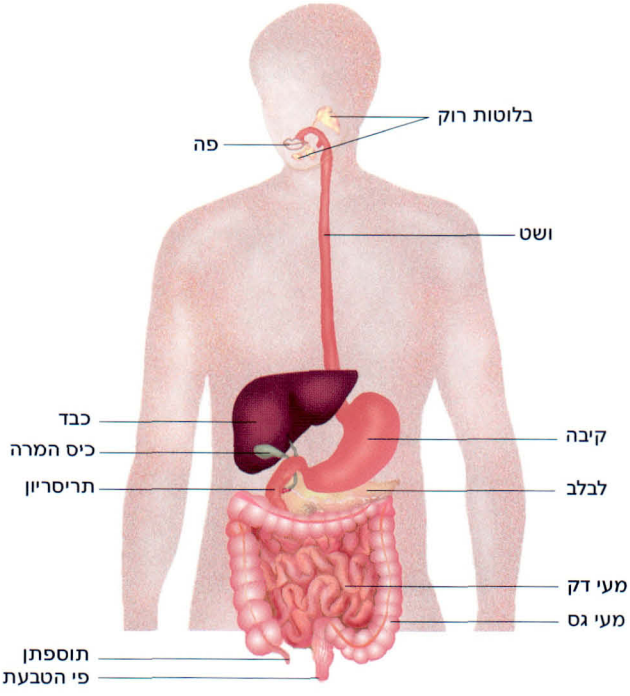
מערכת העיכול באדם ואצל רבים מהאורגניזמים הרב־תאיים בעולם החי היא צינור ארוך שראשיתו בפה וסופו בפתח הפרשה. אף כי היא ממוקמת בתוך גופו של האורגניזם, היא מהווה המשך של הסביבה החיצונית. מיליארדים של תאי אפיתל, המצפים את פְּנים הצינור, מהווים חיץ בין הסביבה החיצונית לסביבה הפנימית של הגוף. המזון עובר תהליכי פירוק בחלל הצינור באמצעות אנזימים המופרשים אף הם לחלל הצינור. רק יחידות הבניין שמתקבלות בתהליכי הפירוק יכולות לעבור דרך קרומי התאים שבדופנות צינור העיכול אל הדם, ואז הן הופכות לחלק מהסביבה הפנימית. עיכול כזה, המתבצע מחוץ לתאים בעזרת אנזימים המופרשים מהתאים, מכונה **עיכול חוץ־תאי** (ראו איור ד–2). על עיכול תוך־תאי תוכלו לקרוא בטבלה ד–1 שבהמשך.



איור ד–2: עיכול חוץ־תאי בתולעת עגולה (שלשול).

ב. מידור בין חלקים בעלי מבנה ותפקוד שונים

מערכת העיכול מורכבת ממספר חלקים השונים זה מזה במבנה ובתפקוד. בכל אחד מהם מתרחש שלב אחר בתהליך (איור ד–3). החלקים השונים של צינור העיכול מופרדים זה מזה באמצעות סוגרים. מידור כזה מאפשר מבנים ותנאים ייחודיים בכל מדור, המתאימים לפעילויות עיכול שונות, ובכך הוא מייעל את פעולת המערכת כולה. הפרשתם של אנזימי העיכול מתרחשת רק בעת הצורך, עובדה המגבירה אף היא את יעילות הפעולה של המערכת.



איור ד–3: המידור במערכת העיכול: חלקי המערכת ומיקומם בגוף.

ג. פירוק המולקולות הגדולות שבמזון ליחידות הבניין המרכיבות אותן

כאמור, כדי שאורגניזמים יוכלו לנצל את רכיבי המזון, רכיבים אלו צריכים להיכנס לתאים. לשם כך המולקולות הגדולות צריכות להתפרק תחילה למולקולות הקטנות שמהן הן בנויות.

פירוק המזון במערכת העיכול כולל תהליכים של פירוק מכני ופירוק כימי.

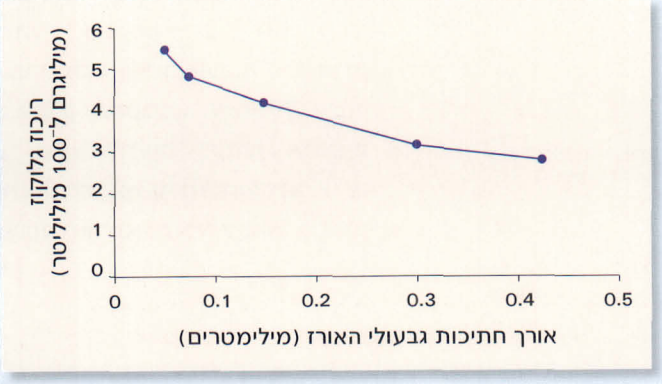
פירוק מכני הוא שבירת המזון לחתיכות קטנות ללא שינוי בתכונות הכימיות של המולקולות. הפירוק המכני מגדיל את היחס בין שטח הפנים של חלקיקי המזון לנפחם, ובכך הוא מייעל את פעולת הפירוק הכימי.

פירוק כימי הוא שבירת קשרים כימיים בתוך המולקולות ויצירת יחידות קטנות יותר. הפירוק הכימי של המזון הוא **תהליך אנזימטי**, המזורז על ידי אנזימים ייחודיים. בעקבות הפירוק הכימי יש שינוי בחומר ובתכונותיו. כך רב־סוכר מתפרק ליחידות של חד־סוכר ושרשרת חלבון מתפרקת לחומצות האמיניות המרכיבות אותה.

הניסוי המתואר להלן ממחיש את תרומתו של הפירוק המכני לפירוק הכימי:

אשנב למחקר

למבחנות שהכילו תמיסות בעלות ריכוז זהה של האנזים צלולאז, אנזים המפרק תאית ליחידות של גלוקוז, הכניסו כמויות שוות של גבעולי אורז יבשים (שאחוז התאית בהם גבוה). לכל מבחנה הוכנסו גבעולי אורז חתוכים, במסה כוללת שווה, אך באורכים שונים. לאחר 7 שעות נבדק ריכוז הגלוקוז בכל אחת מהמבחנות. באיור ד–4 מתוארות תוצאות הניסוי.



איור ד–4: השפעת אורך חתיכות גבעולי האורז על קצב פירוק תאית לגלוקוז.

שאלה ד–1:

התבוננו באיור ד–4 וענו על השאלות הבאות:

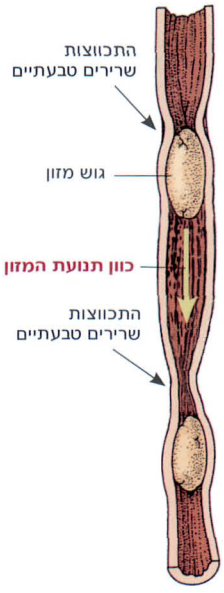
א. תארו על פי העקום את הקשר בין אורך חתיכות גבעולי האורז לבין ריכוז הגלוקוז שנוצר.

ב. הסבירו את תוצאות הניסוי.

ג. מהי חשיבותו של הפירוק המכני של המזון? בתשובתכם התבססו על תוצאות הניסוי.

ד. תנועת המזון בצינור העיכול היא חד־כיוונית

צינור העיכול מוקף בשכבות של שרירים לא־רצוניים משני סוגים: שרירים טבעתיים, המקיפים את צינור העיכול, ושרירים אורכיים, שכיוון סיבהם הוא לאורך הצינור. המזון נדחף לאורך צינור העיכול על ידי התכווצויות של השרירים הטבעתיים באזור שבו עובר המזון. האזור המתכווץ "מתקדם" בעקבות גוש המזון. כך נוצרת בצינור תנועה גלית המניעה את המזון בכיוון אחד בלבד – מהפה אל עבר פי־הטבעת. תנועה זו מכונה **תנועה פריסטלטית** (איור ד–5). התנועה הפריסטלטית מתקיימת כל הזמן, אך היא מוגברת בהשפעת הלחץ שהמזון מפעיל על דופנות צינור העיכול.



איור ד–5: תנועה של גוש מזון לאורך צינור העיכול. המזון נע כתוצאה מהתכווצויות צינור העיכול.

האם המזון ינוע בכיוון הנכון כאשר האדם יעמוד על ראשו ?!

לאחר שהמזון נבלע, גם אם האדם יעמוד על הראש המזון ימשיך לנוע בכיוון הרגיל, שכן תנועתו בצינור העיכול אינה תלויה בכוח הכובד.

ה. פעילות מערכת העיכול נתונה לוויסות ולבקרה

פעילות מערכת העיכול, ובכלל זה הפרשת מיצי עיכול, הפרשת אנזימים ופעילות השרירים המשתתפים בתהליכי העיכול, מבוקרת ומתוזמנת היטב.

מנגנוני בקרה הומיאוסטטיים פועלים לרוב לביטול שינויים שהתרחשו בסביבה הפנימית. בבקרת תהליכי העיכול, לעומת זאת, פועלים **מנגנוני ויסות עצביים והורמונליים לפני** ספיגת המזון לסביבה הפנימית.

בעקבות מחשבה על אוכל, הרחה שלו או ראייה שלו, מגיעים למוח **גירויים עצביים**. כתגובה לגירויים אלו נשלחים ממערכת העצבים אל איברים במערכת העיכול אותות המפעילים אותם. נוסף לכך, כאשר אוכל מצוי כבר במערכת העיכול, גירויים עצביים "מקומיים" מאיברי המערכת מגיעים למערכת העצבים ומועברים דרכה אל איברים אחרים במערכת העיכול.

העובדה שמערכת העיכול מעוצבבת לכל אורכה ונתונה להשפעתם של גורמים מווסתים רבים, יכולה להסביר את ההשפעה של מצבים נפשיים שונים (הכרוכים בגירוי מערכת העצבים) על פעילות מערכת העיכול, השפעה שגורמת לכאב בטן, בחילה, שלשולים, עצירות ועוד.

נוסף לוויסות העצבי, **הורמונים** שונים מופרשים מתאים המצויים בצינור העיכול אל זרם הדם ומועברים באמצעותו אל כל הגוף ונקלטים באיברים במערכת העיכול. ההורמונים מעוררים הפרשת מיצי עיכול או תנועה בצינור העיכול (או את שניהם) ונתונים לוויסות של **מנגנוני משוב** חיוביים או שליליים.

קשר לנושא

ביולוגיה של האדם: *שמירה על הומיאוסטזיס ומנגנוני משוב חיוביים ושליליים.*

שאלה ד–2:

מהו היתרון בעובדה שהפרשתם של אנזימי העיכול מתרחשת רק בעת הצורך?

ו. תהליך העיכול צורך אנרגיה

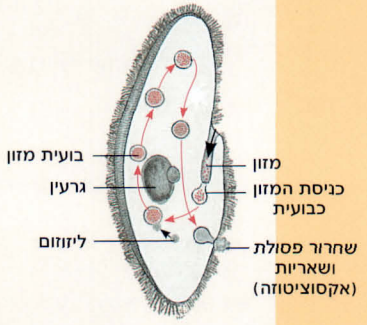
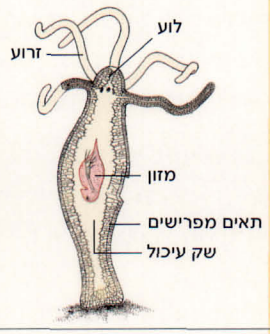
חשוב לזכור שבתהליכי העיכול עצמם לא מופקת מחומרי המזון אנרגיה זמינה. נהפוך הוא: תהליך העיכול עצמו ותהליכי הספיגה של תוצריו הם תהליכים צורכי אנרגיה. גם זרימת הדם וזרימת הלימפה, המסייעות להעברה של חומרי המזון ממערכת העיכול, צורכות אנרגיה, אשר מושקעת בהתכווצויות שריר הלב ושרירי גוף נוספים. אפשר לומר אם כך שלתהליך העיכול יש "מחיר אנרגטי".

הרחבה

מנגנוני עיכול בקבוצות שונות של אורגניזמים

טבלה ד–1 מציגה מנגנוני עיכול שהתפתחו בקבוצות השונות של האורגניזמים במהלך האבולוציה.

טבלה ד–1: מנגנוני עיכול בקבוצות שונות

קבוצה	דוגמה*	עיקרון תפקודי־מבני	תיאור
חיידקים ופטריות		עיכול חוץ־תאי: הפרשת אנזימי עיכול מהתאים לסביבה החיצונית.	אנזימי העיכול מופרשים מן התאים על פני המזון. המזון מתפרק, ותוצרי העיכול נקלטים על ידי התאים.
חד־תאיים (*סנדלית*)		עיכול תוך־תאי בבועית מזון. "בליעת" המזון נעשית בפגוציטוזה.	מולקולות גדולות של מזון "נבלעות" במעין משפך ונוצרת סביבן בועית עטופה בקרום התא. תוך כדי תנועת הבועית בתא, קרום הבועית מתלכד עם ליזוזום, שהוא אברון תוך־תאי המכיל אנזימי עיכול. בבועית המכילה את המזון והאנזימים מתרחש פירוק המזון. הבועית ממשיכה לנוע בתא ותוצרי העיכול עוברים דרך קרום הבועית אל הציטופלסמה של התא. הבועית, המכילה עתה חומרי פסולת מתקרבת אל קרום התא, מתאחה אתו והפסולת נפלטת אל מחוץ לתא (אקסוציטוזה).
רב־תאיים פשוטים (*הידרה*)		שילוב של עיכול חוץ־תאי בשק (חלל) עיכול ועיכול תוך־תאי בבועית מזון. לשק העיכול פתח אחד – לוע, שבו נבלע המזון ודרכו גם מופרשת הפסולת.	עיכול המזון מתחיל בשק העיכול על ידי אנזימים המופרשים מתאים המקיפים אותו. העיכול אינו שלם ותוצריו, שהם חלקיקי מזון גדולים יחסית, נבלעים בפגוציטוזה על ידי התאים. תהליך העיכול נמשך בתוך התאים בבועיות מזון.
חסרי חוליות (*תולעים*)		עיכול חוץ־תאי בלבד. צינור עיכול בעל שני פתחים: פה שדרכו נכנסים חומרי המזון, ופתח הפרשה שדרכו יוצאים חומרי הפסולת. התנועה של המזון היא חד־כיוונית.	צינור העיכול מחולק למדורים שבכל אחד מהם מתבצע תהליך ייחודי: המזון נבלע ונלעס בפה, נאגר בזפק, נטחן ב"קיבה" שרירית, נעכל ונספג לאורך צינור המעי, והפסולת מופרשת מפתח ההפרשה. אנזימי עיכול מופרשים מתאים בדופן המעי.

קבוצה	דוגמה*	עיקרון תפקודי־מבני	תיאור
בעלי חוליות (עוף)		כמו בחסרי חוליות רב־תאיים, אך ניכרים שכלולים במבנה, בחלוקת התפקידים ובאמצעים לביצועם. בקבוצות שונות קיימות התאמות ייחודיות לפי סוג המזון.	מערכת העיכול מתחילה בפה ומסתיימת בפי הטבעת. מבחינים בה במדורים ברורים ושונים זה מזה. אנזימי העיכול מופרשים אל צינור העיכול מִתאים בדופנותיו ומבלוטות.

*שימו לב: יחסי הגודל בין האורגניזמים באיורים אינם משקפים את יחסי הגודל במציאות.

כפי שאפשר ללמוד מטבלה ד–1, המשותף בתהליך העיכול של כל קבוצות בעלי החיים הוא העיקרון של פירוק מולקולות גדולות למולקולות קטנות. בין הקבוצות קיימים הבדלים ברמות המידור וההתמחות הקיימים במערכות העיכול ובספיגה של המזון.

שאלה ד–3:

במהלך האבולוציה מחד־תאיים עד לרב־תאיים מפותחים, חלה גם עלייה בגודלם של בעלי החיים, ולְרוב התאים בגוף אין מגע ישיר עם מערכת העיכול.

איזו בעיה קיימת בתהליך הגעת המזון אל כל תאי הגוף ברב־תאיים, וכיצד היא נפתרת?

שאלה ד–4:

הליזוזומים באמבה (חד־תא) מכילים בעיקר אנזימים מפרקי חלבונים (פרוטאזות) ומפרקי עמילן (עמילאז). מה, לדעתכם, סוג המזון שהאמבה לא תוכל לנצל?

שאלה ד–5:

פטריות הן אורגניזמים הטרוטרופים בעלי דופן תא. נמצא שפטריות מסוימות יכולות לגדול על מצע של חומר אורגני המכיל כמויות גדולות של תאית והמיצלולוז.

א. הסבירו את ההתאמה בין סוג העיכול של הפטריות (עיכול חוץ־תאי) לבין מרכיב המזון העיקרי שלהן.

ב. חומר התשמורת בפטריות הוא גליקוגן. תארו את "גלגולי" הפחמימות המתרחשים בהזנה ובגדילה של הפטרייה.

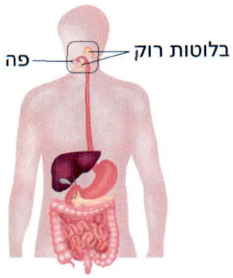
שאלה ד–6:

במה דומה תפקוד בועית המזון בחד־תאיים לתפקוד שק העיכול בהידרה ולתפקוד מערכת העיכול באדם?

4.2 מערכת העיכול של האדם

מערכת העיכול של האדם היא דוגמה למערכות עיכול של בעלי חיים עילאיים. בסעיפים הבאים נכיר את חלקי המערכת, את התהליכים המתרחשים בכל אחד מהם ואת המנגנונים המווסתים אותם.

4.2.1 העיכול בפה



התחנה הראשונה של מערכת העיכול היא ה**פה**, והפעולה העיקרית המתרחשת בה היא פעולת הלעיסה, המתחילה את הפירוק המכני של המזון על ידי חיתוכו לפיסות קטנות. הלעיסה היא פעולה רצונית המתבצעת על ידי הנעת הלסת התחתונה, ומשתתפות בה ה**שיניים**, הלשון ושרירי הלסת. לפעולה מסייע הרוק המופרש לחלל הפה, שהופך את המזון לעיסה.

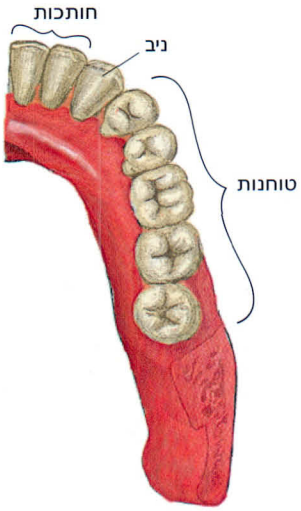
כמו שניתן ללמוד מאיור ד–6, המתאר חצי לסת (כלומר רבע ממה שקיים בפה), אצל אדם בוגר יש 32 שיניים ובהן 8 *חותכות*, 4 *ניבים* ו־20 *טוחנות*.

רעיון מרכזי

התאמה בין מבנה לתפקוד:
לסוגים שונים של שיניים יש צורה שונה ותפקוד שונה.

יש קשר בין צורת השיניים לתפקודן:

- חותכות: שיניים קדמיות רחבות וחדות, שתפקידן לחתוך את המזון.
- ניבים: שיניים חדות דמוי חרוט, שנועדו לקריעת המזון.
- טוחנות: שיניים אחוריות, בעלות כותרות רחבות ועליהן רכסים מעוגלים, שתפקידן למעוך ולשחוק את המזון.



איור ד–6: סוגי השיניים בלסת האדם.

אל חלל הפה מופרש בקביעות **רוק** משלושה זוגות של בלוטות. כמות הרוק הממוצעת היא בין ליטר אחד לשני ליטרים ביום. נוזל הרוק מורכב מ־98% מים, חלבונים (ביניהם אנזימים והחלבון מוצין המקנה לרוק את צמיגותו) ומלחים.

לרוק מספר תפקודים. המים שברוק משמשים ל**המסת** המזון ומאפשרים קליטת טעמים על ידי תאי החוש שבפקעיות הטעם בלשון. חלבון המוצין שברוק עם המים גורמים ל**ריכוך** המזון ולמעבר שלו ביתר קלות מהפה לאורך הוושט. המלחים שברוק משתתפים ב**נטרול** חומציות המזון ויוצרים סביבה מיטבית לפעילות האנזימים שברוק. נטרול החומציות תורם גם לבריאות השן. הרוק מכיל את האנזים **עמילאז**, שמבצע **פירוק כימי** ראשוני של הרב־סוכרים עמילן וגליקוגן לשרשרות קצרות יותר. הרוק מכיל גם את האנזים **ליזוזים**, שמפרק דפנות של חיידקים המגיעים עם המזון, הורס את חלקם ובכך הוא מהווה **חומר אנטי־בקטריאלי**. כמו כן, הרוק מאפשר **ליחוח** של הלשון והשפתיים, הדרוש להפקת צלילים ולדיבור.

כאמור, בתהליך הלעיסה משתתפת גם **הלשון**. הלשון היא שריר המסייע בערבוב המזון עם הרוק, בהעברת המזון בין סוגי השיניים השונים ובדחיקת המזון לכיוון בית הבליעה.

על קצה המזלג...

הלשון וחוש הטעם

הלשון היא גם איבר הטעם העיקרי. את רוב שטחה של הלשון מכסות **פקעיות טעם**, המכילות תאי חישה. בעקבות מגע עם מולקולות מסוימות במזון תאים אלו מעבירים מידע המתפרש במוח כ"טעם". אצל האדם קיימות בלשון כ־10,000 פקעיות טעם, והן נהרסות ומתחדשות מידי שבועיים.

במשך שנים נפוצה התפיסה שלפיה הלשון מחולקת לאזורים שונים שבכל אחד מהם חשים בטעם שונה: מתוק, חמוץ, מלוח ומר. כיום ידוע שתאי החישה בפקעיות הטעם מאפשרים לחוש מגוון של טעמים.

כיום גם ידוע על טעם חמישי – אומאמי, שמקורו במילה ביפנית שפירושה "טעים". קיומו של טעם זה התגלה לראשונה בשנת 1908 וקשה להגדירו. אומאמי מקנה למזון עושר, מרקם והרגשה "בשרית". טעם זה מורגש כאשר המזון מכיל את החומצה האמינית גלוטמט. למזונות מעובדים רבים (אבקות מרק, רטבים) מוסיפים את החומר מונוסודיום גלוטמט כדי להדגיש את טעמם.

אתם בודאי שואלים, מה לגבי תחושת הטעם החריף?

חריף אינו נחשב לטעם היות והרגשת החריפות אינה נובעת ממידע שמקורו בתאי חישה בפקעיות הטעם, אלא מתחושה של צריבה בתאים על גבי הלשון הרגישים לכאב. תחושת הצריבה נובעת ממגע של התאים עם חומרים שונים המצויים במזונות החריפים השונים.

שאלה ז-7:

אחת הבעיות הנפוצות בזקנה היא ירידה בהפרשת רוק. מאלו בעיות יסבלו לדעתכם אנשים בגיל זקנה? הסבירו את תשובתכם על סמך הידוע לכם על תפקידיו של הרוק.

ויסות העיכול בפה

מראה, ריח, טעם ומחשבה על מזון מעבירים אותות עצביים למוח וגורמים להגברה של הפרשת הרוק. נוכחות מזון בפה והפעולה הרצונית של הלעיסה מגבירות גם הן את הפרשת הרוק אל חלל הפה.

מידת הפרשת הרוק מושפעת מכמה גורמים, בהם: מצב רוח; גיל – לרוב, ככל שעולה הגיל יורדת הפרשת הרוק; משק המים בגוף – התייבשות גורמת להפחתת ייצור הרוק; ועישון – שגורם לירידה בהפרשת הרוק.

סיפורו של גילוי

איוואן פבלוב *(Ivan Pavlov 1849–1936)* היה מדען ופיזיולוג רוסי שחקר את מערכת העיכול, ובשנת 1904 קיבל פרס נובל על מחקריו. פבלוב גילה שכלבים מתחילים להפריש רוק (לרייר) עוד לפני שהאוכל מגיע לפיהם, כתגובה לגירוי עצבי של קול או מראה המקושר להגעתו הקרובה של האוכל. יתר על כן, באחד הניסויים הידועים ביותר שלו, חיבר פבלוב צינור לקיבתם של כלבים שאולפו לבוא לאכול לשמע צלצול פעמון. הוא גילה שקיבתם של הכלבים מפרישה מיצי עיכול עוד לפני שהאוכל בא אל פיהם, רק ממראה או מריח האוכל. בשלב מאוחר יותר הופרשו מיצי הקיבה כבר למשמע צליל הפעמון.



הרחבה

האם ניתן להבחין בין אוכלי צמחים לבין טורפים על פי מבנה הלסת?

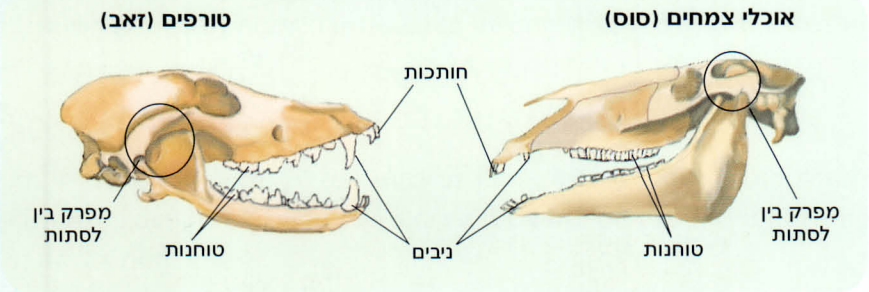
קיים ויכוח רב־שנים בין הצמחונים לאוכלי הבשר לגבי ההתאמה הפיזיולוגית של האדם לאכילת מזונות שונים. אחת מנקודות הוויכוח היא התאמת מבנה השיניים והלסת לסוג התזונה. אם נתבונן במבנה הלסת של אוכלי צמחים ושל טורפים, נראה שלכל קבוצה מאפיינים שונים של מבנה לסת ושיניים.

לאורגניזמים **אוכלי צמחים** יש לסתות מוארכות שיוצרות חלל פה גדול המותאם ללעיסה של נפח גדול של צמחים. בקדמת הלסת מצויות שיניים חותכות המתאימות לתלישה של עלים. לשיניים הטוחנות מבנה של רכסים המתאימים ללעיסה ולריסוק של זרעים וגרעינים.

הלסתות של ה**טורפים** קצרות מאלו של אוכלי צמחים. כאשר טורף סוגר לסתות, השיניים העליונות והתחתונות גוזרות בשר כמו מספרים. בחזית הלסת יש שיניים חותכות קטנטנות שמתאימות לגירוד שרידי בשר מהעצמות, והשיניים האחוריות חדות ומתאימות לגזירה של חתיכות מבשר הטרף ולפיצוח עצמות (איור ד–7).

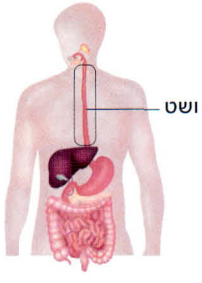
גם תנועת הלסת באוכלי צמחים שונה מזו של טורפים: בטורפים התנועה היא בעיקר למטה ולמעלה, בעוד שאצל אוכלי צמחים היא גם לצדדים, מה שמאפשר גריסה טובה יותר של המזון הצמחי בעיקר על ידי השניים הטוחנות.

אצל האדם, כ**אוכל כול**, קיים מגוון גדול יחסית של סוגי שיניים, שרירי הלסת חזקים וגמישים, והלסת מסוגלת לנוע גם לצדדים. מבנה הפה, סוגי השיניים ותנועת הלסת מעידים על התאמה של האדם למגוון רחב של מזונות הן מהחי והן מהצומח.



איור ד–7: הלסת והשיניים של אוכלי צמחים (סוס) ושל טורפים (זאב).
שימו לב, לא נשמרו יחסי הגודל בין הגולגלות.

2.ד מעבר המזון בוושט

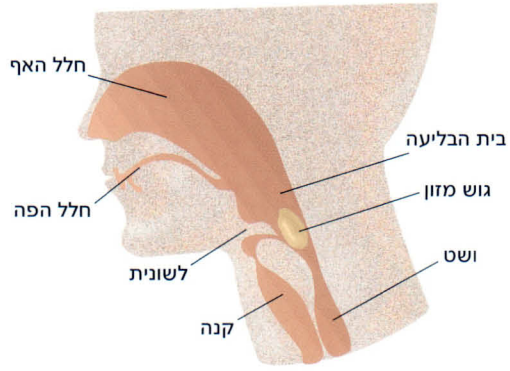


פעולת הבליעה דוחפת את המזון לעבר ה**וושט** ומגבירה על ידי כך את התנועות הפריסטלטיות של השרירים הטבעתיים שבדופן הוושט. אורך צינור הוושט כ־25 ס"מ. מעבר "גל" פריסטלטי מהחלק העליון של הוושט ועד לכניסה לקיבה אורך כ־9 שניות. בוושט לא מתרחש עיכול של המזון.

קנה הנשימה והוושט סמוכים מאוד זה לזה – קנה הנשימה נמצא סמוך יותר לבית הבליעה (איור ד–8). לכן קיימת סכנה שמזון המגיע מהפה, ייכנס לקנה הנשימה, יחסום אותו ויגרום לחנק.

ברגע שמזון עובר מהפה אל בית הבליעה, מופעל מנגנון בקרה הגורם לכיסוי פתח הקנה עם לשונית, וכך המזון נדחף לפתחו של הוושט שנותר פתוח.

דיבור מחייב זרימת אוויר חופשית לקנה, ועל כך אומר הפתגם: "אין משיחין בשעת הסעודה פן יקדים קנה לוושט" (מסכת תענית דף ה, עמוד ב).
רפלקס השיעול מסייע בהרחקת מזון שנכנס לקנה.



איור ד–8: מעבר המזון מהפה אל הוושט.

קשר לנושא

הביולוגיה של האדם:
מערכת העצבים ותגובות רפלקס.

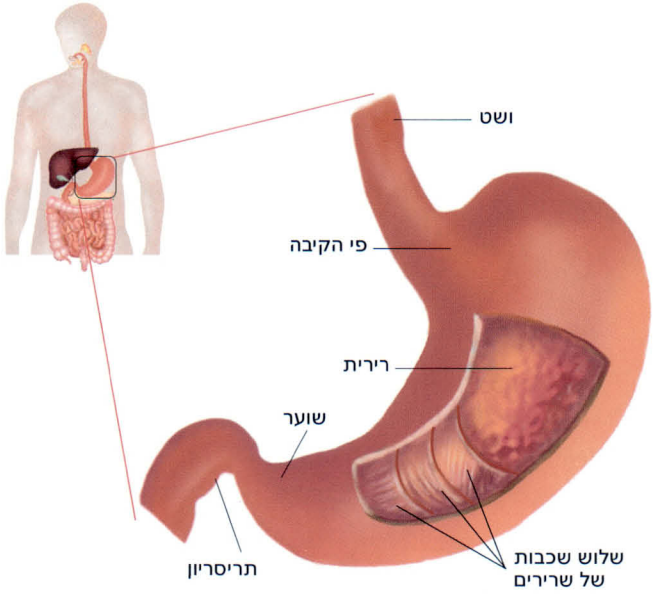
מעבר המזון מהוושט אל הקיבה מבוקר על ידי שריר טבעתי המכונה "פי הקיבה". השריר נמצא בפתח הקיבה (ראו איור ד–9) ונפתח בתגובה ללחץ המזון עליו. לאחר כניסת המזון לקיבה, פי הקיבה נסגר, וכך נמנעת חזרה של המזון מהקיבה לוושט.

אם משתבשת פעולת פי הקיבה, או אם גירוי כלשהו גורם ללחץ של שרירי הבטן על הקיבה, פי הקיבה נפתח והמזון נדחף בכיוון ההפוך, מהקיבה אל הוושט וממנו אל הפה ונגרמת הקאה. הגירויים להקאה הם: מזון שאינו טעים, חומרים רעילים, ריח לא טוב והפרעה בשיווי המשקל.
תופעה נוספת של היפוך התנועה בוושט מתבטאת בצרבת. תחושת הצריבה נובעת מ"דליפה" של עיסה נוזלית המכילה מיץ קיבה, מהקיבה אל הוושט. מגע של חומצה עם הוושט, שבניגוד לקיבה אינו מוגן בפניה, עשוי לגרום לכוויה שתתבטא בתחושת צריבה.

3.2ד העיכול בקיבה

לקיבה מבנה של שק שנפחו משתנה לפי תכולתו: לקיבה ריקה נפח של כ־50 מ"ל, וקוטרה במצב כזה לא עולה בהרבה על זה של המעי הדק.
כאשר האוכל נבלע, שרירי הקיבה מתרפים ומאפשרים התרחבות של הקיבה עד לנפח של כ־2 ליטר. דופן הקיבה עבה ועשויה שכבות של שרירים: מבפנים החוצה – שרירים אלכסוניים, שרירים טבעתיים ושרירים אורכיים (איור ד–9). סידור זה מאפשר ערבול המזון שכן כיוון ההתכווצות של כל אחת מהשכבות הוא שונה.

השכבה הפנימית ביותר הפונה לחלל הקיבה נקראת השכבה **הרירית**. שכבה זו עשויה קפלים רבים המצופים בשכבת אפיתל שבה שקועות בלוטות המכילות תאים מפרישים מסוגים שונים.



איור ד–9: מבנה הקיבה.

רעיון מרכזי

התאמה בין מבנה לתפקוד:
מבנה הקיבה מותאם לתפקודה.

תאים מסוג אחד מפרישים חומצה מלחית (HCl) היוצרת pH נמוך מאוד בין 1.7 ל־3. תאים מסוג אחר מפרישים אנזימים מפרקי חלבונים – **פרוטאזות**, שהעיקרי ביניהם הוא ה**פפסין** המופרש בצורה שאינה פעילה. תאים מסוג שלישי מפרישים ריר. הפרשות אלה מרכיבות את **מיץ הקיבה**, שמופרש ביתר שאת בזמן הארוחות. מדי יום מופרשים כ־2.5 ליטר של מיץ קיבה.

הסביבה החומצית שבקיבה, שהיא יוצאת דופן בצינור העיכול ובגוף האדם בכלל, הכרחית להפיכת הצורה הלא פעילה של האנזים פפסין לאנזים פעיל. נוסף לכך, חומציות הקיבה פוגעת בתאי החיידקים שחדרו עם המזון, ביניהם חיידקים מחוללי מחלות, ותורמת להגנה מפני גורמי מחלות.

בקיבה מתבצעות הפעולות הבאות:

1. **השלמת הפירוק המכני של המזון וערבולו עם מיצי הקיבה** באמצעות התכווצות בו־זמנית של כל שכבות השרירים, בכיוונים השונים.
2. **המשך הפירוק הכימי־אנזימתי של המזון** – בעיקר של החלבונים, על ידי האנזים פפסין. אנזים זה מפרק את החלבונים לפפטידים – שרשרות קצרות של חומצות אמיניות. עם הפפסין פועלים בקיבה אנזימים נוספים המעכלים חלבונים, וכן האנזים ליפאז שמתחיל את פירוק הליפידים.
3. **אִכסון המזון לפני העברתו למעי הדק** והעברתו במנות קטנות יחסית לתריסריון (תחילת המעי הדק).

כיצד תאי דופן הקיבה, אינם נפגעים מהתנאים ה"קשים" השוררים בקיבה?!

קיימים שלושה מנגנונים אשר מגינים על התאים מפני פגיעה מפעילות הפרוטאזות והחומצה המלחית שבקיבה:

- ריר צמיג המצפה את הדופן הפנימי של הקיבה. לריר pH מעט בסיסי והוא מגן על דופן הקיבה מפני פגיעת החומצה.
- הפרוטאזות המופרשות לחלל הקיבה, ובראשן הפפסין בצורתו הלא פעילה, פעילות אך ורק ב־pH הנמוך שמצוי בחלל הקיבה. לכן סמוך לתאי הדופן, שם הסביבה בסיסית בשל הריר המצפה אותם, האנזים נשאר בצורתו הלא פעילה.
- הפרשת החומצה והאנזימים אינה רציפה. היא מווסתת על ידי גירויים עצביים והורמונליים ומתרחשת רק סמוך לאכילה ובזמן האכילה.

למרות המנגנונים האלה, אצל כ־10 אחוזים מהאוכלוסייה מופיעים כיבי קיבה, ורק בשנים האחרונות התבררה סיבתם (ראו סיפורו של גילוי בעמוד הבא).



בקיבה כמעט שלא מתקיימת ספיגה של חומרי מזון. אחד החומרים הבודדים שכן נספג בה הוא האלכוהול. מולקולות האלכוהול הן קטנות ובעלות מסיסות גבוהה במים, ולכן הן נספגות ללא עיכול נוסף: 20% מהאלכוהול שמגיע לקיבה, נספג כבר בה, 80% הנותרים עוברים למעי הדק ונספגים שם במהירות רבה. כאשר הקיבה מלאה יש פחות מגע בין האלכוהול ותאי דופן הקיבה ולכן פחות אלכוהול נספג בה, וגם קצב העברתו למעי הדק נמוך יותר. זו הסיבה שכאשר הקיבה ריקה ההשתכרות מהירה יותר.

סיפורו של גילוי

מה גורם לכיב הקיבה?

במדינות המערב כיב הקיבה (אולקוס) הוא בעיה נפוצה. כיב הקיבה הוא פצע ברקמות הריריות הפנימיות בקיבה, והוא עשוי להופיע גם בתריסריון בשכיחות נמוכה. במשך שנים רבות חשבו שמצבים נפשיים כמו עצבנות ודיכאון הם הגורמים לכיב קיבה. גם שיערו שגורמים שונים כמו חומציות הקיבה, אכילת מאכלים חריפים במיוחד ושתייה מרובה של אלכוהול וקפה מחריפים את מצב החולים. המחקר הוביל לתשובה אחרת ומפתיעה.

שני רופאים אוסטרליים, פרופ' ***בארי מרשל*** (Barry Marshal) וד"ר ***רובין וורן*** (Robin Warren), גילו שהחיידק הֶליקובקטר פילורי (Helicobacter Pylori) הוא הגורם העיקרי למחלת כיב הקיבה.

וורן, שעבד ב־1979 כפתולוג בבית החולים, לקח דגימה רקמתית (ביופסיה) מהחלק התחתון של קיבה מודלקת. הוא מצא חיידקים בעלי צורה מפותלת (ספירלית) שלא הכיר קודם. עדויות על הימצאות חיידקים ספירליים בתוך כיב של חולים היו קיימות כבר מסוף המאה ה־19, אך הממצאים נחשבו לקוריוז או לזיהום ונזנחו. התפיסה הרווחת בקרב המדענים הייתה שהקיבה סטרילית מאחר שמיקרואורגניזמים אינם מסוגלים להתקיים בסביבה חומצית כל כך.

למרות הספקנות הגלויה של הקהילה המדעית, החלו וורן ומרשל בניסיונות לגדל את החיידק בתרבית ולאחר מאמצים רבים הם הצליחו בכך. אך בכך לא נסתיימו תלאותיהם. היה עליהם להוכיח, בדרך המקובלת, כי חיידק זה הוא אכן גורם המחלה. הדרך המקובלת להוכחת הקשר בין החיידק למחלה היא הזרקתו לבעל חיים כדי לגרום בו תסמיני מחלה דומים. אך התברר שהחיידק הליקובקטר פילורי יכול להדביק רק בני אדם.

ב־1984 עשה מרשל צעד דרמתי. הוא שתה בעצמו תכולה של מבחנה שהכילה כמיליון חיידקי הליקובקטר פילורי. שבוע לאחר מכן התפתחו בו תסמיני כיב קיבה אופייניים, ולאחר 10 ימים נוספים, בבדיקה של הקיבה באמצעות צינור עם סיב אופטי שהוכנס למערכת העיכול שלו, נמצאה רקמת קיבה מודלקת וגדושה בחיידקי הליקובקטר פילורי. למרבה המזל, בעזרת טיפול אנטיביוטי, החלים מרשל לחלוטין מהתסמינים הללו והמשיך במחקריו החשובים עם שותפו וורן.

בזכות מחקרם של וורן ומרשל, ידוע כיום שההליקובקטר פילורי הוא חיידק הנמצא בקיבתם של כ־50% מאוכלוסיית העולם. ברוב המקרים, נוכחות החיידק אינה גורמת לכל בעיה, אולם אצל חלק מבני האדם (כ־5%–10%) החיידק עשוי לגרום לדלקות וכיבים. הצורה הספירלית של החיידק ואופן תנועתו מאפשרים לו לחדור את השכבה הרירית המגינה על דופן הקיבה, לפגוע בה ולהפכה לפגיעה להשפעת חומצות ואנזימים. יתר על כן, הוא עשוי לגרום לדלקת בחלק העליון של התריסריון. בזכות המחקר של וורן ומרשל, כיב הקיבה ודלקות קיבה אינן עוד מחלות כרוניות וניתן לרפאן בעזרת אנטיביוטיקה. בשנת 2005 זכו שני הרופאים בפרס נובל לרפואה על תגליתם.

שאלה ד–8:

בשנים האחרונות, משווקים מוצרי מזון שונים בעלי התואר "פרוביוטים" כמוצרי בריאות המכילים חיידקים ידידותיים המקנים למוצרים ערך תזונתי נוסף.

א. לאור הידוע לכם עתה על הקיבה, מהו הספק שמתעורר בנוגע ליעילות מוצרים אלה?

ב. חפשו ברשת האינטרנט מהו, לטענת היצרנים, הפתרון לבעיה?

ויסות העיכול בקיבה

פעילות הקיבה אינה רציפה והיא פועלת בתגובה לגירויים. כזכור, פבלוב גילה שראייה, הרחה ואפילו מחשבה על מזון הם גירויים המפעילים אותות עצביים המעוררים לא רק את הפרשת רוק כי אם גם את פעילות הקיבה. נוכחות מזון בפה מעבירה גירוי עצבי הגורם להפרשה מעטה של מיץ קיבה כך שמיד כשמגיע המזון לקיבה יכול להתחיל בה תהליך הפירוק.

מזון הנכנס לקיבה מרחיב אותה ומפעיל קולטנים בדופן הקיבה. הקולטנים משגרים אותות המגרים שרירים בדופן הקיבה והמעי להתכווץ ותאי בלוטה להפריש אנזימים, הורמונים וחומרים אחרים לחלל הקיבה. קצב התרוקנות הקיבה תלוי בנפח המזון. ארוחה גדולה מפעילה קולטנים רבים בדופן הקיבה, הגורמים להתכווצויות חזקות, והתרוקנות מהירה יותר של הקיבה. כשאין מזון בקיבה הפעילות מצטמצמת.

מיד כשמגיע המזון לקיבה מתחיל בה פירוק החלבונים לפפטידים. נוכחותם של פפטידים קצרים וכן הלחץ המכני שיוצר המזון על דופן הקיבה (מתיחה), מביאים להפרשה מוגברת של ההורמון **גסטרין** מִתאים הנמצאים בדופן הקיבה (באזור הקרוב לשוער) אל הדם.

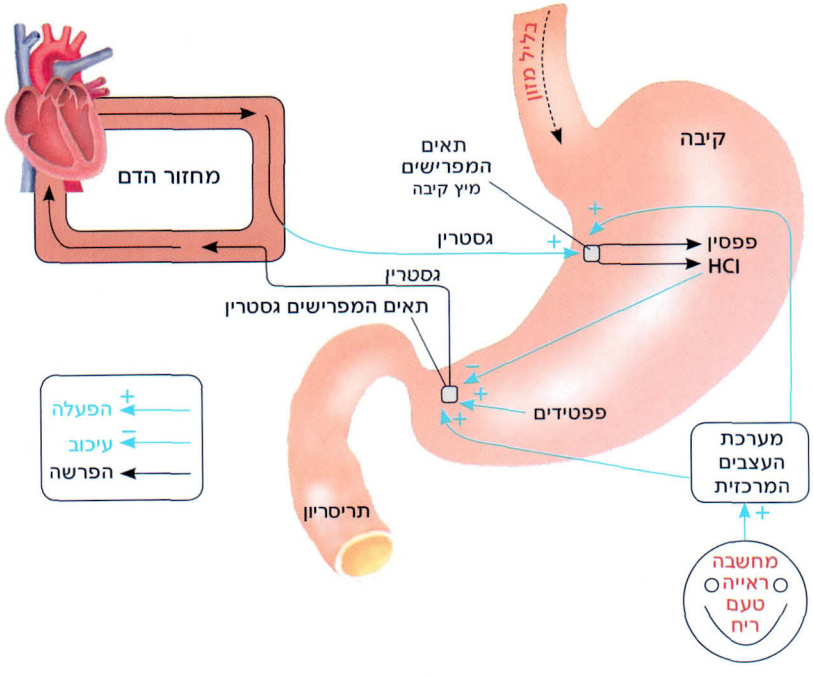
ההורמון מגיע עם זרם הדם לתאים אחרים בדופן הקיבה, שם הוא מזרז את ההפרשה של מיץ הקיבה (HCl ופפסין לא פעיל) ומגביר את תנועת שרירי הקיבה.

הגברת החומציות בקיבה (מתחת ל־2 pH), הנגרמת ממיץ הקיבה, גורמת להפסקת ההפרשה של ההורמון גסטרין ובעקבותיה להפסקת ההפרשה של מיץ הקיבה (ראו איור ד–10).

על הפרשת הגסטרין מפקחות אפוא שתי מערכות משוב. מצד אחד – מערכת של **משוב חיובי** המגיבה לנוכחות פפטידים ומביאה ל**הגברת** ההפרשה של הגסטרין, ומצד שני – מערכת **משוב שלילי** המגיבה לריכוז גבוה של יוני מימן (pH חומצי מאוד) ומביאה ל**הפסקה** של הפרשת הגסטרין.

קשר לנושא

ביולוגיה של האדם:
מנגנוני משוב.



איור ד–10: ויסות ההפרשה של מיץ הקיבה באמצעות מנגנוני משוב.

4.27 העיכול במעי הדק



כשהמזון עוזב את הקיבה רובו עדיין לא מפורק. אמנם בפה ובקיבה התבצע פירוק מכני והמזון הפך לעיסה נוזלית, אך הפירוק הכימי היה חלקי: בפה החל פירוק הפחמימות ובקיבה החל פירוק החלבונים והשומנים. עיקר הפירוק הכימי מתבצע **במעי הדק**.

החלק הקדמי של המעי הדק נקרא **תריסריון**, אורכו הוא כ־25 ס״מ, כרוחבן של תריסר (12) אצבעות ומכאן שמו. המזון נדחף מהקיבה אל עבר התריסריון על ידי התכווצויות של שרירי הקיבה. נפח התריסריון קטן יחסית לנפח הקיבה, לכן המזון עובר אליו מהקיבה במנות קטנות.

בתריסריון פעילים אנזימי עיכול רבים המגיעים אליו בצינורות מהלבלב, וכן אנזימים המופרשים מדופן התריסריון עצמו (ראו טבלה ד–2). כמו כן, בעת הצורך מופרש אל התריסריון מיץ מרה.

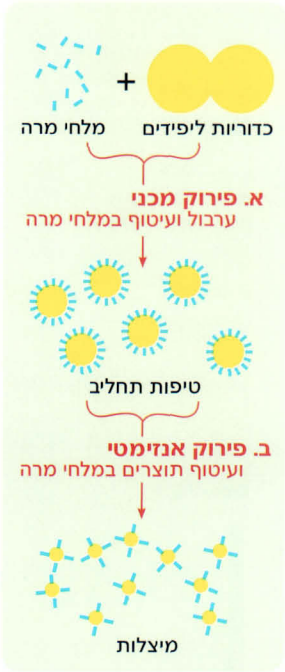
ה**לבלב** הוא בלוטת הפרשה גדולה הנמצאת מתחת לקיבה. בלוטה זו פועלת הן כבלוטת הפרשה חיצונית (אקסוקרינית) המפרישה אנזימים וחומרים שונים דרך צינור אל התריסריון, והן כבלוטת הפרשה פנימית (אנדוקרינית) המפרישה ישירות לדם הורמונים וביניהם אינסולין וגלוקגון שמווסתים את רמת הגלוקוז בדם.

אנזימים רבים מופרשים מהלבלב אל התריסריון, בהם: ליפאזות, עמילאז, ופרוטאזות כמו טריפסין וכימוטריפסין. נוסף לאנזימים מופרש מהלבלב לתריסריון גם **ביקרבונט**, שהוא חומר בסיסי המנטרל את החומציות של העיסה שמגיעה מהקיבה אל התריסריון, וכך נוצר בתריסריון pH ניטרלי (pH 6–7) החיוני לפעולת אנזימים אלה.

כשמגיע לתריסריון מזון המכיל ליפידים, בעיקר טריגליצרידים, מועבר אליו **מיץ המרה**, המיוצר בתאי ה**כבד** והנאגר עד לשעת הצורך ב**כיס המרה**.

מיץ המרה ממלא תפקיד חשוב בתחילת תהליך עיכול הליפידים. מולקולות הליפידים שבמזון אינן מסיסות במים והן נוטות להתלכד בעיסת המזון לכדוריות גדולות שלא מאפשרות פירוק כימי על ידי אנזימים. מיץ המרה מכיל חומרים הנקראים **מלחי מרה**, שבמולקולות שלהן יש חלק הידרופילי וחלק הידרופובי. תנועת דופן המעי הדק מערבלת את עיסת המזון עם מלחי המרה וגורמת לריסוק הכדוריות לטיפות זעירות. טיפות אלה מתכסות במעטפת של מלחי מרה המונעת את התלכדותן מחדש. נוצרת תמיסה מימית שבה מפוזרות טיפות מיקרוסקופיות של חומרים ליפידיים הנקראת **תחליב** (ראו שלב א באיור ד–11). יצירת התחליב היא פירוק מכני של הליפידים. בהיותן בתחליב, שטח המגע של הטיפות עם אנזימי הלבלב שבתמיסה גדול מאוד, ובכך עולה היעילות של הפירוק הכימי על ידי האנזימים. האנזימים המפרקים את הליפידים מכונים **ליפאזות**.

לא כל הטריגליצרידים (הליפידים העיקרים במזון) עוברים פירוק מלא לגליצרול וחומצות שומניות ולכן נותרים במעי גם מונוגליצרידים (גליצרול אליו מחוברת חומצת שומן אחת). המונוגליצרידים, חומצות השומן וכן כולסטרול, פוספוליפידים וויטמינים מסיסים בשומן – כולם נעטפים במלחי מרה ונוצרות טיפות זעירות הנקראות **מיצלות** (ראו שלב ב באיור ד–11). למיצלות חשיבות בספיגת תוצרי פירוק הליפידים לדם, ועל כך נלמד בסעיף הבא.



איור ד–11: א. הפיכת כדוריות הליפידים לתחליב בנוכחות מלחי המרה. ב. מלחי מרה עוטפים את תוצרי פירוק הליפידים ויוצרים מיצלות.

בליל המזון המתעכל נדחף מהתריסריון להמשך המעי הדק שבו נמשך העיכול הכימי. אל בליל המזון מופרשים אנזימים נוספים מתאי בלוטה המצויים בדופן המעי. לאורך המעי הדק מסתיים פירוק הפחמימות והחלבונים וחלק מהליפידים עד לאבני הבניין.

שאלה ד–9:

ביקרבונט ומיץ מרה אינם אנזימים, אך הם ממלאים תפקיד חשוב בפירוק הליפידים באמצעות אנזימי הליפאזות בתהליך העיכול. הסבירו את חשיבותו של כל אחד משני החומרים.

שאלה ד–10:

מהם, לדעתכם, יתרונות אורכו הרב של המעי הדק?

בטבלה ד–2 מוצגים האנזימים החשובים המשתתפים בפירוק הכימי לאורך צינור העיכול, על פי מקום היווצרותם ומקום פעולתם, וכן חומרי המצע (הסובסטרטים) ותוצרי הפירוק שלהם.

טבלה ד–2: האנזימים העיקריים הפועלים במערכת העיכול של האדם, ופעולתם

נוצרים ב:	מופרשים אל:	האנזימים העיקריים הפעילים	הסובסטרט לאנזים	תוצרי הפירוק
בלוטות רוק	חלל הפה	עמילאז ליזוזים	עמילן דופן חיידקים מסוימים	שרשרות סוכרים קצרות ומלטוז חיידקים מתים
קיבה		פפסין ליפאז (בכמות מועטה)	חלבונים ליפידים (טריגליצרידים)	פפטידים חומצות שומניות וגליצרול
לבלב	התריסריון	ליפאז	ליפידים (טריגליצרידים)	מונוגליצרידים, חומצות שומניות וגליצרול
		עמילאז	עמילן, גליקוגן	שרשרות סוכרים קצרות, ודו־סוכרים
		פרוטאזות (טריפסין וכימוטריפסין)	חלבונים	פפטידים קצרים
		נוקלאזות (RNase ,DNase)	DNA RNA	נוקליאוטידים
התריסריון ותאי דופן המעי הדק	חלל המעי הדק	ליפאז	ליפידים	מונוגליצרידים, חומצות שומניות וגליצרול
		לקטאז, מלטאז, סוכראז	דו־סוכרים	חד־סוכרים
		פפטידאז	פפטידים קצרים	חומצות אמיניות
		אנזימים מפרקי נוקליאוטידים	נוקליאוטידים	סוכר, זרחה, בסיסים חנקניים

ויסות העיכול בתריסריון ובמעי הדק

ויסות הפעילות בתריסריון ובמעי הדק מתבצע בעזרת הורמונים המופרשים לדם על ידי תאים בדופן התריסריון שהחשובים בהם הם הסקרטין והכולציסטוקינין (איור ד–12).

הסקרטין מופרש לזרם הדם בתגובה למגע של תאים בדופן התריסריון עם בליל המזון החומצי הנכנס מהקיבה. עם זרם הדם מגיע הסקרטין ללבלב וגורם להפרשת ביקרבונט מהלבלב ובכך לנטרול ה־pH החומצי בתריסריון. עלייה ב־pH שבתריסריון גורמת להפסקת הפרשת סקרטין (משוב שלילי). מנה נוספת של מזון חומצי המגיעה מהקיבה, תחדש את הפרשת הסקרטין.

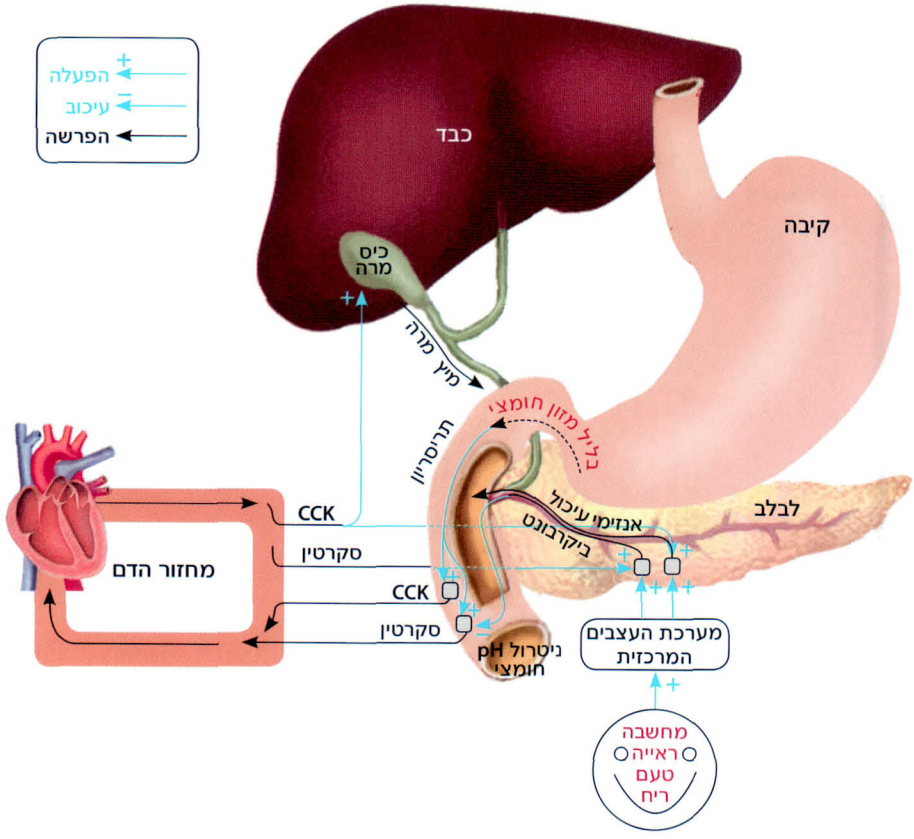
מעניין לדעת שה**סקרטין** (secrete = הפרשה) הוא ההורמון הראשון שזוהה. הוא התגלה בשנת 1902 על ידי שני חוקרים בריטיים: ***ויליאם בייליס*** (William Bayliss) ו***ארנסט סטרלינג*** (Ernest Sterling) שחקרו כיצד מבוקרת פעילות מערכת העיכול. בייליס היה זה שטבע לראשונה את המונח הורמון.

הכולציסטוקינין (CCK) מופרש אף הוא בתגובה להגעת המזון לתריסריון. בהגיעו עם זרם הדם ללבלב, הוא מזרז את ההפרשה של אנזימי העיכול מהלבלב ושל מיץ המרה מכיס המרה אל התריסריון.

גם בלבלב כמו בקיבה, גירויי טעם וראייה גורמים להפרשה מוגברת של אנזימי עיכול.

נוסף למתואר באיור, הכולציסטוקינין גם גורם לסגירת שריר השוער בין הקיבה לתריסריון, פעולה שמאיטה את התרוקנות הקיבה ומייעלת את תהליך העיכול.

לכולציסטוקינין גם השפעה מדכאת על הפרשת הגסטרין בקיבה.



איור ד–12: ויסות עצבי והורמונלי של הפרשות הלבלב אל התריסריון.

5.27 הספיגה במעי הדק

במקביל לפעילות אנזימי העיכול מתרחש במעי הדק **תהליך ספיגה** של תוצרי פירוק המזון אל זרם הדם ואל הלימפה.

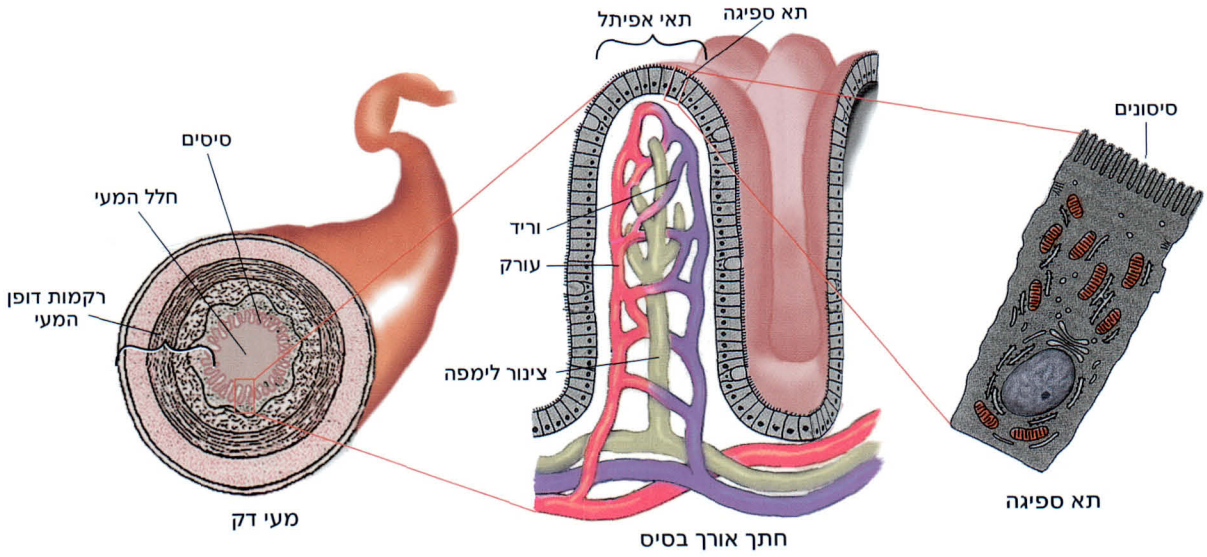
אחד המאפיינים של המעי הוא שטח הספיגה הגדול שלו. אורכו הממוצע של המעי הדק אצל אדם מבוגר הוא כ־7 מטר וקוטרו כ־3 ס״מ. על פי נתונים אלה, שטח הפנים של המעי היה צפוי להיות כ־0.6 מ״ר. אולם בפועל, השטח הפנימי של המעי הדק הוא 200–500 מ״ר – גדול משטחו של מגרש טניס!

רעיון מרכזי

התאמה בין מבנה לתפקוד:
שטח הפנים הגדול של המעי תורם לספיגה יעילה של המזון.

כיצד נוצר שטח ספיגה כה גדול ?!

הפער בין שטח הספיגה הקיים בפועל לבין השטח הפנימי המחושב יובהר בעזרת איור ד–13. בשטחו הפנימי של המעי מצויים קפלים רבים. על הקפלים יש בליטות קטנות ומאורכות הבולטות אל חלל המעי. בליטות אלה נקראות **סיסים** (או מוריגים) ואליהם מגיעים נימי דם ונימי לימפה. פני הסיסים מצופים בשכבה של תאי אפיתל ובה שלושה סוגי תאים: תאים מפרישי ריר, תאים מפרישי אנזימים ו**תאי ספיגה** שהם אלו הסופגים את המזון המעוכל אל הדם ואל הלימפה. על כל אחד מתאי הספיגה יש כ־1,000(!) בליטות קטנות המכונות **סיסונים**. הסיסים והסיסונים מגדילים מאוד את שטח הפנים של אזור הספיגה.



איור ד–13: המבנה הפנימי של המעי הדק.

לתוך כל אחד מהסיסים חודרים נימי דם ולימפה (איור ד–13). הנימים מגיעים סמוך מאוד לתאי הספיגה, גורם המגביר אף הוא את יעילות הספיגה.

