

מערכות ותהליכים

באדם
בבעלי חיים
ובצמחים

הובלה
נשימה
הפרשה
ויסות הטמפרטורה
הגנה וחיסון

האוניברסיטה העברית בירושלים, המרכז להוראת המדעים
משרד החינוך התרבות והספורט, המזכירות הפדגוגית, האגף לתכנון ולפיתוח תכניות לימודים
מטה מל"מ, המרכז הישראלי לחינוך מדעי-טכנולוגי ע"ש עמוס דה-שליט

2006

תשס"ו



כתיבה: אורה כהנא – ריכוז הנושא ועריכה
דנה ודר-וייס

ייעוץ מדעי: פרופ' רוני פרידמן הובלה, נשימה, הפרשה, ויסות טמפרטורת הגוף, חיסון
פרופ' דוד וולפנזון ויסות טמפרטורת הגוף בבעלי חיים במשק החקלאי
פרופ' אריה גרטלר נשימה תאית
פרופ' אמנון שורץ הובלה בצמח
ד"ר שאול בורדמן הגנה בצמח

גרפיקה: אהרון שבו

עריכת הלשון: רבקה שביט

עימוד: ניצן שחר

הערות והצעות: מרב אברהמי, ד"ר ברוריה אגרסט, אמנון אהרנוביץ, שולה אמיתי, מינה בלאט, חנה דרורי, אפרת הנדלסמן,
ד"ר עודד זיו, אורית חריטן, ניצה ירושלמי, לאה כהן, ד"ר שמואל כהן, סבריה פרטוש, לאה פרידמן, ד"ר יעל צור-גיל,
חוה שחם, אתי שילוח, ד"ר אורי שני, מיכל שניצר, דבורה שפירא, תרצה שפירא

בפיתוח מהדורת העיצוב השתתפו: אסתר אבידע, הדס הופמן

תודה מיוחדת למורות ולתלמידיהן שהשתתפו בניסוי הספר בשנת הלימודים תשס"ד ותרמו לשיפורו:
ד"ר יהודית שילה - תיכון הראל מבשרת ציון; ד"ר סיגל סטרשנוב - באר טוביה; אריאלה טבצ'ניק - באר טוביה; הדס כץ - ניר העמק

יצא לאור במימון האגף לתכנון ולפיתוח תכניות לימודים במשרד החינוך התרבות והספורט
ומטה מל"מ, המרכז הישראלי לחינוך מדעי-טכנולוגי ע"ש עמוס דה-שליט



משרד החינוך התרבות והספורט

אישור מס' 1/4097

© כל הזכויות שמורות למשרד החינוך התרבות והספורט, תשס"ו, 2006
אין לשכפל, לצלם, לתרגם או לאחסן במאגרי מידע, בכל דרך ובכל אמצעי אחר כל חלק שהוא מהחומר שבספר זה.