תוצרי העיכול, שהם כאמור מולקולות קטנות – חד־סוכרים, חומצות אמיניות, חומצות שומניות, גליצרול, וכן ויטמינים ומלחים – עוברים מחלל המעי אל תוך תאי הספיגה בדופן המעי ומהם אל נימי הדם או אל צינורות הלימפה המצויים בסמוך (ראו איור ד–14).

תוצרי העיכול, פרט לתוצרי פירוק הליפידים, חודרים אל תאי הספיגה שבדופן המעי באמצעות נשאים בקרומי התאים. חלקם נקלטים בניגוד לכיוון מפל הריכוזים, ב**העברה פעילה (אקטיבית)** תוך השקעה של אנרגיה. תוצרי עיכול אחרים חודרים לתאי הספיגה ב**העברה סבילה (פסיבית)**.

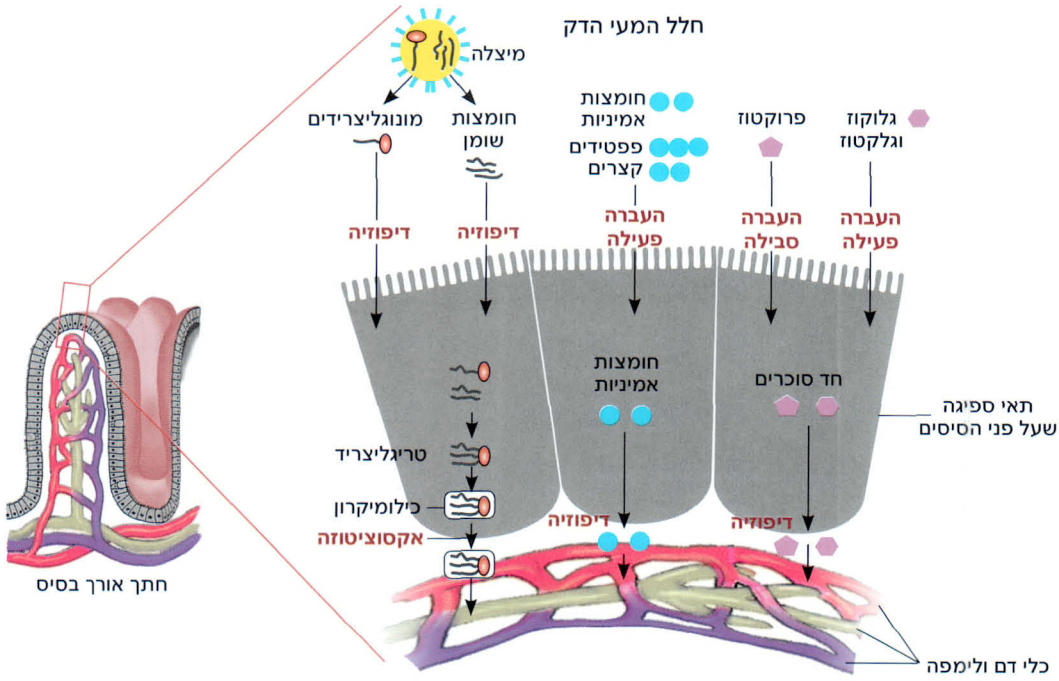
ספיגת תוצרי הפירוק של הליפידים מורכבת יותר. כפי שראינו באיור ד–11, בעזרת מלחי מרה נוצרות מיצלות המכילות את תוצרי הפירוק של הליפידים, ליפידים נוספים (לדוגמה: כולסטרול)

ויטמינים מסיסים בשומן. כאשר ריכוז החומרים הליפידיים במיצלות הנמצאות סמוך לסיסונים גבוה די הצורך, הם עוזבים את המיצלות ועוברים בדיפוזיה, בהתאם למפל הריכוזים, אל תוך תאי הספיגה (ראו איור ד–14).

קשר לנושא

תא – מבנה ופעילות:
מעבר דרך קרומים.

בתוך תאי הספיגה נבנים מהמונוגליצרידים ומחומצות השומן טריגליצרידים ופוספוליפידים חדשים. חומרים אלו נעטפים בתוך תאי הספיגה בחלבון ייחודי, ונוצר מבנה (הנקרא כילומיקרון) המועבר באקסוציטוזה, תוך השקעת אנרגיה, אל כלי הלימפה המתנקזים בסופו של דבר אל כלי הדם.



איור ד–14: דרכי הספיגה של תוצרי העיכול.

ספיגת מים

כמות הנוזלים העוברת בצינור העיכול בתנאים רגילים היא כ־9 ליטר ביממה.
מקורם של כ־2 ליטר הוא בשתייה ובמזון, ומקורם של כ־7 ליטר נוספים הוא מיצים מופרשים מכל חלקי מערכת העיכול. מתוך כל הכמות שנכנסת, רק כ־100 מ"ל נוזל עוזבים את מערכת העיכול בצואה. כל היתר שב ונספג לאורך המעי הדק וגם במעי הגס.

קשר לנושא

אקולוגיה:
התאמה לחיים ביבשה – היכולת הגבוהה של ספיגת מים ממערכת העיכול חזרה לדם.

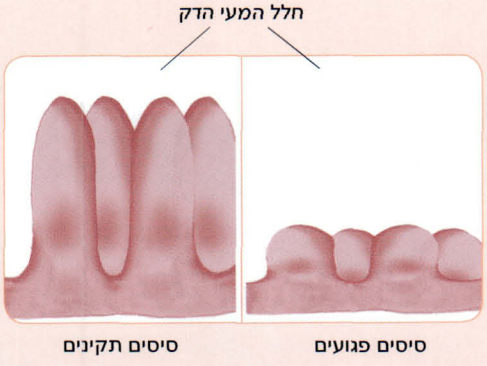
ספיגת המים דרך תאי האפיתל של המעי נעשית באופן פסיבי, ב**אוסמוזה**. המים נספגים בעקבות ספיגת תוצרי העיכול – חד־סוכרים, חומצות אמיניות ויוני מלחים, שגורמים לתמיסה בתוך תאי הספיגה ובנוזלים החוץ־תאיים להיות מרוכזת (היפרטונית) ביחס לתמיסה בחלל המעי.

על קצה המזלג...

גלוטן, סיסים ומחלת הצליאק

בשנת 1888 תיאר רופא בריטי בשם ***סמואל ג'י*** (Samuel J. Gee) תופעה תזונתית מוזרה: הוא טיפל בילדה שאכלה מגוון מזונות, ולמרות זאת סבלה משלשול וירידה במשקל והייתה למעשה במצב של תת־תזונה. מחלה זאת כונתה צליאק (מיוונית – של הבטן). הגורם למחלה התגלה בדרך מקרה, כשבמהלך מלחמת העולם השנייה, ילדים שהיו חולים במחלת הצליאק החלו להחלים. התברר שבשל המלחמה ילדים אלה לא אכלו מוצרים המכילים דגנים. מידע זה הוביל להשערה שהמחלה קשורה למרכיב מסוים בדגנים.

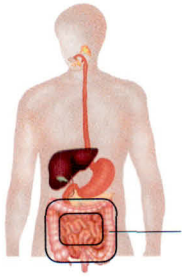
מאוחר יותר הסתבר שהמחלה נובעת מתגובה אלרגית למרכיבים של החלבון גלוטן, המצוי בדגנים כמו חיטה, שעורה, שיבולת שועל ושיפון. בחולי צליאק מתפתחת תגובה חיסונית אשר גורמת לניוון הסיסים ותאי האפיתל במעי הדק כמתואר באיור ד–15.



איור ד–15: ניוון סיסי המעי הדק במחלת הצליאק והקטנת שטח הספיגה.

ניוון הסיסים מביא להקטנת שטח הפנים של המעי, ובעקבות כך נגרמות בעיות חמורות בספיגה של חומרי המזון. בעיות ספיגה אלה עלולות לגרום למצבים של תת־תזונה, אנמיה, אוסטאופורוזיס, בעיות עצביות, בעיות פוריות, עיכוב בגדילה ועוד.
ניתן לשקם את מצב הרירית בעזרת הקפדה על תזונה נטולת גלוטן לחלוטין.
מחלת הצליאק היא מחלה שכיחה יחסית והיא פוגעת ב־0.3%–1% מהאוכלוסייה ברוב המדינות והקבוצות האתניות שבהן היא נחקרה.

6.2ד פעילויות במעי הגס



המעי הגס קצר בהרבה מהמעי הדק. אורכו כמטר, הוא רחב ואין בו קפלים, סיסים או סיסונים. אל המעי הגס מגיעים כל שאריות המזון שלא נספגו במעי הדק וכן תאים מתים מדופן המעי ומיקרואורגניזמים המצויים בו.
התנאים השוררים במעי הגס מאפשרים קיומם של מיקרואורגניזמים, שחלקם מועילים לאדם. הם מעכבים את התפתחותם של חיידקים גורמי מחלות באמצעות תחרות אתם. יתר על כן, המיקרואורגניזמים מייצרים ויטמינים אחדים, ביניהם ויטמין K וויטמין B_{12}, אשר נספגים מהמעי הגס אל הדם. במעי הגס נשלם עיכולם של חומרי מזון שלא עברו פירוק מלא במעי הדק, וזאת על ידי אנזימים שמגיעים עם שאריות המזון.

קשר לנושא

אקולוגיה:
יחסי גומלין – סימביוזה מסוג הדדיות.

שטח הספיגה של המעי הגס קטן פי 30 מזה של המעי הדק דבר המגביל את יעילות ספיגת חומרי המזון. לעומת זאת, **ספיגת המים** מהמעי הגס אל הדם יעילה מאוד, והיא חיונית לשמירת מאזן המים בגוף. ספיגת המים נעשית באופן פסיבי בעקבות העברה פעילה של מלחים שונים בעיקר

נתרן. כאשר הספיגה של המים אינה תקינה, עלולים להיגרם שלשול או עצירות (ראו הרחבה). השאריות הבלתי מעוכלות של המזון נאגרות במעי הגס לקראת הפרשתן כ**צואה**. השאריות מעורבות בצבעני המרה (חומרים המקנים לצואה את צבעה ומקורם בתוצרי פירוק ההמוגלובין ובמרכיבים אחרים במיץ המרה), חיידקים, הפרשות שונות ומעט מים שלא נספגו. כל אלו נדחסים במעי.

ויסות הפעילות במעי הגס

שאריות המזון והמיקרואורגניזמים נדחפים בתנועות פריסטלטיות על ידי שרירי המעי הגס אל הקצה הישר שלו, שם מעורר לחץ הצואה גירוי עצבי השולח מסר לשרירים הטבעתיים הסוגרים את פי הטבעת ואשר פעולתם היא רצונית. הרפיית שרירים אלו והתכווצות שרירי המעי מאפשרות את יציאת הצואה.

במעי הגס תם "מסע" המזון בצינור העיכול. בסעיף הבא נראה מה קורה לרכיבי המזון לאחר שנספגו דרך המעי לדם וללימפה.

הרחבה

בעיות של ספיגה – על שלשול ועצירות

כאמור, כאשר ספיגת הנוזלים מצינור העיכול אינה תקינה, סובל האדם משלשול או מעצירות.

שלשול הוא מצב שבו מופרשים מים בכמויות עודפות בצואה. רוב מקרי השלשול נגרמים עקב זיהום על ידי מיקרואורגניזמים כמו חיידקים, נגיפים, או טפילים. אלו משחררים רעלים, שיכולים לגרום לשלשול בשתי דרכים עיקריות:

1. הרעלן הורס את משאבות היונים בקרומים של תאי המעי וגורם לכך שיונים (יוני כלור, נתרן ואשלגן) לא נכנסים לתאי הספיגה. כתוצאה מכך הריכוז האוסמוטי בתאים אלו נמוך, ולא מתקיימת ספיגה חוזרת של מים מהמעי לדם.
2. הרעלן תוקף כימית את הליפידים המרכיבים את הקרומים של תאי אפיתל המעי וגורם להרס התאים. עקב כך, המים המגיעים אל המעי לא מסוגלים להיספג בו.

לרוב חולף השלשול לאחר יום־יומיים, כשתאי הספיגה מתחדשים. במצב של שלשול ממושך, ללא טיפול, קיימת סכנת התייבשות ואף מוות.

לעתים קרובות מתפתח שלשול בעקבות נטילת אנטיביוטיקה. מדוע ?!

במערכת עיכול תקינה באדם, מצויים כ־400 סוגים של חיידקים ידידותיים. החיידקים הידידותיים מספקים לגוף הגנה מפני חיידקים מזיקים במגוון מנגנונים, כמו תחרות על מקום מחיה (של החיידקים), שינוי רמת החומציות לרמה שאינה נוחה לחיידקים המזיקים, ייצור רכיבים הקוטלים את החיידקים המזיקים ועוד.

התרופות האנטיביוטיות שפועלות נגד חיידקים, אינן מבדילות בין חיידקים "טובים" ל"רעים", וכך במהלך הטיפול באנטיביוטיקה, מושמדים גם החיידקים הידידותיים המצויים בגוף דרך קבע. במצב זה, חיידקים מזיקים יכולים לנצל את המקום והמזון ש"התפנו" ולהתרבות. בעקבות כך, נפגעת הפעילות התקינה של מערכת העיכול. לכן, כשהחולים חייבים ליטול

אנטיביוטיקה למשך תקופה ארוכה, ממליצים הרופאים ליטול באותה תקופה גם כמוסות המכילות חיידקים ידידותיים.

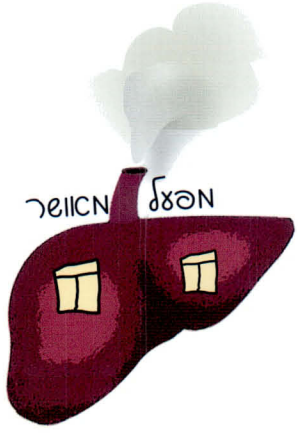
עצירות היא תופעה שבה התרוקנות המעי הגס אינה סדירה והיא נעשית בהפרשי זמן ארוכים, כשלושה ימים ויותר. ככל שהעיכוב מתמשך, מים רבים יותר נספגים, והצואה נעשית קשה ויבשה. עצירות נגרמת בין היתר בשל שתייה בלתי מספקת, אשר עלולה לגרום להתייבשות והתקשות הצואה; דיאטה דלת סיבים תזונתיים, הגורמת לכך שנפח הפסולת במעי הגס אינו מספיק כדי לגרות את דופנות המעי לתנועה פריסטלטית; התאפקות יתר בעשיית צרכים וחוסר פעילות גופנית.

קיימת גם עצירות הנובעת מבעיות פיזיולוגיות, כמו חסימות במעי הדק או הגס, סדק בפי הטבעת או טחורים שגורמים לכאבים ולהימנעות מיציאות.

3ד. חילוף החומרים של תוצרי העיכול

תוצרי העיכול שנספגו במעי מובלים בעזרת הדם והלימפה אל תאי הגוף, ומשתתפים שם בתהליכי החיים הכוללים אלפי תגובות ביוכימיות. ניתן לחלק תהליכים אלה **לתהליכי בנייה** של חומרים מורכבים מחומרים פשוטים ול**תהליכי פירוק** של חומרים מורכבים לחומרים פשוטים. כלל תהליכי הפירוק והבנייה בתאים נקראים **חילוף חומרים (מטבוליזם)**.

1.3ד הכבד – צומת מרכזי בתהליכי חילוף החומרים בגוף



בטרם הגיעו אל שאר תאי הגוף, רוב החומרים הנספגים במעי עוברים דרך ה**כבד**. בכל דקה מגיעים אל הכבד באמצעות צינורות דם ולימפה כ־1.5 ליטר דם.

את הכבד הזכרנו בהקשר של ייצור מיצי מרה המייעלים את עיכול הליפידים. אך תפקודו העיקרי של הכבד הוא תחנת מעבר, עיבוד ואגירה של תוצרי העיכול שנספגו במעי בדרכם אל תאי הגוף.

חלק מתוצרי העיכול המגיעים לכבד, ממשיכים עם זרם הדם אל תאי הגוף בלי שחל בהם שינוי. חלק אחר עובר בכבד שינויים, ורק לאחר מכן החומרים מוחזרים אל מחזור הדם ובאמצעותו מגיעים אל תאי הגוף. חלק מתוצרי העיכול נאגר בתאי הכבד ללא שינוי, או לאחר שעברו שינוי. התוצרים שנאגרו משתחררים לפי הצורך אל זרם הדם ובאמצעותו מגיעים לכל התאים.

בכבד מתרחשים תהליכים רבים, בהם:

1. מקצת הגלוקוז המגיע לכבד עובר דרכו לזרם הדם ללא שינוי. רוב הגלוקוז המגיע לכבד משמש לבניית גליקוגן – **חומר תשמורת** הנאגר בכבד. השאר משמש לבניית שומנים הנאגרים בכבד או מועברים לאגירה בתאי שומן.
2. תוצרים של עיכול הליפידים עוברים עיבוד לצורך תהליכים שונים בתאי הגוף, כמו בניית קרומים.
3. *מחומצות אמיניות* נבנים חלבוני פלסמת הדם (כמו אלבומין) וחלבונים החיוניים לתהליך קרישת הדם (כמו פיברינוגן). אנזימי הכבד יכולים להמיר חומצה אמינית אחת באחרת (פרט ל־8 החומצות החיוניות).

חלבונים המגיעים לדם בעקבות מותם של תאי גוף עוברים פירוק בכבד. מפעולת הפירוק מתקבלות חומצות אמיניות הממשיכות אל תאי הגוף. עודפים של חומצות אמיניות יכולים לשמש לבניית ליפידים.

4. החומרים המזיקים, מקצתם תוצרים טבעיים של פירוק המזון, עוברים בכבד שינויים כימיים שהופכים אותם לבלתי מזיקים. לדוגמה: האמוניה שמקורה מפירוק של חומצות אמיניות בתאי הכבד, היא חומר רעיל לגוף. בכבד נקשרת האמוניה ל־CO_2 ונוצר שתנן, שהוא חומר לא רעיל, המועבר באמצעות זרם הדם אל הכליות ומופרש בשתן. גם סמים, אלכוהול וכן תרופות מסוימות, עוברים בכבד שינויים, שהופכים אותם לחומרים בלתי מזיקים.
5. בכבד נאגרים פרט לגליקוגן ושומן גם ויטמינים כמו A, D ו־B_{12} וכן מינרלים כמו ברזל ונחושת. כאשר ריכוזם בדם יורד, הופכים החומרים המאוחסנים בכבד לזמינים ומאפשרים לגוף להמשיך ולהתקיים פרק זמן מסוים גם ללא אספקה חיצונית של חומרי המזון הללו.

את מגוון הפעילויות בכבד ממחישה בדיחה הרווחת בין תלמידי רפואה: אם סטודנט נשאל על מיקום תהליך כלשהו בגוף האדם והוא אינו יודע את התשובה, אם יענה: "בכבד", רוב הסיכויים שתשובתו תהיה נכונה.

כדי להבין את חשיבותו הגדולה של תפקוד הכבד יש לזכור שהרכב הדם המגיע מהמעי לכבד אינו קבוע, והוא תלוי בהרכב המזון ובתדירות צריכתו. לפעילות הכבד תרומה משמעותית לשמירה על הרכב הדם ולשמירה על סביבה פנימית קבועה.
אחת התרומות החשובות של הכבד היא ויסות צריכת האנרגיה. למרות שאספקת המזון אינה רציפה, הצורך באנרגיה הוא רצוף. כפי שכבר הבנתם, התמודדות הגוף עם מצב כזה היא קודם כול שימוש במה שזמין. כשיש עודפים – נבנים חומרי תשמורת המשמשים כ**מאגרי אנרגיה**, כשחסר מזון – מנוצלים המאגרים.

הפעילויות שמבוצעות על ידי הכבד הן כה חשובות לגוף, עד שללא פעילות תקינה של הכבד אדם אינו יכול לחיות יותר מ־24 שעות. כיום אין איבר מלאכותי או מכשיר שיוכל למלא את תפקודי הכבד (שלא כמו לב או כליה).

הרחבה

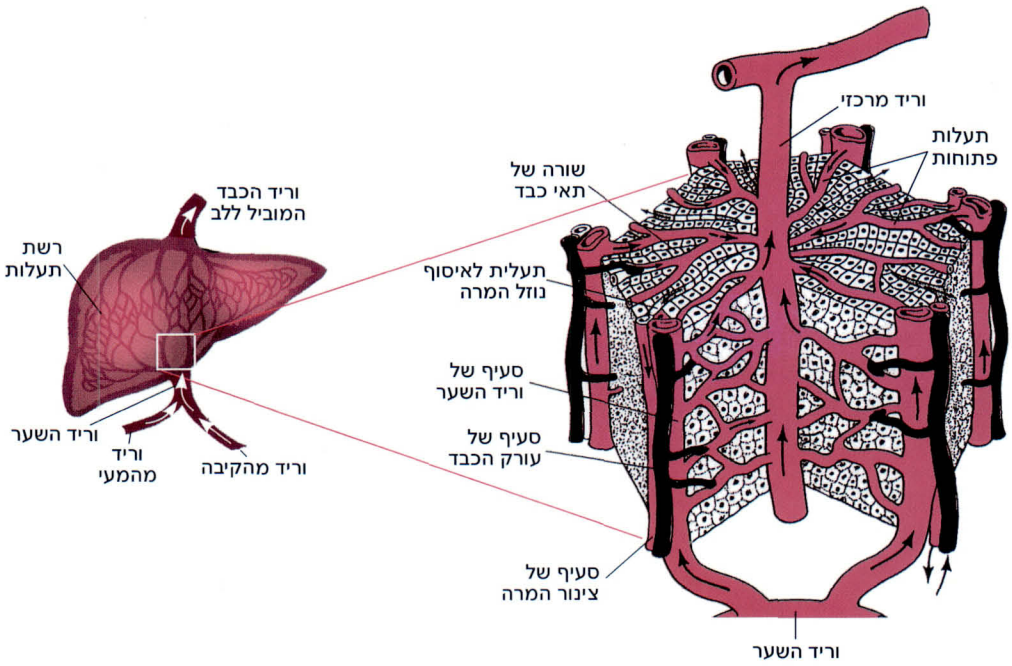
השתתפות הכבד בשמירה על רמת הגלוקוז בדם

כאשר רמת הגלוקוז בדם עולה בעקבות ארוחה, מופרש מהלבלב ההורמון אינסולין, המגביר את חדירות התאים לגלוקוז, ובעיקר תאי שריר ותאי שומן. בכבד האינסולין גורם להפיכה של עודפי גלוקוז לגליקוגן ולהפיכה של גלוקוז לשומנים.
בין הארוחות ובעת צום, כאשר רמת הגלוקוז בדם יורדת, הפרשת האינסולין מהלבלב מעוכבת, ומהלבלב מופרש ההורמון גלוקגון. הגלוקגון גורם לפירוק הגליקוגן שבכבד, וגלוקוז משתחרר לדם. מאגר הגליקוגן בכבד יכול לספק גלוקוז לכ־10–13 שעות.
בעת מחסור חמור בגלוקוז, למשל בעת פעילות שרירים מאומצת מאוד, מסוגל הכבד לייצר גלוקוז מחומצת חלב, הנוצרת בשריר בעת פעילות מאומצת, וכן מגליצרול ומחומצות אמיניות שמצויות בו. גם פעולה זו מופעלת על ידי ההורמון גלוקגון.
בעקבות ארוחה נוספת, רמת הגלוקוז בדם עולה, מאגר הגליקוגן נבנה מחדש וחוזר חלילה.
שני ההורמונים פועלים באמצעות משוב שלילי.

עוד על
פעילות השרירים במאמץ:
בפרק ה עמוד 155.

מבנה הכבד מותאם לתפקודיו

כל החומרים הנספגים במעי מגיעים אל הכבד במערכת מיוחדת הנקראת **מערכת שער**. צינורות הדם והלימפה המגיעים מהמעי הדק ומהקיבה מתנקזים אל וריד השער הנכנס לכבד. וריד השער מתפצל בכבד לרשת של תעלות שהדם הזורם בהן בא במגע ישיר עם תאי הכבד, כפי שניתן לראות באיור ד–16. חומרים חודרים מהדם אל תאי הכבד ויוצאים מן התאים אל הדם. התעלות מתלכדות לווֹרידים דקים ואֵלו לווריד גדול (וריד הכבד), שמוביל את הדם אל הלב. נוסף לווריד השער, מגיע לכבד גם עורק המוביל חמצן לתאי הכבד.



איור ד–16: מימין: מבנה מיקרוסקופי של קטע ברקמת הכבד. **משמאל:** מערכת השער של הכבד.
שימו לב! באיור לא מצוינים העורקים המובילים חמצן לכבד.

שאלה ד–11:

כיצד מסייע מבנה מערכת השער של הכבד לתפקודם של תאי הכבד?

2.3ד חילוף החומרים בתאים

כאמור, תוצרי העיכול מגיעים עם זרם הדם ונקלטים בתאים. חומרים אלה אינם נשארים בתוך התא בצורה שבה הגיעו אליו, אלא הם משתתפים עם חומרים שכבר מצויים בתא בתהליכים ביוכימיים שונים. בכל אחד מתאי הגוף מתקיימים באופן רצוף ובו־זמני אלפי תהליכי בנייה ופירוק בהתאם לצרכיו של התא.

לקיום הפעילויות השוטפות של התאים והגוף דרושה, כאמור, אספקה רציפה של אנרגיה. עקרונית, התאים יכולים להפיק אנרגיה מפחמימות, שומנים וחלבונים, שיכולים להחליף באופן חלקי אלו את אלו. ברוב הרקמות בגוף קיימת העדפה לגלוקוז, אך בלב ובשרירי השלד קיימת

העדפה לחומצות שומן. במצבים של מחסור חמור בגלוקוז, כמו בצום או כאשר התפריט דל בפחמימות, יכולים רוב תאי הגוף להפיק אנרגיה מחלבונים ושומנים. שלא כמו רוב תאי הגוף, תאי מערכת העצבים יכולים להפיק אנרגיה באופן בלעדי מגלוקוז. במצב של מחסור חמור בגלוקוז, מתקיים בכבד תהליך שבו הופכות חומצות אמיניות וחומצות שומן לגלוקוז המספק את צורכי תאי מערכת העצבים.

הפקת אנרגיה בתאים "מכלה" את רוב רכיבי המזון. עם זאת, במקצת רכיבי המזון התא משתמש לבניית חלבונים תפקודיים ולהחלפת חלקי תא. יש לזכור שכל החומרים הבונים את תאי הגוף נמצאים בתחלופה מתמדת. לדוגמה, חומצות אמיניות שהתקבלו בארוחה האחרונה יכולות להשתלב בחלבונים המרכיבים את קרום התא או באנזימים חדשים שהתא מייצר. חומצות השומן מהחמאה שנאכלה לפני יומיים יכולים להשתלב בקרומי תאים חדשים ברירית הקיבה, שמחליפים תאים שנהרסו. כך גם לגבי מרכיבים אחרים בתאים.

שאלה ד-12:

נהוג לכנות את הכבד "בית החרושת של הגוף". הסבירו מדוע.

שאלה ד-13:

כשלועסים לחם זמן ממושך מתחילים להרגיש טעם מתוק בפה. הסבירו מדוע.

שאלה ד-14:

א. לאחר ארוחה דשנה אנו חשים מלאות. מאיזה חלק של מערכת העיכול מועברת, לדעתכם, תחושה זאת? הסבירו.

ב. מדוע אנחנו חשים עייפות אחרי ארוחה דשנה?

שאלה ד-15:

פי הקיבה והשוער הנמצאים בכניסה לקיבה וביציאה ממנה מסייעים לשמירה על התנאים הייחודיים השוררים בקיבה. הסבירו כיצד.

שאלה ד-16:

מהו היתרון שמקנה שטח הפנים הגדול של המעי הדק? התייחסו לתהליכים העיקריים המתרחשים במעי.

שאלה ד-17:

אלו חלקים של מערכת העיכול מעורבים בשמירה על מאזן המים בגוף? באלו מצבים פעולתם משתבשת?

שאלה ד-18:

במה שונה מבנה המעי הדק מזה של המעי הגס?

שאלה ד-19:

החיידקים במעי הגס מקיימים יחסים של סימביוזה מסוג הדדיות עם האדם. מהי התועלת שמפיק כל אחד מהשותפים?

שאלה ד-20:

מהו היתרון ב"חלוקת התפקידים" בין האזורים השונים של מערכת העיכול?

שאלה ד-21:

אדם שנפגעה אצלו מערכת העיכול יכול לחיות שנים רבות בעזרת עירוי (אינפוזיה) של תמיסת חומרי מזון ישירות אל דמו. כיצד "עוקף" הטיפול הזה את הצורך במערכת העיכול? אלו חומרים תכיל תמיסת העירוי?

שאלה ד-22:

היעזרו באיור ד-14 ותארו אלו קרומים עוברים חומרי המזון מחלל צינור העיכול עד הגעתם לתא בגוף.

שאלה ד-23:

הארוחה של משפחת ישראלי כוללת אורז מלא עם עדשים, סטייק עוף וסלט.

א. מהם רכיבי המזון העיקריים בכל אחד ממרכיבי תפריט זה?

ב. הכינו במחברותיכם טבלה לפי הדוגמה שלהלן וסכמו בה את שלבי פירוקם (המכני והאנזימטי) של הרכיבים שציינתם בחלק א של השאלה, וכן את תהליך ספיגתם ותהליכי הוויסות המעורבים בשלבים השונים של העיכול.

ג. הוסיפו כותרת לטבלה.

איבר במערכת העיכול	פירוק מכני	פירוק כימי			ספיגה	מנגנוני הוויסות המופעלים
	מתבצע על־ידי	רכיב המזון העיקרי	אנזים מפרק	תוצר הפירוק	יש / אין אם יש – מה נספג	עצבי / הורמונלי
פה						
ושט						
קיבה						
מעי דק						
מעי גס						

ד.4 העיכול במעלי גירה

מי מאתנו לא ראה את העזים הבדואיות או את הגמלים המשוטטים במדבר וניזונים בעיקר מקוצים יבשים, המכילים כמות גדולה של סיבים קשי־עיכול? ייתכן ששמעתם גם על פרות באזורים נידחים בהודו, שניזונות מפסולת נייר המתגלגלת ברחובות. חִשבו גם על אותם מעלי גירה בעלי משקל גוף גבוה, שתזונתם מורכבת אך ורק ממזון צמחי קשה עיכול, כמו פרות מרעה שמשקלן 400–500 ק"ג, ג'ירפות שמשקלן 800–1200 ק"ג, בופלו אפריקאי – 800–900 ק"ג או גמל – 400–500 ק"ג.

מה דעתכם – כיצד מזון "דל" כל־כך מאפשר לחיות גדולות ממדים לחְיות ולייצר חלב?



חסה היא דוגמה למזון צמחי המורכב מעלים. אם האדם היה ניזון מחסה בלבד, היה עליו לאכול כ־11 ק"ג חסה מדי יום רק כדי לספק את הצרכים ה**אנרגטיים** שלו, בלי להתחשב בצרכים תזונתיים נוספים. (מ־100 גרם חסה מפיק האדם כ־18 קלוריות. אדם ממוצע זקוק לכ־2,000 קלוריות ליום.)

פרת מרעה, שמשקלה כ־500 ק"ג, זקוקה לכ־15,000 קלוריות ליום. בהנחה שתזונתה מורכבת מעשב בלבד, שערכו הקלורי דומה לזה של החסה, ובהנחה – לצורכי החישוב בלבד – שהיא מפיקה מפירוק העשב מספר דומה של קלוריות לזה שמפיק האדם, היה עליה לאכול כ־83 ק"ג חסה מדי יום !!!

למעשה, פרת מרעה שמשקלה כ־500 ק"ג אוכלת רק כ־40–60 ק"ג ירק טרי או כ־17–20 ק"ג ירק יבש מדי יום.

שאלה ד–24:

מהו המרכיב הצמחי העיקרי בחסה שאינו מתעכל במערכת העיכול של האדם? מה גורלו של מרכיב זה בסופו של תהליך העיכול באדם?

אם מגבלות העיכול של מעלי הגירה ואוכלי צמחים אחרים היו זהות לאלו של האדם, הם היו צורכים כמויות גדולות מאוד של מזון והיו זקוקים לשטחי מרעה גדולים בהרבה.

בסעיף זה נכיר את מערכת העיכול הייחודית של מעלי הגירה, ונראה כיצד היא מאפשרת ניצול מזונות סיביים קשי עיכול והסתפקות במזונות דלים בחלבון.

ד.4.1 מבנה ותפקוד מערכת העיכול במעלי גירה

מעלי הגירה מסוגלים לצרוך בזמן קצר כמות גדולה מאוד של מזון ולהמשיך בעיבודו זמן רב לאחר האכילה. מערכת העיכול של מעלי הגירה היא בעלת נפח גדול והיא מהווה כ־25%–35% ממשקלם של מעלי הגירה הבוגרים. לשם השוואה, מערכת העיכול של האדם מהווה רק כ־8% ממשקלו.

במערכת העיכול של מעלי הגירה יש מרכיב ייחודי – **מערכת מדורים** המהווה 60%–70% מנפח מערכת העיכול. מערכת מדורים זו מאפשרת להם לעבד כמויות גדולות של מזון, לקיים את תהליכי העיכול הייחודיים להם ולספוג כבר שם חלק מתוצרי העיכול.

הוושט, התריסריון, המעי הדק, המעי הגס, המעי העיוור, כיס המרה, הכבד והלבלב של מעלי הגירה, דומים כולם במבנה ובתפקוד לאיברים אלו במערכת העיכול של האדם. גם תפקידו של הפה במעלי הגירה דומה לזה של אדם, אלא שמבנה הלסת וצורת השיניים מותאמים לתזונה צמחונית (ראו סעיף ד1.2, עמודים 96–98).

שאלה ד–25:

מה מאפיין את הרכב השיניים ומבנה הלסת של אוכלי צמחים? כיצד הם מותאמים לתפקודם? תוכלו להיעזר באיור ד–7.

על העלאת גירה...

כאמור, מעלי הגירה צורכים כמויות גדולות של מזון צמחי שהם אוכלים תוך זמן קצר. בלעיסה הראשונית של המזון נוצרים כדורי מזון ובהם רוק רב, המכיל מינרלים רבים.

כדורי המזון נכנסים בעזרת התנועה הפריסטלטית של הוושט למדור הראשון של המערכת, הנקרא כרס. המזון האגור בכרס מועלה בחזרה אל הפה במנות קטנות ללעיסה נוספת, ממושכת ויסודית יותר מהראשונה, תוך כדי הפרשה רבה של רוק. העלאת המזון חזרה לפה, הרווייתו ברוק ולעיסתו בשנית נקראת **העלאת גירה**, והיא נעשית באמצעות היפוך התנועה הפריסטלטית שבוושט. העלאת הגירה מאפשרת עיכול יסודי ויעיל יותר של המזון. אצל פרה מניבה, כמות הרוק המופרשת עשויה לנוע בין 75 ל־150 ליטר ליום.



לאחר הלעיסה השנייה, נבלע המזון הרווי רוק וחוזר אל הכרס כשחלקיקי המזון קטנים יותר, ובכך גדלה יעילות הפירוק. המזון שוהה בכרס בין 9 ל־12 שעות. חלקיקים קשי עיכול עשויים להישאר זמן רב יותר – אף 24–48 שעות.

העלאת גירה מקנה למעלי הגירה יתרון אבולוציוני שכן הם מסוגלים לאכול במהירות כמות גדולה של מזון בלי להשתהות בְּמקום שעלולים להימצא בו טורפים המסכנים אותם.

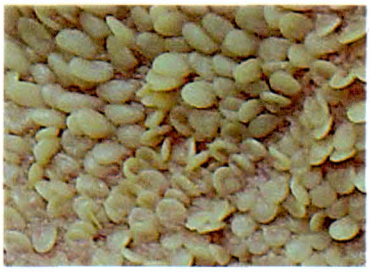
מערכת מדורי העיכול של הפרה

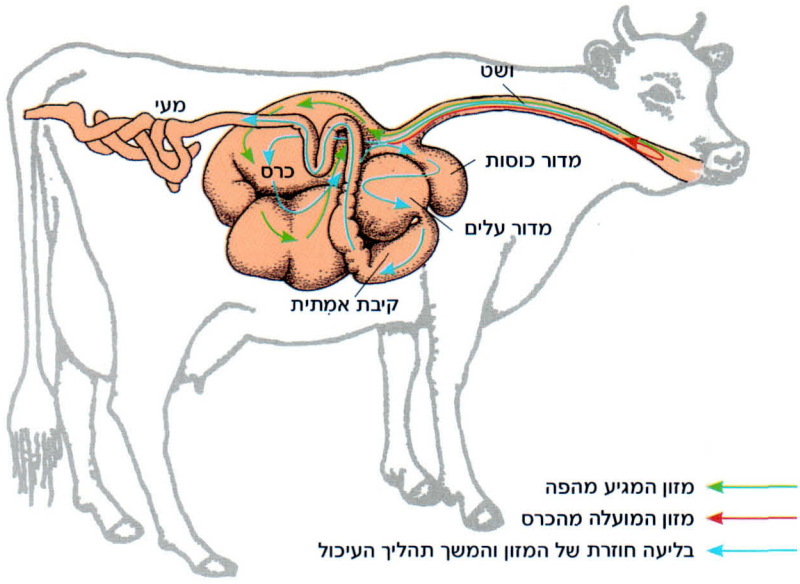
נכיר את מערכת מדורי העיכול של הפרה (איור ד–17) כדוגמה למערכת הקיימת במרבית מעלי הגירה. מערכת זו מורכבת מארבעה מדורים. מדורים אלה מכונים בשפה העממית **מערכת קיבות** (אף ששלושה מהם אינם כאלה כפי שיובהר בהמשך). המדורים הם: כרס, מדור כוסות, מדור עלים וקיבה אמִתית (קיבת מיצים).

הכרס היא המדור הראשון בסדר זרימת המזון והגדול שבמדורי העיכול. נפח הכרס בפרה עשוי להגיע עד 25%–35% מנפח גופה (כ־100–150 ליטר ואף יותר). זהו איבר שרירי הלש ומערבל את המזון, ומצויה בו אוכלוסייה עצומה ומגוונת של מיקרואורגניזמים, כגון חיידקים, אורגניזמים חד־תאיים ופטריות.

למרות שתאי הכרס אינם מפרישים אנזימי עיכול, מתחילים בה תהליכי פירוק כימי של המזון ואף מתקיימים בה תהליכי ספיגה.

הכרס מותאמת לספיגה הודות לאלפי בליטות עשירות בכלי דם (פטמיות) המצויות על הדופן הפנימית שלה (איור ד–17).





איור ד–17: מימין: מבנה מערכת העיכול של הפרה. **משמאל:** פטמיות בכרס.
שימו לב לחצים המתארים את מסלול המזון במערכת העיכול של הפרה.

כיצד, אם כן, למרות שתאי הכרס לא מפרישים אנזימי עיכול, בכל זאת מתקיים בה פירוק כימי של המזון? אלו חומרים נספגים בה? מהו ה"סוד" של מעלי הגירה המאפשר להם לחיות רק על עשב? על ייחודיות תהליכי העיכול בכרס וחילוף החומרים המיוחד במעלי הגירה נלמד בפירוט בהמשך, אך קודם נסקור בקצרה את שאר חלקי מערכת העיכול של הפרה.

נוזלי הכרס, כשבתוכם חלק מהמיקרואורגניזמים, מזון לא מעוכל ותוצרי עיכול שלא נספגו בכרס, עוברים למדורים הבאים של המערכת על ידי התכווצות שרירי הכרס.

מדור הכוסות ומדור העלים – בשני מדורים אלה מתקיימים תהליכי פירוק מעטים בלבד. התכווצות מדור הכוסות דוחפת את נוזלי הכרס, המיקרואורגניזמים וחלקיקי המזון אל מדור העלים. מדור העלים בנוי עלים־עלים בעלי פטמיות ספיגה. הפטמיות סופגות אל זרם הדם מים, אמוניה ותוצרי לוואי של פעילות המיקרואורגניזמים המסיסים במים.

הקיבה האמִתית היא המדור שאליו מועברות שאריות מזון שטרם נעכלו, בתוספת המיקרואורגניזמים. הכינוי "קיבה אמִתית" הוענק למדור זה בשל הדמיון בין התהליכים המתרחשים בה לבין התהליכים המתרחשים בקיבת האדם. הקיבה האמִתית קטנה יחסית למדורים הקודמים ודרגת החומציות (pH) בה היא 3–4. במדור זה מתחיל העיכול על ידי אנזימים המופרשים מדופן הקיבה בדומה למערכת העיכול של האדם.
לאחר שהות בקיבה האמִתית, עוברת העיסה המכילה גם מיקרואורגניזמים להמשך צינור העיכול: המעי הדק והמעי הגס.

התריסריון והמעי הדק

אורכו של התריסריון במעלי הגירה דומה לזה של האדם באופן יחסי לגודלם, ואילו אורכו של המעי הדק במעלי הגירה ארוך מזה של האדם (מגיע בפרות עד 20–25 מטרים), אך דומה לו במבנהו ובתהליכים המתקיימים בו. במעי ממשיך תהליך הפירוק האנזימטי. פירוק חלבונים, ליפידים ופחמימות מתבצע בעזרת אנזימים המופרשים מהלבלב לתריסריון ומִתאים המצויים בדופן

המעי. כמו אצל האדם, מיצי המרה הנוצרים בכבד מפרקים באופן מכני את הליפידים ומייעלים בכך את הפירוק האנזימטי שלהם.

במעי הדק מפורקים גם חלבונים ורב־סוכרים שמקורם במיקרואורגניזמים עצמם וכן חומרים ש"חמקו" מפירוק בכרס.

במעי הדק נספגים תוצרי פירוק המזון – חומצות אמיניות, חומצות שומן, ויטמינים ומינרלים, וכן כמויות קטנות של גלוקוז. תוצרי הפירוק שנספגים מועברים באמצעות הלימפה והדם לכבד. מהכבד מגיעים תוצרי הפירוק באמצעות מערכת הדם לכל תאי הפרה.

המעי הגס

כמו באדם, גם במעי הגס של הפרה פועלים מיקרואורגניזמים המפרישים אנזימים שמפרקים מזון ושרידים של תאי המיקרואורגניזמים. אולם לתהליכים המתרחשים במעי הגס יש משמעות תזונתית משנית מבחינה כמותית, בשל נפחו המצומצם של המעי וכושר הספיגה המוגבל שלו. כמו אצל האדם, גם במעי הגס של הפרה נספגים ביעילות יונים (נתרן ואשלגן) ובעקבותיהם המים.

2.4ד התהליכים הייחודיים המתרחשים בכרס

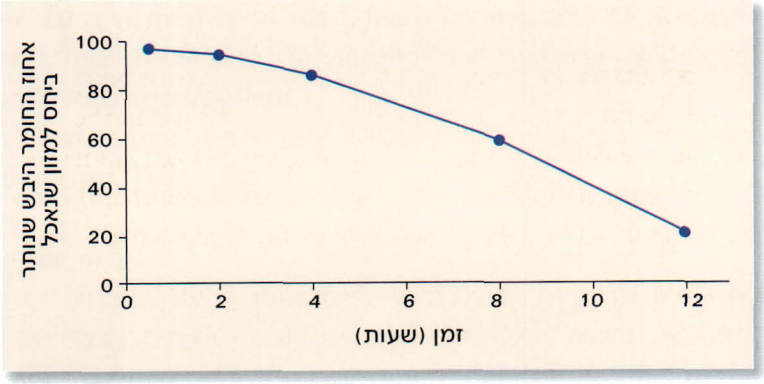
תאי הכרס אינם מפרישים אנזימים. יתר על כן, בבדיקת האנזימים המופרשים על ידי תאי הפרה בשאר אברי מערכת העיכול, לא נמצאו אנזימים המסוגלים לפרק סיבים – תאית (צלולוז) והמיצלולוז (רב־סוכר נוסף בדפנות של תאי הצמח), המהווים מרכיב מרכזי בדפנות של תאי הצמחים.

מרבית המזון שהפרה אוכלת (בין 40% ל־80%) מתפרק בכרס הודות למיליארדי **מיקרואורגניזמים** החיים בה והמייצרים ומפרישים מכלול גדול של אנזימים. החשובים מבין אנזימים אלו הם **צלולאזות** (מפרקי תאית), **והמיצלולאזות** (מפרקי המיצלולוז). הסיבים עוברים פירוק רב־שלבי עד ליחידות המבנה שלהם – חד־סוכרים. המיקרואורגניזמים מייצרים ומפרישים לחלל הכרס גם **עמילאזות ופרוטאזות**.

פירוק דופן התא הצמחי על ידי המיקרואורגניזמים משחרר לחלל הכרס, נוסף לחד־סוכרים, גם את החומרים המצויים בתוך התא הצמחי.

שאלה ד–26:

חוקרים מדדו בכרס את השינוי לאורך זמן באחוז החומר היבש שנותר ממזון צמחי שנאכל על ידי הפרה. תוצאות הניסוי מוצגות באיור ד–18.



איור ד–18: אחוז החומר היבש שנותר מהמזון שנאכל במשך שהותו של המזון בכרס.

א. תארו את השינויים שחלו באחוזי החומר היבש של המזון שנאכל במהלך שהייתו בכרס. הסבירו שינויים אלו.

ב. מהו, לדעתכם, גורל החד־סוכרים שהתקבלו מפירוק של הרב־סוכרים שביצעו המיקרואורגניזמים בכרס?

"היעלמותם" של החד־סוכרים

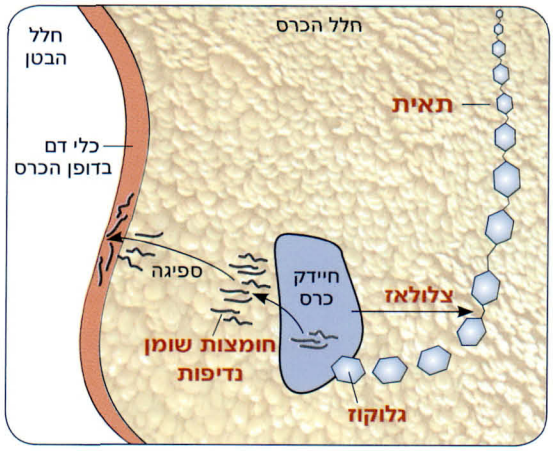
במקביל לירידה בתכולת הסיבים בכרס כתוצאה מפירוקם על ידי המיקרואורגניזמים, היינו מצפים לעלייה בריכוז החד־סוכרים **הזמינים לפרה**, אך מסתבר שלא כך הוא.

כל החד־סוכרים, כולל הגלוקוז – תוצרי הפירוק של הסיבים ורב־סוכרים אחרים שפורקו כגון עמילן, לא נספגים בכרס הפרה אלא נקלטים על ידי המיקרואורגניזמים המצויים בכרס. בתאי המיקרואורגניזמים הופכים מרבית החד־סוכרים לגלוקוז. הגלוקוז משמש אותם לבניית חומרים שונים בגופם ולהפקת אנרגיה הדרושה לקיומם ולהתרבותם. הפקת האנרגיה מגלוקוז נעשית בתוך תאי המיקרואורגניזמים בתהליך של **תסיסה** שהוא תהליך אל־אווירני.

עוד על
תסיסה ותהליכי הפקת אנרגיה בתאים:
בפרק ה בסעיף ה3.4, עמודים 150-156.

בתהליך התסיסה, בניגוד לנשימה תאית אווירנית, אין פירוק מלא של הגלוקוז, ובין תוצריה של התסיסה מצויות **חומצות שומן קצרות ונדיפות**, שבהן נותרת אנרגיה רבה. חומצות השומן הנדיפות מופרשות מתאי המיקרואורגניזמים לחלל הכרס והן נספגות בקלות דרך דופן הכרס אל מערכת הדם של מעלה הגירה ומשם אל כל תאי הגוף, כפי שניתן לראות באיור ד–19.

חומצות השומן הנדיפות משמשות בתאים של מעלה הגירה להפקת אנרגיה בתהליך נשימה תאית אווירנית וכחומר גלם לבנייה של שומנים, פחמימות וחלבונים. הגזים, פחמן דו־חמצני ומתאן, שגם הם תוצרים בתהליך התסיסה של המיקרואורגניזמים, מופרשים לחלל הכרס. הגזים מורחקים באמצעות גיהוקים ונפיחות, או שהם נספגים לדם ומופרשים בתהליך הנשימה.



איור ד–19: פירוק תאית על ידי אנזים חיידקי (צלולאז) וספיגת חומצות השומן הנדיפות בכרס מעלה הגירה.

אנו רואים אם כן שמעלה הגירה אינו ניזון מהחד־סוכרים המתקבלים מפירוק הסיבים שבמזונו, אלא מחומצות השומן הנדיפות המופרשות כתוצר לוואי של תהליך הפקת האנרגיה (התסיסה) בתאי המיקרואורגניזמים.

חומצות השומן הנדיפות תורמות כ־60% מכלל האנרגיה שמעלי הגירה מפיקים מהמזון! את 40% הנותרים של האנרגיה מספקים רכיבי מזון ש"חמקו מתקיפת" אנזימי המיקרואורגניזמים או שהם עמידים בפניהם, וכן רכיבי המיקרואורגניזמים עצמם. פירוק הרכיבים משני מקורות אלה מתבצע על ידי אנזימים המופרשים ממערכת העיכול של מעלה הגירה, ותוצרי הפירוק משמשים אף הם את מעלה הגירה לפעולות החיים. יוצא אפוא שהפרה ניזונה גם מהמיקרואורגניזמים עצמם.

שאלה ד–27:

בתהליך התסיסה המתבצע בכרס על ידי המיקרואורגניזמים מופרשים לכרס תוצרי לוואי שונים, כמו חומצות שומן נדיפות והגז מתאן. חומצות השומן הנדיפות מנוצלות על ידי מעלי הגירה, ואילו הגז מתאן משתחרר אל מחוץ לגופם של מעלי הגירה ללא ניצולו. הסבירו את ההיגד הבא:

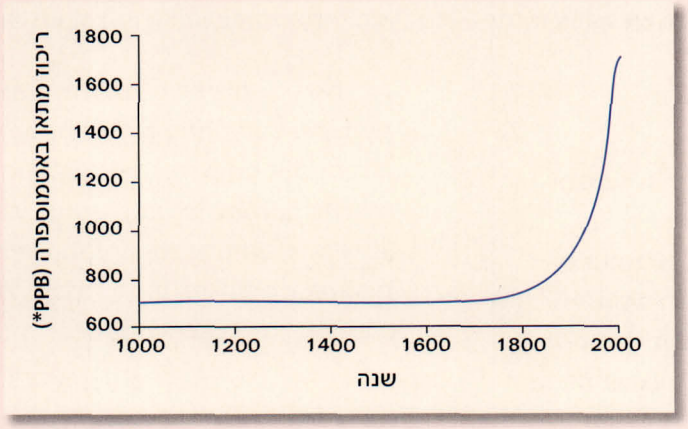
"העובדה שהמתאן משמש גז בעירה היא הוכחה לכך שתהליך התסיסה הוא תהליך לא יעיל למיקרואורגניזמים (מבחינה אנרגטית)".

על קצה המזלג...

פרות, מיקרואורגניזמים והתחממות כדור הארץ

לתהליך התסיסה המתרחש בתאי המיקרואורגניזמים שבכרס הפרה יש גם היבט אקולוגי. גז המתאן (CH_4) הנוצר בתהליך זה מהווה כ־14% מגזי החממה (שעיקרם פחמן דו־חמצני) אשר נחשדים כאחראים העיקריים להתחממות האטמוספרה סביב כדור הארץ.

מתאן נפלט לאטמוספרה גם כתוצאה מהתסיסה של המיקרואורגניזמים המצויים בערמות המכילות הפרשות של בעלי חיים.



איור ד–20: עלייה בריכוז הגז מתאן באטמוספרה לאורך השנים.

PPB* הוא ערך שמציין ריכוז יחסי של חומר מסוים המהווה יחידה אחת מתוך בִּליון (מיליארד) יחידות שנבדקו.

מעניין לדעת, שאיסוף הנתונים על הרכב הגזים באטמוספרה מלפני אלף שנים נעשה על ידי בדיקת בועות אוויר שנכלאו בקרחונים שגילם ידוע.

מהו מקור החלבון למעלי הגירה ?!

כל בעלי החיים זקוקים לחלבון שיספק להם את החומצות האמיניות, הנחוצות לבניית חלבוני גופם, וכן לבניית חומרים המיוצרים על ידם, למשל חלב.

כפי שלמדנו, מעלי הגירה בטבע ניזונים ממזון צמחי, שבניגוד למזון הטורפים אינו עשיר בחלבון. מעלי הגירה אף מתקיימים באזורים שבהם המזון דל במיוחד, כמו למשל הגמלים החיים במדבר. כיצד, אם כן, מעלי הגירה משלימים את המחסור בחלבון במזונם הדל?

המקורות של החומצות האמיניות המשמשות את מעלי הגירה לבניית חלבונים שונים מאלו של בעלי חיים אחרים.

רק 30%–40% מהחומצות האמיניות שמשמשות את מעלי הגירה מקורו בחלבונים במזון (שלא פורקו על ידי המיקרואורגניזמים). המקור העיקרי של החומצות האמיניות המשמשות את מעלי הגירה הוא החלבון המיקרוביאלי. **חלבון מיקרוביאלי** הוא כינוי לכלל החלבונים המרכיבים את המיקרואורגניזמים, ביניהם אנזימים, חלבוני קרום ופפטידים בדופן.

חלק מהמיקרואורגניזמים שמתרבים בכרס עובר עם בליל המזון מהכרס ומגיע לקיבה האמִתית של מעלה הגירה. כל יום עוברים בין 2 ל־5 ק"ג חומר יבש של מיקרואורגניזמים, כאשר 45%–60% ממנו הוא חלבון. יוצא אפוא, שהמיקרואורגניזמים, לרבות החלבונים שבהם, מהווים מזון למעלה הגירה המאכסן אותם. למרות מעבר של מיקרואורגניזמים מהכרס לשאר אברי מערכת העיכול, גודל אוכלוסייתם בכרס נשמר פחות או יותר קבוע הודות לקצב הגבוה של התרבותם.

החלבון המיקרוביאלי נבנה משני מקורות עיקריים (איור ד־21):

א. חלבונים במזון הפרה: חלבונים אלו מפורקים באמצעות אנזימים, כגון פרוטאזות, המופרשים על ידי המיקרואורגניזמים. החומצות האמיניות המתקבלות בתהליך הפירוק נספגות אל תאי המיקרואורגניזמים ומנוצלות לבניית החלבונים שלהם.

ב. תרכובות חנקן שאינן חלבוניות: למיקרואורגניזמים בכרס יש מערכות אנזימטיות ייחודיות המאפשרות להם לייצר את כל סוגי החומצות האמיניות מ**תרכובות חנקן שאינן חלבוניות**, למשל אמוניה (NH_3), תוך שימוש בשלד פחמני שנוצר מפירוק הפחמימות על ידי המיקרואורגניזמים.

מִחזור חנקן במעלי הגירה

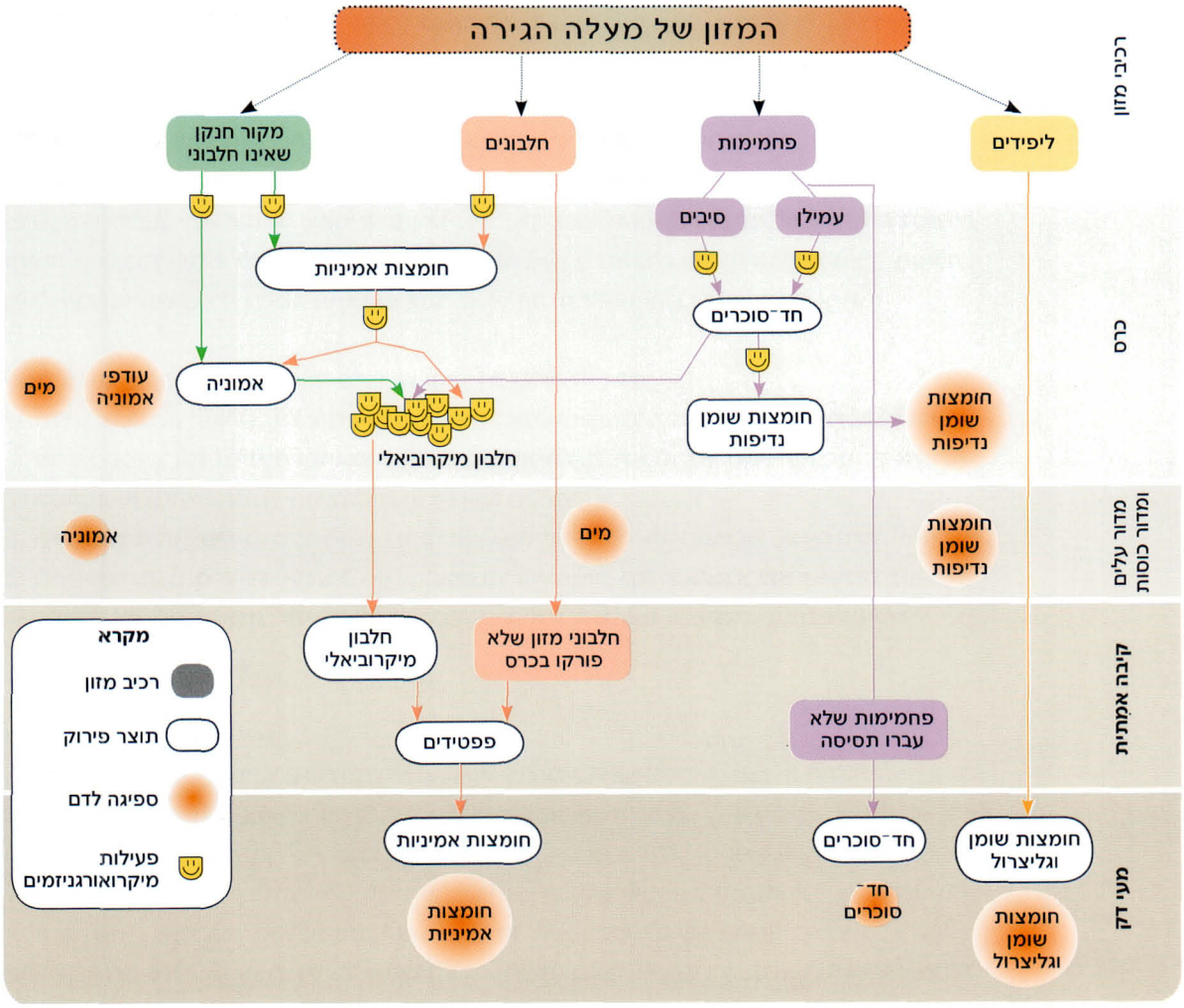
במהלך פירוק החלבונים שבמזון מעלה הגירה על ידי המיקרואורגניזמים, נוצרים חומרי לוואי בהם אמוניה, וזו משמשת כאמור מקור לבניית חלבוני המיקרואורגניזמים.

עודפי האמוניה שלא מנוצלים בכרס ליצירת החלבון המיקרוביאלי, נספגים לדם והופכים בכבד לשתנן, המתווסף לשתנן הנוצר בגוף הפרה כתוצאה מתהליכי חילוף חומרים של חלבון גוף. חלק מהשתנן עובר דרך הכליות ומופרש בשתן תוך הפסד מוחלט של החנקן המצוי במולקולות השתנן. חלק אחר של השתנן עובר מהכבד לדם ומשם מועבר לכרס. המיקרואורגניזמים שבכרס מפרקים את השתנן לאמוניה וזו משמשת להם אבן בניין ליצירת החלבונים שלהם – החלבון המיקרוביאלי. תהליך זה של מִחזור חנקן (מהשתנן) הוא אחד מסודות הצלחת הקיום של מעלי הגירה בעת שהם ניזונים ממזון דל־חלבון בתנאי קיום קשים.

החלבון המיקרוביאלי וחלבונים מהמזון שלא פורקו על ידי המיקרואורגניזמים שבכרס, עוברים לקיבה האמִתית, ושם הם מפורקים על ידי **הפרוטאזות** (בדומה לפירוק חלבון בקיבת האדם). פירוק החלבונים לחומצות אמיניות נמשך גם במעי הדק.

החומצות האמיניות, תוצרי פירוק החלבונים בקיבה האמִתית ותוצרי פירוק החלבונים המיקרוביאליים – נספגות כולן במעי הדק אל זרם הדם, ובאמצעותו הן מגיעות אל כל תאי הגוף של מעלה הגירה.

איור ד–21 מסכם תהליכים מרכזיים המתרחשים במערכת העיכול של מעלה הגירה.



איור ד–21: תהליכי העיכול העיקריים במעלי הגירה.

שימו לב: מפגש החיצים מהאמוניה, מהחד־סוכרים ומהחומצות האמיניות מבטא את בניית החלבון המיקרוביאלי מחומצות אמיניות ו/או ממקור חנקן לא חלבוני ומשלד פחמני.

לסיכום, המיקרואורגניזמים חיים ב**סימביוזה מסוג הדדיות** עם מעלה הגירה. כל שותף מפיק תועלת מסימביוזה זו:

מעלה הגירה בטבע ניזון מעשב, עלים וגבעולים בלבד, למרות שמערכת העיכול שלו, כמו של שאר היונקים, אינה מייצרת אנזימים מעכלי סיבים. הסיבים מפורקים על ידי המיקרואורגניזמים. מעלה הגירה "נהנה" מתוצרי הלוואי של תהליך התסיסה המתבצע על ידי המיקרואורגניזמים. כמו כן, למרות מיעוט החלבון במזון הצמחי של מעלה הגירה, הוא מקבל חומצות אמיניות מפירוק המיקרואורגניזמים עצמם. כחלק מחילוף החומרים, המיקרואורגניזמים מייצרים ויטמינים, כמו ויטמינים מקבוצה *B*, ואלה נספגים על ידי מעלה הגירה בהמשך צינור העיכול.