תוכן העניינים

מבוא 7

כולם ביחד וכל אחד לחוד 7

פרק א: הובלה באדם ובבעלי חיים 9

הובלה בבעלי חיים 9

הובלה ביצורים חד-תאיים 9

הובלה ביצורים רב-תאיים ירודים 10

הובלה ביצורים רב-תאיים מפותחים 11

השפעת היחס שטח פנים/נפח על הובלת חומרים בגוף 11

עבודה 1: השפעת היחס בין שטח הפנים של קוביית אגר ובין

הנפח שלה על דיפוזיה 12

מערכת הדם 14

מערכת דם פתוחה 14

מערכת דם סגורה 14

התפתחות הלב במהלך האבולוציה של מערכת הדם 16

תפקודי מערכת הדם 18

מערכת ההובלה באדם 23

מחזור הדם 23

מחזור הגוף 23

מחזור הריאות 24

הלב 24

מבנה הלב 24

זרימת הדם בלב 27

עבודה 2: לפתוח את הלב - הכרת מבנה הלב של תרנגול הודו 28

פעילות הלב 30

עבודה 3: השפעת הטמפרטורה על קצב פעילות הלב של דפניה 33

הפעילות החשמלית של הלב 35

ויסות קצב הלב 37

תפוקת הלב 38

כלי הדם וזרימת הדם 44

מבנה כלי הדם 44

זרימת הדם בכלי הדם 46

מעבר חומרים בין הדם לתאי הגוף 51

עבודה 4: הזרימה בנימים 53

ויסות זרימת הדם לרקמות 55

מחלות לב וכלי דם 63

טרשת העורקים 63

מחלת לב כלילית 68

רקמת הדם 72

הפלסמה 72

תאי הדם 74

תאי הדם האדומים 74

תאי הדם הלבנים 78

טסיות הדם (לוחיות הדם) 79

בדיקת דם 84

מערכת הלימפה 88

המבנה של מערכת הלימפה 88

תפקידי מערכת הלימפה 90

פרק ב: נשימה באדם ובבעלי חיים 92

נשימה בבעלי חיים 92

נשימה בדגים 93

נשימה בחרקים 95

נשימה בחולייתנים יבשתיים 96

נשימה בעופות 97

נשימה באדם 102

המבנה של מערכת הנשימה 102

פעולת הנשימה – שאיפה ונשיפה 104

נפח האוויר בשאיפה ובנשיפה 106

עבודה 5: מדידה איכותית של CO_2 שנפלט בנשיפה 108

עבודה 6: מדידה כמותית של CO_2 שנפלט בנשיפה 109

ויסות פעולת הנשימה 111

חילוף הגזים בנאדיות הריאה 114

הובלת הגזים בדם 120

הובלת החמצן בדם 120

הובלת CO_2 בדם 123

נשימה בתנאים חריגים 126

נשימת אוויר מזוהם 132

עישון טבק 132

זיהום אוויר 138

נשימה תאית 146

הפקת אנרגיה בנוכחות חמצן 147

נשימה תאית אווירנית 147

הפקת אנרגיה ללא חמצן 154

נשימה תאית אל-אווירנית 154

תסיסה 155

פרק ג - הפרשה באדם ובבעלי חיים 162

הפרשה בבעלי חיים 162

מערכות ההפרשה בבעלי חיים 163

התאמת מערכת ההפרשה של החולייתנים לסביבות מחיה שונות 166

הפרשה באדם 171

מערכת ההפרשה 171

מבנה הכליות 172

מבנה מובילי השתן ושלפוחית השתן 173

עבודה 7: הכרת מבנה הכליה 174

פעולת הכליות 175

בדיקת שתן 184

מחלות במערכת ההפרשה 184

פרק ד - ויסות טמפרטורת הגוף 194

ויסות טמפרטורת הגוף באדם ובבעלי חיים 194

מקורות החום של הגוף 197

אנדותרמי או אקסותרמי - מה עדיף? 198

מנגנונים לוויסות טמפרטורת הגוף 198

מנגנונים מבניים 198

מנגנונים פיסיוולוגיים 200

מנגנונים התנהגותיים 205

בקרת ויסות הטמפרטורה בהומותרמיים 207

ויסות טמפרטורת הגוף בעופות ובפרות 218

השפעת טמפרטורת סביבה נמוכה על העופות 218

השפעת טמפרטורת סביבה גבוהה על העופות 219

השפעת טמפרטורת סביבה גבוהה על הבקר 220

אמצעים להקלת עומס החום בלול וברפת 222

רקמת העצה 306

רקמת השיפה 308

עבודה 10: הסתכלות בחתכי רוחב של שורש ושל גבעול 309

הובלת חומרים בצמח 315

קליטת המים בשורש 315

הובלת מים ויסודות מינרליים בעצה 316

תיאוריית הדיות-קוהזיה-אדהזיה 316

לחץ השורש 319

עבודה 11: עליית מים בפטוטרת של עלה סלרי 320

הובלת תוצרי הפוטוסינתזה בשיפה 322

תיאוריית הזרימה בלחץ (זרימת מסה) 323

מאזן המים בצמח 329

קליטת המים מן הקרקע 329

מצבי הרטיבות בקרקע 329

עבודה 12: בדיקת קיבול מים וקצב חלחול בקרקעות שונות 332

התאמת מערכת השורשים לקליטת המים 333

אובדן המים בתהליך הדיות 334

גורמים שמשפיעים על שיעור הדיות 335

עבודה 13: השפעת גורמי סביבה על הדיות 337

התאמת צמחים ליובש 338

צמחים ש"בורחים" מתנאי יובש 338

צמחים המותאמים לתנאי יובש 339

שמירת מאזן המים בצמחי חקלאות 340

השקיה 340

מאזן המים בישראל 350

מקורות המים בישראל 350

פרק ה - הגנה וחיסון באדם ובבעלי חיים 230

מערכות ההגנה והחיסון 230

מנגנוני הגנה בלתי ייחודיים 231

מנגנוני הגנה קיימים - קו ההגנה הראשון 231

עבודה 8: מנגנוני הגנה קיימים - הרוק והדמעות 233

מנגנוני הגנה מושרים - קו ההגנה השני 234

מערכת החיסון הייחודית - קו ההגנה השלישי 243

מאפייני מערכת החיסון הייחודית 243

התגובה החיסונית הייחודית 244

מערכת החיסון - יישומים ברפואה ובתעשייה 259

החיסון המלאכותי 259

השתלת רקמות 265

הנוגדנים בשירות הרפואה, התעשייה ואיכות הסביבה 272

שיבושים בפעולת מערכת החיסון 280

ליקויים בתפקוד מערכת החיסון 280

הטעיה של מערכת החיסון 291

פרק ו - הובלה בצמח 296

מערכת ההובלה בצמח 296

עבודה 9: עליית מים במערכת ההובלה של הצמח 297

מבנה השורש ותפקידיו 298

המבנה הפנימי של השורש 298

מבנה הגבעול ותפקידיו 300

המבנה הפנימי של הגבעול 300

מבנה העלה ותפקידיו 304

המבנה הפנימי של העלה 304

הקניית עמידות בצמח 384

הקניית עמידות באמצעות טיפול חיצוני 386

הקניית עמידות כללית 386

הקניית עמידות ייחודית 386

הקניית עמידות בשיטות גנטיות 386

פיתוח זנים עמידים באמצעות הכלאות 386

פיתוח צמחים עמידים באמצעות הרכבות 387

פיתוח זנים עמידים באמצעות הנדסה גנטית 387

מילון מונחים 393**מפתח 409**

מקורות המים הטבעיים 350

מקורות המים החלופיים 350

משבר המים 351

הפגיעה באיכות המים 352

המלחת מי התהום 352

זיהום מי התהום 353

שיפור איכות המים 354

צמצום ההמלחה 354

צמצום הזיהום החקלאי 354

צמצום הזיהום הביתי והתעשייתי 355

מדיניות ניהול ושימור המים 355

חיסכון במים 355

פיתוח מקורות מים חלופיים 356

פרק ז - הגנה בצמח 361**מנגנוני הגנה בצמח 361**

מנגנוני הגנה קיימים 364

מנגנוני הגנה קיימים מבניים 364

מנגנוני הגנה קיימים כימיים 366

עבודה 14: השפעה של מיצוי צמחים שונים על התפתחות

פטירות פתוגניות 371

מנגנוני הגנה מושרים 373

מנגנוני הגנה מושרים מבניים 373

מנגנוני הגנה מושרים כימיים 376

ההתפתחות האבולוציונית של מנגנוני ההגנה 378

מבוא

כיצד מאורגן המבנה הפנימי של היצורים החיים? איך מתפקדים המרכיבים השונים של גופם? כיצד מתפקד הגוף כולו כמערכת אחת שלמה? התאים הם יחידות המבנה הבסיסיות של היצורים החיים. בכל אחד מן התאים מתרחשים תהליכי חיים בסיסיים דומים, ואלה ממלאים את הדרישות החיוניות לקיומו של התא הבודד. כל תא מבצע פעולות שהתמחה בהן, וכל הפעולות תורמות לקיומו של האורגניזם השלם. כל תאי הגוף מקורם בתא ביצה מופרה שעבר חלוקות רבות, והתמיינות לתאים שונים. תאים בעלי מוצא ומבנה דומים נמצאים לעתים קרובות זה ליד זה ומקובצים יחד ברקמה. לעתים קרובות, קיים קשר הדוק בין כמה סוגים של תאים ורקמות, ונוצרות יחידות פעולה גדולות ומורחבות יותר – האיברים. איברים אחדים בגוף יוצרים מערכת שאחראית לפעולה מסוימת בגוף. כל מערכות האיברים יחד מרכיבות את האורגניזם השלם.

כולם ביחד וכל אחד לחוד

בכל אחד מן הפרקים בספר נתמקד במערכת גוף אחת, אבל נדגיש גם את יחסי הגומלין בין אותה מערכת לבין מערכות הגוף האחרות. כל מערכת בגוף מבצעת מכלול מורכב של פעולות, אך הגוף השלם מתפקד כיחידה אחת. בפרקי הספר נכיר את המערכות בגופנו, בגופם של בעלי חיים אחרים ובגופם של הצמחים. נבין את המשמעות של שיתוף הפעולה בין המערכות השונות, שיתוף שמאפשר את קיומו של האורגניזם השלם כיחידה מתפקדת אחת. מערכות הגוף מבצעות את הפעולות החיוניות האלה:

1. קליטת חומרי הזנה וחומרים אחרים, פיזורם בגוף וסילוק הפסולת.
2. שמירה על יציבות תנאי הסביבה הפנימית, בתחום המתאים לפעילות התאים – הומיאוסטזיס.
3. התגוננות בפני פציעה ובפני פלישת נגיפים, חיידקים וגורמי מחלות אחרים.

קליטת חומרים, פיזורם וסילוקם

קיום האורגניזם תלוי בקליטת חומרים מן הסביבה, בהובלה שלהם אל התאים, בשימוש בהם לצורכי הגוף ובסילוק חומרי הפסולת מן התאים. מערכות אחדות בגוף האדם ובגוף בעלי החיים פועלות במשולב להשגת המטרות האלה. בחולייתנים, מערכת הדם משמשת כמתווכת העיקרית בין תאי הגוף לבין המערכות השונות

המקשרות עם הסביבה החיצונית. אספקת החמצן, למשל, נעשית על ידי פעולה של מערכת הנשימה, הקולטת חמצן מן הסביבה, ושל מערכת הדם, המעבירה את החמצן לכל תאי הגוף. באופן דומה פועלת מערכת העיכול בתיאום עם מערכת הדם, וחומרי המזון מן הסביבה החיצונית מגיעים אל כל תאי הגוף, לאחר שהם עוברים עיבוד מתאים. באמצעות מערכת הדם, מגיעים גם חומרי הפסולת מן התאים אל הכליות ואל הריאות ודרך יוצאת הפסולת אל מחוץ לגוף.

בצמחים קיימת מערכת הובלה שמורכבת משני סוגי רקמות: רקמת עצה להובלת מים ויסודות מינרליים מהרקע אל החלקים העל-אדמתיים של הצמח, ורקמת שיפה להובלת חומרים אורגניים מהעלים לשאר חלקי הצמח. לצמחים אין מערכת לסילוק ולהפרשה של הפסולת. צמחים מייצרים את החומרים האורגניים בעצמם, וכמעט אינם מייצרים עודפים או פסולת. מעט העודפים והפסולת שנוצרים מובלים בדרך כלל בדיפוזיה לחלוליות התאים ושם הם שוהים עד למות הצמח.

הומיאוסטזיס

סביבה פנימית יציבה בגוף חיונית לפעילות התאים. שינויים קיצוניים בסביבה הפנימית ובהרכבה פוגעים מאוד בתפקוד התאים. היכולת של מערכות הגוף לקיים סביבה פנימית יציבה, בתנאי סביבה חיצונית שאינה קבועה, נקראת הומיאוסטזיס (homoiois = דומה; stasis = קבוע). הסביבה הפנימית הקבועה נשמרת על ידי ויסות גורמים שונים בגוף כמו: לחץ אוסמוטי, כמות נוזלים, רמת pH, ריכוזי חומרים שונים וטמפרטורה. יכולתו של אורגניזם לקיים הומיאוסטזיס תלויה בקיומם של יחסי גומלין בין מערכות הגוף השונות.

סביבה פנימית - החומר התוך-תאי והחומר החוץ-תאי, כולל נוזל הדם ונוזל הלימפה.

סביבה חיצונית - הסביבה שהיצורים חיים בה; חלל צינור העיכול וחלל צינורות מערכת הנשימה מהווים המשך של הסביבה החיצונית.

התגוננות

המגע הרצוף של האורגניזם עם הסביבה החיצונית, כרוך בכניסה בלתי פוסקת של חומרים ושל גורמים זרים לגוף. כל יצור חי מצויד באמצעי התגוננות מפני פגיעה אפשרית של גורמים זרים שמגיעים אל גופו. לבעלי חיים ולצמחים יש מנגנוני הגנה מכניים שמונעים חדירת גורמים זרים לגוף. בתוך כל גוף יש גם מנגנונים שמגנים עליו מפני גורמים זרים שחדרו לתוכו. בחולייתנים, מערכת החיסון מזהה גורמים זרים שפלשו לגוף ומגיבה באופן ייחודי נגדם. בצמחים, חומרים מיוחדים או מוות מהיר של תאים באזור הפגיעה, מונעים פגיעה של מזיקים ומחוללי מחלות שחדרו לצמח.

פרק א

הובלה באדם ובבעלי חיים

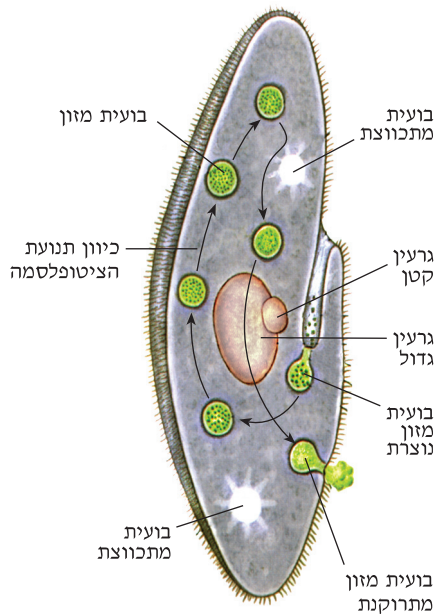
הובלה בבעלי חיים

תאים של יצורים חיים מקיימים יחסי גומלין עם סביבתם; מן הסביבה הם קולטים את כל צורכיהם ואליהם הם פולטים פסולת המתהווה בהם בחילוף החומרים (במטבוליזם). התאים תלויים אפוא לקיומם בהובלה יעילה של החומרים מן הסביבה אליהם ומהם אל הסביבה. אחת הדרכים שבהן נעות מולקולות ממקום למקום היא הדיפוזיה. בתהליך הדיפוזיה, המולקולות נעות בכיוונים שונים בלי סדר, מתנגשות ביניהן ומתפזרות. תנועה זו היא איטית ויכולה להבטיח אספקת חומרים רק למרחק קצר ביותר, הנמדד באלפיות מ"מ. הגוף של בעלי חיים זקוק אפוא לאמצעי אחר, יעיל יותר, לצורכי הובלת החומרים החיוניים לחייו. במהלך האבולוציה התפתחו מערכות הובלה שהלכו והשתכללו בהתאם לצרכים של היצורים החיים.

הובלה ביצורים חד-תאיים

לאורגניזמים חד-תאיים, כמו: אמבה וסנדלית, אין כלל מערכות הובלה להעברה של חומרים בין התא לסביבתו החיצונית. החומרים שדרושים לתא, חודרים אליו ישירות בדיפוזיה, דרך קרום התא, מן הסביבה החיצונית המימית שבה הוא חי. גם חומרי הפסולת מופרשים מן התא אל הסביבה המימית באותה דרך.

אולם, גם יצורים חד-תאיים, למרות גודלם הזעיר (0.2-0.6 מ"מ), לא היו יכולים להתקיים ולנוע לו היו תלויים בדיפוזיה בלבד. הדיפוזיה מואצת אצלם בעזרת **תנועת הציטופלסמה**. אצל האמבה הציטופלסמה נמצאת בתנועה כל הזמן, בכל התא, ומפזרת את חומרי המזון והגזים בכל שטח התא. אצל הסנדלית יש תנועה מתמדת של הציטופלסמה, לאורך מסלול קבוע. באמצעות התנועה הזאת נע המזון בתוך **בועיות מזון** (food vacuoles) שבאות במגע עם כל חלקי התא (איור א-1). באמבה ובסנדלית, הציטופלסמה מניעה גם **בועיות מתכווצות** (contractile vacuoles) שמפרישות עודפי מים החוצה מבעד לנקבים זעירים.

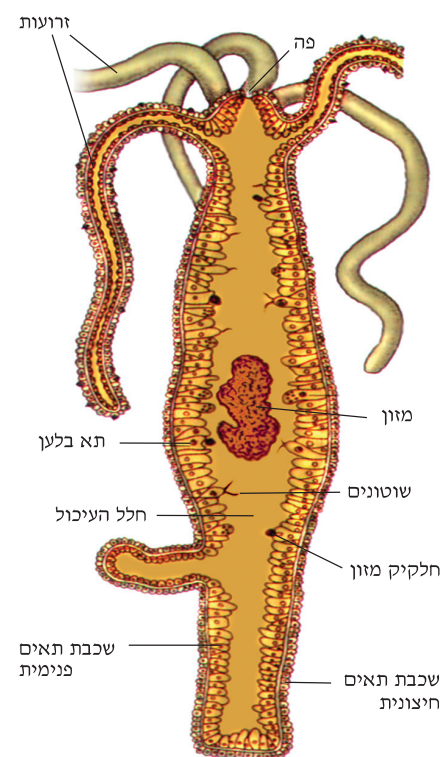


איור א-1: פיזור בועיות מזון ובועיות מתכווצות בסנדלית, בעזרת תנועת הציטופלסמה (הגדלה $200 \times$)