נוסף על כך, שגשוג של אוכלוסיית המיקרואורגניזמים דוחק בהרבה מקרים את החיידקים המזיקים ממערכת העיכול, ובכך תורמים המיקרואורגניזמים להגנה מפני מחלות.

יש לזכור שלמיקרואורגניזמים אין "אינטרס" לפרק את המזון לתועלת מעלי הגירה. הם מפרקים את המזון לצורך גדילתם הם. אגב כך הם מנצלים את החומרים המזינים שבמזון מעלה הגירה, כולל מינרלים ותרכובות חנקן המאפשרים להם (למיקרואורגניזמים) לבנות חלבונים וויטמינים.
המיקרואורגניזמים נהנים לא רק מהספקה שוטפת של חומרי גלם, אלא גם מניקוז של תוצרי הלוואי של הפעילות המטבולית שלהם (שלמעשה הם "ההפרשות" של המיקרואורגניזמים). תוצרי לוואי אלה מופרשים מגוף המיקרואורגניזמים, חלקם נספגים בדופנות הכרס וחלקם ממשיכים הלאה בצינור העיכול. בכרס נשמרים בדרך כלל תנאים קבועים של טמפרטורה, ובדרך כלל גם טווח צר של pH. שמירה על טווח קבוע של התנאים חיונית לפעילות מיקרוביאלית אנזימטית תקינה, שהכרחית לקיום המיקרואורגניזמים ולהתרבותם.

שאלה ד-28:

א. ה־pH בקיבת האדם הוא נמוך (1.7–3) כלומר חומצי. מהי החשיבות בכך?
ב. מה היה קורה אם ה־pH בכרס הפרה היה דומה לזה של האדם? נמקו את טענתכם.

שאלה ד-29:

מחסור ניכר בחלבונים או בתרכובות חנקן, כגון אמוניה או שתנן, במזון הפרה או בכרס, גורם להאטה בפירוק כל סוגי הפחמימות. הסבירו תופעה זאת.

שאלה ד-30:

בניסוי הזינו פרות בנייר עיתון עם תוספות תזונתיות. הפרות התפתחו יפה ואף הניבו 20 ליטרים של חלב ביום.
א. הסבירו כיצד נייר עיתון יכול לשמש מרכיב עיקרי בתזונת פרה?
ב. מהן התוספות התזונתיות שצריכים להוסיף לפרה הניזונה על נייר עיתון?

שאלה ד-31:

לפניכם רשימת תכונות: ניבים ארוכים וחדים, לסת חזקה שתנועתה אנכית (כמספריים), נוכחות של מיקרואורגאניזמים מְפַרקי תאית במערכת העיכול, מעי דק קצר, לסת שיכולה לנוע בתנועות רוחביות.
אלו מהתכונות ברשימה מאפיינות יונקים צמחוניים ואלו מאפיינות יונקים טורפים?

שאלה ד-32:

השוו בין המבנה והתפקוד של מערכת העיכול של האדם ושל מעלי הגירה. התייחסו ל:
א. מבנה המערכת.
ב. יכולת פירוק תאית.
ג. החומרים המשמשים להפקת אנרגיה.
ד. החומרים המשמשים מקור לאבני בניין לחלבונים.

שאלה ד-33:

בפרות חלב שמטופלות באנטיביוטיקה דרך הפה מתגלים לעתים קשיי עיכול וירידה בתנובת החלב. הסבירו.

שאלה ד-34:

הסבירו את הטענה הבאה: מעלי הגירה אמנם מכניסים למערכת העיכול שלהם צמחים, אך בעצם הם ניזונים בעיקר מתוצרים של חילוף החומרים של מיקרואורגניזמים שונים החיים בתוך המערכת.

שאלה ד-35:

כדי לייצר חלב הפרה זקוקה לכמות גדולה של חומרי גלם לבניית חלבונים – חומצות אמיניות. תארו שלושה מסלולים שונים שבאמצעותם מקבלת הפרה את החומצות האמיניות שהיא זקוקה להן לבניית החלבונים.

שאלה ד-36:

חלב הפרה ובשרה משמשים מזון לאדם. האנרגיה שבמזון זה מקורה בשמש. תארו את השלבים בשרשרת המזון הזו על פי השינויים והמעברים הכימיים שחלים בה.

הרחבה

עיכול בבעלי חיים צמחונים שאינם מעלי גירה

ליונקים אוכלי צמחים שאינם מעלי גירה, כמו ארנבים, שפנים וסוסים, יש קיבה בעלת מדור אחד, כלומר אין כרס. עיכול הרב־סוכרים (בעיקר סיבים) המצויים במזון הצמחי מתבצע באיברים אחרים, שבדומה לכרס יש בהם מיקרואורגניזמים אשר מסוגלים לפרק סיבים. בארנבים זהו בעיקר המעי העיוור (החלק הראשון והרחב של המעי הגס), ובסוס זהו בעיקר המעי הגס, אך גם המעי העיוור. איברים אלה ממוקמים אחרי הקיבה והמעי הדק, ולכן שלא כמו במעלי הגירה, המיקרואורגניזמים המתים לא מנוצלים ישירות כמקור לרכיבי תזונה, אלא מורחקים החוצה עם הגללים. חלק מבעלי החיים הצמחוניים נוהגים לאכול את גלליהם, וכך מנוצלים גם הוויטמינים והחלבונים המיקרוביאליים.

סימביוזה עם חיידקים מפרקי סיבים שמצויים במערכת העיכול קיימת גם אצל חרקים צמחונים כדוגמת הטרמיטים, שהם חרקים אוכלי עצים.

4.5 ייעול ההזנה בפרת החלב

ישראל מחזיקה בשיא העולמי לתנובת חלב: כ־12,000 ליטר לפרה בממוצע לשנה (2010). הישג זה ראוי להערכה מיוחדת לאור העובדה שהתנובה הגבוהה מושגת בתנאי סביבה ואקלים קשים יחסית. תוכלו להעריך הישג זה של החקלאות המודרנית בישראל גם בהתחשב בנתונים אלו:

פרת־בר מניבה 4–8 ליטר חלב ליום, ואילו פרה הגדלה ברפת מודרנית מניבה כ־30 ליטר חלב ליום בממוצע.

בתחילת המאה ה־20 הניבו פרות שגדלו ברפתות בישראל רק כ־300–1,000 ליטר חלב לפרה בשנה. בשנות החמישים של המאה ה־20 עמדה תנובה שנתית של פרה בישראל על 3,000–5,000 ליטר; בתחילת המאה ה־21, כאמור, התנובה היא כ־12,000 ליטר חלב לפרה בממוצע בשנה.

שאלה ד–37:

האם, לדעתכם, יכולה להימשך העלייה בתנובת החלב באותו הקצב? נמקו תשובתכם.

שיא עולמי בתנובת החלב השנתית לפרה בישראל



ישראל
12,000 ליטר



ארצות הברית
10,100 ליטר



האיחוד האירופי
8,000 ליטר



אוסטרליה
5,124 ליטר



ארגנטינה
4,183 ליטר



רוסיה
3,120 ליטר



סין
2,264 ליטר

ייצור חלב על ידי פרת חלב

ייצור החלב בעטין הפרה מתחיל באופן טבעי סמוך להמלטה ונמשך כל עוד מופעל גירוי היניקה של העגל. בעדרי בקר לחלב בעולם המערבי נהוג להפריד את העגלים מאמותיהם כבר לאחר ההמלטה, וגירוי היניקה מוחלף בחליבה הנעשית פעמיים־שלוש ביום ואף יותר. החלב משווק לשתייה ולייצור מוצרי חלב שונים.

כמות החלב שפרה מניבה כיום רבה יותר מהכמות הנדרשת לעגל, וחליבת הפרות נמשכת מספר רב של חודשים – יותר מזמן היניקה המקובל.

שני גורמים עיקריים אחראים לכך שתנובת החלב של פרות במשק החקלאי גבוהה בהרבה מזו של פרות־הבר: האחד – תהליכי טיפוח גנטי של העדר המיועד לחליבה; והשני – כמותו ואיכותו של המזון שניתן לפרות החלב.

בסעיף זה נעסוק בגורם השני בלבד, אך נציין שבתהליכי השבחה וטיפוח לייצור חלב בוחרים פרות על פי תכונותיהן הגנטיות: פרות שמייצרות חלב רב, בעלות תיאבון ובעלות כושר עיכול יעיל.

1.5 סוגי מזונות להזנת מעלי הגירה

מעלי הגירה במשק החקלאי ניזונים בעיקר מ־2 סוגים של מזונות, הנבדלים זה מזה בתכולת האנרגיה שלהם:

מזון גס הוא מזון עשיר בסיבים, ותכולת האנרגיה בו היא לרוב נמוכה. מכינים אותו לרוב מהעלים והגבעולים של הצמח. לעתים הוא כולל גם קליפות של זרעים מרוסקים. מזונות גסים הם אלה: ירק טרי, שחת (ירק מיובש עד לתכולת לחות נמוכה), קש (חלקי צמח יבשים שנשארו לאחר הקציר) ותחמיץ (ירק טרי שעבר החמצה בתהליך תסיסה בתנאים אל־אווירניים. ירידת ה־pH של המזון בעקבות ההחמצה גורמת להשמדת חיידקים מזיקים ולכן לשימורו).

הסיבים חשובים הן לאספקת אנרגיה למיקרואורגניזמים שבכרס ולפרה והן לגירוי מערכת העיכול לתנועתיות (פריסטלטיקה), המערבלת את תוכן הכרס ומאפשרת גם את שחרור הגזים הנוצרים בה.

מזון מרוכז הוא מזון דל בסיבים אך עשיר בחלבון, בשומן ובפחמימות קלות לעיכול. תכולת האנרגיה של המזון המרוכז היא גבוהה. לרוב מכינים אותו מזרעים העשירים בעמילן – זרעים של שעורה, חיטה, שיבולת שועל, תירס וסורגום וכן זרעים העשירים בחלבון ושומן, כמו זרעים של כותנה ולפתית (קנולה).

בפרק זה נשתמש במונחים המקובלים על החקלאים למרכיבים הצמחיים המשמשים להזנה. יש לדעת שכשמזכירים גרעין או גרגר מדובר למעשה בזרע הכולל את המעטפת (הקליפה) שלו.

על קצה המזלג...

אוכל כשר לפסח למעלי הגירה

כל סוג מזון יוצר בכרס הפרה רמת חומציות אופיינית והרכב אופייני של אוכלוסיית מיקרואורגניזמים המפרקים את המרכיב העיקרי באותו סוג מזון. שינוי בהרכב המזון יגרום לשינוי ברמת החומציות בכרס ויגרור שינוי בהרכב אוכלוסיית המיקרואורגניזמים.

אם החלפת המזון נעשית בקצב מהיר מדי, אין די זמן להתהוות אוכלוסיית מיקרואורגניזמים המתאימה להרכב המזון החדש. כתוצאה מכך אחוז מסוים של המזון אינו מתעכל, מאזן האנרגיה של הפרה נפגע ונגרמת ירידה בתנובת חלב.

שבועות אחדים לפני פסח מחליפים, מטעמי כשרות, את התערובת שמקבלות הפרות – מתערובת שמכילה חיטה, שעורה ודגנים (שהם חמץ), לתערובות המבוססות על תירס וסורגום (הכשרים לפסח).

מומלץ, אם כן, להתחיל את השינוי במזון באופן הדרגתי ובמשך כמה שבועות, שכן נדרש זמן עד שמתהווה אוכלוסיית מיקרואורגניזמים שמתאימה לפירוק המזון החדש.

2.5ד ייעול ייצור החלב – האיזון העדין

עד המאה ה־20 האכילו פרות במזון גס בלבד. בתחילת המאה ה־20 גילו שכאשר מכניסים למנת המזון של מעלי הגירה גם מזון מרוכז, עולים קצב הגדילה של הפרות ותנובת החלב שלהן. סוג המזון המרוכז משפיע גם על היחס בין תכולת השומן והחלבון בחלב שהפרה מייצרת.

במשק החקלאי האינטנסיבי, שמטרתו להביא לעלייה מתמדת בתנובת החלב ובאחוז השומנים והחלבונים תוך שמירה על רווחיות, יש להביא בחשבון מכלול של מרכיבים בתכנון מנת המזון של פרת החלב.



הרכבת מנת המזון של הפרה הפכה למדע. הרפתן הממוצע כבר אינו מבלה את רוב זמנו מול האבוס אלא חלק ניכר ממנו מול המחשב. היום מתכננים את המנה בעזרת תוכנות מחשב, אשר מתחשבות בהרכב המדויק של כל אחד ממרכיבי המזון האפשריים ובְּעלותו, וכן בצרכים של הפרות בהתאם למצבן. מנת מזון אופיינית לפרות חלב מורכבת כיום מכ־70% של מזון מרוכז וכ־30% של מזון גס.

לפניכם כמה דוגמאות לייעול ההזנה בפרת החלב:

1. חלבוני החלב נוצרים מחומצות אמיניות הנספגות במעי הפרה. כפי שראינו, חלק ניכר מהחלבונים הזמינים לפרה מקורם בחלבון המיקרוביאלי. מכאן יוצא ש**הגברת פעילות המיקרואורגניזמים בכרס** לרמה המיטבית מביאה ליצירה מוגברת של חלבון מיקרוביאלי ומאפשרת עלייה בתנובת החלב ובאיכותו. העשרת מנת המזון בפחמימות זמינות ובמינרלים

ובמקורות חנקן לא־חלבוניים מגדילות את יצירת החלבון המיקרוביאלי. יתר על כן, שימוש ב**תרכובות חנקן שאינן חלבוניות** (חומצת שתן, שתנן ואמוניה) כמו אלה המצויות בזבל עופות, שהוא פסולת חקלאית, מוזיל את עלויות המזון.

פרט למרכיבים התורמים להגדלת כמות החלבון המיקרוביאלי, נוהגים להעשיר את מזון פרות החלב בחלבוניים שאינם מפורקים בכרס על ידי המיקרואורגניזמים. חלבונים אלה מתפרקים במעי הפרה ומנוצלים ביעילות גבוהה יותר גם ליצור חלב.

2. פרה זקוקה לכמות מרובה של אנרגיה לייצור החלב. אם לא תהיה די אנרגיה במנת המזון, הפרה תשתמש ב"רזרבות" שבגופה. כדי שהפרה תקבל **מזון עתיר אנרגיה** לכאורה טוב להגדיל במנת המזון שלה את אחוז המזון המרוכז בשל הכמות הגדולה של הרכיבים האנרגטיים שבו. אך מתברר שסיבים, המרכיבים את המזון הגס, נחוצים לקבלת תנובת חלב גבוהה. דרך אחרת להעלאת הערך האנרגטי של המזון היא העשרת המזון המרוכז בכמות רבה של שומן שערכו האנרגטי גבוה פי 2.3 מזה של פחמימות וחלבונים. אבל מתברר ששומן רב במזון פוגע בפעילות המיקרואורגניזמים בכרס. השומן מתפרק לגליצרול ולחומצות שומן ארוכות שרשרת, שאינן מנוצלות על ידי החיידקים ואינן נספגות בדופן הכרס. יתר על כן, חומצות השומן שוקעות על הסיבים ומונעות את פירוקם על ידי החיידקים. אחד הפתרונות הנהוגים כיום הוא אספקת שומן בצורה המגינה עליו מפני פירוק על ידי המיקרואורגניזמים בכרס. שיטה זו מנטרלת את השפעתו השלילית, אך מאפשרת את פירוקו בקיבה האמִתית ובמעי וספיגתו. שומן זה קרוי בלשון התזונאים "שומן מוגן".
3. סיבים הם מרכיב הכרחי לפעילות טובה של החיידקים בכרס. הם גם גורמים לגירוי המפעיל את דופנות הכרס ואת שרירי מערכת העיכול. מצד שני, סיבים בכמות גדולה מדי, ובעיקר ליגנין, תופסים נפח גדול בכרס לאורך זמן ועל ידי כך מקטינים את נפח מנת המזון הנצרכת על כל מרכיביה, וכתוצאה מכך קטֵנה תנובת החלב. שימוש ב**מספוא צעיר**, שכמות הליגנין בו נמוכה באופן יחסי, מייעל את פירוק הסיבים ומקצר את זמן שהיית המזון בכרס, וכתוצאה מכך מגדיל את צריכת המזון של מעלה הגירה ואת תנובת החלב שלו.

לסיכום, בהרכבת מנת מזון צריך לשמור על איזון עדין בין המזון המרוכז לבין המזון הגס ויש להימנע משינויים תכופים.

תוצרי לוואי של תעשייה וחקלאות משמשים להזנה של מעלי גירה

קשר לנושא

אקולוגיה:
השפעת האדם על הסביבה.

ניתן להזין את מעלי הגירה במזונות זולים שבני האדם אינם צורכים, ובכך להגדיל את הרווחיות של המשק החקלאי. מזונות אלה שייכים לסוג שלישי של מזונות המכונים **מזונות ביניים חצי־מרוכזים**. הם מכילים פחות חומרים מזינים ואנרגיה מאשר המזונות המרוכזים, אך יותר מאשר המזונות הגסים.

היתרון בשימוש במזונות זולים אלה הוא כפול: סביבתי וכלכלי. עיקר ההוצאות של החקלאי במשק חלב נובעות מהכמות הגדולה של מזון הדרוש להזנת הפרות. שימוש בתוצרי לוואי חקלאיים או תעשייתיים כמקורות זולים לאנרגיה וחלבון, מגדיל את **הרווחיות של המשק החקלאי**. להלן כמה דוגמאות לתוצרי לוואי המשמשים להזנת בעלי חיים:

תוצרי לוואי מהצומח:

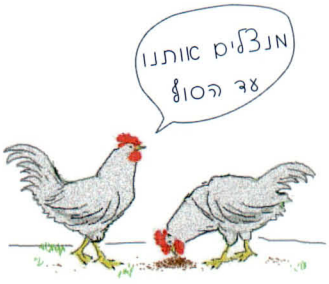
- **זרעי כותנה** שלמים (גרעיני כותנה) – גרעיני הכותנה הם תוצר לוואי תעשייתי של עיבוד סיבי הכותנה לייצור טקסטיל. בשנים האחרונות עולה בעולם השימוש בגרעיני כותנה להזנת פרות. גרעיני הכותנה מהווים מזון מרוכז בשל התכולה הגבוהה של שומן וחלבון בהם. היתרון של גרעיני הכותנה על גרגרים כמו תירס או סורגום הוא תכולת הסיבים הגבוהה במעטפת שלהם.

לעתים מהווים גרעיני הכותנה עד כ־25% ממנת המזון. בארץ, בשל צמצום גידול הכותנה בשנים האחרונות, יש גם ירידה בשימוש בגרעיני כותנה להזנת פרות.

- שאריות של ירקות שונים כגון גזר, סלק וקליפות הדרים שמצטברים בתהליכים תעשייתיים של עיבוד ירקות ופירות.
- סובין – תערובת של קליפות זרעי דגנים, המתקבלת כתוצר לוואי בטחינת גרגירים (למשל בטחינת גרגירי חיטה לקמח).
- גפת זיתים – תוצר לוואי מכבישה של זיתים לייצור שמן זית, אם כי מוצר זה מצריך עיבוד נוסף, דבר המצמצם את כדאיות השימוש בו.

תוצרי לוואי מהחי:

- **מי גבינה** – תוצר לוואי בתעשיית הגבינות, המכיל אחוזי שומן נמוכים ואחוזי חלבון גבוהים. השימוש במי גבינה נפוץ במיוחד בגידול עגלים ועגלות. אולם כיום כמעט ולא נותנים לבעל חיים מי גבינה, כי הובלת כמות אדירה של נוזלים ושימורם במֻכלים יקרה עד מאוד.
- **זבל עופות** – תוצר לוואי של גידול עופות. זבל העופות מורכב בעיקר מ**לשלשת העופות**, וכן משאריות של מזון הניתן לעופות, מצע הריפוד של הלולים ונוצות. זבל העופות הוא מקור זול לתרכובות **חנקן שאינן חלבוניות**: חומצת שתן שמקורה בלשלשת עופות וכן שתנן ואמוניה שהם תוצרי הפירוק של חומצת השתן על ידי חיידקים שונים.



ניצול זבל עופות (הכולל את הלשלשת ומצע הריפוד של הלולים) להזנת מעלי הגירה לא רק מקטין את הוצאות החקלאי, אלא גם מהווה פתרון לבעיה סביבתית גדולה – הנפח הגדול של פסולת הלולים. אך השימוש בזבל עופות מחייב זהירות רבה בשל הימצאות מיקרואורגניזמים פתוגניים העלולים לגרום מחלות בצמחים ובבקר, ולכן חשוב להעבירו תהליכי חיטוי. כמו כן זבל עופות עלול להכיל שרידי תרופות ומתכות ולכן יש לבדוק אותו בהתאם למקור ממנו הוא מגיע. נציין שבהזנת מעלי גירה יש להגביל את כמות תרכובות החנקן הלא־חלבוניות, שזבל עופות הוא אחד מהמקורות של תרכובות אלו. הסיבה לכך היא נטייתן של תרכובות חנקן לא־חלבוניות להתפרק לאמוניה, שבהיספגה בריכוזים גבוהים לדם היא עלולה להיות רעילה.

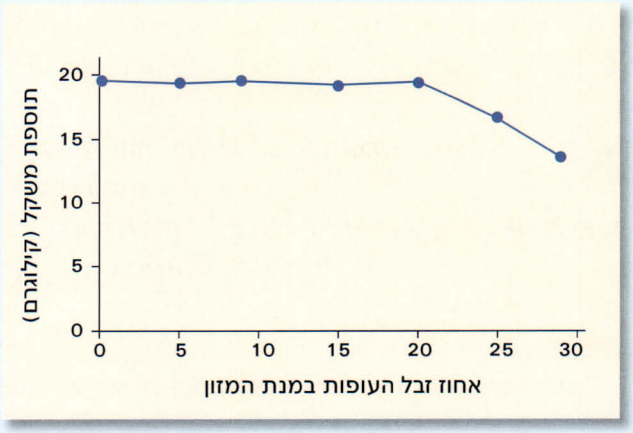
אשנב למחקר

מנת המזון המקובלת להזנת טלאים היא תערובת המורכבת מגרעינים ומגרגרים שונים. למשקים שנקלעו לקשיים כלכליים מציעים להחליף חלק ממנת מזונם של טלאים בזבל עופות.

כדי לבדוק את השפעת אחוז זבל העופות במנת המזון של טלאים על העלייה במשקלם נערך הניסוי הבא:

42 טלאים בגיל 40 יום ובמשקל התחלתי ממוצע של 17 ק"ג חולקו ל־7 קבוצות. כל אחת מהקבוצות קיבלה במשך 8 שבועות מנת מזון שהכילה אחוז שונה של זבל עופות.

התוספת הממוצעת במשקל הטלאים בקבוצות השונות לאחר 8 שבועות מוצגות באיור ד–22.



איור ד–22: השפעת כמות זבל עופות במזון הטלאים על התוספת במשקלם.

שאלה ד–38:

א. הסבירו מדוע מעלי הגירה יכולים להשתמש בזבל עופות כמקור לחנקן ובעלי קיבה אחת אינם יכולים.

ב. ציינו יתרון אחד לשימוש בזבל עופות, נוסף להיותו מקור חנקן זול, וחיסרון אחד.

ג. על סמך הנתונים בגרף תארו והשוו את ההשפעה של החלפת חלק ממנת המזון על משקל הטלאים. התייחסו לטיפולים השונים בניסוי.

ד. על סמך תוצאות הניסוי המוצגות בגרף, באיזה אחוז של זבל עופות תמליצו לחקלאי להשתמש במנת המזון? הסבירו תשובתכם.

דילמה

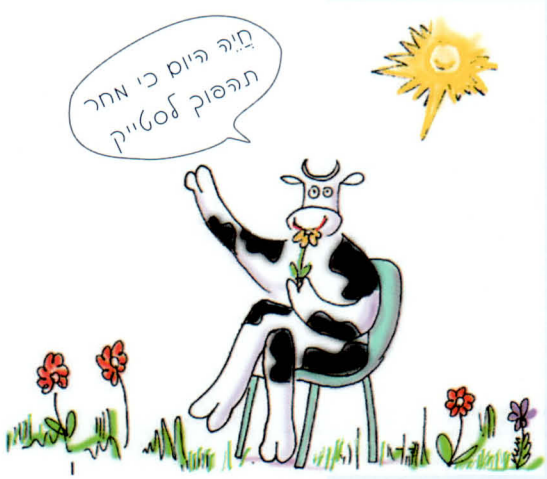
רווחה לבעלי החיים או רווח לחקלאים?

בסעיף ד5 ראינו שייעול הייצור של מזונות מן החי במשק החקלאי מתבסס, בין היתר, על ניצול מזונות זולים כמו סוגי פסולת שונים מן החי ומן הצומח (שאינם ראויים למאכל אדם), כמקורות אנרגיה וחלבון זולים ויעילים למשק החי.

נושא ההזנה של בעלי חיים במשק המסחרי והמתועש הוא דוגמה לגישה השמה את הרווח הכלכלי במרכז, כשהמטרה של החקלאים היא הפקת מקסימום הרווחים במינימום השקעה. גישה זו מתבטאת גם במרחב המחייה המצומצם של החיה במשק, בשליטה על מערכת הרבייה שלה, במספר העובדים הקטן ועוד...

גישה זו מתייחסת אל בעלי החיים כפריטי רכוש מבלי להתייחס לצרכיהם או לסבלם.

האם ההנאה של בני האדם מאכילת מזון מן החי ורצון המגדלים לרווח כלכלי מצדיקים גישה זו? (המשך מעבר לדף)



שאלה ד-39:

גלשו ברשת האינטרנט והציגו טיעונים לכל אחד מבעלי העניין הבאים: ארגוני זכויות בעלי חיים, מגדלי בקר, צרכני בשר, ארגונים סביבתיים.
כתבו את עמדתכם המנומקת לדילמה זו.

עיקרי הנושאים בפרק

- תהליך העיכול הוא כלל התהליכים שבהם מולקולות גדולות ומורכבות של חומרי מזון מפורקות למולקולות קטנות היכולות לחדור לתאי הגוף.
- מערכת העיכול של האדם בנויה כצינור ארוך המוקף בשכבות של שרירים לא־רצוניים. הצינור כולל חלקים שונים הממודרים על ידי סוגרים. מידור זה מאפשר יצירת תנאים מיוחדים בכל אחד מחלקי הצינור. ויסות הפעולה של החלקים השונים במערכת העיכול מתבצע במנגנוני ויסות עצביים והורמונליים.
- לצינור העיכול נלווים איברים (בלוטות רוק, לבלב, כיס מרה וכבד) שבהם נוצרים חומרים המופרשים לצינור העיכול ומשתתפים בתהליך העיכול.
- עיכול המזון במערכת העיכול של האדם הוא עיכול חוץ־תאי, ומתקיימים בו תהליכים של פירוק מכני ושל פירוק כימי. הפירוק הכימי מתבצע על ידי אנזימים.
- *פירוק מכני של המזון* בפה מתבצע באמצעות פעולת הלעיסה של השיניים. מרכיבים ברוק המופרש אל הפה מסייעים בהכנת המזון להמשך עיכולו ובהתחלת הפירוק הכימי של הפחמימות.
- המזון מועבר מהפה לקיבה בצינור הוושט באמצעות תנועות פריסטלטיות של השרירים הטבעתיים המצויים בדופן הוושט.
- הקיבה הוא שק אגירה שרירי. ההתכווצות של שכבות השרירים מאפשרת את השלמת הפירוק המכני. תאים המצויים ברירית הקיבה מפרישים את "מיץ הקיבה" המכיל אנזימים מְפַרקי חלבונים וכן חומצה המאפשרת את פעילותם ומסייעת בחיטוי המזון.
- ויסות ההפרשות והתכווציות הקיבה נעשה כתגובה לגירויים עצביים וכן כתגובה להפרשת ההורמון גסטרין מִתָאים בדופן הקיבה. הפרשת הגסטרין מבוקרת במנגנון משולב של משוב חיובי ומשוב שלילי.
- המעי הדק הוא צינור ארוך ומפותל. עיקר הפירוק הכימי נעשה בחלקו הראשון של המעי הדק – התריסריון. אל התריסריון נפתחים שני צינורות: מהלבלב מופרשים אנזימים שונים הפעילים בסביבה בסיסית, ומכיס המרה מופרשים מיצי מרה שנוצרו בכבד והופכים את השומנים לתחליב.
- אל חלל המעי מתבלטים קפלים (סיסים) המצופים שכבת אפיתל. חלק מהתאים בשכבת האפיתל מפרישים אנזימי עיכול; תאים אחרים, שעליהם סיסונים, סופגים את המזון. הסיסים והסיסונים מגדילים מאוד את השטח הפנימי של המעי הדק ועל ידי כך מייעלים את ספיגת תוצרי העיכול.
- רוב תוצרי העיכול חודרים אל תאי הספיגה באמצעות נשאים בקרומי התאים. חלקם נקלטים בהעברה אקטיבית וחלקם בהעברה פסיבית. ספיגת המים נעשית בכוח האוסמוזה בעקבות ספיגת תוצרי העיכול.
- תוצרי העיכול מגיעים לכבד באמצעות צינורות דם ולימפה (מערכת השער).

- ויסות פעילות המעי הדק נעשה על ידי הורמונים. העיקריים שבהם, כולציסטוקינין וסקרטין, מופרשים על ידי תאים בדופן התריסריון בתגובה להגעת מזון.
- המעי הגס הוא צינור בעל שטח ספיגה קטן המאפשר ספיגה יעילה של מים ומלחים וספיגה מוגבלת של חומרי מזון. במעי הגס נאגרות שאריות המזון ונדחסות לקראת הפרשתן. כמו כן מצויים בו מיקרואורגניזמים המייצרים ויטמינים K ו־B_{12}.
- תוצרי העיכול מגיעים עם צינורות הדם והלימפה אל הכבד. חלק מתוצרי העיכול עוברים עיבוד בכבד, חלקם נאגרים, חלקם עוברים לשאר תאי הגוף ללא שינוי וחלקם מגיעים למערכת ההפרשה ומופרשים באמצעות השתן.
- אנרגיה כימית זמינה מופקת בתאים מגלוקוז ומחומצות השומן, ובשעת מחסור גם מחומצות אמיניות.
- תוצרי העיכול המגיעים לתאים משתתפים בתהליכי חילוף החומרים (מטבוליזם), הכוללים תהליכי בנייה, תהליכי פירוק והפקת אנרגיה.

עיכול במעלי גירה

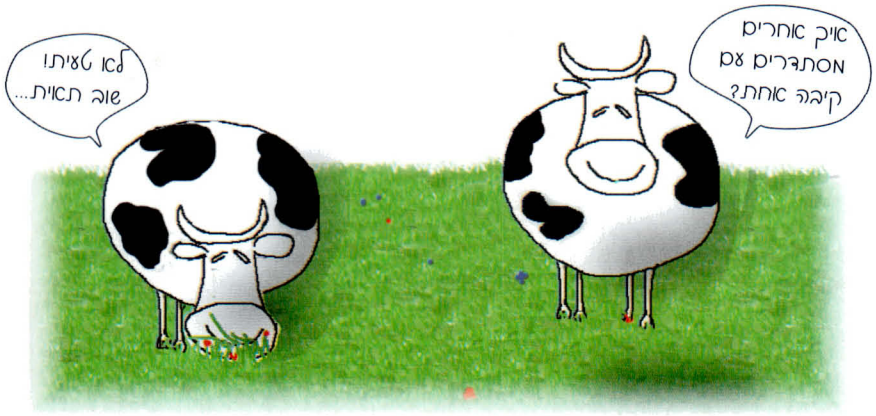
- מערכת העיכול הייחודית של מעלי הגירה מאפשרת ניצול מזונות סיביים, עשירים בתאית ודלים בחלבון וויטמינים וכן ניצול של מוצרי לוואי של עיבוד מזונות האדם. תכונות אלה מוקנות בזכות נוכחותם של מיקרואורגניזמים מפרקי תאית.
- למערכת העיכול של מעלי הגירה נפח גדול, שאת מרביתו תופסת מערכת הבנויה מארבעה מדורים. הכרס היא המדור הגדול והראשון בסדר הגעת המזון. יש בה אוכלוסייה מגוונת של מיקרואורגניזמים, היכולים לעכל רב־סוכרים שונים, בהם תאית, שהאדם, כמו בעלי חיים רבים, אינו יכול לעכל.
- המיקרואורגניזמים בכרס ניזונים מחד־סוכרים המתקבלים מפירוק הרב־סוכרים במזון מעלי הגירה. חומצות שומן נדיפות הנוצרות בתהליכי התסיסה של החיידקים נספגות בתאי הכרס ומשמשות מקור אנרגיה עיקרי לפרה וחומר מוצא לייצור החלב ומרכיבי גוף הפרה.
- מעלי הגירה יכולים להתקיים ממזון דל בחלבון הודות לניצול חלבוני המיקרואורגניזמים שבכרס, אשר יכולים לייצר את כל החומצות האמיניות גם מתרכובות חנקן לא חלבוניות.
- מעלי הגירה יכולים למחזר עודפי אמוניה. עודפי האמוניה מהכרס נספגים לדם הפרה והופכים לשתנן בכבד הפרה. חלק מהשתנן, זה המוחזר לכרס, מנוצל על ידי המיקרואורגניזמים לייצור חלבון מיקרוביאלי.
- מזון הפרה הוא גורם חשוב המשפיע על כמות ואיכות תנובת החלב.
- מזון גס מכיל כמות גדולה של סיבים וחשוב לפעילות המיקרואורגניזמים ולתנועתיות מערכת העיכול. מזון מרוכז – עשיר בחלבונים, בשומנים ובפחמימות קלות לעיכול ודל בתאית. מזון מרוכז הוא בעל תכולת אנרגיה גבוהה.
- איזון בין מזונות גסים ומרוכזים במנת המזון מביא לפעילות מיטבית של המיקרואורגניזמים ולהגברת הייצור של הפרה.
- ניתן להגדיל את רווחיות המגדל על ידי שימוש בסוגי פסולת חקלאית שונים כמקור זול לאנרגיה ולחלבון. זבל עופות, למשל, משמש מקור של תרכובות חנקן שאינן חלבוניות.

מושגים חשובים בפרק

אורגניזמים הטרוטרופים
אנזימי עיכול
גלוקוז, רמה בדם
היפותלמוס
ויסות עצבי והורמונלי
ושט
חילוף חומרים (מטבוליזם)
כבד
כולסטרול
כיס מרה
לבלב
ליפאז
ליפידים
מאגרי אנרגיה
מיצי עיכול
מלחי מרה
מעבר אקטיבי
מעבר פסיבי
מעי דק
מעי גס
מערכת עיכול
מרכזים עצביים במוח
סיסים וסיסונים
ספיגה
עמילאז
פה
פירוק מכני וכימי
פפסין
פרוטאזות
צואה
צינור העיכול
קיבה
רוק
שיניים
תאי ספיגה
תהליך אנזימטי
תנועות פריסטלטיות
תריסריון
תרכובות חנקן שאינו חלבוניות

מושגים שנלמדו רק בהקשר למעלי גירה

הזנה בפרת החלב
העלאת גירה
חלבון מיקרוביאלי
כרס
מזון גס
מזון מרוכז
מזון דל־חלבון
מִחזור פסולת אורגנית
מיקרואורגניזמים
מערכת מדורים (מערכת קיבות)
סיבים
סימביוזה מסוג הדדיות
צלולאזות
שתנן
תאית
תסיסה בכרס



ה. מחומרים אורגניים לאנרגיה זמינה - נשימה תאית

ה1. מבט־על על הנשימה התאית

ה2. ATP כמתווך במעברי אנרגיה המתרחשים בתאים

ה3. השתתפות ה־ATP בתהליכים צורכי אנרגיה

ה4. מסלולים להפקת אנרגיה בנשימה התאית

ה5. פוטוסינתזה היא לא נשימה של הצמח

עיקרי הנושאים בפרק

מושגים חשובים בפרק



פרק ה: מחומרים אורגניים לאנרגיה זמינה – נשימה תאית

ה1. מבט־על על הנשימה התאית

כל האורגניזמים החיים – צמחים, בעלי חיים, פטריות וחיידקים, זקוקים לאנרגיה לקיום תהליכי החיים. מקור האנרגיה לכל האורגניזמים הוא בחומרים האורגניים. בפרקים הקודמים ראינו שאורגניזמים אוטוטרופים והטרוטרופים נבדלים בדרכי השגת החומרים האורגניים: בעוד האוטוטרופים מייצרים חומרים אלו בעצמם, ההטרוטרופים צריכים לקבל חומרים אורגניים מוכנים במזונם. החומרים האורגניים בין אם יוצרו על ידי האורגניזם או נקלטו על ידו מהסביבה משמשים לאותן מטרות: הפקת אנרגיה, אבני בניין לתאים ולרקמות וקיום תקין של תהליכים באורגניזמים. **האחידות** נובעת מהדמיון הרב במבנה התאים של כל האורגניזמים בטבע, בסוגי החומרים הבונים אותם ובתהליכים המתרחשים בתוכם.

רעיון מרכזי

אחידות ושוני:
אחידות במבנה ובתפקוד של תאים.

האנרגיה הכימית שבחומרים האורגניים אינה ניתנת לשימוש מיָדי וישיר בתאים. כדי שהאנרגיה הכימית מן החומרים האורגניים תהיה זמינה להפעלת תהליכים בתאים, צריכים להתחולל תהליכים שבהם האנרגיה תועבר מחומרים אלו לחומרים אחרים. בפרק זה נתאר תהליכים אלו.

תהליך **הפקת האנרגיה** מהחומרים האורגניים והפיכתה לזמינה לצרכיו של התא נקרא **נשימה תאית**. בתהליך זה, המתרחש בכל תא, חלק מאבני הבניין של החומרים האורגניים עוברים פירוק אֶטי ורב־שלבי עד שהם הופכים לחומרים פשוטים יותר (כמו חומצת חלב, פחמן דו־חמצני ומים) תוך שחרור אנרגיה. רמת האנרגיה של התוצרים הסופיים (למשל פחמן דו־חמצני ומים) נמוכה בהרבה מזו של המגיבים, ופירושו של דבר שבתהליך כולו משתחררת אנרגיה רבה.
כפי שנראה בהמשך, חלק מהאנרגיה המשתחררת משמש בתא לבנייה של ATP שהוא מקור לאנרגיה זמינה לביצוע תהליכים צורכי אנרגיה בתאים. יתרת האנרגיה מומרת לאנרגיית חום – צורת אנרגיה שהתא אינו יכול לנצל לביצוע תהליכים המתרחשים בו. אנרגיית החום הנפלטת מהתא משפיעה על הטמפרטורה של האורגניזם השלם.

קשר לנושא

ביולוגיה של האדם:
האנרגיה הנפלטת כחום בנשימה התאית משמשת לשמירה על טמפרטורת גוף קבועה.

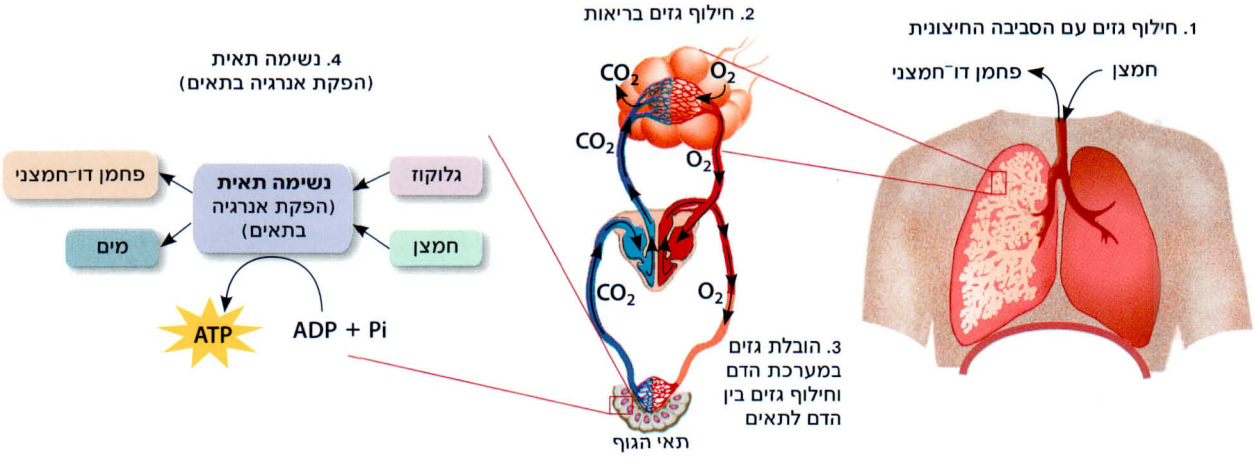
החומר האורגני הנפוץ ביותר המשמש מקור להפקת אנרגיה הוא החד־סוכר גלוקוז. עם זאת, גם חומרים אורגניים אחרים יכולים לשמש מקור אנרגיה, בהם חד־סוכרים אחרים, חומצות אמיניות (אבני הבניין של החלבונים) או חומצות שומן (אבני הבניין של הליפידים).
תהליכי הפקת האנרגיה בתאים כוללים שלבים רבים, ובכל שלב משתתף אנזים ייחודי המזרז אותו. בכל אחד מהשלבים השונים נפתחים קשרים כימיים ונבנים קשרים חדשים.

מה בין נשימה לנשימה תאית ?!

יש להבחין בין "נשימה" לבין "נשימה תאית" ולהבין את הקשר ביניהן.
התהליך המכונה בשפה היום־יומית **נשימה** הוא תהליך של **חילוף גזים**, שבו באמצעות מערכת הנשימה (באדם – הריאות), חמצן נקלט מהאוויר שבסביבה ו־CO_2 נפלט לאוויר. החמצן מהאוויר עובר לדם ומובל באמצעותו לתאים. CO_2 מהתאים עובר לדם ומובל באמצעותו לריאות, שמהן הוא נפלט לאוויר שבסביבה.

הנשימה התאית, היא כאמור תהליך הפקת אנרגיה המתרחש **בתוך** התאים. חשיבותה היא בניצול האנרגיה המשתחררת כאשר החומר האורגני מתפרק ומתחמצן, **לבנייה של מולקולות ATP** זמינות לפעילויות החיים.

חילופי הגזים משרתים את הנשימה התאית: הם מספקים חמצן הנצרך בתהליך ומְפַנים CO_2 שנוצר בו (כפי שנראה בהמשך, חמצן נצרך רק בנשימה תאית אווירנית, אך קיימים גם תהליכי הפקת אנרגיה ללא חמצן). הקשר בין חילוף הגזים לבין הנשימה התאית האווירנית מתואר באיור ה-1.



איור ה-1: תיאור סכמטי של הקשר בין חילוף הגזים ברמת האורגניזם השלם לבין הנשימה התאית האווירנית.

ה.2 ATP כמתווך במעברי אנרגיה המתרחשים בתאים

רעיון מרכזי

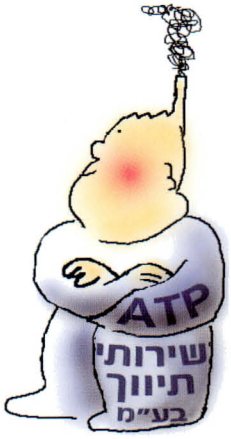
אחידות ושוני: *ATP מתווך במעברי אנרגיה בכל התאים ובכל האורגניזמים.*

אנרגיה לא נוצרת יש מאין. בכל מערכת **תהליכים צורכי אנרגיה** יכולים להתקיים רק אם בצמוד להם מתקיימים תהליכים **משחררי אנרגיה**. תופעה זו מכונה עקרון ה**צימוד**.

כפי שהזכרנו, הגלוקוז הוא מקור האנרגיה הנפוץ בתאים. כמות האנרגיה המשתחררת בפירוק **ובחמצון מלא** של גלוקוז ל-CO_2 ולמים היא עצומה ביחס לכמות האנרגיה הנחוצה לקיום התהליכים הנפוצים בתא. לו התאים השתמשו ישירות באנרגיה המשתחררת בפירוק ובחמצון הגלוקוז (ונציין שאין דרך כזאת), היה נוצר עודף גדול של אנרגיה. מכיוון שלא קיים בתא מנגנון אשר יכול להשתמש בעודף האנרגיה, העודף היה משתחרר כחום. מכאן ששימוש ישיר בגלוקוז כמקור אנרגיה לא רק שהיה גורם לבזבוז אנרגטי גדול, אלא היה עלול לגרום להתחממות התא וכתוצאה מכך לפגיעה בחלבוני התא ובתפקודיו.

יתר על כן, שחרור האנרגיה מהגלוקוז בתא אינו מתרחש בהכרח במקום בתא שבו מתרחשים התהליכים צורכי האנרגיה. שחרור האנרגיה מהגלוקוז בנשימה התאית מתרחש בעיקר במיטוכונדריה, והתהליכים צורכי האנרגיה מתרחשים במקומות שונים בתא.

נדרש אם כן **חומר מתווך** שיכול להעביר כמות אנרגיה, הנמצאת בטווח המתאים למרבית התגובות המתרחשות בתא, ממקום שחרורה של האנרגיה למקום אחר בתא, שבו היא נצרכת. מולקולת ATP עונה על "דרישות" אלו והיא אכן משמשת מתווכת בין תהליכים משחררי אנרגיה לתהליכים צורכי אנרגיה.



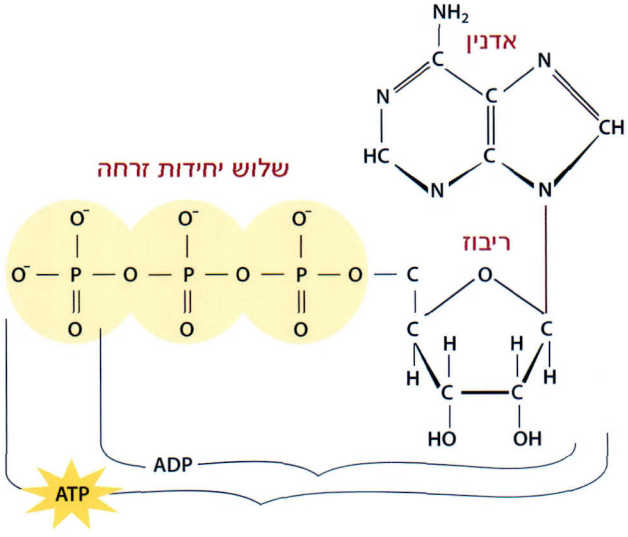
יש המדמים את מולקולת ה־ATP ל"מטבע" של אנרגיה. דימוי זה יכול לשמש כאשר מודדים את הערך האנרגטי של תגובות שונות בתא: הערך האנרגטי של תגובות בתא נמדד במספר מולקולות ATP הנבנות או המתפרקות כאשר תגובה כלשהי יוצאת לפועל.

דימוי זה גם יכול לסייע בהבנת חשיבותה של מולקולת ה־ATP כמולקולה מתווכת. קיומו של "מטבע קטן" מונע בזבוז אנרגיה (כאשר נדרש תשלום קטן ו"לא ניתן לקבל עודף" עדיף לשלם במטבע קטן). יתר על כן, היות וה"עודף" מומר לאנרגיית חום, קיומו של "מטבע קטן" מונע התחממות יתר של התא.

שלא כמו המטבעות המוכרים לנו מחיי היום־יום, הניתנים לאגירה (בארנק או בבנק), בתא אין מאגרים של ATP ואין העברה של ATP מתא לתא. בכל תא נוצר ATP בכמות המתאימה ובזמן המתאים לביצוע הפעילויות השונות בתא בהתאם לצורכי התא.

מבנה מולקולת ה־ATP ותפקודה

מולקולת ה־ATP בנויה מאדנין (בסיס חנקני), ריבוז (חד־סוכר) ו־3 יחידות זרחה, כפי שאפשר לראות באיור ה–2.



איור ה–2: מבנה סכמטי של מולקולת ATP.

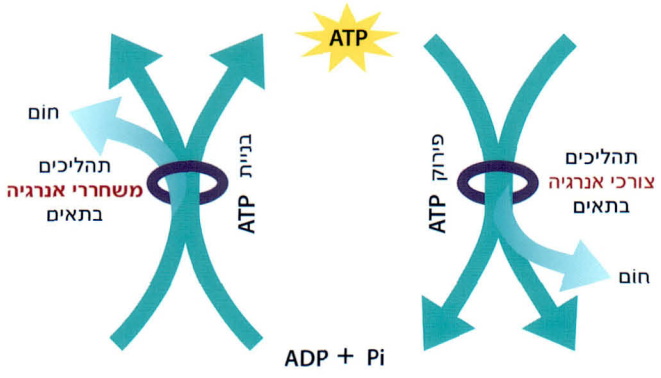
מולקולות ATP נבנות ממולקולות ADP וקבוצות זרחה (Pi), בצמוד לתהליכי הפירוק והחמצון של החומרים האורגניים בתאים, תוך ניצול האנרגיה המשתחררת בתהליכים אלה.

בעבר למדתם שפירוק ATP משחרר אנרגיה המאפשרת קיום תהליכים בתאים, אך ברוב המקרים ניסוח זה כוללני מדי. עתה נתייחס ביתר פירוט לדרך הנפוצה ביותר שבה פירוק ATP מאפשר קיום תהליכים בתא:

בתהליך הפירוק של מולקולת ה־ATP, שבו משתתפת גם מולקולת מים, מתנתק הקשר בין קבוצת הזרחה השלישית לשנייה ונוצרים ADP וקבוצת זרחה. קבוצת הזרחה מועברת למולקולה אחרת בתא, וכתוצאה מכך רמת האנרגיה של המולקולה המקבלת עולה והיא הופכת לפעילה יותר – משופעלת. **השִפעול** מאפשר את השתתפותה של המולקולה המקבלת בתהליכים צורכי אנרגיה בתא. במילים אחרות, בצמוד לפירוק מולקולות ATP מתאפשר קיום תהליכים צורכי אנרגיה בתא.

העברת אנרגיה כימית באמצעות העברת קבוצת זרחה (זרחון) ממולקולת ה־ATP, מפעילה מאות מולקולות שונות ומניעה בתאים מאות תהליכים.

כאמור מולקולת ה־ATP מתווכת בין תהליכים משחררי אנרגיה בתאים לבין תהליכים צורכי אנרגיה בתאים. איור ה־3 מתאר את התיווך באמצעות ATP.
קיים צימוד בין בניית ATP (תהליך צורך אנרגיה) לבין תהליכים שבהם משתחררת אנרגיה וכן בין פירוק ATP (תהליך משחרר אנרגיה) לבין תהליכים שבהם נצרכת אנרגיה.



איור ה־3: ATP כמתווך בין תהליכים משחררי אנרגיה (מחוללים אורגניים) לתהליכים צורכי אנרגיה בתאים. החצים הצמודים והטבעת מסמלים את הצימוד בין בניית ATP או פירוקו לבין תהליכים משחררי אנרגיה או תהליכים צורכי אנרגיה בתא.

מולקולת ה־ATP היא "המתווך האנרגטי" האוניברסלי בכל התאים של האורגניזמים החיים, החל בתאים הפרוקריוטים וכלה בתאים של יונקים מפותחים. עובדה זו מרמזת על כך שמולוקלת ATP שימשה מתווך כבר בזמנים קדומים באבולוציה.

על קצה המזלג...

קצת מספרים על ATP

מולקולות ה־ATP אינן מצטברות בתא, ואין בתא מאגר של אנרגיה. בכל רגע נתון כמות ה־ATP בגוף לא עולה על 50 גרם וגם כמות החומרים שמהם הוא נוצר, ה־ADP והזרחה, נמוכה יחסית. מולקולות ATP נבנות ומפורקות (עוברות מִחזור ATP ⟷ ADP) כל הזמן על פי צורכי התא: אדם שמשקלו 70 ק"ג מייצר ומפרק, במצב מנוחה, כ־40 ק"ג (!) ATP במהלך יממה.
מולקולות ATP אינן יכולות לעבור דרך קרום התא, ולכן הן מנוצלות תמיד בתא שבו נוצרו.
באורגניזם השלם, מאגרים של אנרגיה קיימים בצורה של חומרי התשמורת: רב־סוכרים (עמילן בצמחים וגליקוגן בבעלי חיים) וליפידים (שומן בבעלי חיים ושמן בצמחים).

ה.3 השתתפות ה־ATP בתהליכים צורכי אנרגיה

כאמור, תהליכי החיים החיוניים לקיומם של האורגניזמים הם תהליכים צורכי אנרגיה (תהליכים ביואנרגטיים) והם מתאפשרים (ברוב המקרים) הודות להעברת קבוצת זרחה ממולקולת ATP. בסעיף זה נתאר בקצרה מקצת התהליכים צורכי האנרגיה המתקיימים בתאים ונדגים את הצימוד שלהם לפירוק ATP.

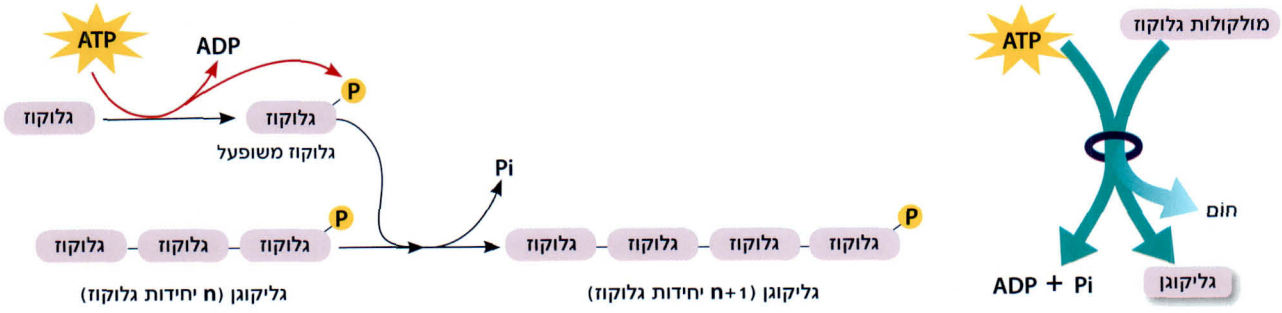
יש לזכור שבכל התהליכים שבהם יש צימוד, האנרגיה אינה מנוצלת במלואה וחלק ממנה משתחרר כאנרגיית חום.

א. תהליכי בניית חומרים מורכבים

נציג את בניית הגליקוגן כדוגמה ל**בניית חומר** מורכב מחומר פשוט.

גליקוגן הוא חומר תשמורת בתאי שריר ובתאי כבד של האדם, הבנוי מיחידות של גלוקוז הקשורות זו אל זו, ומהווה מאגר זמין של גלוקוז. כדי שמולקולות הגלוקוז יוכלו להיקשר זו לזו, עליהן לעבור שינוי הצורך אנרגיה. בתהליך זה, עוברת קבוצת זרחה ממולקולת ATP למולקולת גלוקוז, רמת האנרגיה של מולקולת הגלוקוז עולה והיא הופכת לפעילה יותר – משופעלת (איור ה–4). עתה, מולקולות הגלוקוז המשופעלות יכולות להיקשר לשרשרת הגליקוגן המתארכת. כך מתקיים צימוד בין פירוק מולקולת ATP לבין יצירת גליקוגן.

תהליך דומה מתרחש בבניית מולקולות **עמילן** באברי התשמורת של הצמח (למשל בפקעת תפוח אדמה). תוצרי הפוטוסינתזה – הפחמימות – מגיעים אל אברי האגירה, ושם הם עוברים שפעול על ידי קבלת קבוצת זרחה. רק כך מתאפשרת קשירתן זו לזו ליצירת עמילן.



איור ה–4: צימוד בין פירוק ATP והעברת קבוצת זרחה למולקולת הגלוקוז לבין בניית גליקוגן (תהליך צורך אנרגיה).

שימו לב! גם למולקולת הגליקוגן המתארכת קשורה זרחה. כך, שתי המולקולות הנקשרות נמצאות במצב משופעל. לאחר הקשירה תשתחרר יחידת זרחה אחת והשנייה תישאר לקשירת יחידת הגלוקוז הבאה.

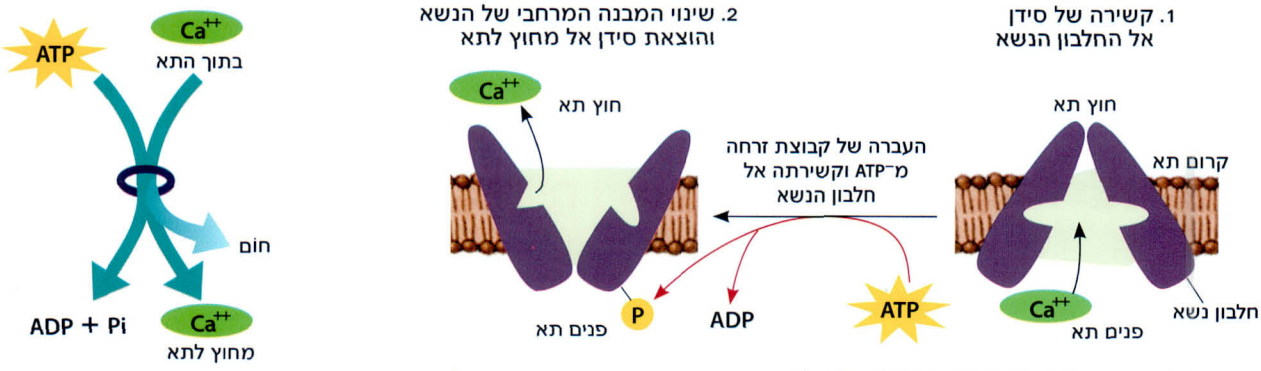
ב. העברה של חומרים בתא בניגוד למפל הריכוזים

קשר לנושא

התא – מבנה ופעילות: *העברה פעילה בניגוד למפל הריכוזים בקרומי התאים.*

קרומי התאים הם בעלי חדירות בררנית, ולא כל החומרים עוברים דרכם מסביבת התא אל תוכו. יתרה מכך, מעבר של חומרים שריכוזם בתא שונה מריכוזם בסביבה, אינו יכול להתרחש מעצמו, והוא מצריך השקעת אנרגיה. העברת חומרים בניגוד למפל הריכוזים נקראת **העברה פעילה** (אקטיבית), והיא נעשית באמצעות **נשאים** חלבוניים מסוג משאבה הממוקמים בקרום התא. העברה פעילה מתרחשת לדוגמה בקליטת מינרלים על ידי יונקות בשורשי הצמחים (ראו פרק ג עמוד 84). רוב המינרלים הדרושים לצמח נקלטים למרות שריכוזם בתמיסת הקרקע נמוך יחסית לסביבה הפנימית בשורש. נציין שלכל מינרל שנקלט בהעברה פעילה יש משאבה מתאימה.

הפעלת משאבה נעשית באמצעות העברת קבוצת זרחה ממולקולת ATP לחלבון המשאבה (איור ה-5). כך מתקיים צימוד בין פירוק מולקולת ATP לבין העברה פעילה על ידי המשאבה.
באיור ה-5 מוצגת לדוגמה משאבה המוציאה יוני סידן מתוך התא אל מחוץ לתא.



איור ה-5: צימוד בין פירוק מולקולת ATP להוצאת יוני סידן (באמצעות משאבה) אל מחוץ לתא בניגוד למפל הריכוזים.

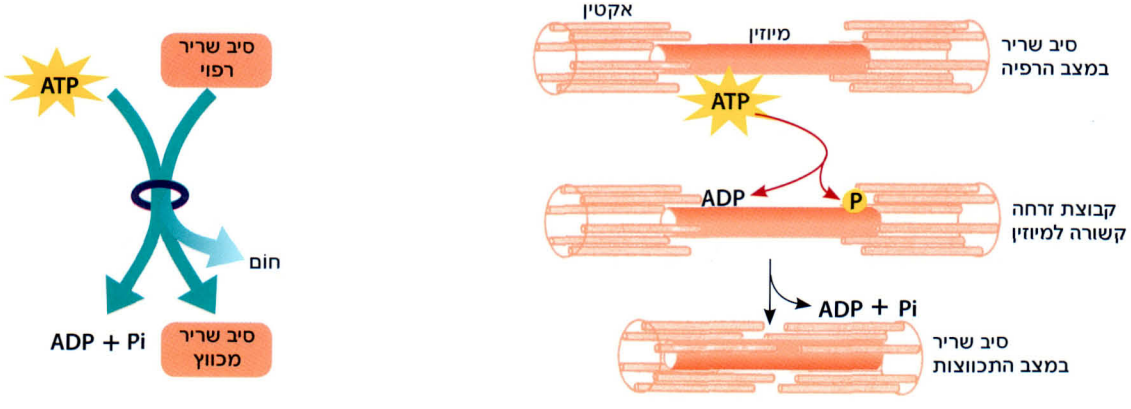
ג. תנועה והתכווצות שרירים

שינוי מקום ותנועה מאפיינים גופים חיים ודוממים והם תמיד צורכים אנרגיה. תנועת המכונית צורכת אנרגיה שמקורה בדלק, האברונים התוך-תאיים וגם התאים עצמם משנים את מקומם בעזרת תנועה של השלד התוך-תאי, הצורכת אנרגיה שמקורה ממולקולות ATP. כאשר אדם רוכב על אופניים, מקורה של תנועת האופניים הוא בפעילות שריריו. **התכווצות השריר** היא תנועה של מרכיבים תאיים, שכאמור צורכת אנרגיה.