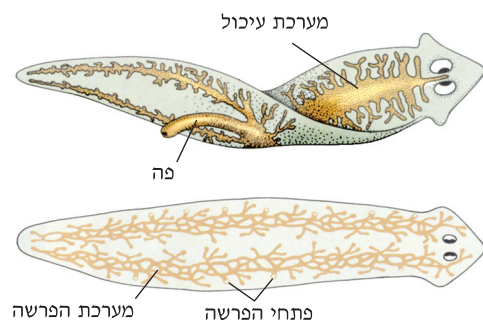
הובלה ביצורים רב-תאיים ירודים

יש יצורים רב-תאיים שאין להם מערכת הובלה מיוחדת להובלת גזים וחומרי מזון. היצורים האלה חיים בסביבה מימית, גופם עשוי משתי שכבות דקות של תאים, וההובלה נעשית בדיפוזיה ועל ידי תנועת נוזל חלל העיכול בגופם. יצור כזה הוא, למשל, ההידרה. גוף ההידרה בנוי מצינור חלול שבקצהו "פה" שמשמש גם לקליטת חומרי מזון וחמצן וגם להפרשת חומרי הפסולת. הצינור החלול בנוי משתי שכבות תאים - חיצונית ופנימית (איור א-2). כל תא בשכבה החיצונית בא במגע עם מי הסביבה, ואילו כל תא בשכבה הפנימית בא במגע עם נוזל חלל העיכול של ההידרה. חלק מתאי השכבה הפנימית, המרפדת את החלל, מצויד בשוטונים שמתנועעים ו"בוחשים" את המים בחלל העיכול. תנועת הנוזל מפזרת את חלקיקי המזון ומביאה אותם במגע עם תאים בלעניים (פגוציטים) שמצויים בשכבה הפנימית. תוצרי העיכול עוברים בדיפוזיה מן התאים הבלעניים, לתאים אחרים בשכבה הפנימית ולתאי השכבה החיצונית. חילוף הגזים נעשה דרך כל שטח הגוף, על ידי דיפוזיה. כאשר ההידרה מניעה את זרועותיה, היא גורמת לזרימה מהירה יותר של מים בסביבתה, ולכן גם החמצן וחלקיקי המזון שנמצאים במים, מגיעים אל התאים מהר יותר.

אצל בעלי חיים ירודים שיש להם יותר משתי שכבות תאים, מערכות ההובלה מגיעות לכל התאים בשכבות הפנימיות. הפלנריה (איור א-3) היא תולעת קטנה (3-15 מ"מ) שטוחה מאוד (מכאן שמה בלטינית: planus = שטוח). היא חיה במאגרי מים מתוקים. הודות למבנה השטוח של הפלנריה, כל אחד מהתאים שלה נמצא קרוב מאוד לסביבה החיצונית, וחילופי הגזים בין המים לתאי הגוף, מתבצעים במנגנון של דיפוזיה. הובלת חומרי המזון, לעומת זאת, נעשית במערכת עיכול מסועפת שמגיעה לכל תאי הגוף. חומרי הפסולת הנוזליים מופרשים אל מחוץ לגוף על ידי צינורות מסועפים של מערכת הפרשה.



איור א-2: חתך אורך בהידרה (הגדלה $\times 7$)



איור א-3: פלנריה (הגדלה $\times 7$)

הובלה ביצורים רב-תאיים מפותחים

מנגנוני ההובלה שקיימים ביצורים ירודים, קיימים גם ביצורים מפותחים, אולם אין הם מספקים את צורכי הגוף. הדיפוזיה באורגניזמים רב-תאיים מפותחים אינה יעילה מספיק, מאחר שהיא איטית ואינה מתאימה להובלה למרחקים גדולים, יחסית. נוסף לכך, גם שטח הפנים של האורגניזמים הגדולים, קטן יחסית לנפחם, וליחס שבין שטח הפנים של הגוף לבין הנפח שלו יש חשיבות רבה בתופעות ביולוגיות רבות, כמו: חילוף חומרים וויסות טמפרטורת הגוף (ראו עמ' 200).

השפעת היחס שטח פנים/נפח על הובלת חומרים בגוף

קליטה של חומרים אל הגוף והוצאתם, באמצעות דיפוזיה, נעשית רק דרך שטח המעטפת החיצונית של הגוף. לכן, כמות החומרים הנקלטים, וכן כמות החומרים הנפלטים, נמצאים ביחס ישר לשטח הפנים של האורגניזם. תהליכי חילוף החומרים, לעומת זאת, נעשים בכל נפח הגוף. לכן, כמות המזון והחמצן הנצרכים על ידי האורגניזם, וכן כמות חומרי הפסולת הנוצרים, נמצאים ביחס ישר לנפח שלו. באורגניזמים רב-תאיים, היחס בין שטח הפנים לבין הנפח הוא קטן. יחס זה אינו מאפשר מעבר יעיל של חומרים מן הסביבה החיצונית אל כל התאים. ככל שהאורגניזם גדול יותר, היחס בין שטח הפנים שלו לנפחו קטן יותר, ומעבר החומרים בדיפוזיה נעשה פחות יעיל. אצל בעלי חיים רב-תאיים מפותחים, נוסף לדיפוזיה יש גם מנגנוני הובלה יעילים יותר ומערכות איברים שמסייעות בקליטה ובהפרשה של החומרים. המערכות הן:

א. מערכת הדם והלימפה

ב. מערכת העיכול

ג. מערכת חילוף הגזים (מערכת הנשימה)

ד. מערכת ההפרשה.

בכל המערכות האלה התפתחו מבנים מיקרוסקופיים ששטח פניהם גדול מאוד, ובכך הם מאפשרים העברה מהירה של החומרים והובלתם. מבנים כאלה הם: נאדיות הריאה, נימי הדם והנפרונים בכליה.

השפעת היחס בין שטח הפנים של קוביית אגר ובין הנפח שלה על דיפוזיה



בניסוי הזה תבדקו את תהליך הדיפוזיה של NaOH לתוך קוביות אגר ספוגות באינדיקטור פנול פתלאין. כאשר הבסיס NaOH עובר בדיפוזיה, משתנה ה-pH ובהתאם משתנה צבעו של האינדיקטור.

כלים וחומרים

סכין או סקלפל

סרגל

עט לסימון (מרקר)

כן למבחנות

2 מבחנות

כוס כימית של 100 מ"ל

2 טפי

כפית פלסטית

2 מגבות נייר

100 מ"ל תמיסת NaOH בריכוז 1%

5 מ"ל תמיסת פנול פתלאין (בבקבוק עם טפי)

מים מזוקקים בבקבוק פלסטי

3 קוביות אגר בגדלים שונים ספוגות בפנול פתלאין; אורך הצלע של הקוביות:

1 ס"מ, 2 ס"מ, 3 ס"מ

מהלך העבודה

1. בעזרת טפי, העבירו כ-20 טיפות מתמיסת הבסיס NaOH, למבחנה אחת, ועליה תכתבו "בסיס".

2. למבחנה אחרת, שעליה תכתבו "מים", טפטפו בעזרת טפי אחר כ-20 טיפות מים מזוקקים.

3. לכל אחת משתי המבחנות טפטפו 2 טיפות אינדיקטור פנול פתלאין. בדקו ורשמו את הצבע המתקבל בכל אחת מן התמיסות.

4. בעזרת כפית, הכניסו את הקוביות לתוך כוס כימית שיש בה תמיסת בסיס NaOH. רשמו את זמן התחלת הניסוי.

5. בעזרת הכפית, הפכו את הקוביות בכל דקה. יש לשים לב שהקוביות תהיינה מכוסות בתמיסה.

6. לאחר 5 דקות הוציאו את הקוביות מן התמיסה והניחו על מגבת נייר. חתכו כל קובייה לשניים והבחינו במסגרת שצבועה בסגול.
7. בעזרת סרגל מדדו את צלע הקובייה ואת רוחב הקטע של המסגרת הצבועה, בכל אחת מן הקוביות.
8. סכמו את תוצאות הניסוי בטבלה. לגבי כל קובייה התייחסו למדדים האלה:
 - א. צלע הקובייה
 - ב. שטח הפנים של הקובייה
 - ג. נפח הקובייה
 - ד. יחס שטח פנים/נפח של הקובייה
 - ה. רוחב הקטע הצבוע (הקטע של המסגרת הצבועה)
 - ו. רוחב הקטע הבלתי צבוע
 - ז. נפח החלק הבלתי צבוע
 - ח. נפח החלק הצבוע (החסירו את נפח החלק הבלתי צבוע מנפח הקובייה השלמה)
 - ט. הנפח הצבוע באחוזים
9. הסבירו מדוע נצבעו הקוביות בצבע סגול.
10. הסבירו מדוע יש הבדל בגודל החלק הצבוע בקוביות השונות.
11. סרטטו עקום שיבטא את היחס שטח פנים/ נפח כתלות בגודל צלע הקובייה.
12. סרטטו עקום שיבטא את אחוז הנפח הצבוע כתלות בגודל צלע הקובייה.
13. השוו בין שני העקומים שסרטטתם. איזו מסקנה ניתן להסיק מהשוואה זו?
14. מה ניתן להסיק מתוצאות הניסוי לגבי הקשר בין היחס שטח פנים/נפח ובין היעילות של תהליך הדיפוזיה? הסבירו.
15. כיצד העיקרון שלמדתם בניסוי זה בא לידי ביטוי ביצורים רב-תאיים? הסבירו.

מערכת הדם

מערכת הדם היא המערכת העיקרית להובלת חומרים בבעלי חיים. מערכת הדם מורכבת מצינורות רבים ובמרכזם נמצאת משאבה (הלב) המניעה ומזרימה את הדם בכל הגוף. נוזל הדם זורם במערכת הצינורות, מוביל אל התאים את החומרים הדרושים להם, ומרחיק מן התאים את חומרי הפסולת שנוצרו בהם.

בגופם של אורגניזמים שונים התפתחו שני סוגים עיקריים של מערכות דם: **מערכת דם פתוחה** (open circulatory system) ו**מערכת דם סגורה** (closed circulatory system).

מערכת דם פתוחה

לפרוקי הרגליים (חרקים וסרטנים) ולרכיכות יש מערכת דם פתוחה (איור א-4, א). במערכת דם פתוחה אין לב אמיתי ואין כלי דם נימיים המגיעים לכל תא ותא. אצל החגב, כמו אצל חרקים אחרים, הדם זורם בצינורות רק בחלק קטן מדרכו, אחר כך הוא נשפך לחללים בגוף, שוטף את הרקמות ובא במגע ישיר עם תאי הגוף. בחלקו האחורי של צינור הדם בגב יש שמונה התרחבויות המתפקדות כ"לב" (איור א-4, ב). ההתרחבויות בצינור הדם יכולות להתכווץ ולהתרחב לחילופין ולדחוף את הדם בהמשך הצינור. כאשר ה"לב" מתרחב נשאב לתוכו הדם. כאשר שרירי ה"לב" מתכווצים, יוצא מהם הדם, והוא נשפך לחללים שבגוף החרק. הדם שוטף את הרקמות, ומעביר להן את החומרים הדרושים. הדם גם אוסף את חומרי הפסולת מן הרקמות ונשאב חזרה אל ה"לב". מערכת הדם הפתוחה משמשת רק להעברת מזון וחומרי פסולת. העברת הגזים נעשית על ידי מערכת חילוף הגזים, ללא תיווכה של מערכת הדם.

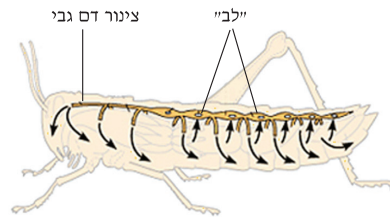
מערכת דם סגורה

אצל חסרי חוליות מפותחים (כמו, התולעים הטבעיות) ואצל כל החולייתנים, נוזל הדם מגיע לכל תא באמצעות כלי הדם, במערכת מחזורית סגורה. התולעים הטבעיות (למשל, השלשול) שייכות לקבוצת היצורים בעלי המבנה הפשוט ביותר שיש להם מערכת דם סגורה (איור א-4, ג). במערכת הדם של השלשול מובלים גזים וחומרי מזון בלבד, ואילו חומרי ההפרשה מובלים במערכת אחרת. בצד הגבי של השלשול מצוי צינור דם שעובר לאורכו וממנו מסתעפים חמישה "לבבות" (איור א-4, ד). לבבות אלה הם צינורות עבים ושריריים מאוד, והם מסוגלים להתכווץ ולהתרחב, וכך לשאוב את הדם ולדחוף אותו, לאורך צינורות

הדם. צינורות הדם מתפצלים לרשת דקיקה של נימי דם והיא מגיעה לכל תאי הגוף. העברת חומרי המזון והגזים נעשית דרך קרומי התאים ודרך הדפנות הדקיקים של נימי הדם. הנימים הדקיקים מתלכדים מחדש לצינורות גדולים יותר ויותר ואלה מתחברים בסוף אל הצינור הגבי. הצינור הגבי דוחף את הדם ל"לבבות" ובכך נסגר מחזור הדם. מחזור הדם בשלשול הוא אפוא מעגל סגור של צינורות שבו זורם הדם. הדם אינו יוצא מן הצינורות ואינו זורם ברחבי הגוף באופן חופשי כמו במערכת הדם הפתוחה.

מערכת דם סגורה מספקת דם לרקמות באופן יעיל יותר מאשר מערכת דם פתוחה. שתי תכונות של מערכת הדם הסגורה מקנות לה את היעילות באספקת הדם: (א) הדם חוזר אל הלב מהר יחסית; (ב) כמות הדם שזורמת אל איבר מסוים ניתנת לוויסות על ידי שינוי הקוטר של כלי הדם.

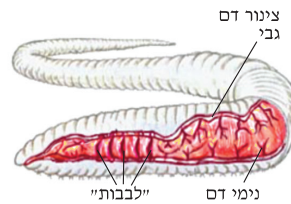
במהלך האבולוציה, התרחשו שינויים במבנה של מערכת הדם הסגורה של החולייתנים. מערכת הדם בחולייתנים היא מערכת מתווכת יעילה והיא מסייעת לקלוט חומרים ולהעביר אותם אל תאי הגוף, וכן לאסוף חומרי פסולת מתאי הגוף ולהעבירם למקומות שמהם יופרשו. לחלק מן החולייתנים יש מחזור דם בודד, ולאחרים יש מחזור דם כפול.



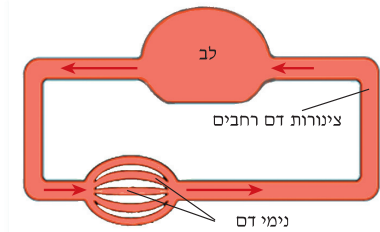
ב. מערכת דם פתוחה בחגב



א. זרימה במערכת דם פתוחה



ד. מערכת דם סגורה בשלשול



ג. זרימה במערכת דם סגורה

איור א-4: מערכת דם פתוחה ומערכת דם סגורה

מחזור דם בודד

מחזור דם בודד מאפיין את החולייתנים הנחותים, למשל דגים. הדם היוצא מן הלב עושה רק מחזור אחד בכל חלקי הגוף לפני שהוא חוזר אל הלב (איור א-5, א). הדם עובר דרך המדורים של הלב ומגיע אל הזימים. בנימי הזימים, הדם קולט חמצן וממשיך לזרום אל שאר חלקי הגוף. בנימי הגוף, החמצן עובר מן הדם אל תאי הגוף. בסופו של המחזור חוזר הדם אל הלב. קצב זרימת הדם במחזור דם בודד הוא איטי יחסית, ואינו מבטיח אספקה יעילה של חמצן אל הרקמות.