קשר לנושא

התא - מבנה ופעילות:
שלד תוך תאי.

השרירים בנויים מקבוצות של סיבים דקים. הסיבים מורכבים משני סוגים של חלבונים: אקטין ומיוזין. התכווצות הסיב נגרמת מתנועה של שני החלבונים אחד על גבי השני. תנועת החלבונים מתאפשרת הודות להפעלת מולקולת המיוזין באמצעות העברת קבוצת זרחה ממולקולת ה-ATP אליה. במקרה זה נקשרת גם קבוצת ה-ADP. המיוזין המופעל נקשר לחלבון אקטין סמוך, מושך אותו בחוזקה, וכתוצאה מכך החלבונים מחליקים אלה על גבי אלה. פעולה זו מובילה להתכווצות (התקצרות) סיב השריר תוך שחרור קבוצת הזרחה (איור ה-6).
כך מתקיים צימוד בין פירוק מולקולת ATP לבין התכווצות סיב השריר. התכווצות השריר היא דוגמה להמרת אנרגיה כימית לאנרגיה של תנועה.



איור ה-6: צימוד בין פירוק מולקולת ATP לבין התכווצות סיב בשריר.

רעיון מרכזי

ויסות והומיאוסטזיס: *כמות ה־ATP הנוצרת בתא נתונה לתהליכי ויסות ובקרה בהתאם לצרכים.*



על קצה המזלג...

עוד קצת מִספרים על ATP

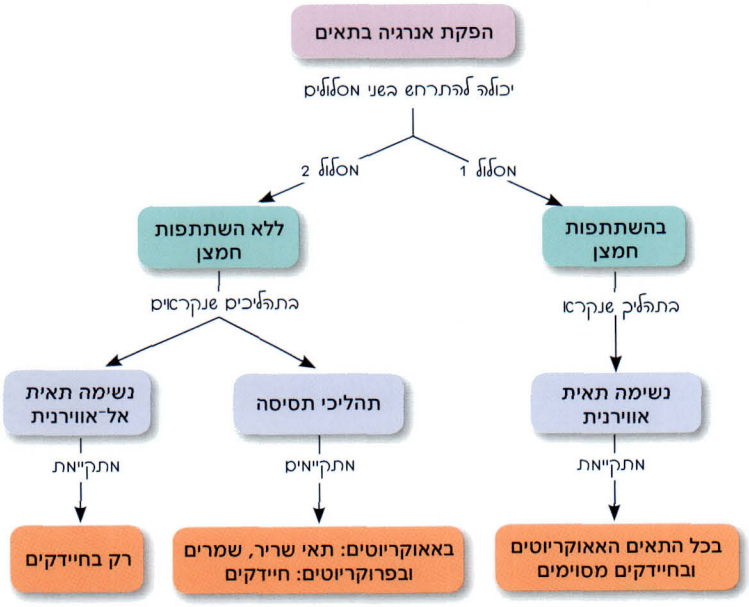
כאמור, בגוף אדם מבוגר **בזמן מנוחה** נוצרים ומתפרקים מידי יממה כ־40 ק"ג של ATP. **בזמן פעילות שרירים מאומצת**, נדרשת כמות גדולה יותר של אנרגיה, ואכן כמות ה־ATP הנוצרת ומתפרקת יכולה לגדול לכ־70 ק"ג ליממה, כמות הקרובה למשקל הגוף!!!

ה4. מסלולים להפקת אנרגיה בנשימה התאית

קיימים שני מסלולים להפקת אנרגיה בתאים:

מסלול 1: בהשתתפות חמצן. מסלול זה מתקיים ברוב האורגניזמים והוא היעיל ביותר. הפקת האנרגיה במסלול זה מתרחשת בתהליך הנקרא **נשימה תאית אווירנית (אירובית)**.

מסלול 2: ללא השתתפות חמצן. מסלול זה מתקיים בחלק מהחיידקים, בשמרים ובתאי בעלי חיים בתנאי מחסור בחמצן. כפי שניתן לראות באיור ה־7, הפקת האנרגיה במסלול זה מתרחשת בתהליכי **תסיסה** או ב**נשימה תאית אל־אווירנית (אנאירובית)**.



איור ה־7: שני מסלולים להפקת אנרגיה (ייצור ATP) בתאים: בהשתתפות חמצן וללא השתתפות חמצן.

השלב הראשון בהפקת האנרגיה בכל אחד מהמסלולים, בהשתתפות או ללא השתתפות חמצן, הוא תהליך שנקרא **גליקוליזה**. זהו תהליך אוניברסלי המתקיים בכל האורגניזמים החיים (חיידקים, פטריות, חד־תאיים, צמחים ובעלי חיים).

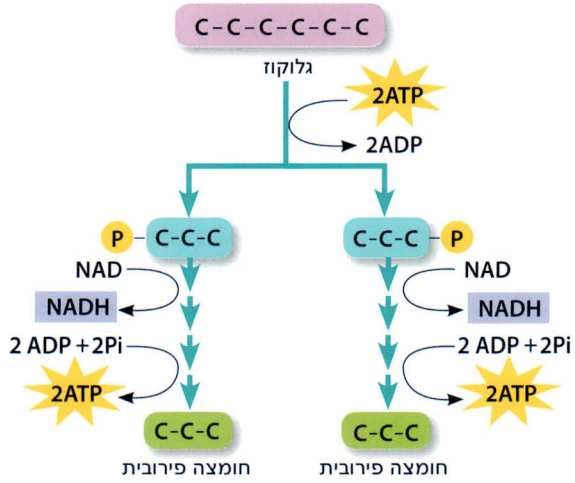
1.4ה גליקוליזה – פירוק גלוקוז לחומצה פירובית

גליקוליזה (ביוונית: *glycos*=סוכר, *lysis*=פירוק) הוא השלב הראשון בשני המסלולים להפקת אנרגיה מגלוקוז. הגליקוליזה מתרחשת בציטופלסמה שבתאי כל האורגניזמים החיים, והיא דוגמה לאחידות בעולם החי. בתהליך הגליקוליזה אין השתתפות של חמצן.

במהלך הגליקוליזה מתפרקת מולקולה של **גלוקוז**, הבנויה משלד בן 6 פחמנים, ל־2 מולקולות של תרכובת בת 3 פחמנים הנקראת **חומצה פירובית** (איור ה–8). פירוק הגלוקוז מתבצע במספר שלבים, שכל אחד מהם מזורז על ידי אנזים ייחודי.

במהלך הפירוק של מולקולות הגלוקוז, מועברים 2 אטומי מימן מכל מולקולת גלוקוז למולקולות שמשמשות **נשאי מימנים (NAD)** ומתקבלים 2 נשאי מימנים מחוזרים (NADH). תהליך פירוק הגלוקוז והעברת המימנים לנשאי מימנים מלווה בשחרור אנרגיה, שחלקה משמש לבניית 4 מולקולות ATP ממולקולות ADP וזרחה. מאחר שבתחילת התהליך מושקעות 2 מולקולות ATP בפירוק מולקולת גלוקוז אחת, הרווח האנרגטי של הגליקוליזה מסתכם ב־2 מולקולות של ATP בלבד.

חשוב להדגיש שהפירוק של הגלוקוז בגליקוליזה הוא חלקי, רק מקצת האנרגיה שבמולקולת הגלוקוז משתחררת בשלב זה. מרבית האנרגיה נשארת בחומצה הפירובית ובנשאי המימנים. כמו כן, רק חלק מהאנרגיה שמשתחררת בשלב הגליקוליזה הופכת לאנרגיה זמינה לתא, בצורת מולקולות ATP, והיתר משתחרר כאנרגיית חום.



איור ה–8: סיכום שלב הגליקוליזה המתקיים בציטופלסמה של התא.
שימו לב! בגלוקוז ובכל תוצרי הפירוק מכאן ואילך מוצגים רק הפחמנים. במציאות אלו מולקולות אורגניות המכילות גם אטומי מימן וחמצן.

רעיון מרכזי

אחידות ושוני: *זהות שלב הגליקוליזה בכל קבוצות האורגניזמים בטבע, מצביעה על האפשרות של מוצא אבולוציוני משותף ועל התפתחותו המוקדמת של תהליך הגליקוליזה באבולוציה.*

עוד על

חמצון-חיזור ונשאי מימנים: *ראו בפרק ג, עמוד 61.*

מה קורה לתוצרי הגליקוליזה ?!

החומצה הפירובית ונשאי המימנים המחוזרים הנוצרים בגליקוליזה אינם מצטברים בתא, אלא עוברים שינויים נוספים התלויים במסלול המתרחש בתאים.

שאלה ה–1:

א. לאלו צורות אנרגיה הועברה האנרגיה הכימית שהייתה במולקולת הגלוקוז בתהליך הגליקוליזה?

ב. לאיזה מתוצרי הגליקוליזה הועברה רוב האנרגיה שהייתה במולקולת הגלוקוז. הסבירו קביעתכם.

שאלה ה–2:

האם תהליך הגליקוליזה יכול להתקיים בסביבה ללא חמצן? נמקו.

2.4 מסלול 1: הפקת אנרגיה בהשתתפות חמצן – נשימה תאית אווירנית

בתרדמת החורף הארוכה של דובי הגריזלי הנמשכת 6 חודשים, הם מאבדים כשליש (!) ממשקל גופם. זאת, למרות שקצב חילוף החומרים בגופם יורד מאוד במהלך התרדמה: הם אינם אוכלים, אינם שותים ואינם מפרישים פסולת. גם קצב הדופק שלהם יורד לכרבע מהקצב הרגיל.

הירידה הגדולה במשקל גופם של הדובים מרמזת על ניצול האנרגיה מהשומן שבגופם.

לשם מה זקוקים הדובים לכל האנרגיה המופקת מהשומן בגופם כאשר למעשה הם אינם עושים דבר פרט לשינה?

לפני שנוכל לענות על שאלה זו עלינו להבין מה גורם לירידה הגדולה במשקל גופם של דובי הגריזלי. לשם כך עלינו להכיר את תהליך הנשימה התאית האווירנית.

הנשימה התאית האווירנית היא התהליך העיקרי שבו מופקת אנרגיה בתאי אורגניזמים אאוקריוטים. זהו המסלול היעיל ביותר להפקת אנרגיה. מופקות בו יותר מולקולות ATP מאשר בכל מסלול אחר, ובכך מתאפשרות פעילויות חיים מורכבות.

לתהליך הנשימה התאית האווירנית מספר שלבים. השלב הראשון, הגליקוליזה, מתרחש בציטופלסמה, שלושת השלבים האחרים מתרחשים במיטוכונדריון.

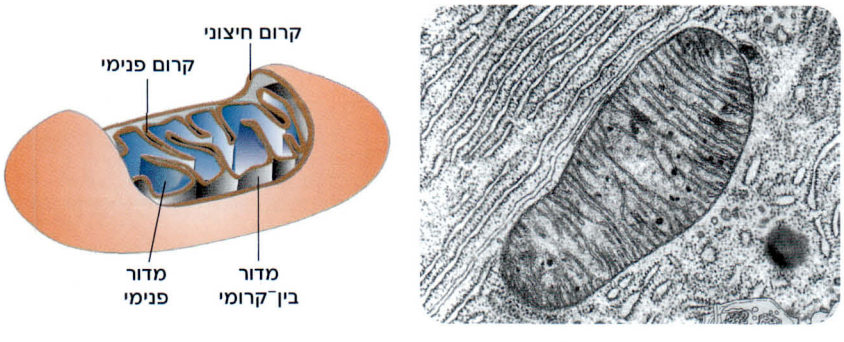
על נשימה תאית אווירנית והמיטוכונדריה

כאמור, בתאים אאוקריוטיים ובנוכחות חמצן, תוצרי הגליקוליזה – החומצה הפירובית ונשאי המימנים המחוזרים – עוברים מהציטופלסמה אל תוך המיטוכונדריון, שם הם ממשיכים בתהליכי הנשימה התאית האווירנית.

התבוננות במיטוכונדריון באמצעות מיקרוסקופ האלקטרונים (איור ה–9) מראה שהוא אברון דמוי גליל שאורכו 1–3 מיקרומטר (מיקרומטר = אלפית המילימטר) המחולק **למדורים**. לכל מיטוכונדריון שני קרומים (כל קרום מורכב משכבה כפולה של פוספוליפידים): קרום חיצוני, התוחם את האברון, וקרום פנימי בעל קיפולים רבים שתוחם חלל פנימי, ובו תמיסה. הקיפולים הרבים של הקרום הפנימי מגדילים מאוד את שטח הפנים שלו יחסית לנפח שהוא ממלא.

קשר לנושא

התא – מבנה ופעילות: *מיטוכונדריון – אברון תוך תאי.*



איור ה–9: חתך במיטוכונדריון. **מימין**: צילום במיקרוסקופ אלקטרונים (הגדלה בערך פי 30,000). **משמאל**: תרשים סכמטי.

רעיון מרכזי

התאמה בין מבנה ותפקוד:
מתבטאת במספר המיטוכונדריה בתאים השונים ומיקומם בהם.

יש התאמה בין **מספר** המיטוכונדריה בתא לבין הרמה של צריכת האנרגיה בו. לדוגמה: בתא שאוגר שומן באדם יש רק מיטוכונדריה אחדים, ואילו בתא מהכבד, שבו יש חילוף חומרים רב, יש בין 500 ל־2,000 מיטוכונדריה בכל תא והם מהווים חמישית מנפח התא. בתאים שפעילותם גבוהה עוד יותר, כמו תאי שריר הלב ותאי זרע, מספר המיטוכונדריה גדול עוד יותר.
בצמחים קיים מצב דומה: בתאי שורש צעירים, למשל, מספר המיטוכונדריה גדול מאשר בתאי הצמח האחרים.

גם **מיקום** המיטוכונדריה בתא קשור בתפקוד של האזורים השונים בתא. לדוגמה: בתאי שריר, המיטוכונדריה מרוכזים בשורות שבין הסיבים המתכווצים, ובתאי הזרע המיטוכונדריה מרוכזים סביב בסיס הזנב שבאמצעותו התאים נעים – אזורים שבהם צריכת ה־ATP גבוהה.

גם **שטח הפנים** של הקרום הפנימי של המיטוכונדריון שונה בתאים השונים בהתאם לצריכת האנרגיה בהם. לדוגמה: שטח הפנים של הקרום הפנימי של המיטוכונדריון בתאי שריר הלב גדול פי שלושה מזה שבמיטוכונדריון בתאי הכבד.

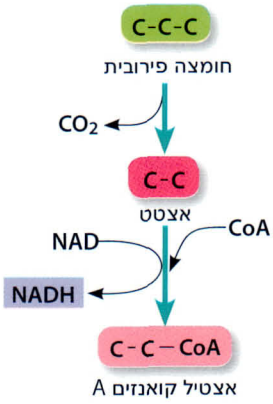
להלן שלושת השלבים של הנשימה התאית האווירנית המתרחשים במיטוכונדריון:

- חִמצוּן החומצה הפירובית שהתקבלה בגליקוליזה.
- "מעגל קרבס".
- העברת מימנים בצמוד לבניית ATP בתהליך הזרחון החמצוני.

שני השלבים הראשונים מתרחשים במדור הפנימי של המיטוכונדריון. השלב השלישי מתרחש על גבי הקרום הפנימי של המיטוכונדריון.

■ חִמצוּן החומצה הפירובית

תוצרי שלב הגליקוליזה – החומצה הפירובית ונשאי המימנים המחוזרים (NADH) – עוברים מהציטופלסמה אל תוך המיטוכונדריון. החומצה הפירובית, שבה 3 פחמנים, עוברת תחילה תהליך פירוק, שבו נוצרות מולקולה אחת של פחמן דו־חמצני (המשתחררת מהתא אל הדם) ומולקולה דו־פחמנית שנקראת אצטט (ראו איור ה–10).
האצטט נקשר לחומר שנקרא קואנזים A (באיור CoA) (קואנזים היא מולקולה הפועלת בשיתוף עם אנזים), ומתקבל חומר בשם **אצטיל קואנזים A**. במהלך היצירה של האצטיל קואנזים A, מועברים אטומי מימן מהחומצה הפירובית לנשא מימנים (NAD) ומתקבל נשא מימנים מחוזר (NADH) נוסף.



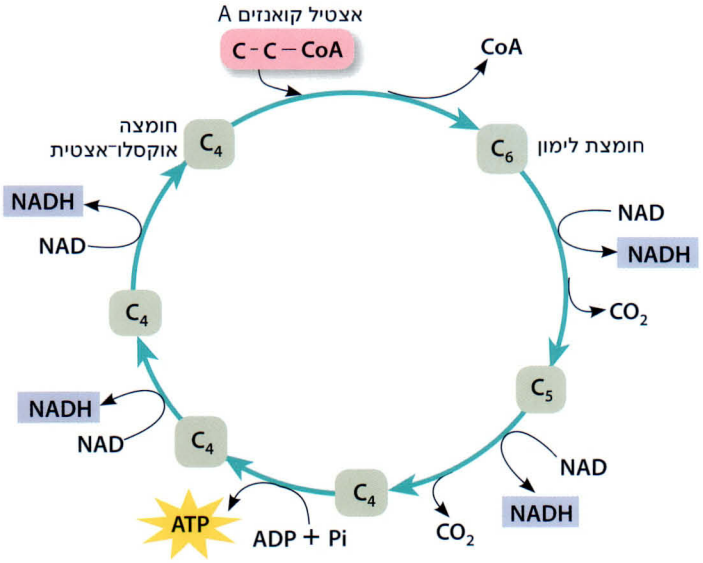
איור ה–10: תהליך פירוק מולקולת החומצה הפירובית וחמצונה המתקיים במיטוכונדריון.

שאלה ה–3:
מיינו למגיבים ולתוצרים את המולקולות הבאות השותפות לשלב חמצון החומצה הפירובית: NAD, CO_2, חומצה פירובית, NADH, אצטיל קואנזים A, קואנזים A.

■ מעגל קרבס

פירוק מולקולת האצטיל קואנזים A מתרחש בתהליך מעגלי רב־שלבי שנקרא מעגל קרבס על שם מגלהו ***הנְס קרבס*** (Hans Krebs 1900-1981). במעבר מחומר לחומר בשרשרת התהליכים של מעגל קרבס מתרחשים שינויים בשלד הפחמני של תרכובות הפחמן ומתקיימים מעברי אנרגיה. כפי שניתן לראות באיור ה־11, המעגל מתחיל עם הקישור בין אצטיל קואנזים A לבין מולקולה בת 4 פחמנים (חומצה אוקסלו־אצטית). מקישור זה מתקבלת מולקולה בת 6 פחמנים (חומצת לימון). בשלבים הבאים משתחררות מחומצת הלימון 2 מולקולות של CO_2 ונותרת תרכובת בת 4 פחמנים. לאחר כמה שלבים מוכנה תרכובת זו להיקשר פעם נוספת לאצטיל קואנזים A ולהתחיל "סיבוב" חדש של המעגל.

במהלך השתנות השלד הפחמני מחומצת הלימון ועד לחומצה האוקסלו־אצטית, עוברים מימנים מחומרי הביניים במעגל לנשאי מימנים. האנרגיה בנשאי המימנים המחוזרים תנוצל בשלב הבא לבניית ATP. נוסף לכך, במעגל קרבס נבנית מולקולת ATP אחת על כל מולקולה של חומצה פירובית (ובסך הכול 2 מולקולות ATP על כל מולקולת גלוקוז). ככל תהליך ביוכימי, גם התהליכים במעגל קרבס מלווים בפליטת חום.



איור ה־11: תרשים כללי של תהליכי מעגל קרבס.
שימו לב! חלק מחומרי הביניים במעגל מיוצגים רק באמצעות ציון מספר הפחמנים בתרכובת.

■ העברת מימנים ובניית ATP – זרחון חמצוני

שלב זה מתרחש גם הוא במיטוכונדריון ובו מתקבלות רוב מולקולות ה־ATP. בשלב זה, נשאי המימנים המחוזרים (NADH) שנוצרו בשלבים הקודמים, מגיעים אל הקרום הפנימי של המיטוכונדריון ומוסרים את המימנים לנשאים ייחודיים הממוקמים בקרום. שרשרת תהליכים המתרחשת בקרום הפנימי של המיטוכונדריון, שעליה תוכלו לקרוא בַּהרחבה שבהמשך, מאפשרת בניית מולקולות של ATP במערכת אנזימטית מיוחדת הממוקמת אף היא בקרום הפנימי. בתהליך נבנות כ־26–28 מולקולות ATP.

ומה קורה למימנים בסוף תהליך הנשימה התאית האווירנית?!

המימנים נקשרים בסופו של התהליך **לחמצן** (כן, אותו החמצן שהגיע מהסביבה ודרך הדם לתאים) ונוצרים מים.

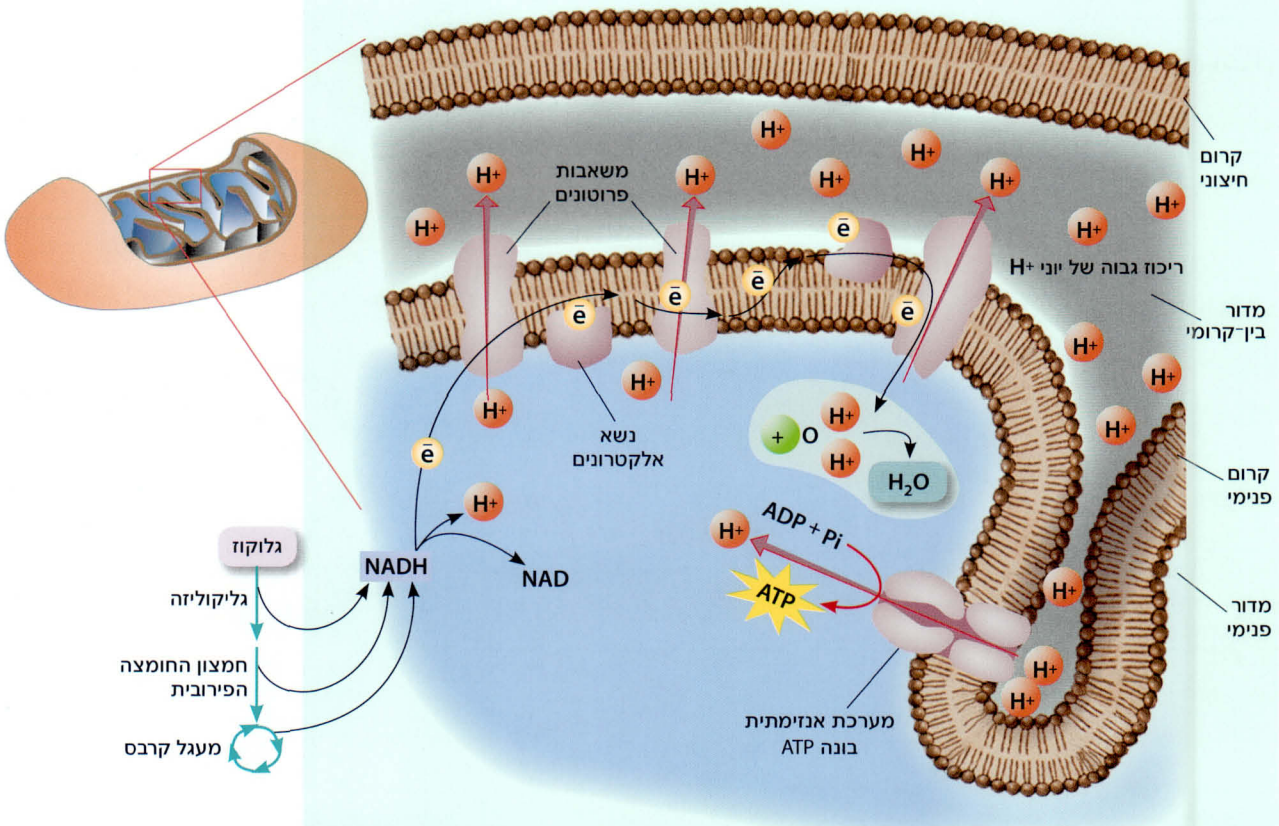
קשר לנושא
אקולוגיה:
מים מטבוליים.

קליטת המימנים מנשאי המימנים המחוזרים (ה־NADH) על ידי החמצן חיונית ל"מְחזור" נשאי המימנים. זאת כיוון שכמות מולקולות ה־NAD בתאים מוגבלת, ואם כל מולקולות ה־NAD היו מחוזרות (NADH), תהליך הנשימה התאית האווירנית היה נעצר.

הרחבה

הזרחון החמצוני במיטוכונדריה – צימוד בין תהליכי חמצון־חיזור לבין בניית ATP

כפי שהזכרנו לעיל, נשאי המימנים המחוזרים (NADH) שנוצרו בגליקוליזה ובשלבים הראשונים של הנשימה התאית האווירנית, מוסרים את המימנים לשרשרת של נשאים ייחודיים הממוקמים בקרום הפנימי של המיטוכונדריון. בתהליך זה, אטומי המימן נפרדים לאלקטרונים ($\bar{e}$) ופרוטונים (יוני H^+). הפרוטונים מועברים למדור הבין־קרומי והאלקטרונים הם שעוברים מנשא לנשא בשרשרת הנקראת "שרשרת מעבר האלקטרונים". מעבר זה הוא סדרה של תהליכי חמצון־חיזור (ראו עמוד 61), כאשר כל נשא בתורו מקבל אלקטרון (מִתחזר) ואז מוסר אותו (מתחמצן). מולקולות הנשאים מאורגנות בקרום הפנימי של המיטוכונדריון ברצף שבו כל נשא הוא מחמצן חזק יותר מקודמו ולכן הוא מסוגל למשוך את האלקטרון מהנשא הקודם לו בשרשרת. האנרגיה שמשתחררת במעבר האלקטרונים מנוצלת להעברת יוני המימן (H^+) אל המדור הבין־קרומי ועל ידי כך ליצירת מפל ריכוזים של יוני מימן משני צדי הקרום הפנימי (איור ה–12).



איור ה–12: זרחון חמצוני בקרום הפנימי של המיטוכונדריון: שרשרת מעבר האלקטרונים ומערכת בניית ה־ATP הצמודה אליה. הערה: משאבות הפרוטונים הן חלק משרשרת מעבר האלקטרונים.

הריכוז הגבוה של פרוטונים במדור הבין־קרומי הוא מאגר של אנרגיה פוטנציאלית (בדומה למים האגורים מאחורי סכר). הפרוטונים עוברים מהמדור הבין־קרומי למדור הפנימי של המיטוכונדריון, בהתאם למפל הריכוזים, דרך מערכת אנזימטית לבניית ATP שממוקמת בקרום הפנימי של המיטוכונדריון. זרם הפרוטונים הוא שמספק את האנרגיה הדרושה למערכת זו לבניית ATP.

מקבל האלקטרונים האחרון בשרשרת הוא חמצן מולקולרי, שהוא מחמצן חזק יותר מכל הנשאים בשרשרת. החמצן קושר הן את יוני המימן במדור הפנימי והן את האלקטרונים תוך כדי יצירת מולקולת מים.

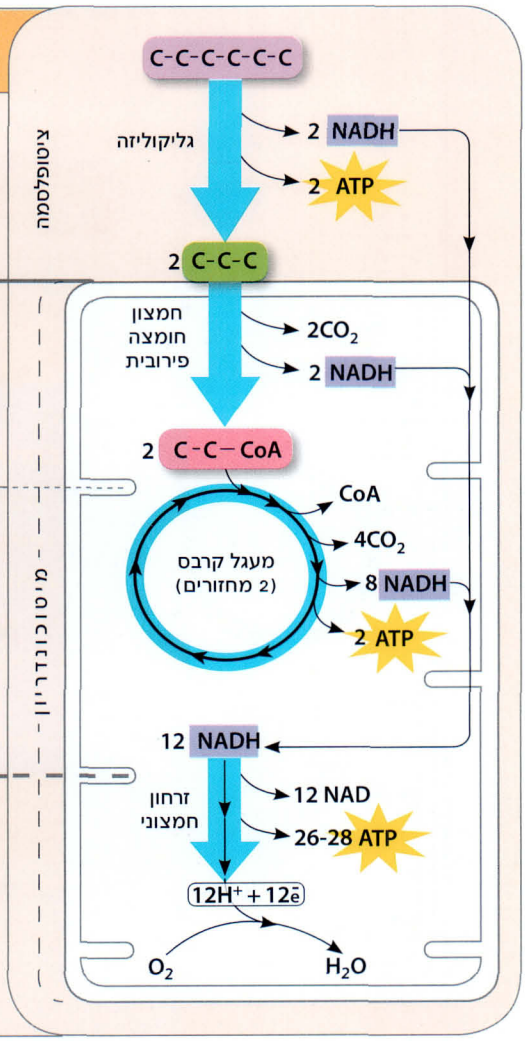
שם התהליך הוא **זרחון חמצוני** כי מתרחשת בו הוספת זרחן (זרחון) למולקולת ADP תוך כדי חמצון נשאי מימן מחוזרים.

טבלה ה–1 והאיור שבתוכה מסכמים את המסלול להפקת אנרגיה בנוכחות חמצן.

טבלה ה–1: סיכום תהליך הנשימה התאית האווירנית – מגלוקוז וחמצן ל־ATP, CO_2 ומים

שימו לב! חלק מהמגיבים שמופיעים בטבלה אינם מופיעים באיור.

שלב	מקום התרחשות	מגיבים	תוצרים
גליקוליזה	ציטופלסמה	גלוקוז (6 פחמנים)	2 חומצה פירובית (3 פחמנים)
		נשאי מימנים ללא מימנים (NAD)	נשאי מימנים מחוזרים (NADH)
		Pi + ADP	ATP
חמצון החומצה הפירובית	מדור פנימי במיטוכונדריון	חומצה פירובית קואנזים A	אצטיל (2 פחמנים) קואנזים A CO_2
		נשאי מימנים ללא מימנים (NAD)	נשאי מימנים מחוזרים (NADH)
מעגל קרבס	מדור פנימי במיטוכונדריון	אצטיל (2 פחמנים) קואנזים A	קואנזים A
		נשאי מימנים ללא מימנים (NAD)	נשאי מימנים מחוזרים (NADH)
		Pi + ADP	ATP
			CO_2
זרחון חמצוני	הקרום הפנימי של המיטוכונדריון	נשאי מימנים מחוזרים (NADH)	נשאי מימנים ללא מימנים (NAD)
		חמצן	מים
		Pi + ADP	ATP



שאלה ה-4:

מהסיכום המוצג בטבלה ה-1 רואים שתוצרים של שלב מסוים הם מגיבים בשלב אחר.
הביאו שלוש דוגמאות לחומרים שהם תוצרים בשלב אחד ומגיבים בשלב אחר.

לסיכום: בשני השלבים שאחרי הגליקוליזה מפורק השלד הפחמני של החומצה הפירובית לחלוטין עד למולקולות של פחמן דו־חמצני. כמות ה־ATP שנוצרת בשלבים אלו באופן ישיר אינה גדולה. השלב האחרון של מסלול זה הוא שמניב מולקולות ATP רבות, כאשר המימנים מנשאי המימנים המחוזרים (NADH), שנוצרו במהלך השלבים הקודמים, נקשרים לחמצן תוך יצירת מולקולות מים. מספר מולקולות ה־ATP המתקבל מ**חמצון מלא** של כל מולקולת גלוקוז הוא כ־30 (2 בגליקוליזה, 2 במעגל קרבס וכ־26–28 בזרחון החמצוני). המספר המדויק תלוי בגורמים שונים, אליהם לא נוכל להתייחס כאן.

הנוסחה הכוללת (והמאוזנת) של הפקת האנרגיה בתהליך הנשימה התאית האווירנית היא:

$$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 + 30ADP + 30Pi \xrightarrow{\text{אנזימים}} 6H_2O + 6CO_2 + 30ATP$$

למרות שיעילות הפקת האנרגיה במסלול הנשימה התאית האווירנית היא הגבוהה ביותר בתאים חיים, יש לציין שרק כ־40% מן האנרגיה המשתחררת מחמצון הגלוקוז מנוצלת להרכבת מולקולות ATP. השאר מומר לאנרגיית חום ונפלט מהתא. נשמע לכם בזבזני? לשם השוואה – יעילות הפקת האנרגיה מדלק במכוניות עומדת על כ־25%.

האם חומרים אורגניים אחרים מלבד גלוקוז יכולים לשמש להפקת אנרגיה בתא?!

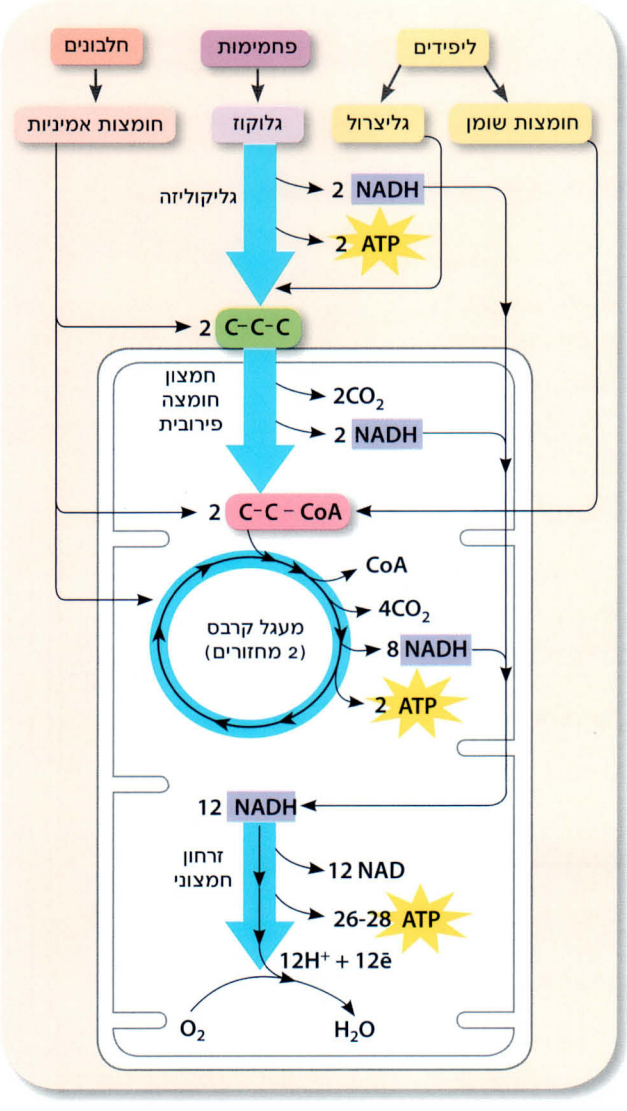
עד כה התמקד התיאור בתהליכי הפקת האנרגיה, כשהמגיב הראשון הוא גלוקוז.

חשוב לדעת שגם תוצרי הפירוק של הליפידים והחלבונים יכולים להשתלב בשלבים שונים של התהליכים ולשמש מגיבים ומקור אנרגיה, כפי שניתן לראות באיור ה-13.

הליפידים המגיעים לגוף, מתפרקים במערכת העיכול, ואל התאים מגיעים תוצרי הפירוק בעיקר חומצות שומן וגליצרול. מחומצות השומן נוצר אצטיל קואנזים A שמשתלב במעגל קרבס, והגליצרול שמשתלב בתהליך הגליקוליזה.

כמות האנרגיה (ATP) שהתא מפיק מחומצות שומן היא בערך כפולה מהכמות המופקת מגלוקוז.

בין הארוחות ובזמן פעילות גופנית ממושכת, פירוק שומן מספק כמחצית כמות ה־ATP הדרושה לתאי השרירים, הכבד והכליות. שומנים מנוצלים להפקת אנרגיה גם בעתות של מחסור בגלוקוז, כמו למשל בשנת חורף או בזמן נדידה.



איור ה-13: הפקת אנרגיה מחומרים אורגניים שונים.

חלבונים משמשים מקור לאנרגיה בתאים כאשר מקורות הפחמימות והשומנים אזלו, לדוגמה בצום או ברעב ממושך. מצב כזה אינו רצוי, היות ופירוק חלבונים עלול להזיק לתפקוד התקין של הגוף. החלבונים מתפרקים לחומצות אמיניות, המשתלבות כחומרי ביניים במעגל קרבס ובשלבים הקודמים לו. כמות האנרגיה (ATP) שהתא מפיק מחומצות אמיניות זהָה לכמות המופקת מגלוקוז.
בכבד אף קיים מסלול שבו חומצות אמיניות הופכות בעת הצורך לגלוקוז (מקור האנרגיה הבלעדי בתאי מערכת העצבים).

מעניין לדעת שחומרי הביניים בתהליכי הנשימה התאית יכולים לשמש אבני בניין לבניית חומרים אורגניים מורכבים. לדוגמה חומרי ביניים במעגל קרבס יכולים לשמש אבני בניין לבניית חומצות אמיניות או חומצות שומן.
מעגל קרבס והחומר אצטיל קואנזים A, מהווים צומת מטבולי חשוב בתא אשר מקשר בין תהליכי הפירוק לתהליכי הבנייה. תהליכי הפקת האנרגיה בתא ותהליכי הבנייה שבו קשורים אלו באלו ומווסתים מצד אחד על פי הצורך באנרגיה ומצד אחר על פי הצורך בבניית חומרים.

שאלה ה-5:
בבעירה של חומר אורגני, החומר מתפרק מיד ל-CO_2 ולמים. לעומת זאת, בתהליך הנשימה התאית האווירנית, החומר האורגני עובר תהליך פירוק רב-שלבי. מהו היתרון שיש לתאים מתהליך הפירוק הרב-שלבי?

שאלה ה-6:
בתהליכי התסיסה, כל האנרגיה (ATP) מתקבלת בשלב הגליקוליזה. הסבירו מדוע תוצרי הגליקוליזה (חומצה פירובית ונשאי מימנים מחוזרים) אינם יכולים להיות התוצרים הסופיים של תהליכי התסיסה.

שאלה ה-7:
מהו תפקידו החיוני של החמצן בתהליך הנשימה התאית האווירנית?

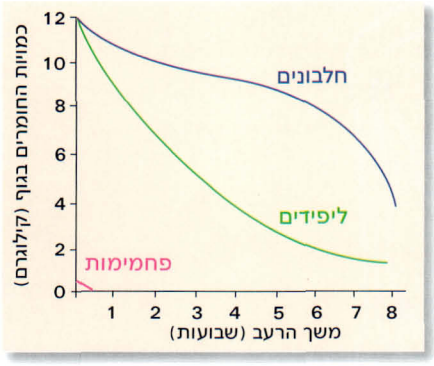
שאלה ה-8:
NAD נוצר מהוויטמין ניאצין (B_3), אך למרות תפקידו המרכזי בתהליך הנשימה התאית האווירנית, בעלי החיים אינם זקוקים לכמות גדולה של ניאצין. הסבירו.

שאלה ה-9:
מדוע יש לשמור על קרקע מאווררת באזור שורשי הצמח?

שאלה ה-10:
מדוע, בדרך כלל, אין צורך לחמם אולמות ספורט כאשר מתקיימת בהם פעילות ספורטיבית?

שאלה ה-11:

באיור ה-14 מתוארת השפעת רעב ממושך על כמות החומרים בגוף האדם. מה ניתן ללמוד מהאיור על כמויות החומרים בגוף ועל סדר ניצולם בעת רעב ממושך?



איור ה-14: השפעת רעב ממושך על כמויות חומרים בגוף.

אשנב למחקר

בניסוי שבו בדקו את צריכת החמצן של חלקי תא שונים הוסיפו גלוקוז ובדקו את צריכת החמצן בשני מקטעים:

1. רקמה כתושה (שכללה את כל מרכיבי התאים).
2. מיטוכונדריה בלבד.

התוצאות מוצגות בטבלה ה-2.

טבלה ה-2: קצב ממוצע של צריכת חמצן של חלקי תא שונים בנוכחות גלוקוז.

המקטע הנבדק	קצב ממוצע של צריכת חמצן (יחידות שרירותיות)
רקמה כתושה	100
מיטוכונדריה (שלמים) בלבד	3

שאלה ה-12:

א. הסבירו את ההבדל בצריכת החמצן בין שני המקטעים.

ב. איזה חומר יש להוסיף למקטע המכיל מיטוכונדריה בלבד כדי להעלות את צריכת החמצן בו? הסבירו קביעתכם.

תרדמת הדובים ו־ATP

נחזור לשאלה ששאלנו בתחילת הדיון על הפקת אנרגיה בהשתתפות חמצן (עמוד 142): ***לשם מה זקוקים הדובים לאנרגיה הרבה המופקת מהשומן בגופם בזמן תרדמת החורף?***

כמו שראינו בפרק זה, בדרך כלל, חלק ניכר מהאנרגיה המתקבלת מפירוק החומרים האורגניים משמשת לבניית מולקולות ATP, שמשמשות מקור אנרגיה זמין לפעולות החיים. התהליכים פועלים כך שקיים צימוד בין פעולות פירוק וחמצון החומרים האורגניים לבין בניית ATP.

בזמן תרדמת החורף, בהיעדר מזון פחמימני, מקור האנרגיה של הדובים הוא שומני גופם. בתאי השומן של הדובים מצויים חלבונים לא פעילים הנקראים **חלבונים מפרי צימוד**. בטמפרטורה נמוכה, מופעלים חלבונים אלה שתפקידם לפגוע בצימוד בין תהליכי העברת המימנים בנשימה התאית לבין בניית מולקולות ATP. כתוצאה מהפרת הצימוד, רוב האנרגיה הנפלטת בתהליך

רעיון מרכזי

ויסות והומיאוסטזיס: *מתקיימים באורגניזם החי כל העת, גם בשעת תרדמה.*



הנשימה התאית האווירנית אינה מנוצלת לבניית ATP אלא מתפזרת כחום. החום המשתחרר מפירוק השומנים עוזר לדובים לשמור על טמפרטורת גופם גם בימי החורף הקשים, ברמה המאפשרת את הפעילות האנזימטית המינימלית הדרושה לשמירה על הומיאוסטזיס גם בזמן תרדמת החורף.

על קצה המזלג...

תכשירי הדברה מסוכנים

בשנת 1986 הגיעה לבית חולים בארצות הברית ילדה בת שלוש וחצי ללא דופק וללא נשימה. אמה סיפרה ששעתיים לפני כן הילדה רחצה את הכלב שלה בתכשיר נגד פרעושים ומיד לאחר מכן הילדה החלה להקיא והפכה לישנונית. עשר דקות מאוחר יותר נשימתה הפכה מאומצת והיא איבדה את הכרתה ומתה.

בדיקה לאחר המוות הראתה מוות של תאים מרקמות שונות, פגיעה במיטוכונדריה שבתאים ורמות נמוכות מאד של ATP בתוך המיטוכונדריה.

ממצאים אלו העלו את החשד שחומר מסוים שמצוי בתכשיר נגד פרעושים פגע בנשימה התאית האווירנית בתאי הילדה וגרם למותה. חשוב לציין שככל הידוע זהו מקרה המוות היחיד שנגרם משימוש בתכשיר שכזה, והוא נבע ככל הנראה מחשיפה מסיבית של הילדה לחומר בעקבות שאיפה ובליעה שלו.

הכרת תהליך הנשימה התאית האווירנית מבארת את הסיבות למות הילדה.

שאלה ה–13:

בבדיקות נתגלה שרמות ה־ATP במיטוכונדריה שבתאי הילדה היו נמוכות בהרבה מהמצופה, אך רמות ה־ATP בציטופלסמה, היו תקינות. נוסף לכך, רמות האצטיל קואנזים A היו תקינות.

א. בהתבסס על ממצאים אלו, איזה שלב בנשימה התאית האווירנית נפגע על ידי התכשיר להשמדת פרעושים?

ב. האם הנשמה מלאכותית הייתה עוזרת לילדה? כיצד הגעתם לקביעה זאת?

3.4 מסלול 2: הפקת אנרגיה ללא השתתפות חמצן – תהליכי תסיסה ונשימה תאית אל־אווירנית

הפקת אנרגיה ללא השתתפות חמצן מתרחשת בתהליכי **תסיסה** או בתהליך שנקרא **נשימה תאית אל־אווירנית (אנאירובית)**. תהליכי התסיסה קיימים גם באורגניזמים פרוקריוטים, כמו חיידקים, וגם באורגניזמים אאוקריוטים בתנאי מחסור בחמצן, למשל שמרים ותאי שריר במאמץ. נשימה תאית אל־אווירנית כאמצעי להפקת אנרגיה קיימת רק באורגניזמים פרוקריוטים והיא תהליך נדיר יחסית.

שימו לב, בטעות מחליפים בין תסיסה לבין נשימה תאית אל־אווירנית. בסעיף זה נראה שאמנם שניהם תהליכים להפקת אנרגיה ללא השתתפות חמצן, אך הם שונים בתהליך הביוכימי המתרחש בתאים, בקולט המימנים הסופי ובמספר מולקולות ה־ATP הנוצרות בהם.

תהליכי התסיסה

מה משותף למלפפון חמוץ, ליין, למאפה שמרים, לבירה ו... לכאבי שרירים ?!

כולם נוצרו בתהליכי תסיסה.

תהליכי תסיסה מורכבים משני שלבים: א. גליקוליזה ב. העברת המימנים תוך מיחזור הנשאים. הפקת אנרגיה (יצירת ATP) מגלוקוז בתהליכי תסיסה מתרחשת בשלב הגליקוליזה בלבד והיא עומדת על 2 מולקולות ATP לכל מולקולת גלוקוז. מספר זה נמוך בהרבה ממספר מולקולות ה־ATP המופקות בנשימה התאית האווירנית.

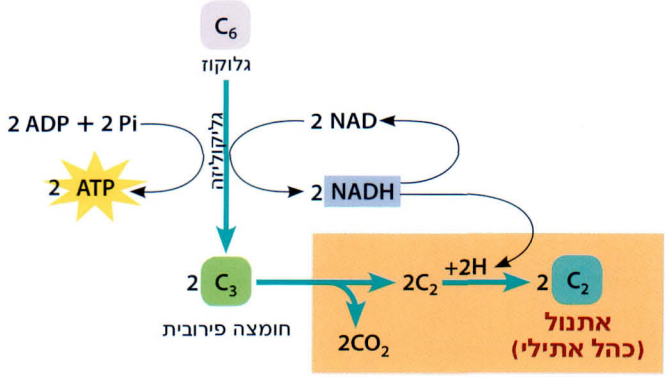
בשלב השני של תהליך התסיסה משתחררים המימנים מנשאי המימנים ומועברים לקולטי מימנים, וכך מתאפשר מִחזור נשאי המימנים חיוני לקיומם של מְחזורים נוספים של גליקוליזה.

קיימים מספר תהליכי תסיסה הנבדלים זה מזה בקולטי מימנים ובתוצרים הסופיים. אנו נעסוק בשני תהליכי תסיסה בעלי חשיבות בתעשיית המזון: תסיסה כוהלית ותסיסת חומצת החלב (תסיסה לקטית).

תסיסה כוהלית

בתסיסה הכוהלית מתפרקת תחילה החומצה הפירובית שהתקבלה בגליקוליזה ל־CO_2 ולחומר ביניים דו־פחמני. החומר הדו־פחמני קולט את המימנים מנשאי המימנים תוך יצירת אתנול (איור ה–15). האתנול, שאף הוא חומר דו־פחמני, וה־CO_2 משתחררים מהתא. מקורו של השם תסיסה הוא בועות הגז הנוצרות עם שחרור הפחמן הדו־חמצני.

תסיסה כוהלית מתקיימת בשמרים ובמיני חיידקים ומנוצלת על ידי האדם להתפחת בצק ולייצור האתנול המכונה בשפת היום־יום אלכוהול.



איור ה–15: תהליך התסיסה הכוהלית.

תסיסה כוהלית בשירות האדם

שמרים משמשים להתפחת בצק בהכנת מוצרי מאפה שונים. שמרים הם פטריות חד־תאיות וביכולתם לבצע הן נשימה תאית אווירנית והן תסיסה. בתחילת תהליך התפחת הבצק, השמרים מפיקים אנרגיה בנשימה תאית אווירנית, כאשר בסביבתם יש די חמצן וחומרי מזון זמינים כמו גליקוז. בתנאים אלה הם מתרבים בקצב מהיר ופולטים כמות רבה של CO_2 הנלכדת בבצק.

בהמשך תהליך ההתפחה, התנאים בבצק משתנים: יש פחות גלוקוז ופחות חמצן (את מקומו תופס CO_2). בתנאים אלו, השמרים עוברים להפיק אנרגיה בתהליך תסיסה כוהלית, והתרבותם מואטת. בתהליך התסיסה נוצרים אלכוהול וחומצות שונות המקנים לבצק טעמים וריחות רצויים.

התסיסה הכוהלית משמשת גם בתעשיית היין. בטבע מתפתחים בענבים זנים רבים של שמרים שניתן לזהותם כאבקה לבנה על גבי הענב. שמרים אלה מכונים "שמרי בר" או "שמרי פרא". בייצור יין מודרני, השיטה המומלצת היא השמדה של שמרי הבר ולאחר מכן הוספה מבוקרת של שמרים שפותחו במעבדה. השמרים שמצויים באופן טבעי על פני הענבים או אלה שהוספו, מאפשרים את הפיכת מיץ הענבים ליין על ידי תסיסה כוהלית. סוכר הענבים (גלוקוז) הוא מזונם של השמרים האלה. מעיכת הענבים יוצרת מגע בין השמרים לבין המיץ שבענבים.

על קצה המזלג...

תסיסה כבקשתך – יצירת משקאות אלכוהוליים שונים.

סוג המשקה האלכוהולי שנוצר תלוי בזן הענבים, בסוג השמרים, בכמותם, במשך התסיסה ובחומר המותסס. כך, למשל, אם התסיסה מופסקת בשלב מוקדם ונותרת כמות גדולה של סוכר שלא הותסס, מתקבל יין בעל טעם מתקתק הנקרא – חצי יבש, המכיל אחוז נמוך של אלכוהול (6%–9%). אם התסיסה נמשכת זמן רב יותר, מתקבל יין "יבש" – יין שיש בו אחוז גבוה יותר של אלכוהול (11%–12.5% אלכוהול).

"יינות קינוח" מיוצרים לרוב מענבים שנבצרו מאוחר, בשל כך אחוז הסוכר הטבעי בהם מאד גבוה. כאשר מופסק תהליך התסיסה שלהם, מתקבל יין שהוא גם מתוק וגם בעל אחוזי אלכוהול גבוהים.

המתיקות ואחוז האלכוהול הגבוה יחסית של יינות המכונים "יינות קידוש" נובעים מהוספת סוכר ואלכוהול בתהליך הייצור.

יין אדום מתקבל מהתססת הענב כולו (כולל קליפת הענב), ואילו יין לבן מתקבל מהתססת המיץ בלבד. עם סיום התסיסה, מפרידים את הנוזל מהמוצקים ומעבירים את היין ליישון במֵכלים גדולים.



הצבע האדום של היין בא למעשה מקליפת הענב ולא מצבע המיץ. יוצא אם כך שמענבים אדומים או שחורים אפשר ליצור לא רק יין אדום אלא גם יין לבן (בהסרת קליפות הענבים).

יינות תוססים ושמפניה מייצרים על ידי התססה נוספת של היין המוכן: מכניסים את היין המוכן לבקבוקים ומוסיפים סוכר ושמרים. נוצרת תסיסה שנייה המתבצעת בבקבוק סגור. מאחר שהבקבוק סגור, אין לגז CO_2 דרך לצאת, וכך נוצר הבעבוע האופייני.

תהליכי תסיסה המבוצעים על ידי שמרים, הם הבסיס ליצירת משקאות אלכוהולים נוספים, כאשר הגורמים הקובעים את הטעם הייחודי הם: סוג השמר וסוג הירק או הפרי המשמש כמצע לתהליך התסיסה למשל, שעורה (בהכנת בירה) תפוחי אדמה (בהכנת וודקה) אורז (בהכנת סאקי) ופירות שונים (בהכנת שיכר).

מעניין לציין שליקר הוא משקה אלכוהולי שלא מתקבל מתהליכי תסיסה, אלא מהשריית מזונות שונים (פירות, עשבי תיבול, קפה ועוד) באתנול נקי.

שאלה ה–14:

בניסוי גידלו שמרי אפייה בשתי צלחות פטרי. בכל צלחת היה מספר דומה של שמרים וכמות גלוקוז זהה במצע הגידול. צלחת אחת הונחה בנוכחות חמצן והשנייה – בהיעדר חמצן. החוקרים שיערו שמלאי הגלוקוז בצלחת פטרי אחת צפוי להיגמר יותר מהר מהמלאי בצלחת האחרת.

א. מהו הבסיס הביולוגי להשערת החוקרים?

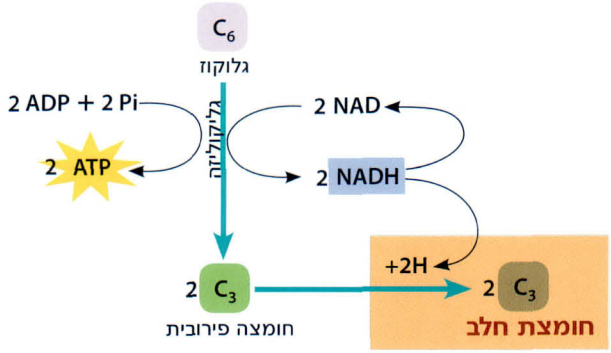
ב. באיזו צלחת ייגמר מלאי הגלוקוז מהר יותר? הסבירו קביעתכם.

תסיסת חומצת החלב (חומצה לקטית)

על אף שבתהליך זה אין שחרור גז, גם הוא מכונה תסיסה.

בתסיסת חומצת החלב משמשת החומצה הפירובית קולטת המימנים, ובמהלך התסיסה היא הופכת לחומצת חלב (איור ה–16). לחומצת החלב טעם חמוץ וריח אופייני.

תהליך זה מתקיים בחיידקי חלב, ויש לו שימושים בייצור שימורי ירקות וכן בייצור מוצרי חלב כמו יוגורט, גבינה ולבן.



איור ה–16: תסיסת חומצת החלב.

תסיסת חומצת החלב בשירות האדם



אחת הדרכים לשימור מזון היא החמצה. לשם כך מכניסים את המזון שרוצים להחמיץ (מלפפון, עגבנייה, כרוב, זיתים, חצילים) לכלי סגור ומוסיפים מים ומלח. המלח יוצר תנאים אוסמוטיים אשר גורמים למוות של אוכלוסיות חיידקים שאינם יכולים לחיות בלחץ אוסמוטי זה. חיידקי חומצת החלב, הנמצאים באופן טבעי על קליפות של פירות וירקות, יכולים להתקיים בלחץ האוסמוטי שנוצר, כך שלאורך זמן אוכלוסיית חיידקי החלב גדלה. חיידקי חומצת החלב מתסיסים את הסוכרים שבקליפות הפרי או הירק. תוצר תהליך התסיסה הוא חומצת חלב, הגורמת לירידת ה־pH בנוזל. ירידת ה־pH גורמת הן להחמצת המלפפונים והן לתמותה של מיקרואורגניזמים נוספים, ובכך מתאפשרת השמירה על הפירות והירקות לאורך זמן. יתר על כן, כתוצאה מירידת ה־pH גם חיידקי חומצת החלב מתים לבסוף ותהליך ההחמצה נעצר.

שאלה ה–15:

א. מדוע ירידת ה־pH בתהליך השימור פוגעת בחיידקים?

ב. מהי השפעת הירידה ב־pH על מוצרי החלב? תנו דוגמה.

סיפורו של גילוי

לואי פסטר בשירות תעשיית היין והמזון

לואי פסטר (Louis Pasteur 1822–1895), כימאי ומיקרוביולוג צרפתי, עסק בחקר של מיקרואורגניזמים שונים במסגרת ניסיונותיו לבירור השאלה: האם חי מוצאו מחי. כחוקר הוא נקרא לסייע בפתרון בעייתם של בעלי מזקקות באזורו שהכינו משקאות אלכוהוליים מסלק סוכר. בעייתם הייתה שהנוזל בחביות ההתססה החמיץ ולא התקבל כוהל כתוצר סופי.

לואי פסטר בדק את הנוזל שבחביות בעזרת מיקרוסקופ וגילה שבמקום השמרים שנמצאו בדרך כלל בחביות וגרמו ליצירת משקה אלכוהולי (שהכיר היטב מניסויים שונים), ישנם מיקרואורגניזמים בצורת מתגים, שלהשערתו הם שגרמו להחמצת הנוזל. פסטר גילה שחיידקים אלה, המצויים גם בחלב, הם הגורמים בסופו של התהליך ליצירת חומצת החלב, להחמצת המשקה ולקלקולו.

פסטר היה הראשון שהוכיח שתהליכי התסיסה מתרחשים בעזרת מיקרואורגניזמים. במחקרים נוספים של תהליכי התסיסה, פסטר מצא שבמיקרואורגניזמים שונים מתקיימים תהליכי תסיסה ייחודיים, ולכל אחד מהם תוצר סופי משלו.

פסטר גם שם לב לכך שבמיני מיקרואורגניזמים מסוימים, תהליכי התסיסה הם מקור בלעדי לאנרגיה. מיקרואורגניזמים אחרים, כמו שמרים, משתמשים במסלולים שונים להפקת אנרגיה בהתאם לתנאי הסביבה – נוכחות או העדר חמצן.

פסטר גם היה הראשון שהוכיח שחימום נוזלים שונים, כמו יין וחלב, מונע התפתחות חיידקים הגורמים להחמצתם. תהליך ה"פסטור" המשמש לעיקור חומרי מזון שונים (חלב, מיצי פירות, בירה ועוד) ממיקרואורגניזמים נקרא על שמו של פסטר.

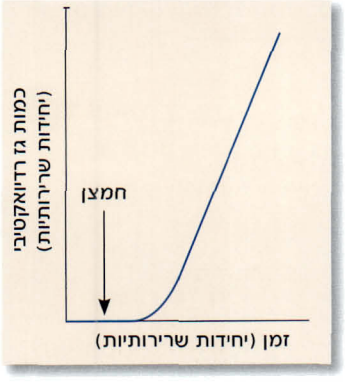
בהמשך מחקריו עבר פסטר לחקר מיקרואורגניזמים הגורמים למחלות זיהומיות באדם ולפיתוח חיסונים.



חומצת חלב נוצרת גם בתאי השרירים שבגופנו בעת פעילות מאומצת של השריר. במצב זה, כאשר קצב זרימת הדם אינו מספק די חמצן לפעילות המוגברת, נוצרים זמנית בתאי השריר תנאים אל-אווירניים, ובמשך זמן קצר מופקת בהם אנרגיה ללא חמצן. בתנאים אלו חימצון הגלוקוז הוא חלקי ותפוקת ה-ATP נמוכה. יתר על כן, בתאים מצטברת חומצת חלב הגורמת לתחושת כאב בשריר המאומץ (ראו הרחבה). חומצת החלב שהצטברה בשריר נישאת עם זרם הדם לכבד, שם היא יכולה לשמש לבנייה מחודשת של גלוקוז. בשריר הלב היא יכולה לשמש להפקת ATP. כשמתחדשת אספקת החמצן חומצת החלב יכולה להפוך שוב לחומצה פירובית ולהשתלב במעגל קרבס.

שאלה ה-16:

בניסוי גידלו תאי שריר של בעל חיים בכלי ובו מצע מזון המכיל גלוקוז, שחלק מאטומי הפחמן שלו היו בעלי סימון רדיואקטיבי (C^{14}). בתחילת הניסוי, התנאים בכלי היו אל-אווירניים. לאחר זמן החלו להזרים לכלי חמצן. בעקבות זאת החלה פליטה של גז מסומן בחומר רדיואקטיבי, כפי שמתואר באיור שלהלן:



א. אלו תהליכים התרחשו בכלי? איזה גז נפלט?

ב. מה תוכלו לומר על כמות הגלוקוז שנוצלה בכל אחד משלבי הניסוי? נמקו.

ג. הוסיפו כותרת לאיור.

שאלה ה–17:

בתהליך הנשימה התאית האווירנית ובתהליך התסיסה מתרחשים תהליכי העברת מימנים מה־NADH. לאלו חומרים מועברים המימנים בכל אחד מהתהליכים?

הרחבה

מהו המקור של כאב השרירים שאנו חווים בזמן פעילות גופנית מאומצת?

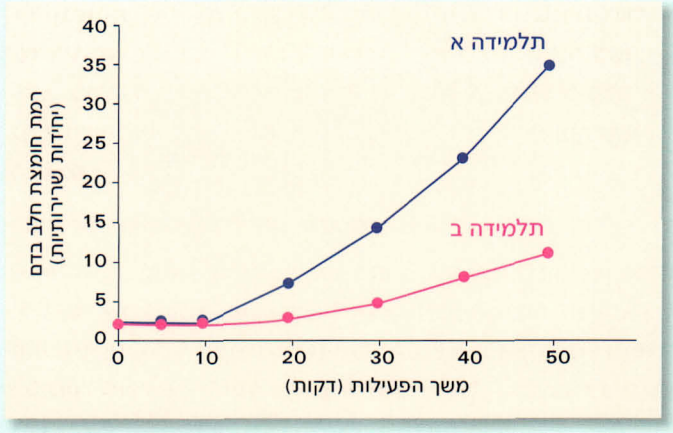
בעת מאמץ, כשאספקת החמצן לשריר הפעיל אינה מספיקה להפקת אנרגיה במסלול הנשימה התאית האווירנית, עוברים תאי השריר להפקת אנרגיה באמצעות תסיסה. חומצת החלב שנוצרת בתהליך התסיסה מצטברת ומורידה את ה־pH. הסביבה החומצית מגרה קולטני כאב עצביים מסביב לתאי השריר, ותהליך זה גורם לתחושת כאב בשריר. כאב זה מורגש בשעת המאמץ הגופני ומעט לאחריו (והוא שונה מהכאב הנגרם עקב התכווצות שריר). ככל שהחומציות גבוהה יותר (pH נמוך יותר), כאב השריר גדול יותר. דרגת החומציות תלויה בין היתר ביכולתו של השריר לפנות את חומצת החלב לדם. ככל שהאדם מאומן יותר, קצב פינוי חומצת החלב לדם מהיר ויעיל יותר, וכאב השריר קטן יותר.