מחזור דם כפול

אצל דו-חיים וזוחלים ניתן למצוא סימנים ראשונים של זרימת דם בשני מחזורים נפרדים (איור א-5, ב, ג). ההתפתחות העיקרית של מחזור דם כפול התרחשה אצל החולייתנים העילאיים – העופות והיונקים. אצל עופות ויונקים יש הפרדה לשני מחזורי דם: מחזור הריאות (מחזור קטן) ומחזור הגוף (מחזור גדול) (איור א-5, ד). **במחזור הריאות** (pulmonary circuit), זורם הדם בין הלב לריאות. דם עני בחמצן ועשיר ב- CO_2 , יוצא מן הלב אל הריאות, ודם עשיר בחמצן ועני ב- CO_2 , זורם מן הריאות אל הלב. **במחזור הגוף** (systemic circuit) זורם הדם בין הלב לגוף. דם עשיר בחמצן ועני ב- CO_2 , שמגיע מן הריאות, זורם מן הלב לכל תאי הגוף, ודם עני בחמצן ועשיר ב- CO_2 , זורם מן התאים אל הלב. זרימת הדם במחזור כפול, יחד עם תפקוד יעיל יותר של הלב, מאפשרים אספקה יעילה יותר של חמצן לגוף.

עני ועשיר - הכל יחסי!

הדם שזורם מן הלב אל הריאות הוא עני בחמצן ועשיר ב- CO_2 יחסית לדם שזורם מן הריאות אל הלב. גם כאשר הוא עני בחמצן, עדיין יש בו יותר חמצן בהשוואה ל- CO_2 .

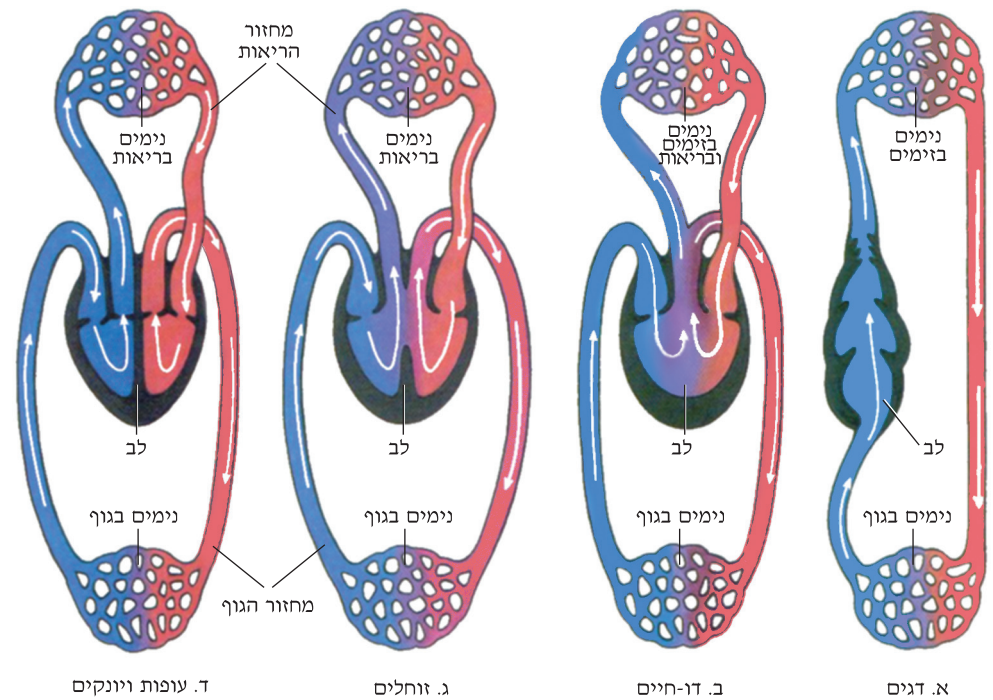
התפתחות הלב במהלך האבולוציה של מערכת הדם

בגופו של כל אורגניזם, בעל מערכת דם סגורה, התפתחו שרירים המשמשים לשאיבה ולדחיפה של הדם. אצל החולייתנים התפתח איבר שרירי המשמש כמשאבה – הלב. בהתאם להתפתחויות שחלו במערכת הדם של החולייתנים, ממחזור בודד למחזור כפול משוכלל, השתנה גם מבנה הלב (איור א-5).

בדגים הלב הוא הפשוט ביותר (איור א-5, א). הדם מגיע אל הלב לאחר שעבר בגוף, וזורם מן הלב אל הזימים שבהם הוא מועשר בחמצן.

בדו-חיים יש הפרדה מועטה בין שני מחזורי הדם ויש מידה מסוימת של ערבוב (איור א-5, ב). **בזוחלים** חלה התפתחות נוספת: בלב שלהם יש מחיצה חלקית, ויש יותר הפרדה בין שני מחזורי הדם (איור א-5, ג).

בעופות וביונקים הגיע הלב לשיא התפתחותו: יש מחיצה שמפרידה בין שני חלקי הלב והיא שלמה ואטומה (איור א-5, ד). צד אחד מקבל דם מועשר בחמצן, שמגיע מן הריאות, ואין לו מגע עם הדם העני בחמצן, שמגיע מן הגוף, ונמצא בצד האחר. ההפרדה המוחלטת שקיימת בין שני זרמי הדם במדורי הלב ובמערכת צינורות הדם בגוף, מאפשרת אספקת חמצן יעילה ביותר.



אדום - דם עשיר בחמצן
 כחול - דם עני בחמצן
 חצים - כיוון זרימת הדם

איור א-5: התפתחות הלב ומחזור הדם בחולייתנים במהלך האבולוציה

תפקודי מערכת הדם

מערכת הדם מתפקדת בשני תחומים: (א) בהובלת חומרים חיוניים בין מערכות הגוף; (ב) בשמירה על הומיאוסטזיס (סביבה פנימית יציבה).

תפקודי הדם בהובלת חומרים

1. הובלת גזים: מערכת הדם מעבירה אל התאים בכל חלקי הגוף את החמצן שנקלט בנימי הדם שבראות, ומובילה CO_2 , שמשתחרר מן התאים, אל הריאות ומשם אל מחוץ לגוף.
2. הובלת חומרי מזון: תוצרי העיכול (כמו: חד-סוכרים, חומצות אמיניות וחומצות שומן) מובלים על ידי כלי הדם מן המעי אל התאים.
3. הובלת פסולת: פסולת שנוצרת בתאים מועברת באמצעות הדם אל איברי ההפרשה, ודרכם יוצאת אל מחוץ לגוף.
4. הובלת הורמונים: ההורמונים נוצרים בבלוטות ייחודיות ומועברים על ידי הדם אל מקום פעולתם בגוף.
5. הובלת חומרי חיסון: בדם נוצרים ומובלים נוגדנים, תאים וחומרים אחרים שמקנים לגוף הגנה בפני גורמים זרים שחודרים לתוכו ומשבשים את פעילותו התקינה של הגוף.

תפקודי הדם בשמירה על הומיאוסטזיס

1. ויסות טמפרטורת הגוף (בעופות וביונקים)
2. ויסות הלחץ האוסמוטי (ריכוזי המומסים)
3. ויסות חלוקת הנוזלים בגוף
4. ויסות רמת ה-pH בגוף.

סיכום

1. ליצורים חד-תאיים (כמו, אמבה וסנדלית) אין מערכות הובלה, והעברת החומרים בין התא לסביבתו נעשית בדיפוזיה, שמזוהת על ידי תנועת הציטופלסמה.
2. אצל יצורים רב-תאיים חסרי מערכת הובלה (כמו, הידרה) הובלת המזון וחילוף הגזים נעשים בדיפוזיה, שמזוהת על ידי תנועת מי הסביבה ותנועת הנוזל בחלל העיכול.
3. אצל בעלי חיים גדולים רב-תאיים, היחס שבין שטח הפנים של הגוף לנפחו הוא קטן ורוב תאי הגוף מרוחקים ממעטה הגוף. בבעלי חיים אלה יש מערכות ייחודיות להובלת המזון והגזים: מערכת דם ולימפה, מערכת עיכול, מערכת נשימה ומערכת הפרשה.