רעיון מרכזי

ויסות והומיאוסטזיס:
בעת מאמץ משתנה מסלול הפקת האנרגיה בתאי השריר בהתאם לתנאים.

שאלה ה–18:

בניסוי השוו את רמות חומצת החלב בדמן של שתי תלמידות במהלך פעילות גופנית זהה שהן ביצעו. התוצאות מתוארות באיור ה–17.



איור ה–17: השפעת משך הפעילות הגופנית המאומצת על רמת חומצת החלב בדם.

א. תארו את ההבדלים בין תוצאות הבדיקה של שתי התלמידות.

ב. מי מהתלמידות נמצאת לדעתכם, בכושר גופני טוב יותר? על מה ביססתם את קביעתכם?

כפי שהזכרנו בפרק ד, מיקרואורגניזמים החיים בכרס מעלי הגירה מתקיימים בסביבה חסרת חמצן ומפיקים אנרגיה מגלוקוז בתהליך תסיסה. כידוע, בתהליך התסיסה אין פירוק מלא של גלוקוז, ותוצרי הפירוק של מיקרואורגניזמים אלו הם חומצות שומן נדיפות שמהן ניתן להפיק

אנרגיה נוספת. חומצות השומן נספגות דרך דופן הכרס אל זרם הדם ומועברות באמצעותו לכל תאי מעלה הגירה, שם הן משמשות מקור אנרגיה עיקרי בתהליך הנשימה התאית. בתהליך התסיסה משתחררים לכרס גם תוצרי לוואי: הגזים CH_4 ו־CO_2. את הגזים האלה מרחיקים מעלי הגירה באמצעות שיהוקים.

נשימה תאית אל־אווירנית (אנאירובית)

הנשימה התאית האל־אווירנית היא שֵם לתהליך נדיר להפקת אנרגיה ללא חמצן. תהליך זה קיים במינים של חיידקים שחיים בסביבות חסרות חמצן, למשל בביצות.

בדומה לנשימה התאית האווירנית, התהליך מתרחש בארבעה שלבים: גליקוליזה, חמצון החומצה הפירובית, מעגל קרבס וזרחון חמצוני, אך קיימים כמה הבדלים משמעותיים:

1. קולט המימנים האחרון אינו חמצן, אלא חומר אי־אורגני אחר. בחלק מהחיידקים הוא ניטראט (NO_3^-), אצל אחרים הוא סולפאט (SO_4^{-2}) ובחלק אחר קולט המימנים הוא CO_2.
2. התוצר הסופי אינו מים והוא משתנה בהתאם לקולט המימנים.
3. בתהליכי הנשימה התאית האל־אווירנית, כמות ה־ATP שנוצר נקבעת על פי קולט המימנים. מכל מולקולת גלוקוז מתקבלות יותר מ־2 מולקולות של ATP (מספר המולקולות המתקבלות בתהליכי תסיסה), אך פחות ממספר המולקולות המתקבלות בנשימה התאית האווירנית.

מכאן ברור גם הדמיון והשוני בין תהליכי התסיסה לבין הנשימה התאית האל־אווירנית.

הדמיון: שניהם תהליכים להפקת אנרגיה ללא השתתפות חמצן. השוני: קולט המימנים האחרון בתהליכי התסיסה הוא חומר אורגני ובנשימה האל־אווירנית הוא חומר אי־אורגני. תהליכי התסיסה פחות יעילים מהנשימה התאית האל־אווירנית. בתהליכי התסיסה ה־ATP נוצר רק בתהליך הגליקוליזה ואילו בנשימה התאית האל־אווירנית נוצרות מולקולות ATP נוספות גם במעגל קרבס וגם בשלב הזרחון החמצוני.



על קצה המזלג...

שימוש בחיידקים אל־אווירניים לטיהור שפכים

בתהליך טיהור מי השפכים, אפשר להפוך את החומר האורגני לגז הניתן לשימוש. לשם כך מכניסים למכל סגור את החומר האורגני ששקע בברכות הטיהור, הנקרא בוצה, ואוטמים אותו. לאחר מכן מעלים את הטמפרטורה במכל ל־55°C למשך כמה שעות. בתנאים אלו פועלים חיידקים אל־אווירניים שעמידים לטמפרטורות אלו, והם מבצעים **נשימה תאית אל־אווירנית**. בין תוצרי התהליך מתקבלת תערובת גזים הכוללת כ־60% CH_4 והיתר CO_2. תערובת גזים זו מכונה "ביוגז", וניתן להשתמש בה כמקור אנרגיה להסקת בתים, לבישול ואף להנעה של כלי רכב.

במים המטוהרים משתמשים להשקיית גידולים חקלאיים מסויימים (ולא לשתייה).



שאלה ה־19:

תהליך הפקת הביוגז מתבצע במכלים סגורים ואטומים. מהי הסיבה לכך?



שאלה ה־20:

ידוע כי מהירותם של תהליכים כימיים גדֵלה עם עליית הטמפרטורה. האם כדאי לחמם את המכלים לטמפרטורה של 100°C לקיצור התהליך?

בתהליך הנשימה התאית האווירנית (הכולל בתוכו הגליקוליזה), בצמוד לפירוק ולחמצון של גלוקוז עד לפחמן דו־חמצני ומים, נבנות כ־30 מולקולות ATP מכל מולקולת גלוקוז. בתהליכי תסיסה נבנות, רק 2 מולקולות ATP המופקות כבר בשלב הגליקוליזה. לתוצרי התסיסה (כמו חומצת חלב והכוהל אתנול) ולתוצרי הנשימה התאית האל־אווירנית (כמו מתאן) רמת אנרגיה גבוהה, אך הם מופרשים מהתא בלי שהאנרגיה שבהם מנוצלת. זו גם הסיבה שאלכוהול וביוגז בוערים וניתן להשתמש בהם כמקור אנרגיה בתעשייה.

שאלה ה־21:

לסיכום תהליכי הפקת האנרגיה בתאים (נשימה תאית אווירנית, תסיסה כוהלית, תסיסת חומצת החלב ונשימה אל־אווירנית), בנו טבלה וכתבו לגבי כל אחד מההיגדים הבאים אם הוא נכון או לא נכון:

- מתרחשת רק באורגניזמים אל־אווירניים
- מתרחשת רק במיקרואורגניזמים
- מתרחשת בנוכחות חמצן בלבד
- מתרחשת רק בציטופלסמה
- מתרחשת בציטופלסמה ובמיטוכונדריון
- בתהליך נוצר CO_2
- בתהליך נוצרים מים

דרגו את התהליכים מבחינת כמות האנרגיה המופקת מכל מולקולת גלוקוז.

ה5. פוטוסינתזה היא לא נשימה של הצמח

יש הנוטים לבלבל בין שני תהליכים המתקיימים בצמחים: פוטוסינתזה ונשימה תאית. יש הטוענים ש"הפוטוסינתזה היא הנשימה של הצמחים". אחרים אומרים ש"ביום הצמח עושה פוטוסינתזה ובלילה הוא נושם" (לטענת האחרונים יש להוציא בלילה צמחים מחדר השינה מאחר שבתהליך הנשימה הצמחים "גוזלים" את החמצן וגורמים לעליית רמת הפחמן הדו־חמצני בחדר).

האם יש אמת בטענות אלו?

לפני שנענה על כך נסכם בקצרה את הידוע לנו על שני התהליכים בצמח.

הצמח, כמו כל אורגניזם אחר, מבצע נשימה תאית ברציפות בכל שעות היממה – קולט מהסביבה חמצן ופולט אל הסביבה פחמן דו־חמצני. לעומת זאת בחלקים הירוקים של הצמח מתרחש בשעות האור תהליך הפוטוסינתזה, שבו הצמח קולט פחמן דו־חמצני ופולט חמצן. יוצא מכך שבתאי הצמח (בחלקים הירוקים) מתרחשים באור זה לצד זה שני התהליכים – תהליך הנשימה התאית ותהליך הפוטוסינתזה, בעוד שבלילה מתקיים רק תהליך הנשימה התאית. בטבלה ה־2 מוצגת השוואה בין שני התהליכים.

טבלה ה-2: השוואה בין תהליך הפוטוסינתזה ותהליך הנשימה

מאפיינים להשוואה	פוטוסינתזה	נשימה תאית אווירנית
מהות התהליך	**הרכבת** חומר אורגני מחומרים אי־אורגאניים תוך ניצול אנרגיית האור.	**פירוק** חומר אורגני לחומרים אי־אורגניים תוך הפקת אנרגיה.
חומרי המוצא	CO_2 ומים.	בדרך כלל פחמימה (גלוקוז) וחמצן.
התוצרים	פחמימה וחמצן.	CO_2 ומים.
מקום ההתרחשות	הכלורופלסט.	הציטופלסמה והמיטוכונדריון.
מועד ההתרחשות	רק בנוכחות אור (בשעות היום).	גם ביום וגם בלילה.
מעברי אנרגיה בתהליך	אנרגיית אור שהצמח קולט מומרת לאנרגיה כימית.	אנרגיה כימית (מהגלוקוז) מועברת לאנרגיה כימית ב־ATP וחלק ממנה מומר לחום.

הטבלה מציגה הבדלים רבים בין תהליך הפוטוסינתזה לתהליך הנשימה. קיימים הבדלים נוספים, המדגישים שאלו שני תהליכים שונים לחלוטין: הם מזורזים על ידי אנזימים שונים, שלבי הביניים שלהם שונים ואף האופן שבו גורמים שונים משפיעים עליהם, שונה. לסיכום, עלינו לזכור שהפוטוסינתזה היא תהליך הזנה של הצמח ולא תהליך נשימה שלו.

ומה לגבי הרעיון שכדאי להוציא פרחים מהחדר בלילה ?!

תהליך הפוטוסינתזה אינו מתרחש בחושך, ולכן בלילה אין פליטת חמצן על ידי הצמחים. תהליך הנשימה, לעומתו, מתרחש גם ביום וגם בלילה – כלומר הצמח צורך חמצן ופולט CO_2. אבל כמות החמצן הנצרכת בתהליך הנשימה של הצמח נמוכה יחסית לכמות החמצן באוויר החדר, וגם תרומת הפרחים לריכוז ה־CO_2 בחדר נמוכה יחסית. לעומת זאת, אדם נוסף הנמצא בחדר גורם ל"גזילת" כמות גדולה של חמצן ו"מעשיר" את החדר בהרבה CO_2 יחסית לפרחים, ולכן עדיף אולי להוציא אותו...

שיעור הנשימה התאית וקצב המטבוליזם נמוכים בצמחים יחסית לאדם. זאת מפני שבצמחים אין תנועה רבה, אין ויסות טמפרטורה, אין עיכול וההשקעה בהובלה קטנה יותר.

שאלה ה-22:

א. באלו תאים מתאי הצמח ובאלו תנאים מתקיימים גם תהליכי הפוטוסינתזה וגם תהליכי הנשימה התאית האווירנית?

ב. באלו תנאים מתקיים בתאי הצמח רק אחד מהתהליכים? הסבירו.

שאלה ה-23:

צמח שעמד באור נחשף לשניות ספורות לפחמן דו־חמצני שבו הפחמן רדיואקטיבי, והועבר מייד לסביבה מבודדת ומוארת שבה פחמן דו־חמצני לא מסומן. כעבור מספר ימים בדקו את האוויר שבסביבת הצמח ומצאו שהוא מכיל פחמן דו־חמצני מסומן. איזה תהליכים מודגמים בניסוי זה? הסבירו טענתכם.

שאלה ה-24:

אחד התלמידים בכיתה טען שתהליך הפוטוסינתזה ותהליך הנשימה הם תהליכים הפוכים. מה הייתם עונים לתלמיד? נמקו את טענתכם.

אשנב למחקר

הניסוי הבא ימחיש את היחסים בין תהליכי הנשימה התאית והפוטוסינתזה המתבצעים בצמחים, ובין תהליך הנשימה המתבצע בבעלי חיים.

בניסוי נבדקה נוכחות CO_2 בסביבה מימית שיש בה אורגניזמים שונים (צמחים ובעלי חיים). הניסוי נערך ב־8 מבחנות שבתוכן כמות מים זהה ואינדיקטור שמשנה את צבעו בנוכחות CO_2.

למעשה, האינדיקטור משנה את צבעו כאשר ה־pH בסביבה המימית יורד. רמת החומציות נמצאת ביחס ישר לכמות ה־CO_2 בתמיסה המימית (ככל שנפלט יותר CO_2, נוצרת יותר חומצה פחמתית ולכן ה־pH נמוך יותר).

צבע כחול – אין CO_2 (סביבה ניטראלית).

צבע אדום – מעט CO_2 (סביבה מעט חומצית).

צבע צהוב – הרבה CO_2 (סביבה מאוד חומצית).

צבע הנוזל במבחנות נבדק לאחר כשעתיים. בטבלה ה־3 מסוכמות תוצאות הניסוי.

טבלה ה־3: השפעת תהליכי נשימה ופוטוסינתזה על כמות CO_2 במבחנות המכילות אורגניזמים שונים

מספר מבחנה	מוחזקת ב־	התכולה	הצבע בתחילת הניסוי	הצבע בתום הניסוי	שינוי בכמות CO_2 במהלך הניסוי
1	אור	מים	כחול	כחול	נשארה זהה
2	אור	מים+חלזונות	כחול	צהוב	עלתה
3	אור	מים+חלזונות+אצות	כחול	אדום	
4	אור	מים+אצות	כחול	כחול	
5	חושך	מים	כחול	כחול	
6	חושך	מים+חלזונות	כחול	צהוב	
7	חושך	מים+חלזונות+אצות	כחול	צהוב	
8	חושך	מים+אצות	כחול	צהוב	

שאלה ה־25:

א. בעמודה המתאימה בטבלה ה־3 ציינו את השינוי שחל בכמות ה־CO_2 במהלך הניסוי (הכמות עלתה /ירדה/ נשארה זהה) בהתאם לשינוי בצבע האינדיקטור.

ב. השוו בין התוצאות בקבוצות המבחנות הבאות והסבירו את השינוי שחל בכמות ה־CO_2 תוך התייחסות לתהליכים שהתרחשו (נשימה תאית/פוטוסינתזה):

I. במבחנות 2, 3 ו־4?

II. במבחנות 4 לעומת 8?

III. במבחנות 3 לעומת 7?

ג. מדוע נכללו מבחנות 1 ו־5 בניסוי? הסבירו.

ד. על אלו גורמים יש לשמור קבועים בניסוי כדי שתוצאותיו ייחשבו למהימנות?

ה. האם הניסוי המתואר הוא ניסוי איכותי או כמותי? מדוע?

פוטוסינתזה ונשימה ברמה האקולוגית

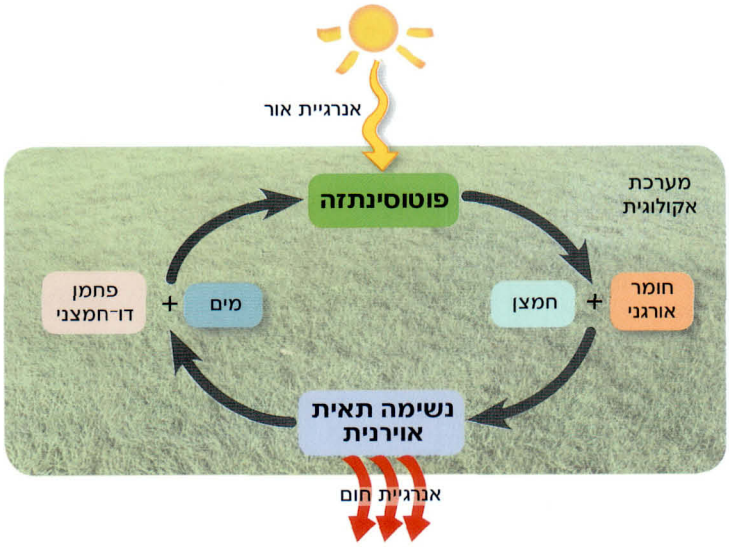
ברמה של המערכת האקולוגית (איור ה-18) הפוטוסינתזה והנשימה התאית הם שני תהליכים מרכזיים במחזוריות של חומרים ובמעברי אנרגיה בטבע.

החומרים המעורבים בהם – פחמן, מימן וחמצן, נעים במעגל סגור דרך אורגניזמים חיים הקשורים זה לזה במארג המזון. קיים קשר הדוק בין החומרים הנעים במעגל: חומרים המיוצרים בתהליך הפוטוסינתזה הם חומרי הגלם לתהליך הנשימה התאית, וחומרים הנפלטים בנשימה התאית הם חומרי הגלם לתהליך הפוטוסינתזה.

מבחינת **האנרגיה** – אין מעגל, יש קליטה ואיבוד מתמידים של אנרגיה. המערכת מתקיימת הודות לזרימה מתמדת של אנרגיה אליה: אנרגיית אור המגיעה מהשמש נקלטת על ידי הצמחים. בצמחים אנרגיית האור מומרת לאנרגיה כימית, וזו עוברת בין האורגניזמים במארג המזון ומנוצלת על ידם. חלק ממנה מומר לאנרגיית חום הנפלטת מן המערכת בלי שנוצלה.

קשר לנושא

אקולוגיה:
הביוספרה היא מערכת אקולוגית סגורה לחומרים ופתוחה לאנרגיה.



איור ה-18: נשימה תאית אווירנית ופוטוסינתזה מנקודת מבט של מערכת אקולוגית.

עיקרי הנושאים בפרק

- כל האורגניזמים מפיקים בתהליך הנשימה התאית אנרגיה כימית זמינה לצורכיהם על ידי חמצון החומרים האורגניים.
- חלק מהאנרגיה המשתחררת מפירוק וחמצון תוצרי העיכול בנשימה התאית, משמש ליצירה של ATP, המאפשר קיום תהליכים צורכי אנרגיה בתאים. שאר האנרגיה מומרת לאנרגיית חום.
- דוגמאות לתהליכים צורכי אנרגיה: שפעול חומרים פשוטים לבנייה של חומרים מורכבים, העברת חומרים בניגוד למפל הריכוזים, התכווצות שרירים.
- אנרגיה מופקת בתאים באחד משני מסלולים: בהשתתפות חמצן וללא השתתפות חמצן. השלב הראשון בכל אחד משני המסלולים הוא זהה (גליקוליזה).
- בתנאים אווירניים מתקיימת נשימה תאית אווירנית הכוללת ארבעה שלבים: גליקוליזה, חימצון החומצה הפירובית, מעגל קרבס וזרחון חמצוני. גליקוליזה וחימצון החומצה הפירובית מתרחשים בציטופלזמה. מעגל קרבס מתקיים במדור הפנימי במיטוכונדריה והזרחון החמצוני – בקרום הפנימי של המיטוכונדריה.

- חלוקת המיטוכונדריון למדורים והקיפולים הרבים של הקרום הפנימי שלו הם דוגמה להתאמה בין מבנה ותפקוד. גם מספר המיטוכונדריה ומיקומם בתאים השונים מותאם לתפקוד אותם התאים.
- בגליקוליזה מתפרקת מולקולה של גלוקוז (6 פחמנים) ל־2 מולקולות של חומצה פירובית (3 פחמנים). מימנים מהגלוקוז מועברים לנשאי מימנים, ונוצרות 2 מולקולות ATP.
- בחימצון החומצה הפירובית מתפרקת החומצה הפירובית ל־CO_2 ולאצטט. האצטט נקשר לקואנזים A ונוצר אצטיל קואנזים A שנכנס למיטוכונדריה.
- במעגל קרבס, אצטיל קואנזים A נקשר למולקולה בת 4 פחמנים ונוצרת חומצת לימון. השלד הפחמני של חומצת הלימון עובר במעגל שינויים, שבמהלכם מימנים עוברים לנשאי מימנים ונבנית מולקולת ATP על כל מולקולה של חומצה פירובית. השלד הפחמני חוזר להיות בן 4 פחמנים ומוכן לסיבוב נוסף.
- בתהליך הזרחון החמצוני, נשאי המימנים מוסרים את המימנים לשרשרת נשאים הממוקמים במיטוכונדריון. קולט המימנים הסופי הוא חמצן. אנרגיה המשתחררת במעבר, מנוצלת לבניית מולקולות ATP. מספר מולקולות ה־ATP המתקבל מחמצון מלא של כל מולקולת גלוקוז הוא כ־30.
- במסלול ללא השתתפות חמצן, הפקת האנרגיה מתרחשת באחד משני תהליכים: תסיסה ונשימה תאית אל־אווירנית.
- שני תהליכי תסיסה עיקריים הם אלה: תסיסה כוהלית ותסיסת חומצת החלב. בשני המקרים, החמצון של הגלוקוז אינו מלא.
- בתהליכי תסיסה מתקבלות מכל מולקולת גלוקוז רק 2 מולקולות ATP. הן מתקבלות כבר בשלב הגליקוליזה.
- נשימה תאית אל־אווירנית היא תהליך נדיר יחסית. התהליך כולל שלבים דומים לאלו המתרחשים בנשימה התאית האווירנית. ההבדל העיקרי בין שני התהליכים הוא שקולט המימנים הסופי אינו חמצן, אלא חומר אי־אורגני אחר (NO_3^-, SO_4^{-2}, CO_2). מספר מולקולות ה־ATP הנוצרות בתהליך תלוי בקולט המימנים הסופי. הפקת האנרגיה בנשימה התאית האל־אווירנית יעילה פחות מאשר בנשימה התאית האווירנית.
- צמחים מקיימים נשימה תאית אווירנית ברציפות בכל שעות היממה.

מושגים חשובים בפרק

ATP	חמצן
בניית (סינתזת) חומרים	מיטוכונדריון
גליקוליזה	מעגל קרבס
המרת אנרגיה	נשא מימנים (NAD)
העברה פעילה	נשימה תאית
הפקת אנרגיה	נשימה תאית אווירנית (אירובית)
התכווצות שרירים	נשימה תאית אל־אווירנית (אנארובית)
חומצה פירובית	צימוד
חילוף גזים	תהליכי תסיסה
חמצון	תהליכים צורכי אנרגיה (תהליכים ביואנרגטיים)
חמצון מלא	

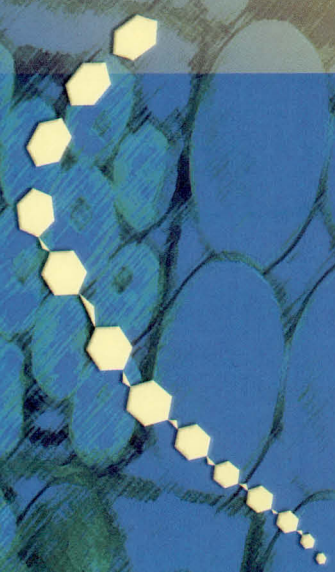


1 תזונה ובריאות האדם

1.1 מאזן אנרגיה
1.2 ויסות צריכת המזון
1.3 תזונה נבונה ומאוזנת
1.4 בעיות תזונה בעולם של מחסור ושפע

עיקרי הנושאים בפרק

מושגים חשובים בפרק



פרק ו: תזונה ובריאות האדם

עם התפתחות מדע הרפואה במאה ה־19 ובתחילת המאה ה־20 רווחה האמונה כי מציאת תרופה מתאימה לכל מחלה היא רק עניין של זמן. ברבות השנים, כשאמונה זו התגלתה כבלתי מציאותית, החלו להפנות משאבי מחקר רבים לבדיקת גורמים שונים המשפיעים על היווצרות מחלות ועל מניעתן. באלפי מחקרים שנעשו ברחבי העולם נמצא שלתזונה יש השפעה מכרעת על בריאות האדם, התפתחותו ותפקודו.

בעוד אצל חלק מאוכלוסיית העולם כמות המזון והרכבו אינם מספקים את החומרים הדרושים לגופם, בחלקים אחרים של העולם אנשים מוצפים במוצרי מזון רבים המשווקים בעזרת פרסום נרחב. האתגר בחלקים אלה של העולם הוא כיצד לעמוד בפני השפע המפתה ולבחור את מה שייטיב עם הבריאות ויספק את חוש הטעם.

המבוכה גדֵלה כאשר שומעים את שלל ההמלצות של רופאים ותזונאים, הסותרות לפעמים זו את זו, כמענה לשאלות **מה לאכול? כמה לאכול? ומתי לאכול?**

בפרק זה ננסה להציג בפניכם את העקרונות הבסיסיים של צורכי הגוף ואת הגישות המוסכמות על רוב אנשי המקצוע לגבי תזונה נבונה.

תוספי תזונה – כן או לא?

חברה ישראלית פיתחה תוסף תזונה – המוצג כפתרון לעשרות בעיות רפואיות, מסוכרת ועד סרטן. חוקרים טוענים כי אין עדיין הוכחות מדעיות להבטחות הללו, והיצרנים מצידם מציגים תוצאות חלקיות של מחקרים...

דיאטת פלא או נוכלות הדיאטות האופנתיות

בכל תקופה ותקופה מציעים מומחים שונים תרופות פלא לאנשי העולם המערבי הדשנים.

פעם זו דיאטה ללא פחמימות, פעם דיאטה של מזון לא מבושל ופעם דיאטת *אשכוליות*.

האם כדאי לאכול מוצרים ללא סוכר כאשר רוצים ל"חסוך בקלוריות"?

אנשים שעושים דיאטות הרזייה נוטים לרכוש מוצרים ללא סוכר מתוך אמונה שכך יפחיתו בצריכת הקלוריות, האומנם?

קפה, כן או לא?

קפה הוא אחד המשקאות הכי שנויים במחלוקת מבחינה תזונתית. בעוד שישנם אנשי רפואה ורפואה אלטרנטיבית שממליצים להתרחק לחלוטין משתיית *קפה*, ואנשים שיעידו כי הימנעות מוחלטת מקפה שיפרה את בריאותם, ישנם רופאים שדווקא ימליצו לשלב אותו בתזונה היומית, בשל סגולותיו, שהוכחו במחקרים שונים בשנים האחרונות...

דיאטת חלבונים, יעילה או מסוכנת?

דעות סותרות של מומחי תזונה ביחס ל"שגעת" דיאטת החלבונים, שפשטה כאש בשדה קוצים. האם יעילה לטווח קצר, האם עלולה להזיק בטווח הארוך? מבולבלים?...

11. מאזן אנרגיה

מאזן האנרגיה בגוף הוא היחס שבין כמות האנרגיה הנקלטת מהמזון לבין כמות האנרגיה המנוצלת על ידי הגוף. כאשר קיים איזון בין האנרגיה הנקלטת לבין האנרגיה המנוצלת, משקל הגוף נשמר קבוע, ואילו כאשר האיזון מופר לאורך זמן, חל שינוי במשקל הגוף. בסעיף זה נתייחס לחומרי המזון כמספקי אנרגיה, אך אל לנו לשכוח שחומרי המזון מספקים גם אבני בניין לרקמות ולתאים.

על מושגים

משקל ומסה

המונח "משקל גוף" הוא מונח יומיומי המקובל גם בקרב רופאים ותזונאים והוא מופיע גם בספרות המקצועית וגם בעיתונים. חשוב לדעת שהמונח המדעי הנכון הוא "מסת גוף". מסה היא כמות של חומר והיא נמדדת בקילוגרמים, בעוד משקל הוא הכוח הפועל על גוף, והוא נמדד בניוטונים. בפרק זה נשתמש ברוב המקרים במונח היומיומי "משקל".

1.11 כשאוכלים - קולטים אנרגיה

האנרגיה הדרושה לקיום כל תהליכי החיים של בני האדם ובעלי החיים מקורה במזון הנאכל.
הגוף יכול להפיק אנרגיה הן מהפחמימות, הן מהליפידים (המכונים בשפה היומיומית שומנים) והן מהחלבונים.
בוודאי ראיתם, שבתוויות על גבי אריזות של מזונות שונים כתוב **הערך האנרגטי** שלהם בקלוריות בלוויית פירוט **רכיבי המזון**. חשוב לשים לב שהקלוריות אינן חומר, אלא יחידות מידה המציינות כמה אנרגיה אפשר להפיק ממכלול חומרי המזון שבאריזה.



על מושגים

קלוריה, קילוקלוריה וג'אול

קלוריה אחת (calorie) היא כמות האנרגיה הדרושה כדי להעלות את הטמפרטורה של **גרם** אחד של מים במעלה אחת. היות והקלוריה היא יחידה קטנה, מקובל להשתמש ביחידה הגדולה ממנה פי 1,000 הנקראת "קילוקלוריה" או בקיצור קק"ל (Kcal). קילוקלוריה היא כמות האנרגיה הדרושה כדי להעלות את הטמפרטורה של **ליטר** אחד של מים במעלה אחת.

ברוב אריזות המזון משתמשים במונח קלוריות כאשר מתכוונים בעצם לקילוקלוריות, וגם בשפת היומיום כאשר אנו אומרים שתפוח גדול מכיל 60 קלוריות או שב־40 דקות של הליכה אטית "שורפים" 80 קלוריות – הכוונה היא בעצם לקילוקלוריות.
השימוש ביחידת המידה "קלוריה" מקובל כאשר עוסקים באנרגיה בהקשר של מזון, דיאטה ופעילות גופנית, ואילו כאשר עוסקים באנרגיה בהקשרים אחרים (לדוגמה: האנרגיה הדרושה להפעלת מכונה) משתמשים ביחידת מידה שנקראת ג'אול. בשנים האחרונות מתחילים להשתמש ביחידות של ג'אול גם בהקשר של תזונה (1 קק"ל = 4.2 ג'אול).
את כמות האנרגיה (הקלוריות) שמספק המזון, מחשבים בשיטה הנקראת **קלורימטריה**. בשיטה זו שורפים את המזון במֵכל סגור ומבודד מהסביבה, השקוע במֵכל מלא מים. כמות החום שנפלטת מהמזון עד לשרפתו המלאה, נמדדת על ידי השינוי שחל בטמפרטורה של המים שבהם המֵכל שקוע.

נתונים שהתקבלו בשיטת הקלורימטריה ומוצגים בטבלה ו–1, מצביעים על הבדל בכמות האנרגיה שמספקים רכיבי מזון שונים.

טבלה ו–1: כמות האנרגיה שמספקים רכיבי מזון שונים

רכיב המזון (1 גרם)	ערך אנרגטי (קילוקלוריות)
פחמימות	4
חלבונים	4
שומנים (ליפידים)	9

שימו לב! כמות האנרגיה שמספקים ליפידים גדולה בהרבה מכמות האנרגיה שמספקים הפחמימות והחלבונים.

הנתונים על כמות האנרגיה שמספקים רכיבי המזון והחלק היחסי של כל רכיב במזון מאפשרים לנו לחשב את הערך האנרגטי של מזון בלי לשרוף אותו. לדוגמה:
אם ידוע ש־100 גרם אורז מבושל מכילים 2.2 גרם חלבונים, 24.1 גרם פחמימות ו־0.2 גרם שומנים, אזי ניתן לחשב את הערך הקלורי של מנה זו:

$$107 \text{ קלוריות} = 2.2 \times 4 + 24.1 \times 4 + 0.2 \times 9$$
חלבונים פחמימות ליפידים

שאלה ו–1:

לפניכם סימון תזונתי של דגני בוקר מחיטה מלאה ואורז. בחנו את הערכים התזונתיים המופיעים בתווית.

ערכים תזונתיים ל-100 גרם דגני בוקר	
אנרגיה (קק"ל)	361
חלבונים (גרם)	8.4
פחמימות (גרם)	78.6
סיבים תזונתיים (גרם)	5.9
שומנים (גרם) מתוכם רוויים (גרם)	1.4 0.4
כולסטרול (מ"ג)	0
נתרן (מ"ג)	480
ברזל (מ"ג)	11.9
סידן (מ"ג)	500
ויטמין C (מ"ג)	102
חומצה פולית (מק"ג)	340



איור ו–1: סימון תזונתי של דגני בוקר.

א. אלו מבין המרכיבים המצוינים באיור ו–1 תורמים לערך האנרגטי של דגני הבוקר?

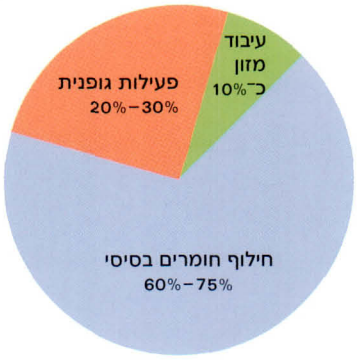
ב. חשבו את הערך הקלורי הצפוי ב־100 גרם של דגני הבוקר. האם קיבלתם את כמות הקלוריות המוצהרת על המוצר?

2.1ו כשחיים – מנצלים אנרגיה

גוף האדם מנצל אנרגיה כל הזמן, הן בזמן פעילות גופנית, הן בזמן מנוחה ואפילו בשינה. כפי שלמדנו בפרק ה, קיים צימוד בין חמצון תוצרי העיכול בתהליך הנשימה התאית ובין בניית ATP, המשמש מתווך אנרגטי בתהליכי החיים.

האנרגיה (כ־ATP) מנוצלת בשלושה סוגי תהליכים ופעילויות המהווים יחד את רכיבי **הניצול האנרגטי של הגוף**:

1. חילוף חומרים בסיסי
2. פעילות גופנית
3. עיבוד המזון



איור ו–2: החלק היחסי של כל אחד מרכיבי הניצול האנרגטי (בממוצע, באדם בוגר שאינו עוסק בספורט או בעבודה פיזית).

איור ו–2 מציג את החלק היחסי הממוצע של כל אחד מהרכיבים. בעמודים הבאים נפרט על כל אחד מרכיבי ניצול האנרגיה.

1. חילוף חומרים בסיסי – רכיב זה מבטא את כמות האנרגיה הדרושה לקיום הגוף במנוחה מלאה – קיום התהליכים הביוכימיים בכל תא ותא, הפעלת שרירי הנשימה, הפעלת מחזור הדם, קיום מתח שרירים ופעילויות בלתי רצוניות נוספות. קיום הגוף כולל גם תהליכים המסייעים בשמירה על הומיאוסטזיס כמו שמירה על טמפרטורת גוף קבועה.

מדידת כמות האנרגיה הדרושה לחילוף החומרים הבסיסי מתבצעת כאשר הנבדק נמצא במצב ערנות ובמנוחה שלמה, כ־12 שעות לאחר אכילה ובטמפרטורת סביבה בטווח שבין 25–28 מעלות צלזיוס.

אולי יפתיע אתכם לגלות שהאנרגיה הדרושה לחילוף חומרים בסיסי מהווה 60%–75% מכלל האנרגיה שהגוף מנצל. מעניין לדעת שלאדם כמעט ואין שליטה על קצב חילוף החומרים הבסיסי שלו.

קצב חילוף החומרים הבסיסי תלוי בגורמים שונים כגון:

- **הרכב הגוף:** רקמת שריר צורכת יותר אנרגיה מרקמת שומן גם במנוחה שלמה. ככל שמסת השריר גדולה יותר ביחס למסת השומן, קצב חילוף החומרים הבסיסי מהיר יותר. היחס בין מסת השריר למסת השומן קשור לגורמים כמו: גיל – ככל שהגיל עולה, יש ירידה ביחס שבין רקמת השרירים לשומן; מגדר – אצל נשים, בדרך כלל תכולת שומן גבוהה יותר ביחס למסת השריר מאשר אצל גברים.
- **גיל (קצב הגדילה):** בתקופות הינקות, הילדות וההתבגרות קצב חילוף החומרים הבסיסי מהיר יחסית. הקצב המהיר נובע מבנייה מוגברת של רקמות הגוף שהיא תהליך צורך אנרגיה.
- **טמפרטורת הסביבה:** ככל שטמפרטורת הסביבה נמוכה יותר, איבוד החום מהגוף גדול יותר. בבעלי חיים הומיאותרמיים, הדבר מביא להגברת קצב חילוף החומרים הבסיסי.
- **נגישות למזון:** במצב של מחסור מתמשך במזון (שבועות ויותר), קצב חילוף החומרים הבסיסי יורד.
- **תורשה:** קצב חילוף החומרים הבסיסי שונה מאדם לאדם. אנשים שחילוף החומרים הבסיסי שלהם אִטי יחסית, משתמשים בפחות אנרגיה לקיום הגוף במנוחה מלאה, וכתוצאה מכך נשארים בגופם יותר עודפי מזון ויש להם נטייה להשמנה. ולהפך, אנשים בעלי קצב חילוף חומרים בסיסי מהיר יחסית, משתמשים ביותר אנרגיה לקיום הגוף במנוחה מלאה, וכתוצאה מכך נשארים בגופם פחות עודפים והם בעלי נטייה להיות רזים.

הרחבה

תת־פעילות של בלוטת התריס

בקרב אנשים מבוגרים מופרת תופעה המאופיינת בעייפות רבה, בחולשה, בישנוניות, בהרגשת קור ובהשמנה, למרות שלא חל כל שינוי באורח חייהם.

פעמים רבות מתגלה בבדיקות דם שאנשים אלו סובלים ממחסור בהורמון תירוקסין עקב תת־פעילות של בלוטת התריס (המצויה בקדמת הצוואר). נמצא שהתירוקסין הוא אחד הגורמים המווסתים את חילוף החומרים, ובעת מחסור בו קצב חילוף החומרים יורד, מה שמסביר את התלונות שהוזכרו.

ייצור התירוקסין דורש יוד. לעתים תזונה דלה ביוד תגרום גם אצל אנשים צעירים לתופעות דומות. מקורות תזונתיים ליוד הם: דגי ים, אננס, צימוקים, אצות, ירקות ופירות הגדלים סמוך לים וכן מלח בישול מועשר ביוד.

שאלה 1–2:

במצבים מסוימים (למשל, פעילות־יתר של בלוטת התריס) יש ייצור־יתר של הורמון התירוקסין. מה צפויות להיות התלונות אצל אנשים הסובלים מבעיה זו?

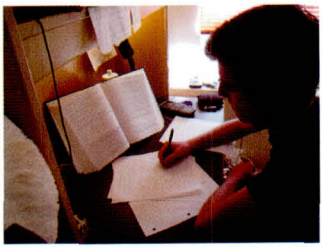
2. פעילות גופנית – רכיב זה מבטא את כמות האנרגיה המשמשת לפעילות גופנית. להבדיל מזו המשמשת לחילוף החומרים הבסיסי, כמות האנרגיה המשמשת לפעילות גופנית היא בשליטתנו ומושפעת מסגנון החיים, *מהכושר הגופני ומההתמדה בפעילות גופנית*.

ככל שהפעילות הגופנית נמרצת ורבה יותר, גוברת ההוצאה האנרגטית, כפי שניתן לראות בטבלה ו–2. נוסף לכך, פעילות גופנית מעלה את מסת השריר, ולכן היא למעשה האפשרות היחידה להשפיע על קצב חילוף החומרים הבסיסי.

אצל אנשים שלא מרבים לעסוק בעבודה פיזית (לדוגמה: חוקרים, פקידים) או בפעילות גופנית קבועה, מרכיב הפעילות הגופנית הוא רק כ־20%–30% מכלל ההוצאה האנרגטית. אצל אנשים העוסקים בעבודה פיזית (סבלים, נגרים) או בפעילות ספורטיבית קבועה ורבה, חלקו של רכיב זה עשוי להגיע עד ל־50% מההוצאה האנרגטית הכללית שלהם.

מעניין לדעת שפעילות שכלית נמרצת (למידה למבחן, למשל) כמעט ולא מעלה את ההוצאה האנרגטית מעל לזו הנדרשת לחילוף החומרים הבסיסי. לעומת זאת, מצבים נפשיים שונים המלווים בחוסר שקט גופני, גורמים לעלייה בהוצאה האנרגטית.





טבלה ו–2: ההוצאה האנרגטית לפעילויות שונות

סוג הפעילות	הוצאה אנרגטית לשעת פעילות (קילוקלוריות)
הליכה מהירה (5 קמ"ש)	350-300
שטיפת רצפות	250-200
הליכה אטית	200-120
נהיגה	120-60
לימוד לבחינה	60-50

סוג הפעילות	הוצאה אנרגטית לשעת פעילות (קילוקלוריות)
ריצה	600-500
כדורסל/כדורגל	600-500
שחייה	700-300
רכיבה על אופניים	400-300
ריקוד	400-200

3. עיבוד המזון – רכיב זה מבטא את כמות האנרגיה הדרושה לגוף לתהליכי פירוק המזון, לספיגתו ולתהליכי ניצול תוצרי הפירוק של המזון. תהליכים אלו מתרחשים בשעות שאחרי האכילה והם מלווים בעלייה בקצב הנשימה התאית ובפליטת חום. האנרגיה הדרושה למרכיב זה מהווה כ־10% מכלל האנרגיה המנוצלת.

לאחרונה הסתבר שכמות האנרגיה הדרושה לעיבוד המזון משתנה בהתאם להרכבו: עיבוד חלבונים צורך את האנרגיה הרבה ביותר, אחריו עיבוד הפחמימות ולבסוף עיבוד השומנים, שצורך את האנרגיה המועטה ביותר.

שאלה ו–3:

מדוע מודדים את כמות האנרגיה הדרושה לחילוף החומרים הבסיסי 12 שעות לאחר האכילה?

שאלה ו–4:

האם קצב חילוף החומרים הבסיסי של אנשים החיים באזורים קרים, יהיה מהיר יותר או איטי יותר מזה של אנשים החיים באזורים חמים?

שאלה ו–5:

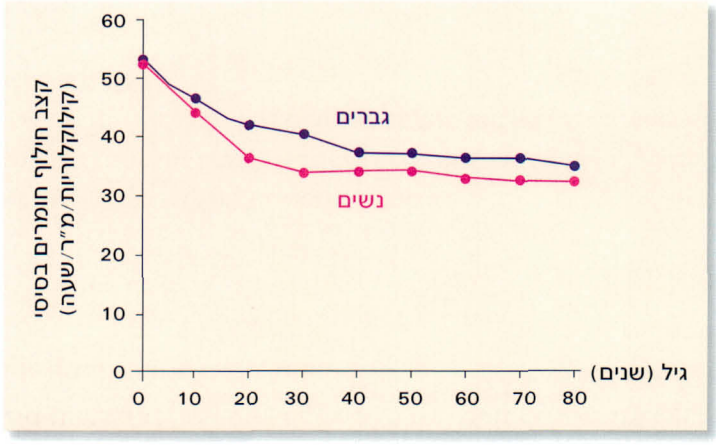
כאשר טמפרטורת הסביבה נמוכה, קצב חילוף החומרים הבסיסי עולה אצל אנשים גבוהים ורזים יותר מאשר אצל אנשים נמוכים ושמנים בעלי משקל זהה. הסבירו מדוע. התייחסו לשני גורמים התורמים להבדל זה.

שאלה ו–6:

בקרב אנשים שעשו דיאטת הרזיה חריפה מוכרת התופעה שלאחר הדיאטה – כשהם מתחילים לאכול בצורה מאוזנת – הם עולים במשקל. מה יכול להיות ההסבר לתופעה זאת?

שאלה ו–7:

התבוננו באיור ו–3 וענו על השאלות שאחריו.



איור ו–3: שינויים בקצב חילוף החומרים הבסיסי באדם במהלך השנים.

א. אלו שני גורמים, המופיעים בגרף, משפיעים על חילוף החומרים הבסיסי?

ב. ציינו שתי מסקנות שאפשר להסיק מהגרף.

ג. ציינו שני גורמים המשפיעים על חילוף החומרים הבסיסי שאינם מופיעים בגרף.

3.11 על איזון בין קליטת אנרגיה וניצולה

כאמור, חוסר איזון בין כמות האנרגיה הנקלטת, לבין כמות האנרגיה המנוצלת, מוביל לשינוי במשקל הגוף.

כאשר הגוף קולט לאורך זמן חומרי מזון שערכם האנרגטי הכולל (מספר הקלוריות שניתן להפיק מהמזון) גבוה ממה שהגוף מנצל, נוצר **מאזן אנרגיה חיובי**; התוצאה היא אגירה של תוצרי העיכול כשומן, כלומר השמנה. כאשר הגוף קולט לאורך זמן חומרי מזון שערכם האנרגטי נמוך מהאנרגיה שהגוף מנצל, נוצר **מאזן אנרגיה שלילי**; התוצאה היא שימוש במאגרי שומן שמוביל להרזיה. במקרים קיצוניים של מאזן אנרגיה שלילי מתמשך חל פירוק של חלבונים ברקמות.

כאשר לאורך זמן כמות האנרגיה הנקלטת בגוף ביממה דומה לזו המנוצלת (חילוף חומרים בסיסי, פעילות גופנית, עיבוד המזון), יש איזון אנרגטי ואין שינוי במשקל הגוף.







על קצה המזלג...

איך צוברים 1 ק"ג שומן בשבועיים? בקלי־קלות!

כדי לצבור בגוף 1 ק"ג שומן, צריך לקלוט 7,700 קק"ל עודפים. בתזונה המערבית, אין זו משימה קשה: אם במשך שבועיים נקלוט מידי יום 500 קק"ל מיותרים – העודפים יצטברו כקילוגרם אחד של שומן.

דוגמאות:

לחמנייה והמבורגר = 710 קק"ל

פלאפל בפיתה = 600 קק"ל

פיתה עם חומוס = 600 קק"ל

שקית צ'יפס = 540 קק"ל

משולש פיצה = 230 קק"ל

שקית במבה (100 גרם) = 503 קק"ל

גביע של גלידה = 550 קק"ל

בקבוק קולה (500 מ"ל) = 210 קק"ל

בוטנים קלופים (100 גרם) = 630 קק"ל

שאלה ו–8:

בחרו שניים מהמאכלים החביבים עליכם במיוחד מהרשימה שלמעלה. עתה בחרו אחת מהפעילויות המובאות בטבלה ו–2 וחַשבו כמה זמן יש לבצעה כדי "לקזז" את הקלוריות שנוספות לגוף באכילת שני המאכלים שבחרתם.

הרחבה

מהו המשקל התקין לכל אדם? על המדד BMI

אחת הדרכים להערכת תקינות המשקל של אדם מתבססת על חישוב ערך ה־BMI שלו (Body Mass Index). החישוב מתבסס על משקל האדם וגובהו.

$$BMI = \frac{\text{מסה (ק"ג)}}{\text{גובה}^2\ \text{(מ"ר)}}$$

דוגמה: לאדם שמשקל הגוף (מסת הגוף) שלו 70 ק"ג וגובהו 1.68 מטר, ה־BMI יחושב כך:

$$\frac{70}{1.68 \times 1.68} = 24.8$$

הערך המחושב הוא ערך ראשוני בלבד והוא אינו מביא בחשבון נתונים של מין, גיל והרכב גוף שהם ערכים חשובים להערכת תקינות המשקל. לכן, כאשר רוצים להעריך את תקינות המשקל באמצעות מדד BMI, הכרחי להביא נתונים אלו בחשבון.

טבלה ו–3: משמעות ערכי ה־BMI במבוגרים (מעל גיל 18):

טווח ערכי BMI	דירוג
קטן מ־18.5	תת־משקל
25–18.5	משקל תקין
30–25	משקל יתר
גדול מ־30	משקל יתר קיצוני

חשוב לשים לב שערכי ה־BMI מוצגים כטווח ולא כערך בודד. אחת הסיבות לכך היא שאנשים בעלי מבנה גוף שונה ומסת שרירים שונה יהיו בעלי BMI שונה. לדוגמה: לספורטאים יכול להיות ערך BMI גבוה יחסית, גם אם הם לא נראים שמנים, בשל מסת השרירים הגבוהה שלהם.

אופן חישוב ערך ה־BMI בילדים ובמתבגרים זהה לזה של מבוגרים, אך היות והם נמצאים בעיצומו של תהליך גדילה, והיות ואחוזי השומן בגוף משתנים באופן טבעי בתהליך הגדילה – הקריטריונים לפירוש ערכי ה־BMI שונים מאלו של מבוגרים.

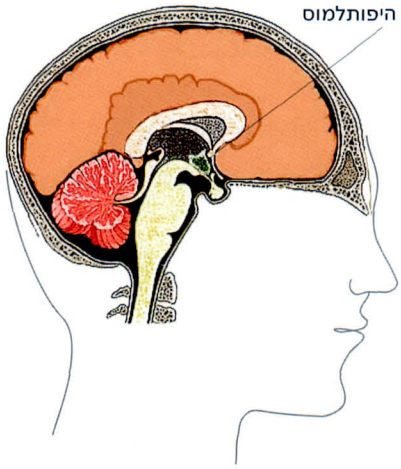
בחינת משקל הגוף של בני נוער והחלטות לגבי דיאטות חשוב שייעשו בהתייעצות עם אנשי מקצוע. אנשי מקצוע יביאו בחשבון את כל הגורמים המשפיעים על תקינות משקל הגוף שלהם, ובעיקר את העובדה שהם נמצאים בתהליכי גדילה.

2.1 ויסות צריכת המזון

על פי רוב, בעלי חיים אוכלים רק כשהם רעבים. נטייתם לחפש ולצרוך מזון נובעת מתחושת הרעב והיא דחף מולד החיוני להישרדות. לעומת זאת, בני האדם אוכלים לא רק כשהם רעבים – האכילה קשורה אצלם גם בגורמים נפשיים, חברתיים ותרבותיים. הפיזיולוג הצרפתי ***ברילא־סאווירין*** (Brillat Savarin) סיכם זאת כך (1825): "**מותר האדם מן הבהמה בכך שהוא אוכל בלי להיות רעב ושותה בלי להיות צמא**".

1.2 מרכז הרעב ומרכז השובע

חקר מנגנוני הרעב והשובע קיבל תנופה החל משנות החמישים של המאה ה־20, עקב העלייה המשמעותית במספר האנשים בחברה המערבית שהגיעו למשקל יתר קיצוני. רוב המחקר על מנגנוני הוויסות של צריכת מזון נעשה בבעלי חיים כמו חולדות וקופים, ובכך גם מגבלותיו. מחקרים הראו שהדחף להשגת מזון נשלט על ידי מרכז בקרה מוחי המצוי בהיפותלמוס (איור 1–4) והוא מורכב מ**מרכז הרעב** ומ**מרכז השובע**.



איור 1–4: מיקום ההיפותלמוס (מעל לגזע המוח) שנחשף בחתך לאורך הגולגולת.

נמצא שפגיעה באזור מסוים של ההיפותלמוס גרמה לחולדה לאכול כמויות קטנות ביותר של מזון ומשקלה ירד. אזור זה זוהה כמרכז הרעב.

פגיעה באזור אחר של ההיפותלמוס גרמה לכך שהחולדה אכלה ללא הפסקה ומשקלה עלה. אזור זה זוהה כמרכז השובע.

מרכזי הרעב והשובע מתפקדים הן בטווחי זמן קצרים והן בטווחי זמן ארוכים. בטווח הקצר, הם מפקחים על צריכת המזון ברמה היומית – מתי נאכל וכמה – וכן על חילוף החומרים ברמה היומית. בטווח הארוך הם מווסתים את הבנייה והניצול של מאגרי החומרים בגוף. בכך הם מסייעים בשמירה על משקל והרכב גוף יציבים פחות או יותר לאורך שנים (כל עוד אין תנודות משמעותיות בצריכת המזון ובפעילות הגופנית).

עיקר המידע הקיים כיום על מנגנוני הרעב והשובע קשור למנגנוני הטווח הקצר.

קשר לנושא

הביולוגיה של האדם:
מערכות תיאום ובקרה.

רעיון מרכזי

ויסות והומיאוסטזיס:
מרכזי הרעב והשובע כמנגנון הומיאוסטטי.

2.21 גורמים המשפיעים על צריכת המזון

למדענים אין עדיין הבנה מלאה של הגורמים והאותות המפעילים את מרכזי הרעב והשובע. קיימות השערות רבות, חלקן סותרות האחת את השנייה. מה שמוסכם על החוקרים הוא שהפעלת מרכזי הרעב והשובע אינה נעשית על ידי גורם אחד אלא על ידי מכלול גורמים, ושקיימים יחסי גומלין ביניהם.

בין הגורמים הפיזיולוגיים המשפיעים על **ויסות צריכת המזון**: **גירויים ממערכת העיכול** (עצביים והורמונליים), רמת תוצרי העיכול בדם, לדוגמה **רמת הגלוקוז בדם** ומצב מאגרי האנרגיה. גורמים אלו מעבירים למוח אותות עצביים והורמונליים על מצב החומרים והאנרגיה בגוף. בהתאם לאות, "משודרת" תחושת רעב או תחושת שובע, המשפיעה על חיפוש מזון או על הפסקת האכילה.

אותות שונים אחראים לבקרה בטווחי זמן שונים. לדוגמה, רמת תוצרי פירוק המזון בדם ואותות המעידים על כמות המזון באברי מערכת העיכול, הם אותות לטווח הקצר. מצב מאגרי הגוף, הוא אות לטווח הארוך.

כאמור, גם **גורמים נפשיים** וחברתיים עשויים להשפיע על צריכת המזון – מצבים כמו שעמום, מתח, חרדה, שמחה והתרגשות. ההשפעה תהיה שונה אצל אנשים שונים, ואף אצל אותו אדם ההשפעה אינה תמיד זהה.

להלן כמה דוגמאות לאותות המשפיעים על צריכת המזון:

1. **אותות עצביים**

א. **אותות המגיעים מאברי חוש, בעקבות גירויים סביבתיים**

מראה או ריח של אוכל, מראה של מסעדה אהובה ואנשים שאוכלים בסביבה הקרובה מפעילים כולם את מרכז הרעב.

ב. **אותות המגיעים מאברים במערכת העיכול**

בשעת האכילה והעיכול, דופנות הקיבה והמעי נמתחים. בדפנות אלו נמצאים תאי חישה הרגישים ללחץ, ששולחים אותות דרך מערכת העצבים למרכז הבקרה בהיפותלמוס. שם הם מתורגמים לתחושת שובע, שבעקבותיה מואטת או מופסקת האכילה. מזונות שזמן עיכולם רב יותר, ישהו זמן רב יותר בקיבה, וכתוצאה מכך יגרמו לתחושת שובע ממושכת יותר. לעומת זאת, בעקבות התרוקנות הקיבה היא מתכווצת ונשלח למוח אות לצרוך מזון.

2. **אותות הורמונליים**

א. **הורמונים המופרשים מאברים במערכת העיכול**

ההורמון **גְּרֶלין** מופרש מהקיבה כאשר היא ריקה. כאשר ההורמון גרלין מגיע עם זרם הדם להיפותלמוס, הוא יוצר תחושת רעב. מגע פיזי של אוכל עם תאי דופן הקיבה גורם לדיכוי הפרשת הגרלין ולירידה בתחושת הרעב.

ההורמון **כּוֹלצִיסְטוֹקינין** (CCK) מופרש מהתריסריון בתגובה להגעת מזון למעי. בפרק ד (עמודים 104–105) ראינו שההורמון גורם להפרשת מיצי עיכול לתריסריון וכן לסגירת שריר השוער בין הקיבה לתריסריון, פעולה שמאיטה את ריקון הקיבה ומייעלת את תהליך העיכול. נוסף לפעולתו המקומית, כשההורמון מגיע עם זרם הדם להיפותלמוס, הוא גורם לתחושת שובע.



על קצה המזלג...

נפח הקיבה ותחושת שובע

כאמור, בהתמלאות הקיבה נשלחים אותות עצביים למוח, הגורמים לתחושת שובע. לעיסה אִטית "מעסיקה אותנו" עם המזון עד להגעת אותות מהקיבה למרכז השובע, המתרחשת כ־20 דקות אחרי תחילת האכילה. באכילה מהירה, מסיימים את האוכל לפני שנשלחים האותות מהקיבה למרכז השובע, ולכן יש רצון להמשיך לאכול.

על בסיס הידע שקיבה מלאה מעניקה תחושת שובע, מבצעים באנשים הסובלים ממשקל יתר קיצוני ניתוח שבו מקטינים מאוד את נפח הקיבה. כתוצאה מהניתוח, תחושת השובע מושגת כבר לאחר אכילה של כמות קטנה יותר של מזון.

אחת הסברות היא שהפחתת תחושת רעב לאחר ניתוח הקטנת קיבה נובעת גם מהקטנת כמות התאים המפרישים גרלין.

אולם הניתוח לא תמיד מוביל להרזיה משום שתחושת השובע לא תמיד מובילה להפסקת אכילה. ידוע שהמשיכה למזון לא קשורה רק לצורך פיזיולוגי ולתחושות הרעב והשובע, אלא גם לגורמים רגשיים. יתר על כן, ניתוחים אלה כרוכים בסיכונים רבים נוספים.

ב. ההורמון אינסולין

ההורמון אינסולין מופרש מתאי־בטא בלבלב ביחס ישר לרמת הגלוקוז בדם. כאשר רמת הגלוקוז בדם עולה, גם רמת האינסולין עולה ומושגת תחושת השובע. כאשר רמת הגלוקוז בדם יורדת, גם רמת האינסולין יורדת ומתגברת תחושת הרעב.

על הקשר **הישיר** בין אינסולין ובקרת רעב ושובע למדו בין היתר מניסוי שבו החדירו אינסולין למוח חולדות באמצעות אינפוזיה. טיפול זה גרם לירידה באכילה ולהפחתת משקלן של החולדות ללא קשר לרמת הגלוקוז בדם.

ג. הורמונים המופרשים ממאגרי אנרגיה (תאי שומן)

נוסף להיותם מאגר של חומר תשמורת (שומן), תאי השומן גם מפרישים הורמונים. **לֶפְּטִין** הוא הורמון חשוב המיוצר על ידי תאי השומן. להורמון זה מיוחס פיקוח בטווח הארוך על צריכת המזון. ייצורו של הלפטין נמצא ביחס ישר למסת השומן ולתכולת הטריגליצרידים בתאים אלו. ככל שמסת השומן גדולה יותר ותכולת הטריגליצרידים בתאים גבוהה יותר, ייווצר יותר לפטין. מרכז הבקרה הנמצא במוח מגיב להורמון זה בתחושת שובע. כשמאגרי השומן מתרוקנים, מתמעט ייצור הלפטין בתאי השומן ונוצרת תחושת רעב.

קיימת סברה שאצל אנשים בעלי משקל יתר קיצוני, שבדמם רמה גבוהה של לפטין לאורך זמן, נוצרת בהיפותלמוס עמידות ללפטין, וסף התגובה של ההיפותלמוס ללפטין עולה מאוד. כך, למרות רמות גבוהות של לפטין בדם לא נוצרת הרגשת שובע ואין ירידה בצריכת מזון.

3. אותות הקשורים לריכוז תוצרי העיכול בדם

ה**גלוקוז**, למשל, בהגיעו למוח הוא נקשר לקולטנים ו"מתפרש" כתחושת שובע. הגלוקוז נקשר גם לקולטנים בתאי הכבד וגורם לשליחת אות עצבי למוח, המתפרש אף הוא כתחושת שובע. מובנת אם כן הדרישה של אמהות בכל העולם – לא לאכול דברי מתיקה לפני האוכל. מעניין לדעת שלא כל החד־סוכרים גורמים לתחושת שובע: הפרוקטוז שנמצא במשקאות מתוקים רבים, מגביר את תחושת הרעב (למען הדיוק, תוצרי הפירוק של הפרוקטוז הם הגורמים לתחושה זאת).

שאלה ו–9:

סכמו בטבלה את השפעת ההורמונים גרלין, כולציסטוקינין, אינסולין ולפטין על צריכת המזון. התייחסו למקום שממנו כל אחד מההורמונים מופרש, לגירוי הגורם להפרשתו, לפעילותו של ההורמון ולתחושה שהוא גורם (רעב/שובע).

אשנב למחקר



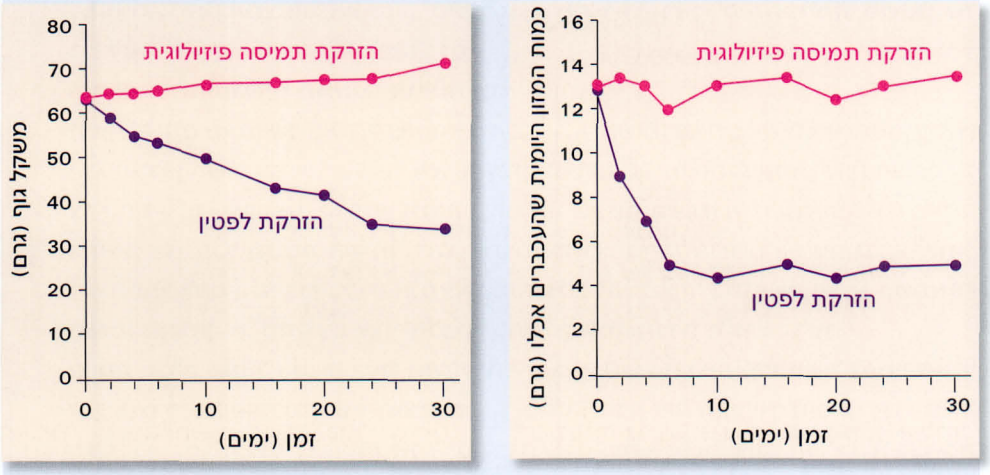
איור ו–5: מימין: עכבר בעל מוטציה בגן ללפטין. משמאל: עכבר רגיל.

בשנות החמישים של המאה ה־20 נמצא זן של עכברים שמשקלם היה גבוה פי שלושה מעכברים רגילים (איור ו–5). תאי השומן שלהם כמעט שלא יצרו לפטין.

בעכברים אלה נמצאה מוטציה בגן ללפטין, והחוקרים שיערו שהזרקת לפטין לעכברים השמנים תשפיע על צריכת המזון שלהם ועל משקלם.