4. מערכת הדם היא המערכת העיקרית להובלת חומרים בבעלי חיים. לחרקים ולסרטנים יש מערכת דם פתוחה, שבה רוב הדם זורם בחללי הגוף, שוטף את הרקמות ובא במגע ישיר עם תאי הגוף. לחסרי חוליות מפותחים ולכל החולייתנים יש מערכת דם סגורה שבה זורם הדם בתוך כלי דם.

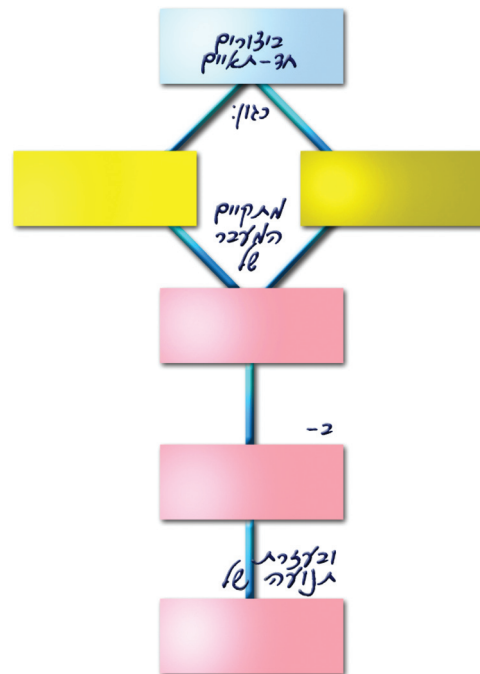
5. באורגניזמים בעלי מערכת דם סגורה, הדם חוזר במהירות אל הלב וכמות הדם שזורמת אל הרקמות ניתנת לוויסות באמצעות שינויים בקוטר כלי הדם. לכן, אספקת הדם באורגניזמים אלה יעילה יותר מאשר באורגניזמים בעלי מערכת דם פתוחה.

6. במחזור דם בודד, שמאפיין חולייתנים נחותים (דגים) הדם זורם במחזור אחד, מן הלב דרך כל חלקי הגוף וחוזר אל הלב. אצל חולייתנים עילאיים (עופות ויונקים) התפתח מחזור דם כפול: מחזור הריאות שבו הדם זורם מן הלב אל הריאות וחוזר אל הלב, ומחזור הגוף שבו הדם זורם מן הלב לכל תאי הגוף וחוזר אל הלב. המחזור הכפול מאפשר אספקת חמצן יעילה יותר ומייעל בכך את חילוף החומרים.

7. באורגניזמים שיש להם מערכת דם סגורה, התפתחו שרירים שמשמשים לשאיבה ולדחיפה של הדם. בחולייתנים השריר הזה הוא הלב. במהלך האבולוציה השתנה מבנה הלב של החולייתנים, במקביל לשינויים שחלו במערכת הדם. הלב, שהיה חסר מחיצה בין שני חלקיו, התפתח ללב בעל מחיצה שלמה שמפרידה בין שני זרמי הדם.

8. מערכת הדם מובילה בגוף חומרים שונים, כמו: גזים, מזון, פסולת, הורמונים, וכן תאים ומולקולות שפועלים בחיסון הגוף.

9. מערכת הדם מסייעת לקיום הומיאוסטזיס בגוף; היא מסייעת בשמירה על סביבה פנימית קבועה גם כאשר בסביבה החיצונית מתרחשים שינויים. הסביבה הפנימית הקבועה נשמרת על ידי ויסות גורמים שונים בגוף: לחץ אוסמוטי, רמת pH, חלוקה של הנוזלים בגוף, וטמפרטורה.



1. העתיקו את מפת המושגים שבאיור א-6 והשלימו את המושגים החסרים, לסיכום נושא ההובלה ביצורים חד-תאיים. היעזרו ברשימת המושגים הזאת: חומרי מזון וגזים; דיפוזיה; אמבה; ציטופלסמה; סנדלית.

```

graph TD
    Root[בזכרון רב-גאון ויחידים] --> M1[מנהל]
    Root --> M2[מנהל]
    M1 --> M1_1[מנהל]
    M1 --> M1_2[מנהל]
    M2 --> M2_1[מנהל]
    M2 --> M2_2[מנהל]
    M1_1 --> M1_1_1[מנהל]
    M1_1 --> M1_1_2[מנהל]
    M2_1 --> M2_1_1[מנהל]
    M2_1 --> M2_1_2[מנהל]
    M1_2 --> M1_2_1[מנהל]
    M1_2 --> M1_2_2[מנהל]
    M2_2 --> M2_2_1[מנהל]
    M2_2 --> M2_2_2[מנהל]
  
```

3. א. מדוע הדיפוזיה (ללא אמצעי הגברה) אצל האמבה, הסנדלית וההידרה אינה מהווה אמצעי מספיק להובלת חומרים?
ב. ציינו באילו דרכים מוגבר קצב הדיפוזיה אצל האמבה, אצל הסנדלית ואצל ההידרה.

4. שלושה תאים בעלי צורה של קובייה, שונים באורך הצלע שלהם. אורך הצלע בתא א' - 2 מיקרון; בתא ב' - 4 מיקרון; בתא ג' - 6 מיקרון.

א. חשבו את שטח הפנים והנפח של כל אחד מן התאים.
ב. חשבו את היחס בין שטח הפנים לנפח של כל אחד מן התאים.

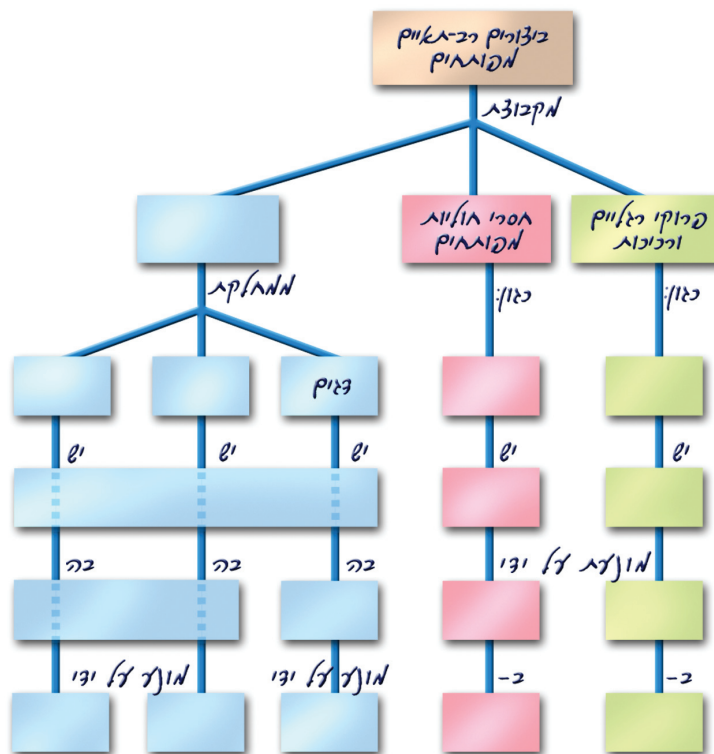
ג. השוו את היחס שטח פנים/נפח בין שלושת התאים וציינו כיצד משתנה היחס עם העלייה באורך הצלע.