בניסוי שנערך לבדיקת ההשערה, בדקו עכברים (ממין נקבה) בעלי מוטציה לגן לפטין (בדמם לא היה לפטין) שסבלו מהשמנה. העכברים חולקו לשתי קבוצות, בכל אחת עשרה עכברים. קבוצה אחת קיבלה מדי יום זריקה של לפטין ולקבוצת העכברים השנייה הוזרקה מדי יום תמיסה פיזיולוגית. הניסוי נערך במשך חודש, במהלכו נבדקו כמות המזון שהעכברים אכלו ומשקל גופם.

תוצאות הניסוי מוצגות בשני הגרפים שבאיור ו–6:



איור ו–6: השפעת הזרקת לפטין על כמות המזון היומית שאכלו העכברים בעלי מוטציה לגן לפטין (ימין) ועל משקל גופם (שמאל).

שאלה ו–10:

א. תארו את תוצאות הניסוי. האם ניתן ללמוד ממנו על הקשר בין לפטין לתחושת שובע? הסבירו קביעתכם.

ב. מהי החשיבות של קבוצת העכברים לה הוזרקה תמיסה פיזיולוגית? התייחסו בתשובתכם לגורמים החלופיים שניתן לשלול בעזרת קבוצה זו.

ג. כיצד הייתם בוחנים את ההשערה שהזרקת לפטין לעכברים שאינם סובלים מחסר בלפטין, אינה משפיעה על צריכת מזון ועל מסת גוף.

ד. נוסף לתפקידו של הלפטין בבקרת רעב ושובע, רמת הלפטין משפיעה גם על תהליכי פוריות. אצל נקבות של יונקים הסובלות מרעב מתמשך רמות הלפטין נמוכות מאוד, וכתוצאה מכך יש הפסקה במחזור החודשי. מהי, לדעתכם, המשמעות האבולוציונית לקשר שבין לפטין ומידת הפוריות?

האם לפטין מתאים גם לטיפול בבני אדם ?!

מחקרים הראו שרק מיעוט מקרב האנשים הסובלים ממשקל יתר נושאים את המוטציה לגן ללפטין. באנשים אלה מקובל כיום לטפל על ידי הזרקת לפטין. אולם אצל רוב הסובלים ממשקל יתר נמצא שרמות הלפטין גבוהות, ולכן הם לא יפיקו כל תועלת מטיפול כזה.

1.3 תזונה נבונה ומאוזנת

רופאים, דיאטנים ומומחים שונים קוראים לנו להקפיד על *"תזונה נבונה"*, *"תזונה מאוזנת"*, *"תזונה נכונה"*, *"אוכל מזין"* ו*"מאכלי בריאות"* ולהימנע מ*"ג'אנק פוד"*.

גם אריזות המזון אינן "מסתפקות" בדיווח על המוצר, אלא משתמשות בביטויים רבים כמו: ללא כולסטרול, דל־סוכר, נטול־קפאין, בטעם פירות; כולם משדרים – כדאי לצרוך מזון זה, הוא בריא יותר.

איך נדע לבחור בצורה נבונה את המזון הנכון **לנו**?

1.3.1 האם יש נוסחה ל"תזונה נכונה"?

התשובה לשאלה זו אינה פשוטה ולמעשה אין תפריט אחד שנכון לכולם. אנו שונים זה מזה במבנה גופנו, באורח חיינו, בהרגלי האכילה שלנו ובהעדפות המזון שלנו לפי טעם ותרבות. לכן, גם התפריט צריך להיות מותאם לצרכים האישיים ולהעדפות של כל אחד ואחת. תפריט ש"נכון" לספורטאים הוא לאו דווקא "נכון" לפקידי בנק, תפריט שמתאים לנערים מתבגרים הוא לאו דווקא מתאים לקשישים וכן הלאה. התפריט צריך להיות מותאם בעיקר למבנה הגוף, לגיל ולרמת האנרגיה המנוצלת.

לאיכות התזונה חשיבות רבה בכל הגילים, אך חשיבותה גדולה במיוחד בתקופות הילדות וההתבגרות המתאפיינות בתהליכי גדילה והתפתחות מואצים. לתוספת המואצת של רקמות גוף דרושים רכיבי מזון רבים ותוספת אנרגיה. אם לא ייקלטו – יפגע קצב הגדילה ותואט או תידחה ההתפתחות המינית.

תזונה נכונה היא קודם כול תזונה מאוזנת שמקיימת שני תנאים: א. היא מספקת לגוף את הצרכים האנרגטיים שלו כך שתתקיים התאמה בין כמות האנרגיה הנקלטת לבין כמות האנרגיה המנוצלת (עמוד 169); ב. היא מספקת לגוף את כל רכיבי המזון החיוניים לבנייה ולתפקוד תקין.

קיימות גישות שונות לתזונה נכונה. עם זאת, על פי הגישה המקובלת על רוב העוסקים בתחום, תזונה נכונה היא כזאת ש:

- תכלול נוזלים רבים כמו מים וסודה, ללא סוכרים או תוספות מלאכותיות שונות.
- תכלול דגנים (בעיקר מלאים) וירקות ופירות לפחות מחמישה צבעים שונים בכל יום.

- תכלול חלב ומוצריו, דלים בשומנים.
- תכלול בשרים רזים כמו עוף ודגים, וכן ביצים, קטניות ואגוזים.
- תהיה דלה בחומצות שומן רוויות, בחומצות שומן מסוג טראנס ובכולסטרול.
- תהיה דלה במלח ובסוכרים פשוטים.
- ערכה הקלורי לא יעלה על הצרכים האנרגטיים של הגוף.

2.3ו פירמידת המזון

את ההמלצות שפורטו לעיל נהוג לבטא בצורה גרפית באמצעות פירמידת המזון (ראו איור ו–7): הפירמידה שמה דגש על צריכה של מזון מגוון בשילוב הרגלי חיים בריאים, כמו שתייה רבה של מים ופעילות גופנית כחלק משגרת החיים.



איור ו–7: תזונה מומלצת – קבוצות המזון והכמויות היחסיות שיש לצרוך מהן, על־פי משרד הבריאות הישראלי (2010).

פירמידת המזון הישראלית, בנויה מ־6 מדרגות המייצגות את כל הקבוצות במזוננו. לכל קבוצה מרכיב עיקרי ייחודי. רוחב המדרגה מייצג את הכמות היחסית המומלצת בתפריט מאותה קבוצת מזון. ככל שעולים בפירמידה, יש לאכול כמות קטנה יותר ממזונות הקבוצה. הפירמידה יכולה לסייע בבניית תפריט מגוון ומאוזן.

שימו לב! ברקע הפירמידה מוצגות פעילויות גופניות שונות. נתייחס תחילה למדרגות השונות בפירמידה, ובהמשך לפעילות הגופנית.



א. מים

בבסיס הפירמידה מצויים המים. כזכור לכם, בספר זה (עמוד 11) כללנו בהגדרת המזון גם חומרים אי־אורגניים ובהם המים. המים הם המרכיב העיקרי בגוף והם הכרחיים לתפקודו התקין. מים רבים אובדים מהגוף במהלך יממה, בעיקר דרך הכליות, שכן רוב החומרים המיותרים והמזיקים יכולים להיפלט מהגוף רק כאשר הם מומסים במים. הגוף מאבד מים גם בדרכי הנשימה ודרך העור – בהזעה. החזרת מים לגוף נעשית באמצעות שתייה, וההמלצה היא להעדיף שתיית מים על פני משקאות קלים ממותקים.

מקובל לחשוב ש...

אסור לשתות מים אחרי שאוכלים פירות. האמת: זה לא נכון! אין כל נזק בשתיית מים לאחר אכילת פירות, מאחר שגם הפרי עצמו מכיל כמות ניכרת של מים. שתיית מים אינה גורמת לשלשול, וחשוב תמיד לשתות הרבה לפני או אחרי אכילת פירות.

לא לשתות בזמן האוכל. האמת: זה לא נכון! מותר לשתות לפני האוכל, בזמן האוכל ואף אחריו. בתנאי מזג האוויר בארץ זה אפילו נדרש.



ב. קבוצת הדגנים

הדגנים הם המקור החשוב ביותר של פחמימות מורכבות. העמילן מהווה כמעט שלושה רבעים מתכולת גרעיני הדגנים. בקבוצה זו כלולים מוצרים העשויים מזרעים של צמחים ממשפחת הדגניים כגון: חיטה, אורז, שעורה, שיבולת שועל, תירס ושיפון. הדגנים מהווים בסיס למגוון עצום של מזונות כמו: פסטה, מאפים שונים ודגני בוקר.

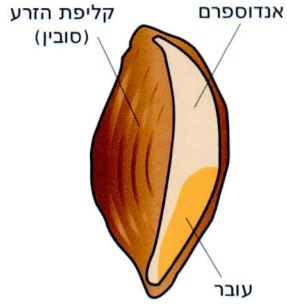
בהמלצה של משרד הבריאות, מודגש להעדיף ככל האפשר מזונות העשויים מדגנים מלאים. מדוע ?!

הכרה של מבנה זרעי הדגנים תסייע לנו להבין המלצה זו.

זרעי הדגנים בנויים משלושה חלקים (איור ו–8):

1. קליפת הזרע (סובין): היא מקור עשיר לסיבים תזונתיים, לוויטמין B_1, B_3, למגנזיום, לזרחן, לברזל ולאבץ.
2. עוּבָּר: החלק בזרע שיתפתח לצמח חדש. מכיל ויטמינים מקבוצת B (B_1, B_2, B_3) מינרלים כמו: מגנזיום, ברזל ואבץ וכן חלבון וקצת שומן.
3. אנדוספרם: רקמה של חומרי תשמורת ליד העובר, המכילה עמילן, חלבון ומעט שומן וכן מעט ויטמינים ומינרלים. האנדוספרם מהווה את רוב הזרע.

בתהליך עיבוד הדגנים מסירים את קליפת הזרע ואת העובר ולכן דגנים מעובדים מכילים אנדוספרם בלבד, בעוד הדגנים המלאים מכילים את כל שלושת החלקים ולכן ערכם התזונתי גבוה יותר.



איור ו–8: מבנה הזרע של צמחים ממשפחת הדגניים.

על קצה המזלג...

מדוע נחשבים הסיבים התזונתיים למרכיב כה חשוב בתזונת האדם?

הסיבים התזונתיים הם תערובת של רב־סוכרים צמחיים כגון תאית (איור ב–9) ותרכובת נוספת הנקראת ליגנין. חלק מהסיבים מסיסים במים וחלק אחר אינו מסיס.

למרות שהסיבים אינם נעכלים על ידי האדם, קיימת המלצה גורפת של ארגון הבריאות העולמי לצרוך מזון עשיר בסיבים (איור ו–9) שתרומתם לבריאות האדם הוכחה במחקרים רבים.

תפקידי הסיבים:

- סיבים מסיסים סופחים מים ותופחים, ובעקבות כך הם מאיטים את קצב התרוקנות הקיבה. על ידי כך הם מעניקים תחושת שובע ומקטינים את כמות האוכל הנצרך.
- סיבים מסיסים מאיטים את קצב ספיגת הליפידים והפחמימות מן המזון שבמעי לזרם הדם. על ידי כך הם גורמים לירידת רמת הליפידים והפחמימות בדם ובכך הם תורמים להקטנת הסיכון לטרשת עורקים.
- סיבים לא מסיסים מגדילים את נפח הצואה, מאיצים את תנועת שרירי המעי ומזרזים את מעבר המזון בו.
- לסיבים התזונתיים יכולת לספוח חומרים מזיקים במעי הגס. תופעה זו, והעובדה שהסיבים הלא־מסיסים ממריצים את פעילות המעיים, מסייעות בקיצור זמן החשיפה של תאי המעי לחומרים מזיקים, מה שתורם ככל הנראה לירידה בשכיחות סרטן המעי הגס.



איור ו–9: מזונות עשירים בסיבים תזונתיים: קמח מלא, פירות טריים ויבשים וירקות.

מקובל לחשוב ש...

לחם בצבע חום כהה הוא לחם מקמח מלא. האמת: זה לא תמיד נכון! קיימים צבעי מאכל כהים ותוספות אשר יכולים לתת ללחם מראה מטעה של לחם מדגן מלא. יש לקרוא את תוויות המזון ולבדוק שאכן מדובר בלחם מקמח מלא.

הלחם משמין וכדאי לוותר עליו. האמת: זה לא לגמרי נכון! הלחם חשוב לנו כמקור לפחמימות מורכבות, ואם מדובר בלחם מקמח מלא – הוא מכיל גם סיבים תזונתיים. לכן אין לוותר על הלחם. מה שמשמין לעתים קרובות הוא הממרח שמעליו (והכמויות!...).

צְנים (טוסט) מכיל פחות קלוריות מפרוסת לחם רגיל. האמת: זה לא נכון! בפרוסה ובטוסט אותה כמות הקלוריות. המצנם מאדה את המים, ולמים כידוע אין כל ערך קלורי.



ג. קבוצת הירקות והפירות

חשיבותם של הפירות והירקות קשורה בכך שהם מכילים הרבה ויטמינים, מינרלים וסיבים תזונתיים. כל אחד מסוגי הירקות והפירות עשיר בויטמינים ובמינרלים שונים, ולכן מומלץ לצרוך סוגים שונים מהם. חשוב לאכול את הפירות והירקות עם קליפתם מאחר שהסיבים מצויים בעיקר בקליפה.



אך בכך לא מתמצה חשיבות הפירות והירקות. במחקרים נמצא קשר בין תזונה עשירה בפירות וירקות לבין שכיחות נמוכה יותר של מחלות כלי דם ולב, סרטן ומחלות כרוניות נוספות.
שימו לב, ההבחנה בין פירות וירקות אינה הבחנה בוטנית אלא מתחום התזונה.
פרי הוא מונח בוטני המתייחס אל החלק בצמח המכיל זרע.
יָרָק אינו מונח בוטני אלא מונח מתחום התזונה. מבחינה בוטנית, חלק מהירקות הם פרי (עגבנייה, פלפל, מלפפון, אבוקדו), אחרים הם עלים (חסה, כרוב), תפרחת (כרובית), גבעול מעובה – פקעות (תפוחי אדמה), או שורשים מעובים (סלק, גזר וצנון).
ההבדל התזונתי הבולט ביותר בין הפירות לירקות הוא הערך הקלורי שלהם. הפירות מכילים יותר פחמימות פשוטות (חד־סוכרים ודו־סוכרים), ולכן הערך הקלורי שלהם גבוה יותר ומומלץ לצרוך מהם פחות.

מדוע ממליצים על אכילה יומיומית של פירות וירקות בדגש על מגוון צבעים ?!

הצבעים השונים של פירות וירקות נובעים מתרכובות כימיות שונות ששמן הכללי הוא פיטוכימיקלים (ידועות כ־25,000 תרכובות כאלה). אחת מהתכונות החשובות של הפיטוכימיקלים היא שהם פועלים כנוגדי חמצון (Antioxidants). נוגדי החמצון מנטרלים חומרים מחמצנים המכונים רדיקלים חופשיים. הרדיקלים החופשיים הם תוצרים של תהליכים כימיים המתרחשים בגוף באופן טבעי, ויכולים גם להגיע לגוף ממקורות חיצוניים. הרדיקלים החופשיים עלולים לפגוע בדפנות של כלי הדם ובתאים עצמם כולל ב־DNA. סבורים שגם בצמחים, החומרים נוגדי החמצון מגינים על החומר התורשתי מפני חומרים מחמצנים הנוצרים בתהליכים המתקיימים בצמח.
היות וכל אחת מהתרכובות מספקת הגנה שונה, חשוב לאכול פירות וירקות במגוון של צבעים.
לדוגמה: עגבניות מכילות ליקופן וגזר ובטטות מכילים קרוטן.
מעניין לדעת שגם סוגים שונים של ויטמינים (A, C, E) ומינרלים (סלניום, נחושת, אבץ), המצויים בפירות וירקות מתפקדים כנוגדי חמצון.

מקובל לחשוב ש...

מיץ סחוט טרי הוא מאוד בריא, וכדאי להרבות בו. האמת: לא מדויק! כאשר סוחטים פרי, נשארים הסיבים החשובים לגוף במסחטה, הוויטמינים שבפרי נחשפים לאוויר וחלקם נהרסים. בכוס נשארים מים, חומצות וסוכר! לעומת זאת, באכילת פרי שלם מקבלים את הסיבים החשובים לגוף וקולטים גם את הוויטמינים והמינרלים.

מותר לאכול פירות ללא הגבלה. האמת: זה לא נכון! פירות אמנם מכילים ויטמינים, מינרלים וסיבים תזונתיים שחשוב לצרוך, אך לא בהגזמה. הפירות מכילים כמות סוכר גבוהה, התורמת באופן נכבד לסך הקלוריות. די ב־3 מנות פרי ביום (כולל פירות חמוצים).

פירות הדר הם המקור הטוב ביותר לוויטמין C. האמת: לא נכון! קיווי הוא הפרי בעל כמות ויטמין C הגבוהה ביותר – 380 מ"ג ב־100 גרם פרי. בפלפל אדום – 175 מ"ג ובתפוז – 45 מ"ג.



משמח לדעת, שילדי ישראל תופסים את המקומות הראשונים בעולם בצריכת פירות וירקות.

ד. קבוצת המזונות העשירים בחלבונים

כפי שלמדנו בפרק ב, החלבונים ממלאים בגוף האדם, כמו באורגניזמים חיים אחרים, תפקידים רבים ומגוונים.







חלבוני המזון מספקים לנו חומצות אמיניות המשמשות אבני בניין לחלבונים וחומרי מוצא לחומרים אחרים.

בפירמידת המזון הישראלית (איור ו–7), רוב המקורות למזונות העשירים בחלבון הם מן החי – דגים, עוף, הודו, בקר, חלב, גבינות וביצים – ומיעוטם מהצומח, בעיקר קטניות כמו: שעועית, סויה, פול, חומוס, עדשים ואפונה. בעוד חלבונים מן החי מספקים את כל 8 החומצות האמיניות החיוניות, כדי לקבל את כל 8 החומצות האמיניות החיוניות מהצומח יש לאכול מגוון של מזונות צמחיים הכוללים גם דגנים וגם קטניות. במאכלים צמחוניים מסורתיים קיימים שילובים שמספקים במשותף את כל 8 החומצות האמיניות החיוניות, לדוגמה חומוס (קטניות) עם טחינה (דגנים), אורז (דגנים) עם שעועית או עדשים (קטניות) ופלאפל (חומוס – קטניות) בפיתה (חיטה – דגנים).



משרד הבריאות ממליץ לשים לב למרכיבים הנלווים אל החלבונים מן החי – שומנים המכילים **חומצות שומן רוויות**. לכן באכילת חלבונים מן החי מומלץ לבחור מזונות שהם דלי־שומן, כמו דגים, עוף (ללא עור), הודו (שעשיר יחסית גם **בברזל**), נתחים דלי־שומן של בקר וכן מוצרי חלב המכילים עד 5% שומן. למוצרי חלב נודעת חשיבות היות והם מכילים גם רמה גבוהה של **סידן**, החיוני לשמירה על צפיפות העצם.



ה. קבוצת המזונות העשירים בשומנים

המילה שומנים בהקשר של פירמידת המזון כוללת הן את השומנים והכולסטרול מהחי והן את השְמנים מהצומח. ממיקום קבוצה זו בפירמידה אנו למדים שאין להרבות במזונות הנמנים עמה. עם זאת, גם כאשר עושים דיאטה דלת־אנרגיה (דיאטת הרזיה) מומלץ שהשומנים יספקו לפחות 20% מצריכת הקלוריות היומית, אך לא יותר מ־30% ממנה.

מבין המזונות בקבוצה זו מומלץ לצרוך בעיקר מזונות המכילים אחוז גבוה של חומצות שומן בלתי רוויות ממקור צמחי, כמו אגוזים, טחינה, אבוקדו, זיתים, שקדים ובוטנים, ורק מעט מזונות המכילים אחוז גבוה של חומצות שומן רוויות (שמקורו פעמים רבות מן החי), כמו חמאה, גבינות שמנות וחמאת קקאו.

מזונות מן החי מכילים, כזכור, גם כולסטרול. המזונות העשירים ביותר בכולסטרול הם חלמון ביצה וחלקים פנימיים כמו כבד, טחול ולב.

בעבר חשבו שמקור הכולסטרול הוא רק בתזונה ולכן המליצו לבעלי רמה גבוהה של כולסטרול בדם להמעיט בצריכת מזונות המכילים כולסטרול. כיום ידוע שכ־70% מהכולסטרול מיוצרים על ידי הגוף בכבד ורק כ־30% מקורם במזון. שני התהליכים, ייצור וקליטת הכולסטרול, נמצאים בבקרה משולבת. כלומר, כאשר הכולסטרול מסופק מן המזון, הכבד מפחית את ייצור הכולסטרול. נמצא שהימנעות מוחלטת מכולסטרול עלולה להזיק ואף לגרום לעלייה בייצור העצמי של הכולסטרול בגוף. ראוי לציין שיש גם מרכיב תורשתי המשפיע על קצב ייצור הכולסטרול בגוף.



ההמלצה המקובלת כיום היא לכלול כמות מסוימת של כולסטרול בתפריט. בניגוד לכך ארגון הבריאות העולמי ממליץ להימנע ככל האפשר, ממזון המכיל שומן מוקשה חלקית, המכונה שומן טראנס, עליו תלמדו בקטע הבא:



על קצה המזלג...

חמאה או מרגרינה?

כאשר התגלה הקשר בין הסיכון לטרשת עורקים ועודף כולסטרול בדם (ראו בהמשך, עמודים 192–193), נחשבה המרגרינה כתחליף טוב לחמאה שעשירה בכולסטרול.

חמאה היא מוצר שמקורו מן החי המתקבל על ידי הפרדת השומן מן החלב. ב־100 גרם חמאה יש כ־82 גרם שומן, מתוכם 49 גרם הם חומצות שומן רוויות. החמאה מכילה גם כולסטרול. אך לחמאה יש גם יתרונות – היא מכילה ויטמין A ו־β קרוטן בכמות נכבדת וכן מינרלים: סידן, מגנזיום, אבץ, נחושת, אשלגן, ברזל וזרחן.

לפני כ־100 שנה פותח תחליף לחמאה – מרגרינה. מלבד היותה זולה יותר, עד שנות השמונים של המאה ה־20 נחשבה המרגרינה גם לבריאה יותר – מכיוון שהיא באה ממקור צמחי היא אינה מכילה כולסטרול.

בהכנת המרגרינה, השמן הצמחי, שהוא נוזלי מטבעו, עובר תהליך כימי המגדיל את דרגת הרוויה של חומצות השומן, ובכך הוא הופך את השמן הנוזלי למוצק. בתהליך זה נוצרות חומצות שומן שכמעט ואינן קיימות במזון לא מעובד, הנקראות **חומצות שומן מסוג טרנס**.

מחקרים שנערכו ב־20 השנים האחרונות מצאו שחומצות שומן מסוג טרנס גורמות נזקים וסתימות בכלי הדם אף יותר מחומצות השומן הרוויות ומהכולסטרול. חומצות שומן טרנס אף חשודות בגרימת נזקי בריאות נוספים כגון: סרטן, סוכרת ואבנים בכיס המרה.

לכן, תזונאים ממליצים כיום להעדיף חמאה על פני מרגרינה, אך גם אותה יש לצרוך בכמויות קטנות בלבד; או לחלופין להשתמש בסוגי מרגרינה שאחוז שומני הטרנס בהם מופחת.

ועוד על שומני טרנס...

חשוב לדעת שחומצות שומן מסוג טרנס נמצאות לא רק במרגרינה, אלא במוצרי מזון מעובדים כמו בורקס, עוגיות ועוגות מתועשות, סוגי שוקולד מסוימים, גלידות וקינוחים על בסיס שומן צמחי וחלק מהחטיפים המלוחים. לעתים על אריזות המזון מופיעות חומצות שומן טרנס תחת הכותרת "**שומנים מוקשים חלקית**". ארגון הבריאות העולמי קורא לצמצם ככל הניתן את צריכת המזון המכיל חומצות שומן טרנס.



ו. קבוצת החטיפים, הממתקים והמשקאות הממותקים

בראש פירמידת המזון (איור ו–7) מצויים החטיפים, הממתקים והמשקאות הממותקים. ההמלצה היא להמעיט ככל האפשר בצריכת מזונות מקבוצה זו, ולכן קבוצה זו מופרדת מגוף הפירמידה ומוקפת בקו אדום. מזונות אלה אינם הכרחיים לגוף והם עשירים בשומן (לרבות מסוג טרנס), סוכר ומלח. בקבוצה זו נכללים כול החטיפים המלוחים ומוצרים כמו סוכר, דבש, ריבה, שוקולד, ופלים, גלידות ומשקאות קלים ממותקים בסוכר. צריכה רבה של מוצרים מקבוצה זאת עלולה לגרום להשמנה ולבעיות הנלוות לה, כולל הסיכון לחלות בסוכרת מסוג 2, בעיות בשיניים ופגיעה בכבד.



עצוב לציין שבסקר שנערך בשנות ה־2000 על ידי ארגון הבריאות העולמי בקרב בני נוער ב־35 מדינות, נמצא שישראל נמצאת במקום הראשון בצריכת משקאות ממותקים ובמקום גבוה בצריכת ממתקים.

המלצת משרד הבריאות מתייחסת גם להפחתת הצריכה של מלחי נתרן. רובנו צורכים כמות מלח הגבוהה בהרבה מזו הנחוצה לגופנו, וזו עלולה לגרום ליתר לחץ דם. רוב המלח שאנו מקבלים במזון מגיע מתהליכי עיבוד ושימור או כתבלין שאנו מוסיפים לפי טעמנו. המזונות הטריים והגולמיים מכילים כמות מועטה של מלח.

על קצה המזלג...

דיאטה ים־תיכונית

אחד מדפוסי התזונה הנחשבים לבריאים ביותר הוא הדיאטה הים־תיכונית. דיאטה זו עשירה במרכיבים מהצומח, קטניות, פירות וירקות, ודלה יחסית במזונות מן החי. היא כוללת גם שמן זית וכמות קטנה של יין אדום. זה מכבר הוכחה השפעתו החיובית של תפריט זה על תוחלת החיים ועל מניעה של מחלות לב.

כדי שתזונה תיחשב לים־תיכונית יש לאכול כ־900 גרם פירות וירקות ליום. רובנו לא אוכלים כך...

שאלה 1–11

א. עִרכו רשימה של כל המזונות והמשקאות שאתם צורכים במשך יממה כולל כמויות.

ב. סרטטו פירמידת מזון ריקה ושבצו את מה שאכלתם במדרגות השונות.

ג. בחישוב המזונות היומי, האם הכמות היחסית שאכלתם מסוגי המזונות בכל מדרגה בפירמידה מתאימה לרוחב היחסי של המדרגה?

ד. אלו שינויים כדאי לכם לערוך בתזונה שלכם כדי שתהיה יותר מאוזנת?

הרחבה

מה מסתתר בין האותיות הקטנות שבתווית מזון?

לפי חוק סימון המוצרים הפועל בישראל משנת 1994, כל מוצר מזון ארוז צריך להכיל על גבי האריזה תווית המהווה מעין תעודת זהות של המוצר. באמצעות התווית יכולים הצרכנים להשוות בין סוגי מזון שונים.

מה כוללת תווית המזון?

שם המוצר: למשל, הדגנים לבוקר.

תיאור המוצר: בדוגמה שבאיור, פתיתי חיטה מלאה (מצופים דבש) בתוספת פקנים ושקדים.

הסימון התזונתי: מידע מפורט על הערך האנרגטי של המוצר (בקילוקלוריות) ועל כמויות המרכיבים השונים, כמו חלבונים, פחמימות, שומן, שומן רווי, נתרן, ולעתים רכיבים נוספים כגון כולסטרול, ויטמינים, מינרלים ועוד. הערכים בסימון התזונתי מתייחסים לרוב למשקל של 100 גרם מוצר מוצק או 100 מיליליטר מוצר נוזלי. יש לשים לב שלעתים מוצגים ערכים המותאמים לגודל מנה מקובלת (לדוגמה: 30 גרם דגני בוקר).

רכיבי המזון: רשימה המפרטת את כל המרכיבים של המוצר על פי סדר תכולה יורד (מהרכיב שכמותו במוצר היא הגדולה ביותר עד לרכיב שכמותו היא הקטנה ביותר).

לדוגמה: קניתם מיץ תפוזים טבעי? שימו לב לרכיב הראשון ברשימת הרכיבים; אם הוא מים ולאחר מכן מופיע סוכר, לא מדובר במיץ טבעי. במיץ טבעי הרכיב הראשון ברשימה יהיה: מיץ תפוזים טבעי. עוד דוגמה: אם על אריזת "קציצות בקר" מופיע קודם כול "חלבון מן הצומח" ורק לאחריו "בשר בקר", תדעו שקציצות הבקר שבאריזה מכילות יותר חלבון צמחי מאשר בשר בקר.

ברשימת רכיבי המזון, היצרנים מחויבים לרשום את כל המרכיבים, כולל אלו שנמצאים במוצר בכמויות מזעריות ביותר. רכיבים המסומנים באות E ומספר לצִדה, הם תוספי מזון כגון חומרי טעם, חומרי שימור וחומרי צבע.

לעתים מופיעות על האריזה הגדרות שונות כגון: "דל סוכר", "לייט", "דיאט", "נטול" וכדומה. **מה פירושן של הגדרות אלה?** להלן רשימה קצרה שתסייע בהתמצאות:

- דיאט/ דל קלוריות — מכיל עד 40 קק"ל ב־100 גר'/מ"ל (אם המשקה אינו חלבי – עד 20 קק"ל).
- לייט/ מופחת/ קל — הערך הקלורי נמוך ב־1/3 מהמוצר הרגיל המקביל.
- דל־שומן — עד 2 גרם שומן ב־100 מ"ל.
- דל־כולסטרול — עד 30 מ"ג כולסטרול ב־100 גרם.
- דל־נתרן/ דל מלח — עד 100 מ"ג נתרן ב־100 גרם.
- ללא נתרן — עד 5 מ"ג נתרן ב־100 גרם.
- ללא סוכר — אין סוכר במוצר.
- ללא תוספת סוכר — אך מרכיביו הטבעיים עשויים להכיל סוכר.
- 0% שומן — אין שומן במוצר.
- "נטול " — הרכיב הוצא מהמוצר בתהליך הייצור, אך ייתכן שעדיין קיים בו במידה מסוימת.
- "בטעם..." — המוצר מכיל לרוב תמציות טעם ולאו דווקא את המרכיב עצמו ("בטעם שוקולד").

שימו לב! כשכתוב **ללא סוכר**, אין זה אומר שהמוצר גם דל־שומן ולהפך: מוצר שעליו כתוב 0% שומן עשוי להכיל לא מעט סוכר.



3.3 ו תרומת פעילות גופנית לחיים בריאים

המלצות משרד הבריאות הישראלי לאורח חיים בריא, כפי שהן באות לידי ביטוי בפירמידת המזון באיור ו–7, כוללות נוסף למסר של תזונה נבונה, גם המלצות **לפעילות גופנית** סדירה. לא מדובר דווקא בפעילות מאומצת; הכוונה היא ליותר תנועה בחיי היומיום – למשל הליכה ברגל ועלייה במדרגות במקום נסיעה במכונית ושימוש במעליות. לכך מומלץ להוסיף גם פעילויות כמו רכיבה על אופנים, שחייה, ריצה וכדומה.



הפעילות הגופנית תורמת לא רק לשמירה על מאזן האנרגיה, אלא גם לשיפור הכושר הגופני, שיפור גמישות המפרקים, השרירים והגידים, תפקוד טוב יותר של הלב והריאות, הורדת לחץ דם ושיפור בזרימת הדם לכל הגוף המגבירה את אספקת החמצן לתאים.

הפעילות הגופנית משפיעה גם על "מצב הרוח" באמצעות הגברת ההפרשה של מוליך עצבי (סרוטונין), שהוא בעל תפקיד מרכזי בתחושות הקשורות במצב רוח.

שאלה ו–12:

באחד ממכוני הכושר שבהם מתאמנים גם נערים ונערות, ניתנות המלצות תזונתיות שבהן גם ההמלצה: "מספר שעות לפני אימון יש לאכול ארוחה עשירה בחלבונים. גם לאחר האימון מומלץ שעיקר הארוחה תהיה מורכבת מחלבונים". האומנם?

חפשו מידע ברשת האינטרנט וענו על השאלות הבאות:

א. איזו ארוחה מומלצת לפני אימון?

ב. האם כדאי לאכול בזמן אימון?

ג. ממה תורכב ארוחה לאחר אימון?

מקובל לחשוב ש...

פעילות גופנית חייבת להיות נמרצת ולהימשך ברצף לפחות 45 דקות, האמת: זה לא לגמרי נכון! מחקרים מראים שגם אם הפעילות הגופנית מתבצעת ברמת מאמץ בינונית, או מחולקת לשנים־שלושה פרקי זמן של 15 דקות כל אחד, היא יכולה להביא תועלת בריאותית. בפעילות הגופנית חשוב להניע כמה שיותר משרירי הגוף.

דילמה

האם מזון אורגני בריא יותר?

בפרק ג הוצגו כמה הבדלים עקרוניים בין החקלאות המודרנית "הרגילה" לבין החקלאות האורגנית. מקובל להגדיר את המזון שגודל בחקלאות אורגנית כ"מזון אורגני". (שימו לב: אין להחליף בין מושג זה לבין "חומרים אורגניים". מזון אורגני, כמו מזון שגודל בחקלאות "רגילה", מכיל כמובן את כל רכיבי המזון).

ב־2009 התפרסם בבריטניה מחקר גדול שיצר סערה ציבורית. במחקר זה נסקרו תוצאות של עשרות מחקרים שהוגדרו כאמינים, שבדקו תכולת חומרים שונים – חנקן, זרחן ועוד – במזון שגודל בשיטה האורגנית לעומת מזון שגודל בשיטה הרגילה. עורכי המחקר הסיקו שאין הבדל משמעותי, אם בכלל, בערך התזונתי של מזונות שגודלו בשיטות השונות. מסקנתם הייתה שאין סיבה לבחור במזון אורגני על בסיס **הערך התזונתי** העדיף שלו.

תוצאות אלה עוררו ביקורת רבה, בעיקר בקרב חסידי המזון האורגני שטענו שלא נסקרו מחקרים שבדקו את תכולת נוגדי החמצון במזון אורגני לעומת תכולתם במזון "הרגיל". לטענתם, במחקרים נמצא שמזון אורגני עשיר בנוגדי חמצון בכ־25% בממוצע יותר ממזון שאינו אורגני. טענה נוספת הייתה שבמחקרים אלו לא התייחסו לשרידים של חומרי הדברה שבהם נעשה שימוש בחקלאות הרגילה ושעלולים להזיק לצרכנים.

הוויכוח נמשך, ויידרשו כנראה מחקרים בלתי תלויים נוספים כדי להביא להכרעה.

שאלה ו–13:

חפשו מידע ברשת האינטרנט על מזון אורגני.

א. מה הם המאפיינים של מזון אורגני?

ב. הציגו לפחות 3 נימוקים של התומכים בצריכת מזון אורגני ולפחות 3 נימוקים של הנמנעים מצריכתו.

ג. מה הכוונה ב"מחקרים בלתי תלויים"?

שאלה ו–14:

בטבלה ו-4 שלפניכם מוצגים ערכים תזונתיים של קמח מחיטה מלאה (קמח מלא) ושל קמח מחיטה מעובדת (קמח לבן).

טבלה ו–4: ערכים תזונתיים של קמח מחיטה מלאה ושל קמח מחיטה מעובדת

סימון תזונתי	קמח מחיטה מלאה (100 גרם קמח מלא)	קמח מחיטה מעובדת (100 גרם קמח לבן)
קלוריות (קק"ל)	313	342
פחמימות (גרם)	72.6	72.5
מתוכם סיבים תזונתיים (גרם)	12.2	2.4
חלבון (גרם)	13.7	12
שומנים (כללי) (גרם)	1.8	1.5
מתוכם חומצות שומן רוויות (גרם)	0.32	0.24
סידן (מ"ג)	34	15
זרחן (מ"ג)	346	97
אשלגן (מ"ג)	138	25
ברזל (מ"ג)	3.88	2.4
β קרוטן (מיקרוגרם)	5	1
ויטמין B_1 (תיאמין) (מ"ג)	0.44	0.11

א. אלו מבין הרכיבים המפורטים תורמים לערך הקלורי של הקמח?

ב. מהי הסיבה להבדל הבולט בתכולת הסיבים התזונתיים בקמח מלא לעומת קמח מעובד?

ג. ציינו 3 תפקודים חשובים של סיבים בגוף האדם.

ד. על כיכרות הלחם שנאפים משני סוגי קמח אלה נרשם לעתים "ללא כולסטרול". האם זה פרסום הוגן? נמקו.

ה. מדוע תכולת חומצות השומן הרוויות גדולה יותר בקמח מלא מאשר בקמח לבן?

ו. במקומות שבהם החורף קשה וארוך עברו לשימוש בקמח לבן (שחיי המדף שלו ארוכים יותר) במקום בקמח מלא. איזה סכנה טמונה בשינוי זה?

ז. קמח מחיטה מלאה מכיל פי 5 יותר β קרוטן מקמח העשוי מחיטה מעובדת. ציינו 3 מקורות נוספים ל-β קרוטן (היעזרו בנספח).

ח. הסבירו את ההמלצה של משרד הבריאות להעדיף תמיד מוצרים מקמח מלא על פני מוצרים מקמח מעובד. התבססו על הנתונים בטבלה וציינו לפחות 3 גורמים.

שאלה ו–15:

רכיבי המזון השונים חשובים לגוף לאספקת אנרגיה, לבניין רקמות ולקיום פעולות החיים. בנו טבלה שתכלול את רכיבי המזון השונים (כולל מינרלים, ויטמינים ומים) וסמנו לגבי כל אחד מהם לאלו מהתפקודים שפורטו הוא משמש.

שאלה ו–16:

מקובל לחשוב שמזון מהיר (המכונֶה גם Junk Food) הוא חסר ערך ומזיק לבריאות. חפשו מידע ברשת האינטרנט, כולל באתרים של חברות מזון מהיר. הציגו טיעון התומך בעמדה שבראש השאלה וטיעון המתנגד לה. לכל עמדה השתמשו ב־2 דוגמאות.

שאלה ו–17:

באיור ו–11 מוצג סימון תזונתי של שני סוגי פופקורן.
איזה סוג פופקורן תעדיפו? הביאו לפחות 4 נימוקים.



איור ו–11: תוויות סימון תזונתי של שני סוגי פופקורן.

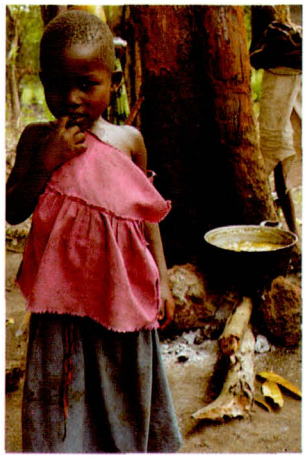
שאלה ו–18:

בבדיקה שגרתית שנעשתה לשי, טבעוני שלא אוכל כלל מוצרים מהחי (גם לא מוצרי חלב, ביצים או דגים), נמצאו בדמו ערכים גבוהים ביותר של כולסטרול (מעל ל־300 מ"ג בכל 100 סמ"ק דם). ברוב המקרים של ריכוז כולסטרול גבוה בדם, הרופאים ממליצים על שינוי בתזונה. במקרה של שי, הרופאה המליצה על תרופה שמעכבת את האנזים הפעיל בייצור הכולסטרול בכבד. הסבירו את המלצת הרופאה.

1.4 בעיות תזונה בעולם של מחסור ושפע

תזונה לא מאוזנת מפילה בעולם יותר קרבנות מאשר כל מחלה. על פי דו"ח של ארגון הבריאות העולמי משנת 2009, שליש מאוכלוסיית העולם ניזון היטב (ואף למעלה מזה), שליש מצוי בסכנה של תת־תזונה ושליש מצוי בסכנה של מוות מרעב.
בסעיף זה נעמוד על הקשר בין תזונה לא מאוזנת ומחלות הקשורות בה.

1.4.1 תת־תזונה ורעב



פניה של התת־תזונה

נא להכיר את אנה בת השש. אנה גרה עם אחיה, אחותה והוריה באחד הפרברים של ניירובי, קניה. המשפחה של אנה נמצאת מתחת לקו העוני. שני הוריה עובדים בעבודות מזדמנות והכנסתם השנתית עומדת על כ־241 דולר. הכנסה זו אינה מספיקה לענות על צורכיהם הבסיסיים. למרות שיש מגוון של מזון בשווקים, אנה אוכלת פעם ביום דייסת קמח תירס (כשיש) ומדי פעם פירות וירקות. בשר, ביצים ומוצרי חלב היא כמעט ואינה אוכלת. ערך ה־BMI של אנה נמוך בהרבה מהתקין. נוסף למחסור הכללי בקלוריות, אנה סובלת גם ממחסור במרכיבי מזון, ובעיקר ממחסור בוויטמין A, ברזל ויוד (על מרכיבי מזון אלה וחשיבותם למדתם בפרק ב). כתוצאה מהמחסור, אנה סובלת מתחושת רעב תמידית, מעייפות, מחולשה, מהאטה בגדילה, ממחלות זיהומיות בתדירות גבוהה, מאנמיה, מבעיות ראייה ועוד.

עוד על
מחלות חסר: *בטבלאות ויטמינים ומינרלים בעמודים 200-203.*

תת־תזונה הוא מונח כללי המתאר מצב בריאותי הנגרם כתוצאה מתזונה שאינה מספקת לגוף את כל המרכיבים הדרושים, או שהיא מספקת אותם, אך בכמויות שאינן מספיקות לתפקודו התקין. גם בעיות עיכול או ספיגה עלולות לגרום לתת־תזונה.

רעב הוא מצב שנובע ממחסור מתמשך במזון, כשכמות המזון בכלל והחלבונים בפרט, אינה מספקת את האנרגיה הדרושה ואת המרכיבים החיוניים. באזורים שבהם אנשים סובלים מרעב מתמיד (העולם השלישי), קיימות כמובן גם תופעות של תת־תזונה.

כאשר יש מחסור קיצוני במזון, התאים מנצלים כל מקור אפשרי לאנרגיה. אם אין פחמימות ושומנים, האנזימים בתאים מתחילים לפרק חלבונים.
הרזון הנורא המוכר לנו מתמונות של ילדים ומבוגרים מאזורים מוכי רעב, נובע מכך שרקמות השומן בגופם מדולדלות והחלבונים הבונים את תאי השריר ותאי העצם מתפרקים. כפי שהוזכר בפרק ב, הבטן הנפוחה של ילדים מאזורים אלו נגרמת עקב חסר מתמשך של חלבונים בדם, שמוביל להצטברות נוזלים בחלל הבטן.
מחסור ממושך במזון גורם לתשישות, לאובדן חיוניות ולפגיעה במערכת החיסון, המובילה במקרים רבים למחלות זיהומיות. מצב זה עלול להסתיים במוות.

כמה עובדות קשות על תת־תזונה בעולם הרעב:

- 18,000 ילדים מתים מרעב מידי יום.
- בכל שנה מתים בעולם כ־6 מיליון ילדים מתחת לגיל 5 בשל סיבות הקשורות לתת־תזונה ורעב.
- 1 מבין 6 תינוקות הנולדים בעולם השלישי הם בעלי משקל לידה נמוך עקב תת־תזונה של האם במהלך ההיריון. משקל לידה נמוך הוא גורם סיכון למוות עד גיל שנה, לבריאות לקויה, לעיוורון, לבעיות התפתחות ולליקויי למידה.
- 1 מכל 4 ילדים בעולם סובלים מתת־תזונה ורעב: 70% מהם באסיה, 26% מהם באפריקה ו־4% באמריקה הלטינית ובאיים הקריביים.
- 57% מכלל מקרי המוות באפריקה ממלריה מיוחסים לתת־תזונה המובילה להחלשת מערכת החיסון.

במדינות מסוימות בעולם האוכלוסייה חשופה לסכנת **רעב המוני**. זהו מחסור במזון שפוקד אוכלוסייה נרחבת ועלול לגרום למוות מרעב או כתוצאה ממגפות המתפשטות במהירות בשל ירידה בתפקוד מערכת החיסון. רעב המוני יכול להיגרם מפגעי טבע, כמו בצורת או ארבה, או ממלחמות.

נוסף לתת־תזונה הנובעת ממחסור באנרגיה, אוכלוסיות רבות בעולם סובלות ממחסור מתמשך בוויטמינים ומינרלים, למשל כתוצאה מתזונה דלה בפירות ובירקות. פעמים רבות תת־תזונה, רעב ומחסור בוויטמינים ומינרלים שלובים זה בזה.

הרחבה

האם יש די מזון בעולם?

במאה ה־19 חזה ***תומס מלתוס*** (Thomas Malthus) (כלכלן ודמוגרף אנגלי) כי במאה ה־20 תתרחש בעולם "קטסטרופה דמוגרפית־תזונתית". זאת, עקב חוסר האיזון בין הגידול המהיר של אוכלוסיית האדם בעולם מצד אחד, לבין הגידול האִטי של אמצעי הייצור המספקים מזון, מצד שני.

שנים רבות לאחר מכן, ב־1968, בעקבות מוות ברעב של אלפי אנשים בהודו, חזה הביולוג ***פול ארליך*** (Paul Ehrlich 1854–1915) בספרו "פצצת האוכלוסין" שבתוך כמה שנים יביא גידול האוכלוסייה לחיסול המשאבים המוגבלים ולמותם ברעב של מאות מיליוני בני אדם בעולם כולו.

שניהם טעו – מלתוס לא הצליח לחזות את ההתפתחות המדעית־טכנולוגית שחלה במאה ה־20 והביאה ל"מהפכה הירוקה", שהתבטאה, בין היתר, בעלייה בכושר הייצור החקלאי. פול ארליך לא הצליח לחזות את התפשטותה של מהפכה זו לחלק מהארצות המתפתחות, ובמיוחד להודו.

כיום, רוב בעיות התת־תזונה והרעב ההמוני אינן נובעות מחוסר היכולת של החברה האנושית לייצר את כמות המזון הדרושה, אלא מבעיות חברתיות ופוליטיות שבעקבותיהן המזון לא מגיע לאלו שזקוקים לו. רוב הסובלים מתת־תזונה וסכנת רעב חיים באפריקה ובדרום־מזרח אסיה.

קשר לנושא

אקולוגיה:
המהפכה הירוקה.

מקובל לקשור תת־תזונה עם רעב ומחסור, אולם חשוב לדעת שגם כשהמזון מצוי בשפע ייתכנו מקרים של תת־תזונה.

פנים אחרות של התת־תזונה: סיגל בת ה־25, עובדת בחברת הייטק, התלוננה על עייפות וחולשה. סיגל שעובדת שעות רבות, הייתה נתונה ללחץ רב במשך חודשים רבים וניזונה בתקופה זו רק ממזון מהיר (כמו פיצה ופלאפל), דברי מתיקה וחטיפים מלוחים. מזונה כמעט ולא כלל ירקות ופירות.
הרכב תזונה זה הביא אמנם רק לעלייה קלה במשקלה, אך בבדיקות הדם התגלתה אצלה אנמיה והתברר שהיא סובלת ממחסור בוויטמינים (בעיקר ויטמין C וויטמינים מקבוצה B) ובברזל, מצב המוגדר כתת־תזונה.

מקרים של תת־תזונה בעולם המערבי "השבע" מתרחשים כאשר לא צורכים את כל רכיבי המזון החיוניים ובכמויות מספיקות. פעמים רבות מדובר בחסר של רכיב מזון יחיד, שעלול להשפיע בצורה קריטית על תפקוד הגוף. מבין המצבים האלה מוכרות ביותר **מחלות חסר** בוויטמינים או במינרלים מסוימים. תזונה המבוססת על מזון מהיר וחטיפים ועל צריכה מועטה של פירות וירקות, עלולה להוביל למחלות חסר שונות (ראו טבלת ויטמינים בנספח). בהקשר זה ראוי להיזכר בתינוקות שהתפתחותם נפגעה קשה ביותר עקב מחסור בוויטמין B_1 בתחליף החלב הצמחי שממנו ניזונו באופן בלעדי (עמוד 33).
לעתים מופיעה תת־תזונה בחברת השפע גם בהקשר של אידאולוגיות הקשורות לתזונה, המובילות להימנעות מצריכת מזונות שונים. לדוגמה: צמחונים וטבעונים נמנעים, כידוע, ממזונות שמקורם בבעלי חיים, ולכן הם חשופים לחסרים של ויטמינים מקבוצה B, ויטמין D ומינרלים כמו ברזל, סידן ואבץ, ובמידה מסוימת גם חסר בחומצות אמיניות חיוניות. ניתן למנוע בעיות אלו על ידי מודעות גבוהה למרכיבים שעלולים להיות חסרים במזון הצמחי. יש להקפיד על תפריט שימלא את כל הצרכים התזונתיים של הגוף על ידי גיוון מקורות החלבונים ובחירת מזונות העשירים ברכיבי תזונה חיוניים.
קיימים מצבים של תת־תזונה שבהם חֶסֶר ברכיב מזון מסוים לא נובע מחסרונו במזון, אלא מפגיעה בספיגת הרכיב מהמעי לדם או מהדם לתאים. בהקשר זה חשוב לציין שצריכה מופרזת של משקאות קלים מוגזים, העשירים בזרחן, גורמת להפרת האיזון בין ריכוזי הזרחן והסידן בדם. האיזון מושג מחדש על ידי פירוק רקמת העצם ושחרור סידן לדם, אך תופעה זו עלולה להוביל לדלדול העצם (אוסטאופורוזיס).

שאלה ו־19:
סכמו את הדומה והשונה בין תת־תזונה של העולם הרעב לתת־תזונה של העולם המערבי.

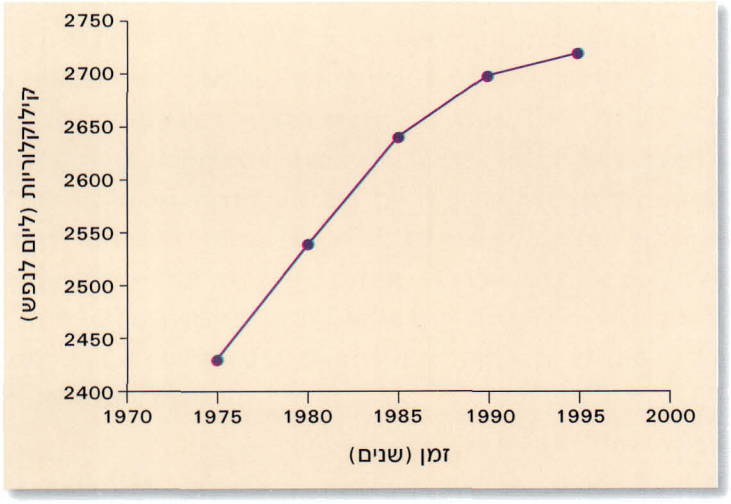
2.4ו השמנה – המגפה של המאה ה־21

בסרט "לאכול בגדול" (שנקרא במקור "Super Size Me"), תיעד הבמאי ***מורגן ספרלוק*** (Morgan Spurlock) מה קורה לאדם שמחליט לאכול במשך חודש אך ורק מזון מהיר. הסרט מתאר כיצד הידרדרה בריאותו בעקבות תזונה שהתבססה על מוצרי רשת מזון מהיר וכללה המבורגרים, צ'יפס וקולה. את הניסוי שערך ליוו 3 רופאים ותזונאית, אשר ניבאו לספרלוק נזקים בריאותיים קלים. התוצאות הקשות של הניסוי הפתיעו גם אותם: במהלך החודש התברר כי ספרלוק הוסיף 12 ק"ג (!) למשקל גופו, רמת הכולסטרול בדמו עלתה באופן משמעותי, הכבד שלו נפגע, הוא פיתח סימנים של התמכרות וסבל מכאבי ראש, מהקאות ומאין־אונות (אימפוטנציה).

בעוד בעולם הרעב האוכלוסייה מתמודדת עם מחסור מתמיד במזון ומתמותה הנובעת מתת־תזונה, בעולם המערבי מתמודדים עם בעיות השמנה ועם תמותה ממחלות הנובעות מאורח החיים – תזונה המאופיינת בעודף קלוריות ובחסר במרכיבים חיוניים והיעדר פעילות גופנית.
אורח החיים האינטנסיבי המאפיין את העולם המערבי מעודד שימוש במזון מעובד שמהווה פתרון תזונתי מהיר וזמין. הנוסחה "המנצחת" של המזון המהיר – המבורגר דו־קומתי, שפע תפוחי אדמה מטוגנים נוטפי שמן וכוס גדולה של קולה – נצרכת בחוצות בנגקוק, מוסקבה, בייג'ין, טוקיו ופריז. לדעת מדענים רבים, השמנת־יתר היא תוצר לוואי של הגלובליזציה (המכונה גם "קוקה־קולוניזציה"), שיצרה תשתית עולמית לתרבות המזון המהיר.

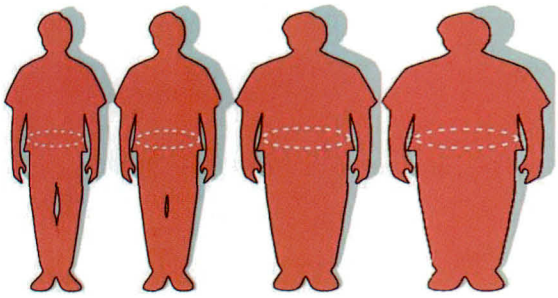
שאלה ו–20:

איור ו–12 מציג את השינויים בצריכה היומית הממוצעת לנפש של אנרגיה במזון, בעולם לאורך השנים.
כיצד, לדעתכם, היה נראה האיור אם היינו מוסיפים בו עוד שני עקומים: האחד לתיאור צריכת האנרגיה הממוצעת לנפש באירופה ובארה"ב, והשני לתיאור צריכת האנרגיה הממוצעת לנפש באפריקה?



איור ו–12: ממוצע כלל עולמי של צריכת אנרגיה במזון לנפש ליום לאורך השנים.

אחת התוצאות של אורח החיים המודרני היא עלייה מתמדת באחוז המבוגרים והילדים בעלי משקל יתר בדרגות שונות. העובדה שאחוז בעלי משקל יתר בעולם כולו עלה פי שניים מ־1980 עד אמצע העשור הראשון של המאה ה־21 הופכת, על פי ארגון הבריאות העולמי, את ההשמנה למגפה.



מהי השמנה?

השמנה היא הוספת משקל מעל לטווח המתאים למין, לגיל ולמבנה הגוף, שנובעת מאגירת שומן בגוף. ההשמנה נגרמת מצריכה עודפת של מזון וממאזן אנרגיה חיובי לאורך זמן.

עם זאת חשוב לציין שאגירת שומן היא טבעית וחיונית כל עוד היא אינה מוגזמת. בתקופות קדומות באבולוציה של האדם, כשאספקת המזון לא הייתה סדירה, היכולת לצבור אנרגיה ברקמות שומן העניקה יתרון הישרדותי. כיום בחברה המערבית, כשהמזון זמין בכל מקום ובכל עת והפעילות הגופנית אינה הכרחית להישרדות, אגירת השומן מהווה בעיה ולא יתרון.

גם רכיבי מזון שאינם ליפידים עשויים להיאגר כשומן. כשהמזון מצוי בעודף, עודפי גלוקוז שאינם נצרכים מיד בתאים נאגרים כגליקוגן בתאי הכבד והשריר. מאחר שיכולת האגירה של גליקוגן מוגבלת (עד כ־500 גרם), תוצרי פירוק מזון המצויים בעודף, כמו גלוקוז וחומצות אמיניות, הופכים בכבד בתיווך האינסולין לחומצות שומן, ובשלב מאוחר יותר לטריגליצרידים הנאגרים בתאי שומן ברקמות שונות בגוף.

מידת ההשמנה מותנית בגורמים רבים, חלקם תורשתיים ופיזיולוגיים שאינם בשליטתנו, כמו מין, גיל וקצב חילוף חומרים בסיסי, וחלקם התנהגותיים־סביבתיים הנמצאים בשליטתנו, כמו רמת הפעילות הגופנית והרגלי האכילה.

נוסף לעודפי הקלוריות במזון, עלולים לתרום להשמנה גם אורח חיים שאינו מחייב פעילות גופנית משמעותית, ותרבות פנאי שמתמצה במקרים רבים בצפייה בטלוויזיה או בשימוש במחשב.

על קצה המזלג...

קצת מספרים על ממדי ההשמנה

בעולם כולו יש יותר ממיליארד מבוגרים בעלי משקל יתר (BMI מעל 25), מהם כ־300 מיליון בעלי משקל יתר קיצוני (BMI מעל 30).

טבלה 1–5: אחוז המבוגרים בעלי משקל יתר קיצוני (BMI מעל 30) במדינות שונות בעולם*

מדינה	אחוז בעלי BMI מעל 30	מדינה	אחוז בעלי BMI מעל 30
ארה"ב	33.3	טורקיה	15.2
מקסיקו	30.0	ישראל	13.6
אנגליה	24.5	גרמניה	13.6
אוסטרליה	21.7	איטליה	9.9
יוון	18.1	שוויץ	8.1
הונגריה	18.8	קוריאה	3.8
קנדה	15.9	יפן	3.4



* לפי דיווח הארגון לשיתוף פעולה ופיתוח כלכלי (OECD) בסוף העשור הראשון של המאה ה־21.

דאגה מיוחדת מעוררת העלייה באחוז הילדים בעלי משקל יתר. מתוך נתוני ארגון הבריאות העולמי עולה שבשנת 2008 היו בעולם למעלה מ־22 מיליון ילדים בעלי משקל יתר. מחקרים מראים כי קיים סיכון גבוה לכך שילדים שמנים יהפכו למבוגרים שמנים.
מעניין לדעת שבסין, שבה לא הייתה נפוצה התופעה של משקל יתר, עולה במהירות שכיחות הילדים (7–18) בעלי משקל יתר. בין השנים 1985 ל־2000 השכיחות עלתה פי 28! גם בישראל מצב ההשמנה בקרב הילדים מעורר דאגה. מומחים מעריכים ש־15%–20% מקרב ילדים עד גיל 18 סובלים ממשקל יתר קיצוני.

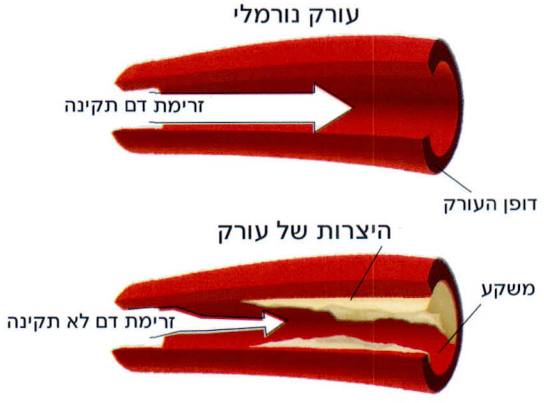
3.4ו הסכנות הטמונות בעודף משקל

למשקל יתר יש גם השלכות בריאותיות וגם השלכות חברתיות. ההשלכות הבריאותיות של ההשמנה מתבטאות בפגיעה באיכות החיים ואף בירידה בתוחלת החיים. עודף משקל והשמנה מהווים גורם סיכון למחלות כרוניות כמו: סוכרת מסוג 2, מחלות לב וכלי דם, לחץ דם גבוה ושבץ מוחי, וכן סוגים מסוימים של סרטן (שד, המעי הגס, ערמונית ועוד).
יש לציין שחלק מהבעיות הנובעות מהשמנה הן הפיכות וניתן לפתור אותן בעזרת הפחתת משקל ומעבר לאורח חיים בריא.

מחלות כלי־דם ולב

קשר לנושא
ביולוגיה של האדם:
מערכת ההובלה.

מחלות כלי־דם ולב הן בעיה בריאותית חמורה ביותר בעולם כולו, בעיקר בארצות המערב המפותחות. בישראל הן "אחראיות" ל־30% מהתמותה הכללית (לשם השוואה, תאונות הדרכים גורמות ל־1.5% מהתמותה הכללית). הגורם העיקרי לרוב מחלות כלי־דם ולב הוא **טרשת העורקים**. בטרשת עורקים נוצרים משקעים שומניים על הדפנות הפנימיים של העורקים, וכתוצאה מכך קוטר העורק קטן ועמו קטנה גם כמות הדם שהוא מספק לאיבר (ראו איור ו–13).
נמצא שצירוף של רמה גבוהה של כולסטרול וכמות גדולה של חומצות שומן רוויות בדם, עלול לגרום להיווצרות משקעים על דופנות העורקים. טרשת עורקים עלולה להתרחש כמעט בכל עורק בגוף.



איור ו–13: זרימת דם בעורק נורמלי ובעורק שהוצר עקב היווצרות משקעים.

בעקבות המשקעים, העורקים מאבדים מגמישותם, והם אינם יכולים להתרחב כראוי בתגובה להזרמת הדם מהלב. בעקבות זאת נפגעת אספקת הדם לתאים תוך פגיעה בתפקוד הגוף כולו. טרשת העורקים היא גם אחת הסיבות להתפתחות יתר לחץ דם.

טרשת העורקים אינה תהליך טבעי, כפי שסבורים רבים, ואין היא חלק בלתי נמנע מתהליך ההזדקנות. אוכלוסיות רבות על־פני כדור הארץ לא נפגעות ממחלה זו כל עוד הן אינן מאמצות אורח חיים מערבי.

מחקרים רחבי היקף שנערכו לאורך שנים רבות, אפיינו את גורמי הסיכון למחלות כלי־דם ולב: רמות כולסטרול גבוהות בדם, לחץ־דם גבוה, רמה גבוהה של חומצות שומן רוויות, רמה גבוהה של הומוציסטאין (סוג של חומצה אמינית), עישון וסוכרת. נמצאו גם גורמי סיכון משניים, כמו למשל חוסר פעילות גופנית קבועה ומאפייני אישיות מסוימים.

חשוב לציין שמשנות התשעים של המאה ה־20 יש ירידה באחוז הלוקים בטרשת העורקים בעולם המערבי, ובכלל זה גם בישראל. הסיבה העיקרית לירידה מיוחסת להגברת המודעות לגורמי הסיכון.

על קצה המזלג...

על "הכולסטרול הרע", ה"כולסטרול הטוב" וטרשת עורקים

כדי להבין את הקשר בין כולסטרול וטרשת עורקים, עלינו להבין כיצד הכולסטרול, שהוא חומר שומני שאינו מסיס בדם, נישא בו ומגיע לכל תאי הגוף. הכולסטרול נישא בדם על ידי נשאים מיוחדים המורכבים ממולקולות חלבון ושומן והנקראים ליפופרוטאינים.

קיימים שני סוגים של נשאי כולסטרול בדם הנבדלים זה מזה בהשפעתם על התפתחות טרשת עורקים:

LDL – הנשא העיקרי של הכולסטרול בדם. הוא בעל נטייה גבוהה לשקוע על דפנות העורקים ולגרום לטרשת העורקים (ראו איור ו–13), ועל כן הוא מכונה בשפה העממית "הכולסטרול הרע".

HDL – נשא המסוגל להביא למחזור הכולסטרול בכבד. מחקרים הראו שלנשא זה יש יכולת להיקשר גם לכולסטרול ששקע בעורקים ולפנותו. לכן, רמה גבוהה שלו בדם רצויה כי הוא מגן מפני טרשת עורקים. מובן אם כן מדוע בשפה העממית נקרא נשא זה "הכולסטרול הטוב".

מחקרים הראו שחומצות שומן רוויות, שמהן הגוף יכול לייצר כולסטרול, הן הגורם העיקרי להעלאת רמת ה־LDL בדם. לכן מומלץ להימנע ממזונות עתירי חומצות שומן רוויות, שמקורן לרוב מן החי.

רמת הכולסטרול בדם תלויה גם בגורמים תורשתיים המשפיעים הן על רמת ייצור הכולסטרול בגוף והן על רמות הנשאים לכולסטרול.

סוכרת מסוג 2

בעשרות השנים האחרונות, בד־בבד עם העלייה המתמדת בשיעור האנשים בעלי משקל יתר, עולה בכל העולם גם השכיחות של מחלת סוכרת מסוג 2. מחלה זאת מופיעה בדרך כלל אצל מבוגרים, אך בשנים האחרונות חלה עלייה מדאיגה בשכיחות המחלה גם בילדים ובמתבגרים.

הסוכרת היא מחלה המתבטאת ברמה גבוהה של גלוקוז בדם. בניגוד לסוכרת מסוג 1, שבה נפגעים תאי β בלבלב והוא אינו מייצר אינסולין, בסוכרת מסוג 2 הלבלב אמנם מייצר אינסולין, אך האינסולין איננו יעיל בשל תגובה מופחתת של תאי המטרה לאינסולין (בעיקר תאי שריר,

שומן וכבד). אי־קליטת גלוקוז על ידי התאים גורמת לעליית ריכוזו בדם. ריכוז גבוה של גלוקוז בדם מעורר הפרשת אינסולין נוספת, וכך רמות האינסולין בדם גבוהות. יתר אינסולין בדם מביא בסופו של דבר לתופעה הנקראת **עמידות** לאינסולין: התאים מפסיקים להגיב לנוכחות אינסולין, כתוצאה מכך אין כניסת גלוקוז והמצב יכול להגיע עד ל"הרעבת התאים".

סוכרת מסוג 2 היא מחלה ניוונית המתפתחת בהדרגה. הוכח שנוסף לנטייה תורשתית, תזונה המבוססת על מזון מעובד, כמויות קטנות של סיבים, עודף פחמימות והיעדר פעילות גופנית – כל אלה גורמים הן להשמנה והן לעליית הסיכוי ללקות בסוכרת מסוג 2. תזונה נבונה ועיסוק בפעילות גופנית יכולים לעכב את התפתחות המחלה ולמנוע את הצורך בתרופות.

נציין שסוכרת מסוג 2 הנמשכת זמן רב עלולה לגרום בסופו של דבר לירידה במספרם של תאי β **בלבלב** בשל פעילותם הנמרצת להפרשת אינסולין. ירידה זו מובילה למצב "דמוי סוכרת מסוג 1" ולצורך בהוספת אינסולין חיצוני.

שאלה ו־21:

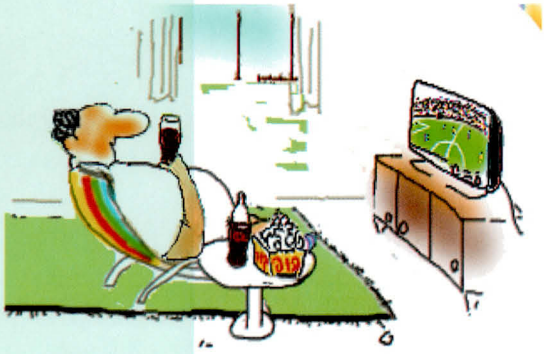
הסבירו את הקשר:

א. בין תזונה עשירה בשומנים לבין מחלות כלי דם.

ב. בין תזונה עשירה בפחמימות לבין סוכרת מסוג 2.

הרחבה

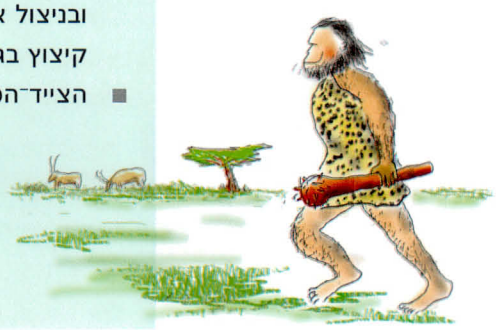
מאפייני תזונה וסגנון חיים בתקופת האדם הקדמון ובימינו



שינויי התזונה שחלו בדורות האחרונים בעולם המערבי הם גדולים ומהירים עד כדי כך שגופנו לא מותאם אליהם. ישנם חוקרים החושבים שמרבית התחלואה הכרונית כיום, שמובילה לכ־75% מהתמותה, מקורה באורח החיים של האדם המודרני. המטען התורשתי של האדם אינו מותאם לסביבת החיים של העולם המערבי, המאופיינת בשפע של מזון זמין, אלא לסביבת חיים שבה המזון אינו זמין ויש הכרח בפעילות גופנית כדי להשיגו.

על חשיבותם של המאפיינים התורשתיים להישרדות המין האנושי ניתן ללמוד ממאפייני התזונה וסגנון החיים של ההומו־ספיאנס, האדם הנבון, שהופיע לפי מקורות שונים לפני כ־50–200 אלף שנה – **תזונת הצייד־המלקט**. מעדויות ארכאולוגיות וחקר תרבויות שעדיין חיות בסגנון חיים שלא השתנה מזה עשרות אלפי שנים, ניתן ללמוד על מאפייני תזונת הצייד־המלקט ואורחות חייו:

- תזונת הצייד־המלקט ואורח חייו מאופיינים בקליטת מזון בעל רמה אנרגטית נמוכה ובניצול אנרגטי גבוה, שכלל כ־3–5 שעות פעילות פיזית ביום כמו הליכה, חפירה או קיצוץ בגרזן.
- הצייד־המלקט אכל את חיות הבר שהצליח לצוד. איכות בשר זה שונה מהותית מאיכות הבשר הנמצא כיום בשווקים, שמקורו בחיות מבויתות. בשרן של חיות בר מכיל פחות חומצות שומן רוויות ויותר חומצות שומן בלתי־רוויות. נוסף על כך, בשר של חיות בר מכיל כמות נכבדה (בערך 4%) של חומצות שומן חיוניות מסוג אומגה 3, שכיום מייחסים לה בין היתר הגנה מפני טרשת עורקים ומחלות ממאירות.



- מקור הפחמימות של הצייד־המלקט היה בעיקר פירות ודגנים מלאים, עשירים בסיבים תזונתיים, בניגוד למקור הפחמימות בימינו שרובו דגנים מעובדים, נטולי קליפות, וסוכרים פשוטים.
- האמצעים הטכנולוגיים שעמדו לרשות הצייד־המלקט לא אפשרו לו לשמר מזון ולעבדו. הוא אכל מזון טרי ולא מעובד (פרט לצלייה על אש). מאז המהפכה התעשייתית, שהתרחשה לפני כ־200 שנה, חל שינוי משמעותי בנגישות למזון ובעיבודו. תהליכי עיבוד המזון השיגו אמנם יעדים כמו הארכת חיי מדף של מוצרי מזון, ייצור מוצרים חדשים ושיפור טעמם, אך פעמים רבות הם פגעו בערכים התזונתיים של מוצרי המזון.
- צריכת הנתרן הכללית בתזונת הצייד־המלקט הייתה נמוכה בלפחות 80% מכמות הנתרן שצורך האדם המערבי הממוצע (בעיקר במלח הבישול). כמות האשלגן במזונם הייתה גבוהה בהרבה משלנו. ליחס בין אשלגן לנתרן נודעת חשיבות במניעת יתר לחץ דם.

בימינו, בחברות שבהן אורח החיים דומה לתרבות הצייד־המלקט, אנשים מבוגרים לא סובלים כלל מסוכרת וממחלות כלי־דם ולב, שלא כמו בני גילם בחברה המערבית.

4.4 הפחתת משקל – דיאטה דלת־אנרגיה

לאור הסכנות הרבות הנובעות מההשמנה, במצבים של חריגה משמעותית מהמשקל התקין מומלץ להפחית במשקל באמצעות **דיאטה דלת־אנרגיה (דיאטת הרזיה)**, המשולבת בהגברת הפעילות הגופנית.

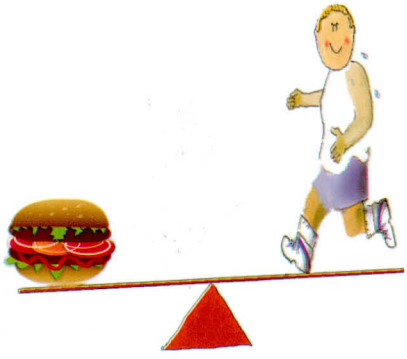
מקור המונח דיאטה הוא בשפה היוונית, ומשמעו אורח חיים. דיאטה היא מושג כללי המתייחס לכלל התפריט היומי של האדם. קיימים סוגים רבים של דיאטות כגון: דיאטה צמחונית שבה לא אוכלים בשר ודגים, אך אוכלים ביצים ומוצרי חלב; דיאטה טבעונית שגם בה לא אוכלים בשר ודגים, אך גם לא אוכלים מוצרי חלב וביצים. בשפת היום־יום המושג דיאטה מתייחס לרוב לדיאטה דלת־אנרגיה (דיאטת הרזיה) שמטרתה היא הפחתת משקל הגוף.

העיקרון המרכזי בדיאטה דלת־אנרגיה הוא יצירת מאזן אנרגיה שלילי.

כפי שלמדתם, כדי להעלות את משקל הגוף בק"ג אחד, יש לקלוט כ־7,700 קק"ל עודפים, כך שכדי לרדת ק"ג אחד יש לגרוע כ־7,700 קק"ל מהתזונה.

כדי שדיאטה דלת־אנרגיה לא תגרום נזק לגוף, התפריט היומי צריך לכלול את כל רכיבי המזון והחומרים החיוניים לגוף. מומלץ **מאוד** להתייעץ עם תזונאי או תזונאית ולהתאים את התפריט לנתונים הפיזיולוגיים של הפרט ולהעדפותיו האישיות.

להורדת משקל הגוף רצוי ליצור מאזן אנרגיה שלילי לא רק על ידי הקפדה על כמות המזון ואיכותו, אלא גם על ידי הגברת ניצול האנרגיה באמצעות **פעילות גופנית**.



ואכן, פעילות גופנית היא מרכיב חשוב בכל דיאטה שמטרתה הרזיה – היא מביאה להקטנת מסת השומנים, היות שעם הקטנת כמות האנרגיה הנקלטת במזון, מאגרי השומן של הגוף מהווים מקור לאנרגיה הדרושה לפעילות המוגברת. כמו כן, במקביל לירידה במסת השומן, הפעילות הגופנית גורמת לעלייה במסת השרירים וזו מעלה את קצב חילוף החומרים הבסיסי, כלומר את כמות האנרגיה המנוצלת.

קיימת סיבה נוספת לחשיבות הפעילות הגופנית במקביל לדיאטת ההרזיה: ידוע שהפחתת כמות הפחמימות והשומנים בתפריט הדיאטה דלת־האנרגיה גורמת לירידה בהפרשת חומרים מרגיעים במוח (כגון סרוטונין), וכתוצאה מכך למצב רוח ירוד. פעילות גופנית מגבירה הפרשת חומרים אלו ומשפרת את מצב הרוח, ובכך יתרונה הנוסף.

על קצה המזלג...

דיאטות דלות אנרגיה בקרב בני נוער בישראל

בתחילת שנות האלפיים ערך ארגון הבריאות הבין־לאומי סקר, בו נבדק אורח החיים של ילדים ובני נוער במדינות שונות, כולל ישראל. ממצאי הסקר מעוררים דאגה באשר לאחוז הגבוה של נערות בישראל (20%), העושות דיאטות דלות אנרגיה שחלקן קיצוניות. בין היתר מדובר בדיאטות המבוססות על אכילת מרכיב תזונתי אחד, ויתור מוחלט על שומנים או פחמימות, דילוג על ארוחות ושימוש בחומרים משלשלים. **שיעור בני הנוער בישראל העושים דיאטות דלות אנרגיה כפול משיעור בני הנוער בעלי משקל יתר!!!**

פער זה עשוי להצביע על כך שמספר גבוה של צעירים וצעירות בגיל ההתבגרות רואים עצמם כשמנים, למרות שמשקלם תקין לגמרי.

חשוב לדעת שלדיאטות לא מאוזנות בגיל ההתבגרות עלולות להיות השלכות חמורות במיוחד, בין היתר: בעיות קשב וריכוז, הפרעות שינה, פיגור בגדילה, עיכוב בהבשלה המינית והפרעות במחזור החודשי אצל הבנות. כאמור, דיאטות כאלו משפיעות לרעה על מצב הרוח, והן עלולות להוביל לעצבנות ולדיכאון. פעמים רבות הדיאטות הלא מאוזנות מסתיימות בכישלון הגורם לתסכול שעלול להוביל להשמנה.

מקובל לחשוב ש...

כדאי לוותר בדיאטה על ארוחת בוקר: זה לא נכון! ארוחת בוקר חשובה למבוגרים ולילדים. אחרי לילה שלא אכלנו, יורדת רמת הסוכר בדם, ולפיכך ארוחת הבוקר מספקת סוכר החיוני למוח ומסייעת לערנות ולשמירה על ריכוז גבוה. הניסיון אף מלמד שאלו המדלגים על ארוחת הבוקר, משלימים את כל הקלוריות החסרות בהמשך היום. ארוחת הבוקר אינה חייבת להיות דשנה. גם יוגורט או דגנים מלאים יכולים להספיק.

שאלה ו–22:

כִּתבו פסקה על הקשר בין מאזן אנרגיה, השמנה ודיאטה דלת־אנרגיה.

שאלה ו–23:

חפשו ברשת האינטרנט תפריט של דיאטת הרזיה, ונתחו אותו לפי הנקודות הבאות:

א. המרכיבים התזונתיים שהתפריט מכיל ואלו שחסרים בו.

ב. הערך הקלורי היומי שהוא מספק.

ג. חסרונות ויתרונות נוספים של הדיאטה.

5.4 הפרעות אכילה



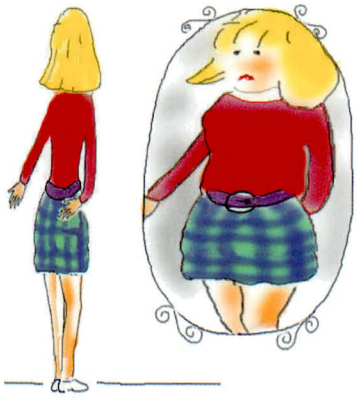
כמו שראינו, אחד המאפיינים של חברת השפע הוא התעסקות רבה בגוף, במזון ובמשקל. מצבים שבהם ההתעסקות במשקל ובמזון הופכת להיות כפייתית, ולעתים אף לא נשלטת, מוגדרים כ**הפרעות אכילה**. בחברות שעבורן האוכל הוא בסיס להישרדות, לא קיימות הפרעות אכילה.

חוקרים טוענים שהעלייה בשכיחות של הפרעות אכילה בעשורים האחרונים נובעת מסיבות חברתיות. עיקר האשמה מופנית כלפי "תרבות הרזון" המשתקפת בכלי התקשורת. חל קישור בין יופי לרזון מופרז: גוף רזה משמעו גוף יפה, דימוי שהתקשורת מעצימה באמצעות פרסומות, סרטי קולנוע ותכניות טלוויזיה שבהן מככבות נשים צעירות ורזות מאוד.

הפרעות האכילה המוכרות ביותר הן אנורקסיה נרבוזה ובולימיה נרבוזה. שתיהן מחלות קשות, השכיחות בעיקר בקרב נערות מתבגרות, אך גם בקרב נשים מבוגרות יותר וכן בקרב נערים וגברים, אם כי באחוז נמוך מזה של הנשים.

בין 0.5%–1% מהנערות בגילאי 12–18 חולות באנורקסיה נרבוזה, וכ־2% בבולימיה נרבוזה (כפי שנראה בהמשך, את שיעור החולות בבולימיה קשה להעריך בשל משקלן התקין).

הפרעות אכילה מביאות לא רק לנזקים בריאותיים, אלא גם לפגיעה בערך העצמי ולהזנחת תחומי חיים משמעותיים, כמו קשרים חברתיים, לימודים ועבודה.



אנורקסיה נרבוזה

אנורקסיה נרבוזה היא מחלה בעלת מרכיב פיזיולוגי ומרכיב נפשי, שמאפיינה העיקרי הוא תת־משקל הנובע מהרעבה עצמית. אצל נשים ונערות רבות המחלה מתחילה מדיאטת הרזיה רגילה ומרצון להוריד מספר קילוגרמים סביר. למרות רזונה, החולה נתפסת בעיני עצמה כשמנה, והיא נשלטת על ידי פחד לא מציאותי מפני עלייה במשקל. היא מרעיבה את עצמה כדי לרדת במשקל, אך משקל היעד הולך ויורד ללא גבול.

להרעבה העצמית יש כמה מאפיינים: צום במשך שעות עד ימים, צריכת קלוריות יומית דלה מאוד ומגוון מצומצם של מזונות "מותרים".

כתוצאה מהדיאטה הקיצונית, נגרמת פגיעה בריאותית חמורה. לעתים קרובות המחזור החודשי נפסק, השֵׂער נושר ונגרם נזק בלתי הפיך למערכת השלד ולשיניים. ב־10%–15% מהמקרים מסתיימת המחלה במוות!

סימני האזהרה הם אלה: משקל נמוך מהמשקל התקין בהתחשב בגיל, בגובה ובמבנה הגוף; פחד עמוק מפני עלייה במשקל; דימוי גוף מעוות; הפסקת המחזור החודשי והתנהגויות כפייתיות הקשורות לאוכל, לפעילות גופנית או לנושאים אחרים.

הטיפול באנורקסיה נרבוזה כיום מתמקד בייעוץ פסיכולוגי ובחזרה למשקל הרצוי באמצעות משטר הזנה מבוקר. ככל שזיהוי המחלה והטיפול בה נעשים בשלב מוקדם יותר של המחלה, עולים סיכויי ההחלמה. חשוב לדעת! בעוד ההידרדרות לאנורקסיה עלולה להיות מאוד מהירה, היציאה ממנה קשה וממושכת.

בולימיה נרבוזה

בולימיה נרבוזה היא הפרעת אכילה המתאפיינת בהתקפי זלילה המלווים בהקאה. היא מתחילה לרוב בגיל ההתבגרות, ושכיחותה בקרב נשים גבוהה פי 10–20 מאשר בגברים.

בהתקף הזלילה, החולה אוכלת כמויות עצומות של מזון בזמן קצר (סדר גודל של כשעה). האכילה נעשית בדרך כלל בהיחבא וכוללת מאכלים בעלי ערך קלורי גבוה, שניתן לאכלם במהירות, כמו גלידה וממתקים. לאחר התקף הזלילה החולה גורמת לריקון מכוון של מערכת העיכול על ידי הקאה מכוונת או שימוש במשלשלים, כל זאת במטרה למנוע את העלייה במשקל. בניגוד לאנורקסיה המאופיינת ב־BMI נמוך מהתקין, רוב החולות בבולימיה הן בעלות BMI תקין. רוב הסיבוכים הרפואיים בבולימיה נגרמים בשל שיטות הריקון של מערכת העיכול. שימוש בהקאה גורם לפגיעה בלוע, בוושט ובשיניים בשל חומציות תוכן הקיבה. שימוש במשלשלים גורם לפגיעה במעיים. בשתי שיטות הריקון קיימת סכנת התייבשות וחוסר איזון מינרלי.

מחלת הבולימיה ניתנת להסתרה בקלות יחסית, בעיקר בשל המשקל התקין יחסית של החולות. זוהי גם הסיבה לכך שקשה להעריך את שכיחות המחלה באוכלוסייה.

שאלה 1–24:

סכמו את הדומה והשונה בין אנורקסיה נרבוזה לבין בולימיה נרבוזה.

עיקרי הנושאים בפרק

- הגוף זקוק לאנרגיה ברציפות, גם כשהוא נמצא במנוחה מוחלטת. שלושת הרכיבים של הניצול האנרגטי הם: חילוף חומרים בסיסי, פעילות גופנית ועיבוד המזון.
- מקור האנרגיה הוא המזון שאנו אוכלים.
- המאזן האנרגטי בגוף, כלומר היחס בין כמות האנרגיה שאנו קולטים לכמות שאנו מנצלים, קובע האם משקל הגוף יעלה, ירד או יישאר קבוע.
- צריכת המזון באדם מווסתת במרכזי הרעב והשובע המצויים בהיפותלמוס.
- צריכת המזון מווסתת על ידי גורמים פיזיולוגיים ונפשיים. בין הגורמים הפיזיולוגיים נכללים גירויים ממערכת העיכול (עצביים והורמונליים), רמת תוצרי העיכול בדם ומצב מאגרי האנרגיה.
- תזונה נבונה היא תזונה המותאמת באופן ייחודי לאדם לפי הגיל, המין, מבנה הגוף, רמת הפעילות הגופנית, הרגלי האכילה והעדפות המזון. עליה לכלול את כל קבוצות המזון, סיבים תזונתיים והרבה מים.
- פירמידת מזון היא ביטוי גרפי להמלצות לתזונה נבונה. המסרים העיקריים בה הם: העדפת מוצרים דלים בשומן ובכולסטרול; העדפת מוצרים המכילים פחות מלח וסוכר; העדפת מזונות המכילים סיבים; ריבוי שתיית מים; המעטה במזונות מעובדים ובמשקאות ממותקים ועיסוק יומיומי בפעילות גופנית.
- סטייה קיצונית מהמשקל התקין – משקל יתר או תת־משקל – גורמים לבעיות בריאות קשות, ולכן חשוב להקפיד על מאזן האנרגיה.
- תת־תזונה בעולם הרעֵב נובעת מסיבות פוליטיות וחברתיות שגורמות לכך שאוכלוסיות נרחבות ניזונות ממזון שאינו מכיל את כל המרכיבים הדרושים בכמויות הנדרשות. במצבים קיצוניים, חסר קיצוני באנרגיה ובחלבונים במזון מביא לרעב עד מוות.
- בעיות התזונה בעולם המערבי נובעות מעודף קלוריות במזון, מאכילה מוגזמת של מוצרי מזון מעובדים החסרים מרכיבי מזון חיוניים וממיעוט בפעילות גופנית.
- עודף משקל והשמנה מוכרים כיום כגורם סיכון למחלות לב וכלי־דם, לסוכרת מסוג 2 ולסוגי סרטן שונים.
- תת־תזונה בעולם המערבי נובעת מתפריט שאינו מכיל רכיבי מזון חיוניים ובעיקר ויטמינים, מינרלים וסיבים תזונתיים. תת־תזונה יכולה לנבוע מאורח חיים ו/או מאידאולוגיות הקשורות לתזונה.
- בדיאטה דלת אנרגיה מפחיתים בצורה מכוונת את כמות הקלוריות במזון. כשעושים דיאטה כזאת יש להקפיד על תזונה מאוזנת ומומלץ להתייעץ עם אנשי מקצוע, בעיקר כשמדובר בבני נוער.
- הפרעות אכילה מתבטאות בהתנהגות אכילה לקויה, בפחד עמוק בפני השמנה ובהתעסקות יתרה במזון. הגורמים להפרעות הם שילוב של גורמים אישיים (תורשה, פיזיולוגיה, אישיות) וגורמים סביבתיים (תרבות, חברה ומשפחה).

מושגים חשובים בפרק

דיאטה דלת־אנרגיה
היפותלמוס
הפרעות אכילה
השמנה
ויסות צריכת המזון
חילוף חומרים (מטבוליזם) בסיסי
מאגרי אנרגיה
מאזן אנרגיה (חיובי, שלילי)
מרכז הרעב
מרכז השובע
סיבים תזונתיים
פעילות גופנית
תזונה מאוזנת
תת־תזונה



נספח

טבלה 1: הוויטמינים באדם – תפקודיהם בגוף, מקורותיהם והשפעות של חסר או עודף בוויטמינים

הוויטמין	פעילותו העיקרית בגוף	נמצא בעיקר במזונות אלה	תופעות הנובעות מחסר בוויטמין	תופעות הנובעות מעודף בוויטמין
ויטמינים מסיסים בשומן				
ויטמין A	מרכיב של חומר רגיש לאור, הנמצא בתאי חישה בעיניים וחיוני לראייה, חשוב לגדילה ולהגנה מזיהומים של העור.	כבד, חלמון ביצה, שומנים מן החי, חלב, חמאה, שמן דגים, ירקות צהובים־כתומים, ירקות ירוקים.	אצל ילדים – הפרעות בגדילה, נזקים לרקמות אפיתל, עור יבש וסדוק, זיהומים בדרכי הנשימה, קשיי עיכול, זיהומים של השלפוחית, עיוורון לילה, פגיעה בקרנית העין עד כדי עיוורון.	נזק לכבד, כאבי ראש, כאבים בעצמות ובמפרקים, הקאות ושלשולים, אובדן תיאבון, נשירת שער, יובש העין והעור.
קרוטן	חומר מוצא לייצור ויטמין A ולכן חיוני לייצורו.	ירקות ופירות צהובים־כתומים (גזר, דלעת, עגבנייה, פלפל אדום), ופחות בירקות ירוקים.	נזק לעור ולרקמות ריריות, עיוורון לילה, תופעות שנמנו לעיל בקשר למחסור בוויטמין A.	
ויטמין D	מגביר העברה של סידן לדם, חיוני למאזן תקין של מעבר סידן בין העצמות לדם.	חלב, חמאה, שמן דגים. ככלל, אינו שכיח במזון, אך תאים בעור יכולים לייצרו בהשפעת קרינה מהשמש. נהוג להוסיפו למזונות בסיסיים כמו חלב ומרגרינה.	אצל ילדים – חולשה ועיוות של העצמות – מחלה ששמה רככת, בגיל הגדילה – הפרעות בגדילת העצמות, אצל מבוגרים – חולשת שרירים.	הסתיידות רקמות רכות הגורמת נזק למוח, ללב ולכליות, בחילות והקאות, עצירות, צמא, השתנה מרובה.
ויטמין E	מונע תהליכי חמצון הפוגעים בתאי דם אדומים ובחומרים שונים בתאים, חשוב לתפקוד תקין של השרירים.	כבד, דגים, שומן מן הצומח, ירקות ירוקי עלים, טחינה, אגוזים.	חסר נדיר מאוד. עלול לגרום לאנמיה.	נדירות.
ויטמין K	משתתף בתהליכי נשימת התא בכל התאים, משתתף בייצור חומר החיוני לקרישת דם ולמניעת דימומים.	כבד, ירקות ירוקי עלים. מיוצר גם על־ידי חיידקי מעיים.	הפרעות בקרישת דם, נטייה לדימומים פנימיים, נזק לכבד.	אנמיה, הרס הכבד.

הוויטמין	פעילותו העיקרית בגוף	נמצא בעיקר במזונות אלה	תופעות הנובעות מחסר בוויטמין	תופעות הנובעות מעודף בוויטמין
ויטמינים מסיסים במים				
ויטמין C (חומצה אסקורבית)	סינתזת קולגן, מעורב בבניית העצמות, הסחוס והשיניים, משתתף במטבוליזם הפחמימות, מסייע לקליטת ברזל מהמעיים לדם.	פירות הדר, כרוב, עגבניות, פלפל ירוק, תותים, תפוחים, תפוחי אדמה.	מחלת צפדינה המתבטאת בדימומים, קושי בהגלדת פצעים, חולשה כללית ואנמיה.	עודף בוויטמין C הוא נדיר מאחר והחומצה מופרשת בשתן. לעיתים עשוי לגרום לשלשול וללקויי עיכול אחרים.
ויטמין B_1 (תיאמין)	משתתף במטבוליזם של הפחמימות ובתהליכים הקשורים בשחרור אנרגיה בנשימת התא.	בשר, כבד, דגים, ביצים, חלב, דגנים מלאים, קטניות, ירקות ירוקי עלים (כגון תרד, חסה, חמציץ).	חוסר תיאבון, הפרעות בעיכול, חולשה של הלב ודופנות כלי הדם, מחלת ברי־ברי המתבטאת בדלקות עצבים, עוויתות, חולשה כללית ושיתוקים בגפיים.	נדירות.
ויטמין B_2	משתתף במטבוליזם של פחמימות וחלבונים.	בשר, כבד, עוף, דגים, חלב, חלבון ביצה, דגנים מלאים, קטניות, ירקות ירוקים.	נטייה לזיהומים ודלקות, פצעים בעור, נפיחות בלשון, גירויים בעיניים.	לא ידועות.
ויטמין B_3 (ניאצין)	חיוני לתהליכים של הפקת אנרגיה בנשימת התא, בעיקר מפחמימות.	עוף, דגים, חלב, שמרים, ביצים, קטניות, דגנים מלאים.	נטייה לתשישות, דלקות בעור, דלקות עצבים.	שטפי דם, בחילות והקאות.
ויטמין B_5	חיוני למטבוליזם של פחמימות ושומנים.	נמצא ברוב סוגי המזון מהחי ומהצומח.	חוסר תיאבון, כאבי בטן וכאבים באיברים שונים, נטייה לעייפות ולדכדוך.	לא ידועות.
ויטמין B_6	משתתף במטבוליזם של חומצות אמיניות, חיוני לייצור תאי דם אדומים ולייצור מחדש של גלוקוז בכבד.	בשר, עוף, דגים, שעועית לבנה, תפוחי אדמה. מצוי פחות בדגנים ובירקות.	חסר אצל תינוקות גורם לאנמיה, דלקות עצבים, עוויתות. במבוגרים – חולשה ותשישות.	לא ידועות.
ויטמין B_7 (ביוטין)	חיוני למטבוליזם של חומצות אמיניות ולייצור שומנים.	כבד, בשר, חלבון ביצה, קטניות, אגוזים.	דרוש בכמויות כה זעירות שחסר בו הוא נדיר.	לא ידועות.
ויטמין B_9 (חומצה פולית)	חיונית לייצור תאי דם אדומים, לייצור דנ"א וחומצות אמיניות.	כבד, ביצים, דגנים מלאים. מיוצר גם על־ידי חיידקי מעיים.	מצבים שונים של אנמיה (חסר או פגיעה בתאי דם אדומים), מומים עובריים במערכת העצבים.	אלרגיות, הפרעות שינה.
ויטמין B_{12}	משתתף בייצור חלבונים וחומצות גרעין, חשוב לפעילות תקינה של תאי עצב, מסייע ביצירת המיאלין, תאי עצם ותאים במערכת העיכול.	בשר, כבד, עוף, דגים, מוצרי חלב, שמרים.	סוג של אנמיה ("אנמיה ממארת").	לא ידועות.

טבלה 2: היסודות המינרלים החיוניים בבעלי־חיים ובאדם – מקורותיהם, תפקודיהם וסימני חסר או עודף במינרלים.

המינרל	תיפקודים עיקריים	מקורות עיקריים	סימני חסר	סימני עודף
מקרומינרלים				
סידן (Ca)	מרכיב במבנה העצמות והשיניים, חיוני בהעברת דחפים עצביים ובכיווץ והרפיית שרירים, חיוני בהסדרת קצב פעימות הלב, מסייע בהקרשת הדם.	טחינה (משומשום מלא), חלב ומוצרי חלב, סרדינים עם עצמות, ירקות ירוקים (ברוקולי, חסה), אגוזים, קטניות, פירות יבשים.	רככת והתגרמות לקויה של עצמות ילדים ובעלי חיים צעירים, "בריחת" סידן מהעצמות אצל מבוגרים, הפרעות בפעילות שרירים ובקרישת דם.	הסתיידות רקמות רכות, הצטברות אבנים בכליות ובדרכי השתן, שיתוק שרירים והפסקת פעילות הלב.
זרחן (P)	מרכיב חיוני בעצמות ובשיניים, חיוני לחמצון פחמימות ושומנים בתהליכי שחרור אנרגיה וניצולה בתאים, מסייע בשמירת ה־pH של נוזלי הגוף.	חלב ומוצרי חלב, ביצים, בשר, ירקות, דגנים מלאים, קטניות, אגוזים.	חולשה, הפרעות עצביות.	פגיעה בספיגת הסידן מהמעי, ובשל כך תופעות של מחסור בסידן.
נתרן (Na)	מווסת לחץ אוסמוטי של נוזלי הגוף ואת נפח נוזלי הגוף, מסייע בהעברת דחפים עצביים ובהתכווצות שרירים, חיוני לספיגת חומרים דרך קרומי התאים.	מלח שולחן (NaCl), חלב, בשר, דגים, ביצים, תרד, גזר, לפת, סלק, כרפס.	הזעה, כאבי בטן, חוסר תיאבון, הקאות, בחילות, שלשולים, עוויתות שרירים.	יתר לחץ דם, השתנת יתר.
אשלגן (K)	חיוני לאיזון נוזלי הגוף, חיוני לפעולת עצבים ושרירים.	פירות וירקות רבים, קטניות, גרגרי דגנים מלאים, בשר, חלב ומוצריו.	חולשה ושיתוק שרירים (הפרעות בנשימה, הפרעות בפעילות הלב), בחילות.	חולשת שרירים, הפרעות בתפקוד הלב (תופעות כמו במחסור).
כלור (Cl)	חיוני לאיזון ה־pH של נוזלי הגוף, מרכיב בחומצה המלחית החיונית לפעילות הקיבה.	מלח שולחן (NaCl), דגים, בשר, ביצים, ירקות, מים.	נדירים.	לא מוכרים אצל בני אדם.
מגנזיום (Mg)	מרכיב של עצמות ושיניים, מפעיל אנזימים רבים, משתתף ביצירת חלבונים ובחילוף חומרים של שומנים, מווסת פעולת שרירים ועצבים.	ירקות עליים ירוקים, אגוזים, גרגרי דגנים מלאים, קטניות, חלב, בשר, שוקולד.	הפרעות בפעילות מערכת העצבים והשרירים: חולשת שרירים, פעילות יתר (רעידות), רגישות עצבית מוגזמת, הפרעות מנטליות.	בחילות, הקאות, חוסר תיאבון, שיתוק פעולת שרירים ועצבים, קשיי נשימה, הפרעות בפעילות הלב, דום לב.

המינרל	תיפקודים עיקריים	מקורות עיקריים	סימני חסר	סימני עודף
מיקרומינרלים				
ברזל (Fe)	חיוני ליצירת המוגלובין ומיוגלובין, מרכיב באנזימים של חמצון ובחלבונים שונים.	כבד, בשר, חלמון, דגנים מלאים, ירקות עליים ירוקים, קטניות, פירות יבשים.	אנמיה, חיוורון, עייפות, קוצר נשימה ודפיקות לב בעת מאמץ.	פגיעה בכבד, בלבלב, בלב, ובאיברים אחרים.
אבץ (Zn)	קואניזם ביותר מ־40 אנזימים שונים.	כבד, בשר, דגי הרינג, גרגרי דגנים מלאים, קטניות.	ריפוי איטי של פצעים, שינויים בעור, הפרעות במערכת החיסון, פגיעה בגדילה, פגיעה בהתבגרות המינית.	אנמיה, בחילות, שלשולים, חום, עייפות.
יוד (I)	מרכיב בהורמון תירוקסין, החיוני לוויסות קצב חילוף החומרים.	דגי ים, אצות ים, ירקות ופירות הגדלים בסמוך לים, מלח בישול מועשר ביוד.	הפרעות בהתפתחות גופנית ושכלית של ילדים, פגיעה בהתפתחות המינית, זַפֶּקת במבוגרים (התרחבות בלוטת המגן).	זַפֶּקת במצבים קיצוניים.
פלואור (F)	מחזק את העצמות והשיניים.	מי שתייה, תה, אצות ים, דגים, אורז, פולי סויה.	עששת השיניים, פגיעה בעצמות השלד.	גוון מנומר לשיניים.
נחושת (Cu)	קואניזם באנזימים רבים, החיוניים לתהליכי הנשימה התאית, חיוני ליצירת תאי דם אדומים, חיוני במטבוליזם של ליפידים.	כבד, אבוקדו, אגוזים, פטריות, קטניות, מוצרי קקאו, גרגרי דגנים מלאים.	אנמיה, הפרעות במערכת העצבים המרכזית, ירידה במספר תאי דם לבנים, פגיעה בפיגמנטציה של עור ושיער.	הפרעות בכבד, בכליות ובמערכת העצבים.
סלניום (Se)	פועל עם ויטמין E למניעת חמצון שומנים, מונע נזקי חמצון בתאים.	כבד, בשר, חלב, בצל, גרגרי דגנים מלאים, דגים, ירקות טריים.	בילדים – בעיות לב וכלי דם, במבוגרים – בעיות במפרקים.	נשירת שיער, ציפורניים פגומות, שחמת כבד וצהבת, צליעה.
מנגן (Mn)	חיוני לבניית עצמות, מרכיב באנזימים אחרים.	אגוזים, גרגרי דגנים מלאים, קטניות, פירות, ירקות, תה, קפה, קקאו, חלמון.	פגיעה בבניית עצמות וסחוסים.	לא מוכרים.
כרום (Cr)	חיוני לחילוף חומרים של גלוקוז, מווסת פעולת אינסולין.	כבד, בשר, גרגרי דגנים מלאים, שמרי בירה.	פגיעה בחילוף חומרים של גלוקוז.	רגישות יתר במערכת העיכול (רעיל במגע).
קובלט (Co)	מרכיב בוויטמין B_{12}, מפעיל אנזימים אחדים.	כבד, בשר, שמרים, דגים, חלב, תאנים, תרד, חסה.	אנמיה.	פוליציטֶמיה – יתר תאי דם אדומים.

מילון מונחים

מונחים ש**מודגשים** בתוך ההגדרה מופיעים גם הם במילון.
מונחים שאינם בעברית מופיעים לאחר המונחים בעברית.

אאוקריוט, תא, אורגניזם (eukaryote) (יוונית: *eu* = אמִתי; *karyon* = גרעין)
אורגניזם חד־תאי או רב־תאי, שבתאיו גרעין המוקף בקרום. בתאים אאוקריוטים יש בתאים אלו אברונים נוספים המוקפים בקרום (ראו גם: פרוקריוט).

אביוטי, גורם (abiotic factor)
מרכיב לא חי של הסביבה, כמו טמפרטורה, מים, אור, קרקע וחומרי הזנה **אי־אורגניים**.

אדנוזין־טרי־פוספט – ראו: ATP בסוף הרשימה.

אווירני (ארובי), תהליך, אורגניזם (aerobic, process, organism)
תהליך המתרחש רק בנוכחות חמצן מולקולרי באוויר או חמצן מומס במים;
אורגניזם שיכול להתקיים רק בנוכחות חמצן (ראו גם: אל־אווירני).

אוטוטרוף, אורגניזם (autotroph, organism) (יוונית: *autos* = עצמי; *trophe* = מזון)
אורגניזם הניזון מתרכובות אורגניות שהוא מייצר בעצמו מתרכובות אי־אורגניות פשוטות כמו H_2O, CO_2 ומלחים שונים תוך ניצול אנרגיה מהסביבה (למשל: אנרגיית אור השמש) בתהליך **פוטוסינתזה** או **כימוסינתזה** (דוגמה לאוטוטרוף: הצמח הירוק). האוטוטרופים הם קבוצת היצרנים בפירמידה האקולוגית (ראו גם: הטרוטרוף).

אורגני, זבל (organic fertilizer)
תרכובות אורגניות שמקורן בשרידים של צמחים ובהפרשות של בעלי חיים. הזבל האורגני מתפרק בהדרגה ומשחרר לקרקע יסודות מינרליים. לרוב משמש הזבל האורגני מטייב קרקעות (ראו גם: זיבול, דשן כימי).

אורגני, חומר (organic compound)
תרכובת הבנויה מאטומי פחמן ומימן ולרוב גם מחמצן. לעתים קרובות מכילה התרכובת גם אטומים נוספים (כמו חנקן, זרחן או גופרית). בטבע, חומרים אורגניים נוצרים על ידי אורגניזמים חיים. התרכובות האורגניות משמשות באורגניזמים החיים לבניית רקמותיהם ולהפקת אנרגיה (לדוגמה: סוכרים, חלבונים, שומנים, חומצות גרעין).

אורגני, מזון (organic food)
מזון שגודל בשיטות של **חקלאות אורגנית**, כלומר ללא שימוש בחומרי הדברה ובדישון כימי. במוצר מזון אורגני לא נעשה שימוש בחומרים משמרים, בצבע מאכל או בתוספות מלאכותיות אחרות.

אורגנית, חקלאות (organic farming)
שיטת ייצור חקלאית בה נמנעים משימוש בתרופות ובהורמונים בגידול חיות משק ומשימוש בדשנים כימיים ובחומרי הדברה כימיים בגידול צמחים. בחקלאות האורגנית מזינים ומטייבים את הקרקע בעיקר באמצעות **קומפוסט, זבל אורגני** ומחזור זרעים.

אי־אורגני (אנאורגני), חומר (inorganic compound)
כל חומר המצוי בטבע ואינו מתאים להגדרה של **חומר אורגני** (לדוגמה: מים, פחמן דו־חמצני, מלחים שונים).

איבר אגירה (storage organ)
איבר בצמח שבו נאגרים **חומרי תשמורת**. לדוגמה: בצל, פקעת, זרע, פרי.

אינסולין (insulin)
הורמון המופרש מתאי בטא (β) ב**לבלב** לזרם הדם ביחס ישר לרמת ה**גלוקוז** בדם. ההורמון גורם להחדרת גלוקוז לרוב תאי הגוף ומאפשר בנייה של **גליקוגן ושומן**. ככל הנראה, כשאינסולין מגיע עם זרם הדם ל**היפותלמוס**, הוא משרה תחושת **שובע**.

אל־אווירני (אנארובי), **אורגניזם, תהליך** (anaerobic, organism, process)
אורגניזם המתקיים בסביבה חסרת חמצן, או תהליך המתרחש בסביבה חסרת חמצן.

אנדוספרם (endosperm)
רקמה המכילה **חומרי תשמורת** בזרעים וממוקמת מסביב לעובר או לצדו. בתהליך הנביטה, עם **פירוק** החומרים באנדוספרם לרכיביהם המסיסים, מתאפשר ניצול **חומרי התשמורת** האגורים בו לצורכי גדילתו של הנבט.

אנורקסיה נרבוזה (Anorexia nervosa)
הפרעת אכילה הנובעת מהרעבה עצמית. היא מאופיינת בתת־משקל ובעלת מרכיב פיזיולוגי ומרכיב נפשי (ראו גם: בולימיה נרבוזה).

אנזים (enzyme)
זרז ביולוגי. **חלבון** (על פי רוב) המזרז תהליך ייחודי בתוך התא או בסביבה הבין־תאית (ראו גם: ליפאז, עמילאז, פפסין, פרוטאז, צלולאז).

אנרגיה (energy) (יוונית: *en* = בעוצמה; *ergon* = עבודה)
תכונה של חומר, של מערכת או של גוף, המבטאת את יכולתם לגרום לשינוי, לבצע עבודה או להעביר חום. אנרגיה יכולה להופיע בצורות רבות, כגון אנרגיית חום, אנרגיה כימית ואנרגיית אור. בתנאים מסוימים, צורה אחת של אנרגיה יכולה להפוך לצורה אחרת.

אנרגיה כימית (chemical energy)
האנרגיה הפוטנציאלית של חומרים. כאשר חלים שינויים במבנה של מולקולות, האנרגיה הכימית יכולה להיות מועברת בין חומרים, או מומרת לצורות אחרות. זוהי צורת האנרגיה העיקרית המשמשת לתהליכי החיים.

אפידרמיס (epidermis)
שכבת התאים החיצונית המקיפה ומכסה את אברי הצמח או בעל החיים.

אפקט החממה (greenhouse effect)
תופעה הנובעת מהילכדות אנרגיית חום באטמוספרה. קרינת חום מפני כדור הארץ מוחזרת אליו בגלל הימצאותם של גזים שונים באטמוספרה בהם פחמן דו־חמצני ומתאן. מדענים סבורים שתהליך התחממות כדור הארץ הנצפה כיום נובע מהגברה של אפקט החממה, והגברה זו נגרמת כנראה בשל העלייה בריכוז פחמן דו־חמצני ובריכוז מזהמים אחרים באטמוספרה.

בולימיה נרבוזה (Bulimia nervosa)
הפרעת אכילה המתאפיינת בהתקפי אכילה שבהם צורכים כמויות גדולות מאוד של **מזון**. מלווה בדרך כלל בהקאות יזומות כדי למנוע עלייה במשקל (ראו גם: אנורקסיה נרבוזה).

בליעת אור (light absorption)
תהליך שבו אנרגיית אור פוגעת בחומר (**צבען**), נקלטת בו כולה או חלקה ומחוללת בו שינוי. השינוי מוביל להמרת אנרגיית האור לצורה אחרת של אנרגיה (לדוגמה: בצמח, אנרגיית האור פוגעת ב**כלורופיל** ונקלטת בו ובעקבות כך מומרת לאנרגיה כימית; בדוד שמש, אנרגיית האור מומרת לאנרגיית חום).

בתי צמיחה
מבנים סגורים (כמו: חממות, בתי רשת ומנהרות) שבהם ניתן לגדל גידולים חקלאיים תוך בקרה על תנאים כגון: טמפרטורה, לחות, קרינה, הרכב האוויר, מידת ההשקיה והדישון.

גורם מגביל (limiting factor)
גורם כלשהו המשפיע על קצב תהליך. כל עוד הגורם אינו מצוי בשיעור מיטבי, הוא מגביל את קצב התהליך והגדלת שיעורו מגבירה את קצב התהליך.

גלוקוז (glucose)
חד־סוכר שנוסחתו $C_6H_{12}O_6$. מהווה מקור עיקרי להפקת אנרגיה בתאים של צמחים ובעלי חיים בתהליך **הנשימה התאית**. מהווה אבן־בניין של **רב־סוכרים** (כגון: עמילן, גליקוגן ותאית).

גליצרול (glycerol)
תרכובת אורגנית תלת־פחמנית, המהווה מרכיב ב**טריגליצרידים** ובפוספוליפידים.

גליקוגן (glycogen)
רב־סוכר המורכב מיחידות חוזרות של גלוקוז. משמש **חומר תשמורת** בתאי בעלי חיים.

גליקוליזה (glycolysis)
השלב הראשון בהפקת האנרגיה מגלוקוז בכל האורגניזמים החיים. הגלוקוז מתפרק לשתי מולקולות של תרכובת תלת־פחמנית (חומצה פירובית). במהלך הגליקוליזה, משתחררת מקצת האנרגיה ממולקולת הגלוקוז ומשמשת לבניית שתי מולקולות של **ATP**.

גרלין (ghrelin)
הורמון המופרש מה**קיבה** כאשר היא ריקה אל זרם הדם. כאשר הוא מגיע ל**היפותלמוס** הוא משרה תחושת **רעב**.

גסטרין (gastrin)
הורמון המופרש מתאים הנמצאים בדופן ה**קיבה** אל זרם הדם. הוא המווסת את הפרשת מיץ הקיבה מתאים אחרים בדופן הקיבה ואת תנועת השרירים שבה.

דגנים (cereals, grains, Poaceae)
משפחה של צמחים הכוללת בין היתר חיטה, אורז, שעורה ותירס. בתזונה, המונח מתייחס למוצרים העשויים מזרעים של צמחים ממשפחת הדגניים, כמו פסטה, מוצרי מאפה שונים ודגני בוקר. זהו המקור החשוב ביותר של פחמימות מורכבות.

דו־סוכרים (disaccharides)
תרכובות הבנויות משתי יחידות של **חד־סוכר** (לדוגמה: סוכרוז).

דיאטה (diet)
מושג כללי המתייחס לתפריט של האדם.
דיאטה דלת־אנרגיה (דיאטת הרזיה) (Low calorie diet)
תפריט שמתוכנן על פי העיקרון של יצירת **מאזן אנרגיה שלילי** שמטרתו הפחתת משקל הגוף.

דיות (טרנספירציה) (transpiration)
התאדות מים מהצמח, המתרחשת בעיקר דרך ה**פיוניות** שבעלים. לשיעור הדיות השפעה רבה על מאזן המים של הצמח.

דישון – ראו: דשן כימי.

דשן כימי (chemical fertilizer)
מלחים או תרכובות אי־אורגניות אחרות, המספקים לצמח יסודות **מינרליים** חיוניים, בעיקר חנקן, זרחן ואשלגן במצב מסיס וקליט (ראו גם: זבל אורגני).
דישון (fertilization)
הוספת דשן כימי לקרקע.

הורמונים (hormones)
חומרים הנוצרים בתאי בלוטה בחלק אחד של הגוף, מופרשים אל הנוזלים הבין־תאיים ו/או מערכות הובלה, מועברים באמצעותם ומשפיעים על פעילותם של תאים או איברים בחלקים אחרים של הגוף. מאפשרים העברת מידע בין תאים בגוף ומשפיעים על ויסות פעולות שונות בגוף ותיאום שלהן. הורמונים מצויים בצמחים ובבעלי חיים (ראו גם: אינסולין, גרלין, גסטרין, לפטין, כולציסטוקינין, סקרטין).

הזנה מינראלית (mineral nutrition)
קליטת יסודות מינרליים חיוניים מהקרקע והטמעתם בחומרים הנבנים בצמח. בקרקע החקלאית שבה המלאי הטבעי של היסודות המינרליים אינו מספיק, יש צורך להוסיף יסודות מינרליים באמצעות תוספת **דשן כימי** או **זבל אורגני**.

הטרוטרוף, אורגניזם (heterotroph, organism) (יוונית: *hetero* = שונה; *trophe* = מזון)
אורגניזם הניזון מתרכובות אורגניות מוכנות ואינו מסוגל לייצר אותן בעצמו מתרכובות אי־אורגניות. כל בעלי החיים, הפטריות ורוב החיידקים הם **הטרוטרופים**. הם מהווים את הצרכנים ואת המפרקים במערכת האקולוגית (ראו גם: אוטוטרוף, אורגניזם).

היפותלמוס (hypothalamus)
אזור במוח של בעלי חוליות אשר מפקח על פעילויות רבות, בעיקר אלו המעורבות בהומיאוסטזיס, בהן: שמירה על טמפרטורת הגוף, שמירה על ריכוז יוני המימן בדם וויסות צריכת המזון.

המרת אנרגיה (energy conversion)
שינוי של צורת האנרגיה, למשל: אנרגיית אור משתנה לאנרגיה כימית. בכל המרת אנרגיה, מקצת מהאנרגיה הופכת לאנרגיית חום שאינה ניתנת לניצול.

העברה סבילה (פסיבית) (passive transport)
מעבר של חומרים דרך קרום התא ממקום שבו ריכוזם גבוה למקום שבו ריכוזם נמוך (בהתאם למפל הריכוזים). תהליך זה אינו צורך **אנרגיה**.

העברה פעילה (אקטיבית) (active transport)
העברה של חומרים דרך קרום התא ממקום שבו ריכוזם נמוך למקום שבו ריכוזם גבוה (כנגד מפל הריכוזים). תהליך זה צורך אנרגיה ומאפשר צבירה של יונים מסוימים בתוך התא והפרשה של יונים אחרים מן התא. מתבצעת באמצעות נשאים ייחודיים.

העלאת גירה – ראו: מעלי גירה.

הפרעות אכילה (eating disorders)
מצבים שבהם התעסקות **במזון** ובמשקל הופכת כפייתית עד כדי פגיעה בבריאות הגופנית והנפשית (ראו גם: אנורקסיה נרבוזה, בולימיה נרבוזה).

הרזיה (weight loss)
הפחתה במשקל הגוף כתוצאה מ**מאזן אנרגיה** שלילי לאורך זמן. ירידה במשקל מתחת לטווח המתאים למין, לגיל ולמבנה הגוף עלולה לפגוע בבריאות (ראו גם: דיאטה דלת אנרגיה, הפרעות אכילה).

הרכבת (סינתזת) **חומרים** (biosynthesis) (יוונית: *bio* = חיים; *synthesis* = הרכבה)
בניית תרכובות מורכבות מתרכובות פשוטות יותר על ידי אורגניזמים חיים. הרכבת חומרים היא חלק מתהליכי **חילוף החומרים**.

השמנה (weight gain)
עלייה במשקל הגוף כתוצאה מ**מאזן אנרגיה** חיובי לאורך זמן. הוספת משקל מעל לטווח המתאים למין, לגיל ולמבנה הגוף עלולה לפגוע בבריאות.

ויטמינים (vitamins)
תרכובות אורגניות שבעלי חיים זקוקים לכמויות זעירות שלהן לצורך פעילות מטבולית תקינה, אך בדרך כלל אינם מסוגלים לבנות אותן בעצמם, ומקבלים אותן במזון.

ושט (esophagus)
קטע קצר ב**מערכת העיכול** שצורתו צינורית, הקולט את המזון שנבלע בפה ומוליך אותו אל ה**קיבה**.

זבל אורגני – ראו: אורגני, זבל.

זיבול (organic fertilization)
הוספת **זבל אורגני** לקרקע (ראו גם: אורגני, זבל).

זיהום קרקע
פגיעה בהרכב הקרקע באופן שמזיק לצמחים ולמיקרואורגניזמים. בין הגורמים לזיהום קרקע: שימוש לא מבוקר או ממושך מדי ב**דשן**, ב**זבל** ובחומרי הדברה; הצטברות פסולת מוצקה וחומרים בלתי מתכלים; גשם חומצי. הזיהום יכול להתבטא בהצטברות **מינרלים**, מתכות כבדות ורעלים אחרים או בחומציות או בסיסיות.

זרחה (phosphate)
שם כללי ליונים HPO_4^{-2} או PO_4^{-3}. יונים אלו משתתפים בתהליכים המלווים במעברי אנרגיה בתא. נהוג להשתמש בסימול Pi לציון הזרחה ברישום התהליכים בהם יון כזה מעורב (ראו גם: זרחון).

זרחון (פוספורילציה) – (phosphorylation)
העברה של **זרחה** לתרכובת אורגנית. במקרים רבים, מולקולת ה־**ATP** תורמת את הזרחה לתהליך.

זרחון חמצוני (oxidative phosphorylation)
הוספת יחידה של **זרחה** ל־ADP באמצעות אנרגיה שמקורה בריאקציות חמצון־חיזור (לדוגמה: בניית ATP בצמוד להעברת אלקטרונים בנשימה התאית האווירנית).

חד־סוכרים (monosaccharide)
אבני הבניין של ה**פחמימות**. תרכובות הכוללות בין 4 ל־8 אטומי פחמן המאורגנים במרחב כטבעות מחומשות או משושות. החד־סוכרים הם בעלי מבנה גבישי, טעם מתוק ומסיסות גבוהה במים.

חומצות אמיניות (amino acid)
אבני הבניין של ה**חלבונים**. תרכובות חנקן אורגניות, הכוללות אטום פחמן שאליו קשורים אטום מימן, קבוצה קרבוקסילית (COOH), קבוצה אמינית (NH_2) ושרשרת צדדית שאופיינית לכל חומצה אמינית ומסומנת באות R.

חומצות שומן (fatty acid)
אבני הבניין של רוב ה**ליפידים**. תרכובות הבנויות מאטומי פחמן, מימן וחמצן. חומצות השומן נבדלות זו מזו במספר אטומי הפחמן וביחס בין מספר אטומי המימן והפחמן. מהוות מרכיב של **טריגליצרידים**.

חומר אורגני – ראו: אורגני, חומר.

חומר אי־אורגני – ראו: אי־אורגני, חומר.

חומרי תשמורת (storage substance)
תרכובות הנאגרות באורגניזמים חיים ומשמשות בעת הצורך מקור לחומרים ולאנרגיה (לדוגמה: שומן, גליקוגן ועמילן).

חילוף גזים (gas exchange)
תהליך שבאמצעותו האורגניזם קולט חמצן מהאוויר שבסביבה ופולט פחמן דו־חמצני אל האוויר שבסביבה.

חילוף חומרים (מטבוליזם) (metabolism) (יוונית: *metabole* = שינוי, חילוף)
כלל התהליכים הכימיים המתרחשים בתאים. תהליכים אלה כוללים, בין היתר, פירוק תרכובות אורגניות מורכבות לפשוטות ויצירת תרכובות אורגניות מורכבות מתרכובות פשוטות. תהליכי חילוף החומרים מלווים בשחרור ו/או בהשקעה של **אנרגיה**.

חילוף חומרים בסיסי (**B**asic **M**etabolic **R**ate)
מרכיב של **הניצול האנרגטי של הגוף**. מוגדר ככמות האנרגיה הדרושה לקיום הגוף במנוחה, ולשמירה על הומיאוסטזיס, כלומר לקיום התהליכים הביוכימיים בכל תא ותא, לחילוף גזים, להפעלת מחזור הדם, לקיום מתח שרירים ולפעילויות בלתי רצוניות נוספות.

חלבונים (proteins)
תרכובות אורגניות גדולות שאבני הבניין שלהן הן **החומצות האמיניות**. הרכבן, מספרן וסידורן של החומצות האמיניות בשרשרת החלבון הוא שקובע את תכונותיו. לחלבונים תפקודים שונים באורגניזמים חיים, חלקם חלבוני מבנה (לדוגמה: קולגן) ואחרים חלבוני פעולה (**אנזימים**, נשאים בקרום, נוגדנים, **הורמונים**).

חלבון מיקרוביאלי (microbial protein)
ה**חלבונים** המרכיבים את המיקרואורגניזמים (חלבוני דופן, אנזימים ועוד). בתזונת **מעלי הגירה**, חלבוני המיקרואורגניזמים, שעוברים מהכרס לקיבה האמִתית, הם מקור חלבון עיקרי.

חמצון־חיזור, תהליך (oxidation-reduction reaction)
תהליך של העברת אלקטרונים או מימנים מאטום של חומר אחד לאטום של חומר אחר. החומר המוסר הוא החומר המחזר, ואילו החומר המקבל הוא החומר המחמצן (לדוגמה: בתהליך **הנשימה התאית** מתרחשים תהליכי חמצון־חיזור).

חמצון מלא (complete oxidation)
תהליך שבו **חומר אורגני** מתפרק בנוכחות חמצן ל־CO_2 ומים תוך שחרור הכמות המרבית של **אנרגיה**.

חקלאות אורגנית – ראו: אורגנית, חקלאות

טריגליצרידים (triglycerides)
סוג של **ליפידים** הבנויים מ־3 חומצות שומן הקשורות למולקולה אחת של **גליצרול**. הטריגליצרידים כוללים שְמנים ו**שומנים**.

טרנספירציה – ראו: דיות.

יונקות (root hairs)
שלוחות ארוכות היוצאות מתאי אפידרמיס בשורשים צעירים. דרכן מתרחשת מרבית הקליטה מהקרקע של מים ויסודות מינרליים אל הצמח. מספר היונקות הצומחות משורש אחד הוא גדול מאוד, ובכך גדל שטח המגע בין השורש לקרקע.

יצרן – ראו: אוטוטרוף, אורגניזם.

כבד (liver)
איבר גדול ומרכזי בבעלי חוליות שבה נוצרים **מיצי מרה**, נבנה **גליקוגן**, נוצרים **חלבונים** רבים המופרשים לדם, נאגרים **ויטמינים** ומפורקים חלק מהחומרים הרעילים בגוף.

כולסטרול (cholesterol)
חומר ליפידי המצוי רק בבעלי חיים. משמש חומר מוצא ל**הורמונים** סטרואידיים ול**מלחי מרה** ומהווה מרכיב חשוב בקרום התא. נמצא קשר בין רמת כולסטרול גבוהה בדם לבין היצרויות כלי דם וסיכון ללקות בהתקף לב.

כולציסְטוקינין (cholecystokinin) (CCK)
הורמון המופרש מה**תריסריון** אל זרם הדם בתגובה להגעת מזון למעי. גורם להפרשת **מיצי עיכול** וכן לסגירת שריר השוער בין ה**קיבה** ל**תריסריון**. נוסף לפעולתו המקומית, כשכולציסטוקינין מגיע עם זרם הדם ל**היפותלמוס**, הוא משרה תחושת **שובע**.

כימוסינתזה (chemosynthesis)
תהליך שבו **אורגניזמים אוטוטרופים** (סוגים מסוימים של חיידקים) בונים חומרים אורגניים בעזרת אנרגיה המופקת מתהליכי חמצון של חומרים אי־אורגניים מהסביבה (כמו מימן גפריתי) ולא בעזרת אנרגיית האור.

כיס המרה (gall bladder)
איבר האוגר את נוזל ה**מרה** המופרש מה**כבד**, מרכז אותו ומפריש אותו ל**מערכת העיכול**.

כלורופיל (chlorophyll)
צבען (פיגמנט) ירוק, הבולע גלי אור, בעיקר בתחום הכחול והאדום. קליטה של אנרגיית האור גורמת לשינוי כימי במולקולה (הרחקת אלקטרון) המניע את תהליך ה**פוטוסינתזה**.

כלורופלסט (chloroplast)
אברון המצוי בתאי צמחים (בחלקים הירוקים) ובאצות ובו מתבצע תהליך ה**פוטוסינתזה**. מכיל **כלורופיל**, **אנזימים** ו**נשאים** הדרושים לביצוע התהליך. קיימים בו מבנים קרומיים היוצרים שני מדורים, שבכל אחד מהם מתרחש שלב אחר של הפוטוסינתזה.

כרס (rumen)
המדור הראשון והגדול במערכת המדורים של **מעלי הגירה**. בו נעשית לישה ראשונה של ה**מזון** שלאחריה עולה המזון ללעיסה נוספת בפה. בכרס מתרחש עיקר פעולת המיקרואורגניזמים.

לבלב (pancreas)
בלוטה בבעלי חוליות שממוקמת מאחורי ה**קיבה**. פועלת הן כבלוטת הפרשה חיצונית, המפרישה אל ה**תריסריון מיצי עיכול**, והן כבלוטת הפרשה פנימית, המפרישה לזרם הדם את ה**הורמונים אינסולין** וגלוקגון המעורבים בבקרה של רמת הגלוקוז בדם.

ליזוזום – ראו: פגוציטוזה.

ליפאז (lipase)
שם כללי ל**אנזימים** מפרקי שומנים במערכת העיכול.

ליפידים (lipids)
קבוצת חומרים אורגניים שאינם מסיסים במים. רובם בנויים משרשרות או מִטְבעות של אטומי פחמן ומימן. הקבוצות העיקריות הן אלה: **טריגליצרידים**, פוספוליפידים וסטרואידים. הליפידים משמשים בין היתר מקור אנרגיה, חומר אגירה, חומר הגנה ובידוד ואבן בניין של קרומי התאים והאברונים.

לֶפְטִין (leptin)
הורמון המופרש על ידי תאי השומן אל זרם הדם. ייצורו נמצא ביחס ישר למסת השומן ולתכולת ה**טריגליצרידים** בתאים אלו. כאשר הוא מגיע ל**היפותלמוס** הוא משרה תחושת **שובע**. הלפטין קשור לפיקוח בטווח הארוך על צריכת המזון.

מאזן אנרגיה (energy balance)
מאזן האנרגיה בגוף הוא היחס בין כמות האנרגיה הנקלטת ב**מזון** לבין כמות האנרגיה המנוצלת על ידי הגוף.

מאזן אנרגיה חיובי – מצב בו כמות האנרגיה הנקלטת במזון גבוהה מכמות האנרגיה שהגוף מנצל. לאורך זמן – עשוי להוביל ל**השמנה**.

מאזן אנרגיה שלילי – מצב בו כמות האנרגיה הנקלטת במזון נמוכה מכמות האנרגיה שהגוף מנצל. לאורך זמן – עשוי להוביל ל**הרזיה**.

מזון אורגני – ראו: אורגני, מזון

מזון גס (forage)
מזון **למעלי גירה** המכיל אחוז גבוה של **תאית**.

מזון מרוכז (concentrate food)
מזון **למעלי גירה**, בעל תכולה גבוהה של חלבון, שומן ופחמימות קלות־עיכול ותכולה נמוכה של **סיבים** (**תאית**).

מחזר, חומר (reductant)
חומר בעל נטייה למסור אלקטרונים או מימנים לחומר אחר (ראו גם: חמצון־חיזור).

מחמצן, חומר (oxidant)
חומר בעל נטייה לקבל אלקטרונים, או מימנים מחומר אחר (ראו גם: חמצון־חיזור).

מחלת חסר (deficiency disease)
מחלה הנובעת מתזונה לקויה עקב חסר של רכיב תזונה יחיד, כגון **ויטמין** או **מינרל** מסוים, החיוני לתפקוד התקין של הגוף (ראו גם: סימני מחסור).

מטבוליזם – ראו: חילוף חומרים.

מיטוכונדריון (ברבים: מיטוכונדריה) (mitochondrion, mitochondria)
אברון תוך־תאי בתאים אאוקריוטיים, שבו מתבצעים תהליכי **הנשימה התאית האווירנית**. מוקף קרום כפול המחלק את האברון למדורים. השלבים השונים של הנשימה התאית מתבצעים במדורים השונים ועל גבי הקרומים.

מינרלים (minerals)
חומרים אי־אורגניים, בדרך־כלל מלחים, המצויים בקרקע ובמים, שמקורם בסלעי כדור הארץ. המינרלים חיוניים לצמחים ולבעלי חיים לבניית גופם ולתפקודם התקין. צמחים קולטים את המינרלים מהקרקע ובעלי חיים – במזון.

מיצי עיכול (digestive fluids)
תמיסות המופרשות מכל חלקי **מערכת העיכול** (צינור העיכול והאיברים הנלווים אליו) ומכילות חומרים המשתתפים בתהליכי העיכול. התמיסות כוללות: מים, אנזימי עיכול, חומרים מווסתי pH וחומרים נוספים.

מלחי מרה (gall/bile salts)
חומרים המופרשים מן **הכבד** בנוזל המרה. מסייעים לתִחלוּב ולעיכול **שומנים** ב**מעי הדק**. נוזל המרה נאגר בשלפוחית קטנה הנקראת **כיס המרה** ומופרש בעת הצורך ל**תריסריון**.

מעבר אקטיבי – ראו: העברה פעילה.

מעבר פסיבי – ראו: העברה סבילה.

מעגל קלוין (calvin cycle)
מסלול מעגלי של תהליכים המביאים לקיבוע פחמן דו־חמצני ל**פחמימות** בתהליך ה**פוטוסינתזה**. מתרחש בסטרומה שב**כלורופלסט**. המסלול נקרא על שם החוקר שפיענח אותו.

מעגל קרבס (krebs cycle)
מסלול מעגלי של תהליכים המהווה חלק מרכזי של תהליך **הנשימה התאית האווירנית** ושל **חילוף החומרים** של חומרי המזון בכלל. במהלכו מתחמצנים תוצרים של פירוק המזון ומשתחרר פחמן דו־חמצני. מתרחש ב**מיטוכונדריה** במדור התוך־קרומי. נקרא על שם החוקר שפענח אותו.

מעי דק (small intestine)
אזור ב**מערכת העיכול** של חולייתנים, שבו מתבצע עיקר **פירוק** המזון וממנו נספג המזון לדם. אורכו הכולל עולה בדרך כלל על אורך הגוף, והשטח הפנימי מוגדל, בדרך כלל, על ידי קיפולים ובליטות רבות (ראו גם: סיסים וסיסונים).

מעי גס (large intestine)
אזור ב**מערכת העיכול** של חולייתנים, שאליו עוברים מ**המעי הדק** שיירי מזון לא מעוכלים, מים וחיידקים. רוב המים וחלק מהמינרלים שבתערובת נספגים מהמעי הגס לדם, החלק הנותר מתמצק והופך לצואה, המופרשת דרך פי הטבעת.

מעלי גירה (ruminants)
קבוצה של בעלי חיים (כגון: צבאים, בקר, עיזים), שבולעים **מזון** לעוס חלקית, ובהמשך מעלים אותו חזרה אל הפה, לועסים אותו שוב ובולעים מחדש להמשך תהליך העיכול (העלאת גירה). בעלי חיים אלה מסוגלים לנצל מזונות סיביים עשירים בתאית ודלים בחלבון בזכות סימביוזה עם אוכלוסייה גדולה ומגוונת של מיקרואורגניזמים ובזכות מערכת מדורי עיכול ייחודית.

מערכת הובלה (בצמח) (vascular system)
רקמות ההובלה בצמח. קיימים שני סוגים של צינורות: עצה ושיפה.

שיפה (phloem) – צינורות הובלה בצמחים המובילים את תוצרי **הפוטוסינתזה** מהעלים אל שאר חלקי הצמח וכן מרקמות אגירה אל חלקים אחרים של הצמח.

עצה (xylem) – צינורות הובלה בצמחים, המובילים מים ומלחים מהשורש אל שאר חלקי הצמח.

מערכת עיכול (digestive System)
מערכת שבה מתפרקים חומרי המזון בעזרת **אנזימים** שונים לחומרים פשוטים יותר, ואלו נספגים אל הדם ומובלים באמצעותו לכל תאי הגוף. המערכת בנויה כצינור ואיברים נלווים.

מרה – ראו: מלחי מרה.

מרכז הרעב ומרכז השובע (satiety center, hunger center)
מרכזי בקרה מוחיים המצויים ב**היפותלמוס**. מפקחים לטווח הקצר על צריכת המזון וקצב **חילוף החומרים** ולטווח הארוך פועלים בוויסות הבנייה והניצול של מאגרי הגוף.

משוב, מנגנון (feedback mechanism)
מנגנון שבאמצעותו תוצאות של תהליך מווסתות שלבים קודמים של אותו תהליך.
משוב חיובי – עלייה בתוצאה של התהליך מביאה להגברת התהליך.
משוב שלילי – עלייה בתוצאה של התהליך מביאה לעיכוב התהליך.

ניצול אנרגטי של הגוף (energy expenditure)
כל התהליכים שבהם מנוצלת האנרגיה בגוף. כולל: **חילוף חומרים בסיסי**, פעילות גופנית ועיבוד המזון.

נשאי מימנים (hydrogen carriers)
תרכובות אורגניות בעלות נטייה לקשור מימנים ולשחרר אותם בהתאם לנטייה של חומרים אחרים למסור להם מימנים או לקבל מהם את המימן. מעבירות מימנים בשלבים שונים של תהליכי ה**גליקוליזה** וה**נשימה התאית** (**NAD**) ושל ה**פוטוסינתזה** (NADP).

נשימה תאית (cellular respiration)
סדרה של תהליכים ביוכימיים בתאים המשמשים להפקת אנרגיה בתאים. במהלכם חלים פירוק וחמצון של תרכובות אורגניות פשוטות, תוך כדי שחרור אנרגיה. האנרגיה מנוצלת לבניית מולקולות **ATP** מ־ADP וזרחה (Pi). קיימים מספר תהליכים של נשימה תאית: **נשימה תאית אווירנית**, תהליכי **תסיסה** ו**נשימה תאית אל־אווירנית**.

נשימה תאית אווירנית (אירובית) (aerobic respiration)
תהליך פירוק וחמצון רב שלבי של תרכובות אורגניות פשוטות, שבו קולט המימנים האחרון הוא חמצן חופשי. זהו התהליך היעיל ביותר להפקת אנרגיה – ממולקולה אחת של גלוקוז מתקבלת אנרגיה המנוצלת להרכבת כ־30 מולקולות **ATP**, והתרכובות האורגניות עוברות בו **פירוק** מלא עד לקבלת CO_2 ו־H_2O. בתאים איקריוטים, הנשימה התאית האווירנית מתרחשת ב**מיטוכונדריה**.

נשימה תאית אל־אווירנית (נשימה אנארובית) (anaerobic respiration)
תהליך נדיר הקיים רק בחלק מהתאים הפרוקריוטים, שבו הפקת אנרגיה מפירוק התרכובות האורגניות מתרחשת ללא נוכחות חמצן חופשי. דומה בשלביו לתהליך ה**נשימה התאית האווירנית**, אך שונה ממנו בקולט המימנים האחרון, בתוצרים ובתפוקת אנרגיה נמוכה בהרבה.

סוכרים – ראו: פחמימות.

סוכרת (diabetes)
מחלה המאופיינת בעיקר בריכוז גבוה של גלוקוז בדם. נגרמת בשל היעדר הפרשה של **אינסולין** (סוכרת מסוג 1 – סוכרת נעורים), או בשל תגובה מופחתת של תאי המטרה לאינסולין (סוכרת מסוג 2).

סיבים תזונתיים (dietary fiber)
פחמימות מורכבות המצויות בדפנות של תאי הצמח ובקליפות של הזרעים. ב**מערכת העיכול** של האדם, הסיבים אינם נעכלים. עם זאת הם מהווים מרכיב חשוב בתזונה. הם מסייעים לפעולת המעיים ומקטינים את הסיכון לחלות במחלות האופייניות לחברת השפע.

לעומת זאת, בכרס של **מעלי הגירה** חיים מיקרואורגניזמים המסוגלים לפרק את **הסיבים**. המיקרואורגניזמים מנצלים את תוצרי הפירוק לצורכיהם, ומעלה הגירה מנצל את תוצרי הלוואי של תהליכי פירוק אלו.

סימביוזה (symbiosis) (יוונית: *sym* = ביחד; *bios* = חיים)
חיים בשיתוף של שני מינים (species) שיש ביניהם קשר הדוק הנמשך זמן רב, לדוגמה: טפילות, הדדיות (מוטואליזם). לעתים אין המינים יכולים להתקיים באופן עצמאי.

סימביוזה מסוג הדדיות (mutualism)
חיי שיתוף שבהם שני המינים מפיקים תועלת (לדוגמה: מעלי גירה והמיקרואורגניזמים החיים בכרס שלהם, האדם והמיקרואורגניזמים החיים במעי הגס שלו).

סימני מחסור (mineral deficiency symptoms)
סימני מחלה בצמחים, כגון כלורוזה ונקרוזה, האופייניים למחסור ביסודות מינרליים חיוניים. סימני המחסור תלויים בפעילותם של **המינרלים** בצמח. בהתאם לסימנים, החקלאי משלים את החסר באמצעות **דישון** מתאים או **זיבול** (ראו גם: מחלת חסר).

סיסים (*villi*)
בליטות דמויות אצבע היוצאות משטחו הפנימי של **המעי הדק** ובולטות אל החלל שלו. פני הסיסים מצופים בשכבה אחת של תאי אפיתל משלושה סוגים: **תאי ספיגה**, תאים מפרישי ריר ותאים מפרישי **אנזימים**. הסיסים תורמים להגדלה משמעותית של שטח הפנים של המעי, ובכך הם מייעלים מאוד את תהליך ה**ספיגה**.

סיסונים (microvilli)
קיפולים דמויי אצבעות בקרום **תאי הספיגה** המצפים את ה**סיסים** ב**מעי הדק**. הסיסונים תורמים להגדלה משמעותית של שטח הפנים של המעי, ובכך הם מייעלים מאוד את תהליכי ה**ספיגה**.

ספיגה (absorption)
המעבר של תוצרי ה**פירוק** הסופיים של המזון מחלל המעי אל הדם ואל הלימפה. רוב תוצרי העיכול חודרים אל התאים שבדופן ה**מעי** באמצעות **נשאים** בקרומי התאים, חלקם ב**העברה סבילה** ואחרים ב**העברה פעילה**. המים נספגים באופן סביל (אוסמוזה) בעקבות ספיגת תוצרי העיכול. (ראו גם: תאי ספיגה).

ספקטרום (spectrum)
תחום של גלים בטווח מסוים של אורכי גל (לדוגמה: ספקטרום האור הנראה הוא תחום אורכי הגל בטווח הנראה לעין האדם).

ספקטרום בליעה (absorption spectrum)
מכלול אורכי הגל של האור, הנבלעים על ידי חומר מסוים (לדוגמה: ספקטרום הבליעה של הכלורופיל כולל את האור האדום ואת האור הכחול).

ספקטרום פעולה (action spectrum)
מכלול אורכי הגל של האור, הגורמים לפעילות מסוימת (לדוגמה: ספקטרום הפעולה של תהליך **הפוטוסינתזה** כולל בעיקר את האור הכחול ואת האור האדום).

סקרטין (secretin)
הורמון המופרש לזרם הדם מִתְאים בדופן **התריסריון** בתגובה למגע עם בליל המזון החומצי המגיע מ**הקיבה**. גורם להפרשת ביקרבונט מ**הלבלב** ל**תריסריון** ועל ידי כך לנטרול ה־pH החומצי בתריסריון.

עמילאז (amylase)
אנזים המפרק **רב־סוכרים** (עמילן וגליקוגן) לשרשרות קצרות של יחידות גלוקוז, עד ל**דו־סוכר** מלטוז.

עמילן (starch)
רב־סוכר הבנוי ממולקולות רבות של גלוקוז. משמש **חומר תשמורת** עיקרי בצמחים.

עצה – ראו: מערכת הובלה.

פגוציטוזה (phagocytosis)
תהליך בליעת חלקיקים על ידי תאים. במהלכו, החלקיק הנבלע נעטף בקרום התא ונוצרת בועית, הניתקת מהקרום ונודדת אל פנים התא. בחד־תאיים הבועית מתלכדת עם **ליזוזום** שבו אנזימי פירוק, ובדרך זו נעכל בהם **המזון**.

פוטוסינתזה (photosynthesis) (יוונית: *photos* = אור; *synthesis* = הרכבה)
תהליך שבו אנרגיית האור מומרת לאנרגיה כימית המשמשת לבניית **פחמימות** מפחמן דו־חמצני וממים. בתהליך זה משתחרר חמצן. התהליך מתרחש בחלקים הירוקים של הצמחים, באצות ובכמה מינים של חיידקים (ראו גם: אוטוטרוף, שלב קיבוע הפחמן הדו־חמצני, שלב קליטת האור).

פחמימות (carbohydrates)
תרכובות אורגניות, המורכבות מפחמן, מימן וחמצן, שנוסחתה הכללית $C_x(H_2O)_y$. הפחמימות כוללות **חד־סוכרים** כמו **גלוקוז**, **דו־סוכרים** כמו סוכרוז **ורב־סוכרים** כמו **תאית** ו**עמילן**. הפחמימות משמשות מקור אנרגיה עיקרי לתאים וכן מקור לחומרי בנייה.

פיגמנט – ראו: צבען.

פיונית (stoma)
פתח ברקמת האפידרמיס של עלים וגבעולים לא מעוצים בצמח, שדרכו מתרחש **חילוף גזים** בין הצמח לבין הסביבה, ובכלל זה פליטת אדי מים (**דיות**). משני צדי הפתח יש שני תאים בעלי מבנה מיוחד הנקראים "תאי שמירה". כאשר תאי השמירה מלאים מים פתח הפיונית פתוח.

פירוק מכני של המזון (mechanical digestion)
שבירת ה**מזון** לחתיכות קטנות ללא שינוי בתכונות הכימיות של המולקולות. מתרחש בעיקר בפה וב**קיבה**.

פירוק כימי (chemical digestion)
שבירת קשרים כימיים בתוך המולקולות ליצירת יחידות קטנות יותר, למשל – פירוק **רב־סוכרים** ליחידות של **חד־סוכרים**. בעקבות הפירוק הכימי יש שינוי בסוג החומר ובתכונותיו. הפירוק הכימי של המזון מזורז על ידי **אנזימים** ייחודיים ומתרחש בעיקר בפה, ב**קיבה** וב**מעי הדק**.

פירמידת מזון (nutrition pyramid)
ביטוי גרפי לתזונה מומלצת, המתאר את קבוצות המזון ואת הכמויות היחסיות שיש לצרוך מהן.

פפסין (pepsin)
אנזים בקיבה שמתחיל את פירוק ה**חלבונים** על ידי ביקועם לפפטידים גדולים יחסית.

פרוטאז (protease)
שם כללי לקבוצה של **אנזימים** הפועלים ב**מערכת העיכול** והמפרקים חלבונים לפפטידים קצרים תוך שבירת הקשרים הפפטידיים ב**חלבון**.

צבען (פיגמנט) (pigment)
חומר כימי המסוגל "לבלוע" גלי אור בטווח אורכֵי גל מסוים. גלי אור שאינם נבלעים מוחזרים, והם המקנים לצבענים את צבעם. **כלורופיל**, לדוגמה, הוא צבען.

צימוד אנרגטי (energy coupling)
מצב שבו תהליך משחרר אנרגיה (לדוגמה: פירוק גלוקוז בנשימה תאית) מתרחש בצמוד לתהליך צורך אנרגיה ומניע אותו (לדוגמה: בניית ATP).

צינור העיכול – ראו: מערכת העיכול.

צלולאז (cellulase)
אנזים מפרק **תאית** (צלולוז). אינו מצוי ב**מערכת העיכול** של האדם ושל בעלי חיים עילאיים. מיוצר על ידי המיקרואורגניזמים החיים ב**כרס** של **מעלי הגירה**.

צמחי CAM (**C**rassulacean **A**cid **M**etabolism plants)
צמחים המותאמים לתנאי יובש, שבהם פתיחת ה**פיוניות** וקליטת ה־CO_2 מתרחשות בלילה, ועל ידי כך מופחת שיעור **הדיות**. ה־CO_2 נקשר בלילה עם קליטתו לתרכובת זמנית וביום הוא משתחרר ומשתתף בתהליך ה**פוטוסינתזה**, בשעה שה**פיוניות** סגורות.

קוטיקולה (cuticle)
שכבה דקה ושקופה של תרכובות ליפידיות (שעוות), המכסה את החלקים העל־אדמתיים של הצמח ומגינה עליהם מפני התנדפות מים ומפני חדירה של גורמי מחלה. הקוטיקולה מופרשת על ידי תאי ה**אפידרמיס**.

קומפוסט (compost)
זבל אורגני שהוא תוצר של פירוק שאריות של **חומר אורגני**, על ידי חיידקים, חרקים, פטריות ושלשולים בתהליך אווירני. הקומפוסט מספק יסודות **מינרליים** לצמחים ומטייב קרקעות. שימוש בו מצמצם שימוש ב**דשנים כימיים**.

קיבה (stomach)
איבר גמיש ושרירי דמוי שק, המהווה מרכיב ב**מערכת העיכול** באדם וברוב בעלי החיים הרב־תאיים. בקיבה ממשיך ה**פירוק המכני** של המזון ומתקיים חלק ניכר מעיכול ה**חלבונים**.
ב**מעלי הגירה** קיימת מערכת של ארבעה מדורים שבהם מתרחשים תהליכי עיכול מורכבים, חלקם על ידי מיקרואורגניזמים (ראו גם: כרס).

קלוריה (calorie)
יחידת מידה לאנרגיה המקובלת בהקשר של **מזון**, של **דיאטה** ושל פעילות גופנית. קלוריה היא **כמות האנרגיה** הדרושה להעלאת הטמפרטורה של גרם אחד של מים במעלה אחת. לרוב משתמשים ביחידה גדולה פי 1,000 המכונה קילוקלוריה ומסומנת: קק"ל או Kcal.

קליטה פעילה (אקטיבית)
קליטה של מינרלים מהקרקע לשורש **בהעברה פעילה**.

קליטה סבילה (פסיבית)
קליטה של מינרלים מהקרקע לשורש **בהעברה סבילה**.

רב־סוכרים (polysaccharides)
פחמימות המורכבות מיחידות רבות של **חד־סוכר** הקשורות ביניהן בשרשרת (לדוגמה: **גליקוגן**, **עמילן**, **תאית**).

רוק (saliva)
תמיסה המופרשת אל חלל הפה מבלוטות בתוכו. מורכב מ־98% מים, מ**חלבונים** (ביניהם אנזימים) וממלחים. מאפשר את המסת המזון ומסייע **לפירוק המכני והכימי** שלו.

רכיבי מזון (nutrient)
החומרים במזון (**פחמימות**, **ליפידים**, **חלבונים**, **מינרלים**, **ויטמינים**, מים) החיוניים לתפקודו התקין של האורגניזם.

רעב (famine, hunger)
- מצב המאופיין במחסור של מזון לאורך זמן, ובמקרים רבים הוא מוביל לתופעות של **תת־תזונה**.
- תחושה שדוחפת לחפש ולצרוך מזון (ראו גם: מרכז הרעב והשובע).

רקמה ספוגית (spongy tissue/ layer)
רקמה בעלה, שתאיה מכילים **כלורופלסטים** רבים שבהם מתבצע תהליך ה**פוטוסינתזה**. שֵם הרקמה נגזר מארגון התאים ברקמה בדומה למבנה של ספוג – בין התאים רווחים רבים.

רקמת עמודים (palisade tissue/ layer)
רקמה בעלה, שתאיה מכילים **כלורופלסטים** רבים בהם מתבצע תהליך ה**פוטוסינתזה**. שם הרקמה נגזר מצורת התאים – מוארכים ונראים כעמודים, וביניהם חללי אוויר רבים.

שובע – ראו: מרכז הרעב ומרכז השובע.

שומנים (fats)
טריגליצרידים (סוג של **ליפידים**) המכילים אחוז גבוה של **חומצות שומן** רוויות. מקור של השומן בדרך כלל בבעלי חיים. משמשים **חומרי תשמורת** עיקריים בבעלי חיים ובחלק מהצמחים.

שיפה – ראו: מערכת הובלה

שלב קיבוע הפחמן הדו־חמצני (CO_2 fixation)
השלב השני בתהליך **הפוטוסינתזה**; בשלב זה מקובע הפחמן הדו־חמצני לתרכובת אורגנית, תוך ניצול ה־**ATP** והחומר המחזר שנוצרו **בשלב קליטת האור**.

שלב קליטת האור (light reactions)
השלב הראשון בתהליך **הפוטוסינתזה**. בשלב זה **אנרגיית האור** נקלטת על ידי מולקולות **כלורופיל** ומומרת **לאנרגיה כימית**. האנרגיה מנוצלת לפירוק מולקולת מים (תוך שחרור חמצן) ולבניית **ATP ונשא מימנים** מחוזר (NADPH), המשמשים בשלב **קיבוע הפחמן הדו־חמצני**.

שִׁפְעוּל (activation)
תהליך מקדים להתרחשותן של תגובות כימיות רבות, שבו מושקעת **האנרגיה** הדרושה להתרחשות התגובה. השפעול מתבטא בעירור היציבות הכימית של המולקולות המעורבות בתגובה. במקרים רבים נעשה באמצעות העברת **קבוצת זרחה**.

שתנן (urea)
תרכובת אורגנית שנוצרת ב**כבד** (ביונקים). השתנן נוצר מאמוניה, שנוצרת מפירוק **חומצות אמיניות** ומהווה חומר רעיל לגוף. שתנן הוא מרכיב מרכזי בשתן. המיקרואורגניזמים החיים בכרס **מעלי הגירה** מנצלים אמוניה ושתנן, שמקורם במעלה הגירה, לבניית חלבוני גופם.

תאי ספיגה (epithelial absorption cells)
תאי אפיתל, הנמצאים על גבי ה**סיסים** ב**מעי הדק**. בתאים אלו מתרחשת ספיגת תוצרי הפירוק של המזון.

תאית (cellulose)
רב־סוכר הבנוי מיחידות של גלוקוז, והוא מרכיב עיקרי של דופן תאי הצמחים. התאית אינה נעכלת על ידי מרבית בעלי החיים, אך **מעלי גירה** וטרמיטים יכולים לנצל את תוצרי הפירוק שלה הודות לפעילות מיקרואורגניזמים בקיבתם.

תזונה מאוזנת (balanced nutrition)
תפריט שמספק לגוף את כל רכיבי המזון בכמויות הדרושות לצורכי הגוף.

תנועה פריסטלטית (peristaltic movement)
תנועת התכווצות והרפיה של השרירים הטבעתיים שבדופנות צינור העיכול. התנועה מתקדמת כגל לאורך הצינור ודוחפת את המזון קדימה.

תסיסה (fermentation)

אחד מתהליכי הפקת **אנרגיה** באורגניזמים חיים תוך פירוק **פחמימות**. תהליך התסיסה מתרחש בתנאים **אל־אווירניים** (ללא חמצן) וכמות האנרגיה המתקבלת בו מועטה (2 מולקולות **ATP** על כל מולקולת גלוקוז). קיימים תהליכי תסיסה שונים המאופיינים בתוצרים שונים, כמו אתנול וחומצת חלב.

מיקרואורגניזמים **בכרס מעלי הגירה** מפיקים אנרגיה בתהליך **תסיסה** ייחודי, שתוצריו הם **חומצות שומן** נדיפות, פחמן דו־חמצני ומתאן המופרשים אל חלל הכרס. חומצות השומן נספגות לדמם של מעלי הגירה ומנוצלות לצורכיהם.

תריסריון (duodenum)

החלק הראשון של **המעי הדק**. נקרא תריסריון על שום אורכו השווה לרוחב של תריסר (12) אצבעות. בתריסריון מתרחש **פירוק כימי** של פחמימות, שומנים וחלבונים על ידי **אנזימים** ובסיוע חומרים המופרשים לתוכו מהכבד, מהלבלב ומִתָאים ברירית התריסריון.

תת־תזונה (malnutrition)

מצב בריאותי הנגרם מתזונה שאינה מספקת לגוף את כל המרכיבים הדרושים, או שהיא מספקת אותם אך לא בכמויות המספיקות לתפקודו התקין. יכולה להיגרם עקב מחסור נרחב במקורות אנרגיה ובחלבונים, או עקב חסר של מרכיב חיוני יחיד כמו **ויטמין** או **מינרל**.

ATP (אדנוזין טרי־פוספט) (**A**denozin **Tri**phosphate)

תרכובת אורגנית המתווכת בין תהליכים משחררי **אנרגיה** בתא לתהליכים צורכי אנרגיה. מכונה "מטבע האנרגיה". מבחינה כימית, ATP הוא נוקליאוטיד הבנוי מאדנין (בסיס חנקני), ריבוז (חד־סוכר) ומשלוש יחידות **זרחה** (ראו גם: נשימה תאית אווירנית).

BMI (**B**ody **M**ass **I**ndex)

ערך המשמש להערכת תקינות משקל האדם. מחושב על פי נתוני גובה ומשקל.

NAD (**N**icotinamide **A**denine **D**inucleotide)

תרכובת המשמשת כ**נשא המימנים** בנשימה התאית. במצבה המחוזר (כשהיא קשורה למימנים), היא מסומנת NADH (ראו גם: נשאי מימנים).

מפתח

א

אבולוציה 94, 116
אבן בניין/אבני בניין **12**, 16, 18, 21, 25, 30, 92, 121, 148
אגירה, בתאים, באיברים ראו: חומרי תשמורת
אדנוזין־טרי־פוספט (ATP) 13,47, 60, 84, 134, **135–140**, 141, **144–146**, 147, 148, 149, 157
אוטוטרופ, אורגניזם, הזנה **11–12**, 46, **48**
אומגה 3, 6 26, 194
אוסמוזה 84, 107
אור 47, 51, 52, 57, 64, 69
– כמקור אנרגיה **47**, **60–61**
אורך גל 57–59
אורגניים, חומרים 10–11, 13, **17–37**, 46, 47, 80, 134
אותות הורמונאליים **172–173**
אותות עצביים **172**, 173
אחידות ושוני 12, 16, 30, 47, 51, 56, 134, 141
אי־אורגניים, חומרים 10–11, **38–44**, 46, 48, 177
אי־סבילות ללקטוז 20
אינסולין 103, 111, 173, 191, **193–194**
אלבומין 29, **30**, 32, 110
אלכוהול 100, 111, 151, 152, 157
אמוניה (NH_3) 48, 111, 121, 122, 127
אמיניות, חומצות **30**, 107, 110, 111, 118, 121, 122
אנדוספרם 177
אנורקסיה נברוזה 197
אנזימי עיכול 92, 94, 95, 100, 103, 104, 105, 108, 117, 118
אנזימים, גורמים המשפיעים על הפעילות **72**, 100
אנטיביוטיקה 109
אנרגיה 13 ראו גם: תהליכים צורכי אנרגיה, תהליכים משחררי אנרגיה
– אנרגיה כימית 13, 47, 60
– אנרגית אור 13, **47**, **60**, 160
– אנרגיית חום 13, 134, 138, 141, 160
– אנרגיית שפעול 138
– המרות אנרגיה **13**, 47, **60–61**, 134, 139, 160
– הפקת אנרגיה **112–113**, 119, 134, **140–157**
– מאזן אנרגיה **164,169**, 183, 195
– מעברי אנרגיה **13**, 134, 144, 160
– ערך אנרגטי 165
– רכיבי הניצול האנרגטי 10, **166–169**
אפידרמיס **52**, **54**, **83**
אפיתל 106, 107, 108
אפקט חממה **71**, 120
אצטיל קואנזים A ראו: קואנזים A
אקטין 139
אקסוציטוזה 94, 107
אתנול 151, 157

ב

β־קרוטן 36
בולימיה נברוזה 197
בועית מזון 94
ביודלק/ביוגז **68**, 156, 157
ביקרבונט 103, 105
בליעה 98, 116
בניית חומרים מורכבים 138
ברזל **38**, 180, 205
ברי־ברי 33
בתי צמיחה 73

ג

גורם מגביל **69–70**, 73, 74, 77
גורמים סביבתיים (חיצוניים) 73, **69–74**
גלוטן 108
גלוקגון 103, 111
גלוקוז **18**, 107, 110, 112, 119, 134, 138, 141, 146
– רמה בדם 19, 21, 103, **111**, 113, 147, 172, **173**, 194
גליצרול **27**, 28, 111, 127
גליצרידים 25, **27**, 103, 107, 173, 191
גליקוגן **21**, **23**, 110, 138, 191
גליקוליזה **141**, 146, 156
גלקטוז 18
גסטרין 105
גרלין 172, 173

ד

דגנים **177**
דו־סוכרים **19–20**, 122
דיאטה דלת־אנרגיה (הרזיה) 25, 180, 182, 195, 196, 197
דיות (טרנספירציה) **53**, **54**, 72, 84,
דיפוזיה (פעפוע) 62, 84, 107
דנטורציה **32**
דשן **79–80**, 81

ה

הומיאוסטזיס 10, 19, 53, 54, 93, 140, 149, 150, 155, 171
הורמונים 103, 105, 111, **172–173**
הזנה **10–12**
– ייעול ההזנה בפרת החלב 125–128
החמצת מלפפונים 153
הטרוטרופ, אורגניזם, הזנה **11**, **12**, 16, 46, 90
היפותלמוס 171, 172
המיצלולוז 118
המרת אנרגיה **46**
העברה פעילה (אקטיבית) 106, **138–139**
העברה סבילה (פסיבית) 106
העלאת גירה **116**, 117
הפקת אנרגיה **112–113**, 119, 134, **140–157**
הפרעות אכילה **196–197**
הרזיה 169, 195–196
השמנה 12, 169, 170, 181, **189–192**
התאמה בין מבנה לתפקוד 32, **49–54**, **83–84**, 96, 98, 100, 105, 112, 116–117, 143

ו

ויטמינים **33–37**, 108, 111, 118, 177, **178–179**
– חסר או עודף ב... 35, 36, 37, **202–203**
– ויטמין A **36**, 202
– ויטמין D 28, **35**, 202
ויסות
– במערכת העיכול **93**, 97, 102, **104–105**, 109
– צריכת אנרגיה 111
– צריכת מזון **171–175**
ושט **98–99**, 116

ז

זבל אורגני/זיבול **79–80**
זבל עופות 81, 127, 128
זרחה (Pi), קבוצה 28, 136, 138, 139
זרחן (פוספט) 38, 204
זרחון 136–137, 138, 139
זרחון חמצוני **144–146**, 156
זרע/זרעים 22, 126, 127, 177

ח

חד־סוכרים **18–19**, 118, **119–120**, 122
חדירות בררנית 138
חום ראו: אנרגיית חום
חומצה מלחית (HCl) 100, 102
חומצה פירובית 141, 146, 153, 156
– חמצון החומצה הפירובית, שלב **143**, 146
חומצות אמיניות **30**, 107, 110, 111, 118, 121, 122
חומצות גרעין 10,19
חומצות שומן **25–26**, 27, 28, 113, 118, 127, 180, 193
– מסוג טרנס 181
– נדיפות 119, 122, 155–156
חומצת חלב 111, 153, 154, 155, 157
חומצת שתן 127, 128
חומרי תשמורת 18, **21**, 22, **23**, **27**, 65, 66, 67, 110, 111, 137, 138, 177
חומרים אורגניים 10–11, 13, **17**, **37**, 46, 47, 80, 134
חומרים אי־אורגניים 10–11, **38**, **44**, 46, 48
חיידקים ראו: מיקרואורגניזמים
חילוף גזים 52, 53, 54, 83, **134–135**
חילוף חומרים **110–113**, **147**, 148, 158
חילוף חומרים בסיסי **166–167**, 168, 169
חלב, ייצור וייעולו 125, **126–128**
חלבונים **29–32**, 110, 112, 113, 147–148, 169, 187
– אצל מעלי גירה 118, 120, 121, 122
– בתזונה 12, **180**
– מחנקן לא חלבוני 121, 122, 127, 128
– מחסור **30**, **120** ראו: גם אלבומין
– מיקרוביאליים 121, 122, 126
חממות 73
חמצון־חיזור **61**, 145
חמצן (O_2) 46, 47, 51, 58, 62, 140, 144, 150, 158, 160
חנקן 10, 30, 38, 57, 76, 121
– ממקור לא חלבוני 121, 122, 127, 128
חקלאות
– הגברת הפוטוסינתזה ב... **73–74**
– מחזור פסולת אורגנית ב... **80**
– ייעול יצור החלב **126–127**
– אורגנית ורגילה 81, **82**, 184

ט

טריגליצרידים 25, **27**, 103, 107, 173, 191
טריפסין 103
טרשת עורקים 178, 181, 193

י

יבול, הגברת הייצור ראו: חקלאות, הגברת הפוטוסינתזה ב...
דשן, זבל
יונקות 83
יחס שטח פנים לנפח 51, 52, 57, 83, 92, 105, 106, 108, 142, 143
יחסי גומלין **67**, 122, 124
ירקות ופירות **178–179**

כ

כבד **110–112**
כהל אתילי 151, 152
כולסטרול **28**, 106, 180, 181, 193
כולציסטוקינין (CCK) 105, 172
כיב קיבה 101
כילומיקרון 107
כימוטריפסין 103
כימוסינתזה **48**
כיס המרה ראו: מרה
כלורפיל 46, 52, **57–58**, 60, 62
– ספקטרום בליעה ופעולה 58, 59
עירור 60
כלורופלסט 52, **56**
כריתת יערות **48**, 71
כרס **116**, **118–123**, 122

ל

לבלב **103**, **105**, 111, 117, 173, 194
ליגנין 177
ליזוזום 94
ליזוזים 96
לימפה 106, 107, 118
ליפאז 100, 103
ליפידים **25–28**, 100, 103, 106–107, 110, 118, 122, 147, 180
לעיסה 96, 98
לפטין 173, 174
לקטאז 20
לקטוז 20
לשון 96–97
לשלשת עופות ראו: זבל עופות

מ

מאגרי אנרגיה 27, 111, 137, 172, 173 ראו גם: חומרי תשמורת
מאזן אנרגיה **164**, **169**, 183, 195
מאזן מים **41–42**, 53, 72, 108
מבנה ותפקוד, התאמה 32, **49–54**, **83–84**, 96, 98, 100, 105, 112, 116–117, 143
מדורי עיכול ראו: כרס, מערכת עיכול מעלי גירה
מזון 90, 11, 168, 184
– מהיר 189, 190
– מחסור 30, 113, **187–188** ראו גם: רעב, צום
– מן החי 180, 189
– מן הצומח (מזון צמחי) 115, 180 ראו גם: צמחונות
– צריכה **171–175**
– של מעלי גירה 121, **125–128**
מחלות חסר 189, 202, 205
מחלות לב וכלי דם 193
מי גבינה 128
מיחזור 79, 80, 81, 121, 137, 145, 151
מיחזור נשאים לבדוק אם חלק מעמ' 137
מטבוליזם ראו: חילוף חומרים
מידור **56**, **91**, 142
מיוזין 139
מיטוכונדריון **142–143**, 145, 146
מים
– בתזונה 11, **177**
– הובלה **52–53**, 54
– כתוצר בנשימה התאית 144
– מאזן **41–42**, 53, 72, 108
– מטבוליים 42, 144
– ספיגה 107, 108, 118, 122
– קליטה ואיבוד בצמח 52, **53**, 54, 55, 84
– פירוק בפוטוסינתזה 60, 62
מינרלים / מלחים 11, **38–40**, **74–76**, 77, 79, 80, 107, 111, 118, 177, **204–205**
– מחסור ועודף 75, 76, 77, 84, **204–205**
– קליטה **84**, **85**, 138–139
מיץ קיבה 99, **100**, 102
מיצי עיכול 90, 97
מיצלה 106
מיקרואורגניזמים (כולל שמרים וחיידקים)

– אצל מעלי גירה 118, 119, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 155
– במערכת העיכול באדם 100, 101, 108, 109
– בשרות האדם 153, 154, 156
מלחים ראו: מינרלים
מלטוז 20
מנגנוני משוב 93
מספוא 127
מעגל קלווין 55, **63–64**
מעגל קרבס 144, 146, 148, 156
מעי גס 107, **108–109**, 110, 118
מעי דק **103–105**
– מבנה ופעילות **103–105**, 117
– ספיגה **106–107**, 108, **109–110**, 122
מעלי גירה
– מערכת העיכול **115–118**
– הזנה **125–129**
מערכת אקולוגית 47, 48, 71, 120, 160
מערכת הובלה של הצמח 53–54
מערכת עיכול
– אדם ראו: עיכול, באדם
– מעלה גירה **115–118**, 122
מערכת שער 112
מפל ריכוזים 84, 107, 138, 145
מקור אנרגיה 18, 29, 47
מרה, כיס, מיץ, מלחים 90, 91, 103, 105, 106, 109, 118
מרכז הרעב 171, 172
מרכז השובע 171, 172
משאבות 84, 138–139, 145
משוב, שלילי וחיובי 93, 102, 111
משקל גוף 169, 170 ראו: גם הרזיה, השמנה
– עודף משקל ראו: השמנה
משקל יבש 17
מתאן (CH_4) 119, 120, 156

נ

נוגדי חימצון 36, **179**
נשאים 106, 138–139, 141, 145
נשא אלקטרונים 60, 145
נשא מימנים (NAD, NADP) 61, 143, **144–145**, 146, 151
נשימה ראו: חילוף גזים
נשימה תאית 134, 135, **134–158**
נשימה תאית אווירנית **135**, 140, **142–150**, **157–160**
נשימה תאית אל־אווירנית (אנאירובית) 140, 150, **156–157**

ס

סביבה, גורמים ראו: גורמים סביבתיים (חיצוניים)
– חיצונית 91
– פנימית 12, 41, 91
סובין 128, 177
סוכרוז 19, 65
סוכרים ראו: פחמימות, חד־סוכרים, דו־סוכרים רב־סוכרים
סוכרת 181, 193–194
סטרואידים 25, **28**
סטרומה 56, 63
סיבים (תזונתיים) 23, 110, 118, 122, 125, 127, 194, **177–178**
סימביוזה 67, 122, 124
סיסים וסיסונים 106, 108
ספורט ראו: פעילות גופנית
ספיגה
– ספיגת מזון *באדם:* 100, 106, 107, **108–110**, 189; *במעלי גירה:* 116, 117, 118, 121, **122**
– ספיגת מים *באדם:* 107, 108, 110; *במעלי גירה:* 118, 122
ספקטרום 57–59
סקרטין 105

ע

עיוורון לילה 36
עיכול ראו גם: פירוק (מכני, כימי)
– באדם (מבנה, תפקוד) 94, 95, 99–100, 102, 103–105
– במעלי גירה **118–124**
– ויסות 93, 97, 99, 102, 104–105
– חוץ תאי ותוך תאי **91**, 94, 118
– עקרונות **90–95**
עלה **51–54**
עמילאז 96, 103, 118
עמילן 21, **22–23**, 65, 122, 138
עצה 53, 54
ערך אנרגטי (קלורי) 27, 179, 182, 197
ערך תזונתי 177

פ

פגוציטוזה 94
פה **96–98**, 116
פוטוסינתזה
– התאמת הצמח ל... **51–55**
– ונשימה תאית **157–160**

– מעורבות האדם **73–74**
– קצב, שיעור 53, 55, 59, **69–70, 72**
– שלבים **60–64**
– תהליך **46–51, 60–64, 69–74**
– תוצרים 47, 49, 58, 62, **65–67**
פוספוליפידים 25, **28**, 107
פחמימות **17–24**, 47, 112, 122, 177
פחמן 10,17, 23, 30, 160
פחמן דו־חמצני (CO_2)
– במעלי גירה 119, 120
– בנשימה 135, 144, 156, 158
– בפוטוסינתזה **48, 53**, 54, 55, 70, **71**, 158
– בתהליכי תסיסה 151, 152
פי הטבעת 109
פיגמנט (צבען) 52, 56, 57
פיונית 39, **53–54**, 55, 72
פיטמיות **116–117**
פיסטור 154
פירוק (מכני, כימי) **92**, 96, 100, 103, 116, 117, 118, 121
פירמידת המזון **176–182**
פפטידים 122
פפסין 100
פעילות גופנית 155, 168, **183–184**, 194, 195
פרוטאזות 100, 103, 118, 121
פרוקטוז 18, 173
פריסטלטית, תנועה ראו: תנועה פריסטלית

צ

צבען 52, 56, 57
צואה 107, **109**, 110, 178
צום ורעב ממושך 113, 149 ראו גם: גלוקוז, רמה בדם
צימוד 135, **136–137**, 138, 145, 149
צלולאז 118
צליאק 108
צמחונות 30, 34, 124, 189, 195
צמחי CAM **55**
צמחים טורפים **85**
צריכת מזון **171–175**

ק

קואנזים A, אצטיל **143**
קוטיקולה **52, 53, 54**
קיבוע פחמן, שלב 55, **63–64**
קולטנים 97, 102, 155, 172, 173
קומפוסט 80
קיבה **99–102**, 172, 173
– אצל מעלה הגירה 117, 121, 122
קלוין, מעגל 55, **63–64**
קליטת אור
– התאמה ל 51–52
– שלב **60–62**
קרבס, מעגל **144**, 146, 148, 156
קרוטן ו־β קרוטן **36**
קשר פפטידי 32
קליטה סביבה ופעילה 84

ר

רב־סוכרים **21–24**, 118, 177
רודופסין 36
רוק **96**, 97, 116
ריבוז 19
ריכוז אוסמוטי 23, 27, 29, 30, 39, 109
רירית 99, 101, 108
רכיבי המזון 16, 90, 113, 122, 182, 183, 189
רככת 35
רעב 30, 148, 149, 171, 172, 173, 187, 188
רקמה ספוגית **52**, 54
רקמות הובלה בצמח 53–54
רקמת עמודים **52**, 54
רקמת שומן ראו: שומן, תאי שומן

ש

שובע, תחושה 172, 173
שומן, חומצות **25–26**, 27, 28, 113, 118, 127, 180, 193
שומן **27**, 112, 113, 142, 149 ראו גם: ליפידים
– אגירה; מאגרים 110, 170, 173, 190, 191, 195
– בתזונה 180, 181
שוער 105
שורשים 83–84
שטח פנים–נפח, יחס 51, 52, 57, 83, 92, 105, 106, 108, 142, 143
שלשול 108, 109
שיניים 96, 98, 116
שיפה 53, 54, 65
שמן 27, 180
שפעול 136, 138
שרירים 13, 28, 93, 99, 109, 111, 139, 154, 155, 171
שרשרת העברת אלקטרונים 145
שתנן 111, 121, 127

ת

תאי β ראו: לבלב
תאי בלוטה 102, 103
תאי חישה 97, 172
תאי ספיגה 106, 109
תאי שומן 110, 173, 191
תאי שמירה 53
תאית (צלולוז, סיבים) 21, **23**, 65, 118, 177
תהליכים צורכי אנרגיה 64, 93, 136, 137, **138–139**
תהליכים משחררי אנרגיה 135, 136, 137
תווית מזון **182–183**
תזונה **175–176**, 194
– בעולם של מחסור 187–188
– בעולם של שפע 189–190
– צמחונית ראו: צמחונות, מזון מן הצומח
תחליב 103
תחמיץ 125
תילקואיד 56
תנועה פריסטלטית 93, 98, 109, 110, 116, 125
תסיסה 119, 140, 150, **151–156**, 157
תרדמת חורף 142, 149
תריסריון 103, 104, 105, 117, 172
תרכובות חנקן לא חלבוניות 121, 122, 127, 128
תת־תזונה 30, **187–189**

מונחים בלועזית

ATP, ADP 13,47, 60, 84, 134, **135–140**, 141, **144–146**, 147, 148, 149, 157
BMI 170, 187, 191, 197
CAM, צמחי 55
CH_4 ראו: מתאן
CO_2
– בפוטוסינתזה **48**, **53**, 54, 55, **63–64**, 70, **71**, 158
– במעלי גירה 119, 120
– בתהליכי תסיסה 151, 152
– בנשימה 135, 144, 156, 158
HDL, LDL 193
HCl 100, 102
NADH, NAD 141, 143, 144–145, 146
NADPH. NADP (נשא מימנים) 61, 63
NH_3 ראו: אמוניה
O_2 ראו: חמצן
pH
– בכרס 117, 123
– במערכת העיכול 100, 103
– בקרקע 77

חוקרים

אנגלמן, תאודור **58–59**
הלמונט, ואן **49–50**
וורן, רובין ומרשל, בארי 101
פבלוב, איוון **97–98**
פסטר, לואי 153–154
פריסטלי, ג'ון **50–51**
קמן ורובן 62
קלוין, מלווין 63

מקורות וזכויות

אנו מודים לאנשים ולארגונים אשר נתנו לנו את רשותם להשתמש בתמונות ובחומרים.

We thank all organizations and individuals who granted us permission to reproduce their materials in this book.

עמ' 10: דבורה – Nate Brelsford (sxc); **טחבים על עץ** – (picasaweb) Paul Willwort; **סנאי**; Flavio Takemoto (sxc) – **אנפה** (en.wikipedia); Mila Zinkova – **פטריות**; John Howard (sxc) – **נמלים**; Greg Zbrozek (sxc); **זחל** – Rachel Kirk (sxc).

עמ' 11: ארוחה – Ilker (sxc).

עמ' 17: לחמים – Gökçe (sxc); **אורז** – Brandon W. Mosley (sxc); **פסטה** – Nicolas Raymond (sxc).

עמ' 18: תפוחי אדמה – Knut Pettersen (sxc); **ענבים** – Zoran Ozetsky (sxc); **תאנים** – Eyup Salman (sxc).

עמ' 19: כלי סוכר – Mike Hughes (sxc); **חלת דבש** – Waugsberg (wiki.comm).

עמ' 26: סטייק – Frans Andersson (sxc); **קוקוס** – Andrzej Gdula (sxc); **אבוקדו** – pat herman (sxc); **זיתים** – iliana (sxc).

עמ' 27: שמן זית – Aristides Papadakis (sxc); **חמאה** – Matthew Trow (sxc).

עמ' 30: ילדה מורעבת – (wiki.comm) Dr. Lyle Conrad, Centers for Disease Control and Prevention, Atlanta, Georgia, USA

עמ' 32: ביצת עין – Jan KratÃ (sxc).

עמ' 33: ירקות ופירות – *(pics4learning) Ruby*.

עמ' 34: ארבידופסיס – Benjamin Zwittnig.

עמ' 38: עלי שעועית בחסר ברזל – Howard F. Schwartz.

עמ' 42: צמח זקוף וכמוש – רונן נאמן.

עמ' 51: מליסה – Christa Richert (sxc); **קיסוס** – רותי אמיר; **צמח טרופי** – tracy carpena (sxc).

עמ' 55: צבר – אילנה אדר.

עמ' 71: זיהום – (flickr) Peter Grima's.

עמ' 73: חממות – Jack Horst (sxc).

עמ' 74: פרדס – מושב חרות http://www.moshav-herut.org.il

עמ' 75: כלורזה ונקרוזה בעלי תות – Manitoba Agriculture, Food and Rural Initiatives

עמ' 78: עדשת המים – Michal Zachrzewski (sxc).

עמ' 80: קומפוסטר – (flickr) Port of San Diego's.

עמ' 85: מלכודת הדבקה – Alejandro Linconao (wiki.comm); **מלכודת סגירה** – אירית שדה; **מלכודת נפילה** – chadmiller (flickr)

עמ' 100: בירה – engindeniz (sxc)

עמ' 112: כבד (ימין) – מתוך: תזונה באדם ובבעלי חיים כהנא,א. (תשנ"ו) משרד החינוך, האגף לתכניות לימודים.

עמ' 116: פרות באחו – (wiki.comm) Agricultural Research Service

עמ' 117: פטמיות בכרס – Colorado State University , Richard Bowen Dr Thomas Caceci Virginia-Maryland Regional College of Veterinary Medicine, Blacksburg Virginia USA.

עמ' 126: בול – באדיבות מדינת ישראל.

עמ' 168: שטיפת רצפה – Michael lorenzo (sxc); **לימוד לבחינה** – (wiki.comm) Gnarlycraig.

עמ' 170: פלאפל – (flickr) Vera Yu and David Li; **המבורגר** – (flickr) Pointnshoot.

עמ' 174: עכבר חסר גן ללפטין – Sebastien G. Bouret, Ph.D, University of Southern California.

עמ' 176: פירמידת המזון הישראלית – על פי משרד הבריאות בישראל 2010. באדיבות משרד הבריאות.

עמ' 177: כוס מים – (wiki.comm) Olli Niemitalo; **קערת דגנים** – (wiki.comm)Fir0002/Flagstaffotos.

עמ' 178: סלסלת לחם – sanja gjenero (sxc).

עמ' 179: סלסלת פירות וירקות – רונן נאמן.

עמ' 180: קטניות – רונן נאמן; **כוס חלב** – Alessandro Paiva (sxc); **ביצה רכה** – David Hamel (sxc); **חומוס ופיתה** – (flickr) Marshall Astor; **בשר** – Rob Owen-Wahl (sxc).

עמ' 181: גלידה – Lotus Head (sxc).

עמ' 183: ריצה – Cheryl Empey (sxc); **רכיבה על אופניים** – Tim Brink (wiki.comm).

עמ' 186: קערת פופקורן – Steven Kapsinow (sxc).

עמ' 187: ילדה במטבח מאולתר בעולם הרעב – (flickr) Julien Harneis.

עמ' 191: השמנה – (flickr) Mike Licht; **אכילת גלידה** – Robert Lawton.

עמ' 196: שקילה – רונן נאמן.

מקורות נוספים

עמ' 76: טבלה על פעילות המינרלים בצמחים – מתוך הספר: פוטוסינתזה והזנה מינרלית בצמח כהנא, א. (תשס"ב) משרד החינוך, האגף לתכניות לימודים.

עמ' 19, 204 (על הדבש ועל העוקץ, הוויטמינים האדם) – מתוך הספר: תזונה באדם ובבעלי חיים כהנא, א. (תשנ"ו) משרד החינוך, האגף לתכניות לימודים.

קטעי ה"אשנב למחקר" שלהלן עובדו מתוך פעילויות באתר "שילוב טכנולוגיות מידע בהוראת המדעים ובחקלאות", של הפקולטה למדעי החקלאות, המזון ואיכות הסביבה, האוניברסיטה העברית בירושלים. (http://ict-agribioed.huji.ac.il/ictPortal/index.aspx)

עמ' 20: אי-סבילות לסוכר החלב.

עמ' 31: השפעתן של שתי חומצות אמיניות על התפתחות אפרוחים.

עמ' 40: השפעת אחוזי הסידן במזון מטילות על ממוצע הביצים השנתי.

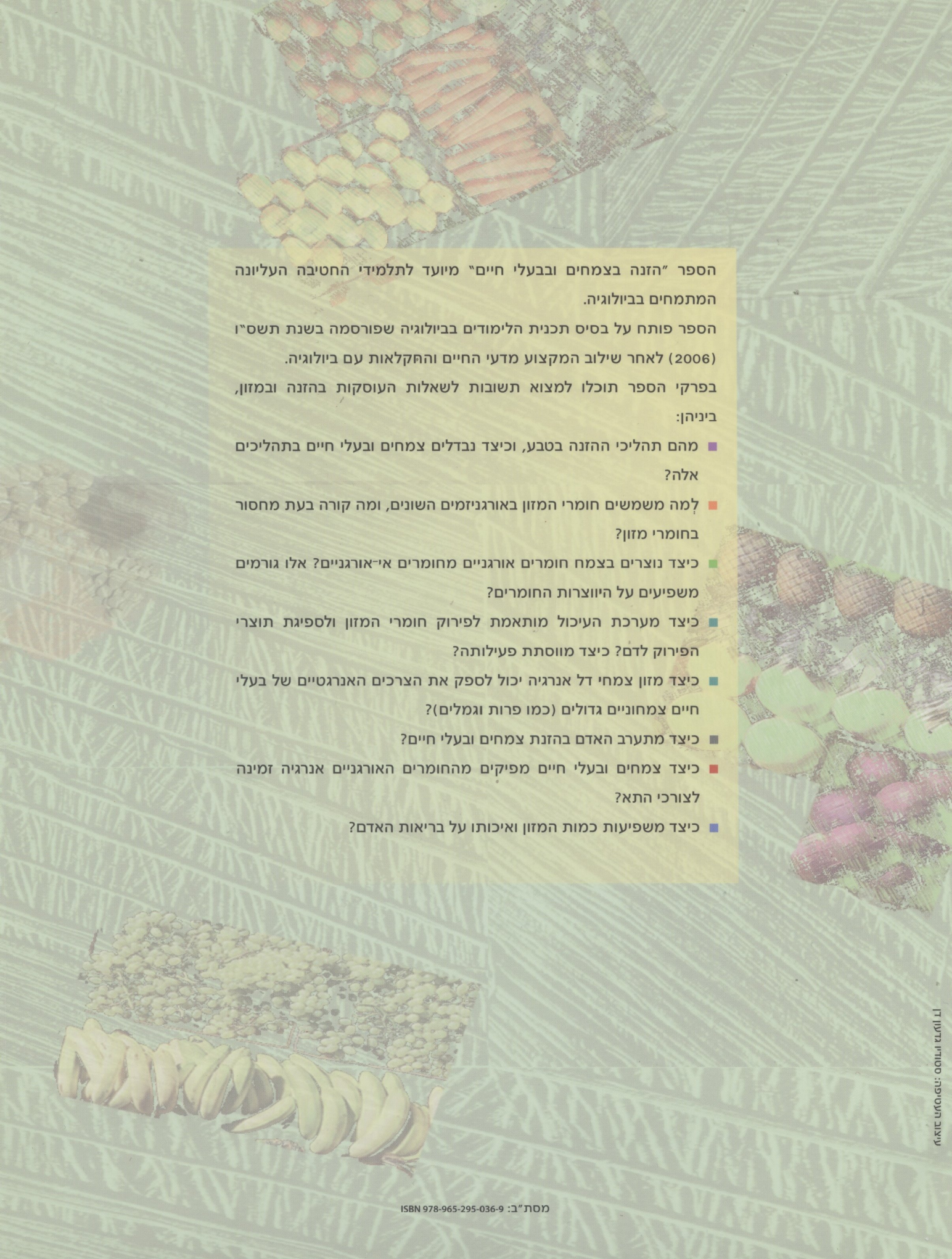
עמ' 70: השפעת ריכוז פחמן דו-חמצני על היבול.

עמ' 129: השפעת זבל עופות במזון טלאים על העלייה במשקלם.

עמ' 159: השפעת תהליכי נשימה ופוטוסינתזה על כמות הפחמן הדו-חמצני.

השתדלנו לאתר ולציין את כל בעלי הזכויות לפריטים המופיעים בספר זה. אנו מתנצלים מראש על כל טעות או השמטה, ואם יובאו לידיעתנו נתקנן במהדורה הבאה.

Every effort has been made to locate and credit all copyright holders. In case of omission or mistake please contact the publisher for correction in future editions.



הספר "הזנה בצמחים ובבעלי חיים" מיועד לתלמידי החטיבה העליונה המתמחים בביולוגיה.

הספר פותח על בסיס תכנית הלימודים בביולוגיה שפורסמה בשנת תשס"ו (2006) לאחר שילוב המקצוע מדעי החיים והקלאות עם ביולוגיה.

בפרקי הספר תוכלו למצוא תשובות לשאלות העוסקות בהזנה ובמזון, ביניהן:

- מהם תהליכי ההזנה בטבע, וכיצד נבדלים צמחים ובעלי חיים בתהליכים אלה?
- לְמה משמשים חומרי המזון באורגניזמים השונים, ומה קורה בעת מחסור בחומרי מזון?
- כיצד נוצרים בצמח חומרים אורגניים מחומרים אי־אורגניים? אלו גורמים משפיעים על היווצרות החומרים?
- כיצד מערכת העיכול מותאמת לפירוק חומרי המזון ולספיגת תוצרי הפירוק לדם? כיצד מווסתת פעילותה?
- כיצד מזון צמחי דל אנרגיה יכול לספק את הצרכים האנרגטיים של בעלי חיים צמחוניים גדולים (כמו פרות וגמלים)?
- כיצד מתערב האדם בהזנת צמחים ובעלי חיים?
- כיצד צמחים ובעלי חיים מפיקים מהחומרים האורגניים אנרגיה זמינה לצורכי התא?
- כיצד משפיעות כמות המזון ואיכותו על בריאות האדם?

מסת"ב: ISBN 978-965-295-036-9