ד. באיזה תא יהיה חילוף הגזים יעיל ביותר? הסבירו.

ה. מהי המשמעות של הממצאים הנ"ל לגבי הדיפוזיה של גזים ביצורים גדולים?

5. כיצד מותאם מבנה הגוף של ההידרה ושל הפלנריה להובלת חומרים בגופם?

6. העתיקו את מפת המושגים שבאיור א-8 והשלימו את המושגים החסרים, לסיכום נושא ההובלה ביצורים רב-תאיים מפותחים. היעזרו ברשימת המושגים הזאת: מערכת דם סגורה; מערכת דם פתוחה; צינור דם גבי; גב; דו-חיים וזוחלים; עופות ויונקים; לב בעל מחיצה שלמה; לב ללא מחיצות; לב בעל מחיצה חלקית; חולייתנים; מחזור דם בודד; מחזור דם כפול; 8 שרירים; 5 צינורות דם שריריים; חגב; שלשול (שימו לב! יש מושג אחד שיופיע באיור פעמיים).



איור א-8: מערכות ההובלה ביצורים רב-תאיים מפותחים

7. השוו את מחזור הדם של חגב למחזור הדם של שלשול.
 א. תארו את מסלול זרימת הדם בגוף של חגב ובגוף של שלשול.
 ב. מה מניע את הדם בחגב ובשלשול?
 ג. איזה "מטען" מוביל הדם בחגב ואיזה בשלשול?
 8. א. המבנה של מחזור הדם ושל הלב תורמים לייעול ההובלה אצל עופות ויונקים. הסבירו כיצד.
 ב. מהי החשיבות של מערכת הובלה יעילה לעופות וליונקים? הסבירו.
 9. סכמו בטבלה אילו חומרים מובילה מערכת הדם, מהיכן ולאן.
 10. ציינו אילו גורמים מווסתת מערכת הדם בשמירה על ההומיאוסטזיס בגוף.



את יישום המחשב משמעות היחס בין שטח הגוף לבין נפחו ביונקים ניתן למצוא באתר
http://agribio.snunit.k12.il/main/upload/.ab/id_span1.html
 ביישום משולב גיליון אלקטרוני במתכונת של פתרון בעיה. היישום עוסק בהשפעת גודל גוף
 היונקים על תהליך ויסות הטמפרטורה, ויש בו מודל להמחשת היחס שטח פנים/נפח ללימוד
 נושא ההומיאוסטזיס.

מערכת ההובלה באדם

מערכת הדם של האדם (איור א-9) מייצגת את סוג מערכת ההובלה שהתפתחה בחולייתנים עילאיים; זוהי מערכת מסועפת של צינורות דם ובמרכזה הלב, שמזרים את הדם בשני מחזורים.

מחזור הדם

כדי שהדם יוכל לשמש כאמצעי הובלה, חשוב שינוע במהירות וביעילות. הדם זורם בזרימה מחזורית בתוך מערכת סגורה של כלי דם, ומגיע לכל תאי הגוף, מכוח פעולת הדחיפה והשאובה של הלב. הזרימה במחזור נעשית הודות למפל לחצים שקיים על פני כל מחזור הדם. מרכזי בקרה במוח מווסתים את הזרמת הדם לחלקי הגוף השונים לפי התצרכות שלהם.

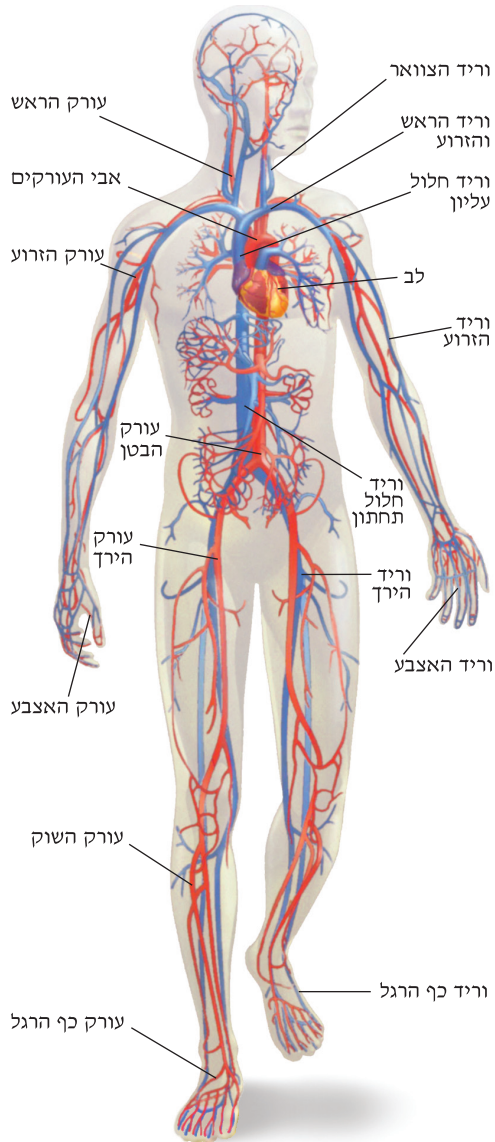
מערכת הדם בגוף מורכבת ממחזור דם כפול (איור א-10): **מחזור הגוף** (המחזור הגדול) ו**מחזור הריאות** (המחזור הקטן).

מחזור הגוף

במחזור הגוף, דם עשיר בחמצן יוצא מן הצד השמאלי של הלב אל כל חלקי הגוף, וחוזר אל הצד הימני של הלב כשהוא עני בחמצן. מן הלב אל כל חלקי הגוף האחרים הדם זורם בכלי דם שנקראים **עורקים** (arteries), ואילו בחזרה, מן התאים אל הלב, הוא זורם בכלי דם שנקראים **ורידים** (veins).

העורק הגדול ביותר, שיוצא מן הצד השמאלי של הלב, נקרא **אבי העורקים** (aorta), שכן כל העורקים של מחזור הגוף מסתעפים ממנו. לאחר היציאה מן הלב, מסתעף אבי העורקים לשלושה עורקים גדולים: אחד פונה כלפי הצוואר והראש ושני האחרים פונים לבית החזה ולזרועות. אבי העורקים עצמו ממשיך כלפי מטה וממנו מסתעפים עורקים לעבר חלל החזה והבטן. העורקים הגדולים מסתעפים בגוף לעורקים צרים יותר, ואלה מסתעפים גם כן לעורקים שהולכים וקטנים. לעורקים הקטנים ביותר קוראים **עורקיקים** (arterioles). מכל עורקיק מסתעפים **נימים** (capillaries) רבים ואלה פרוסים כרשת רחבה וצפופה בין התאים. בין הנימים לתאים מתבצע מעבר החומרים וחילוף הגזים.

הנימים מתכנסים בקצותיהם ל**וורידונים** (venules), שהם רחבים ועבים יותר מן הנימים. הוורידונים מתלכדים ל**וורידים**, ואלה מתנקזים לוורידים גדולים יותר ויותר. הוורידים



אדום - דם עורקי עשיר בחמצן
כחול - דם ורידי עני בחמצן

מתלכדים אל שני הוורידים הגדולים ביותר – **הוורידים החלולים** (vena cava). **וריד חלול תחתון** מנקז אל הלב את הדם שחוזר מחלקי הגוף שנמצאים מתחת לבית החזה. **וריד חלול עליון** מנקז אל הלב דם שמגיע מן הראש ומחלקי הגוף העליונים (איור א-10). שני הוורידים החלולים מתחברים לצד הימני של הלב, והדם שנאסף מהגוף חוזר דרכם אל הלב.

מחזור הריאות

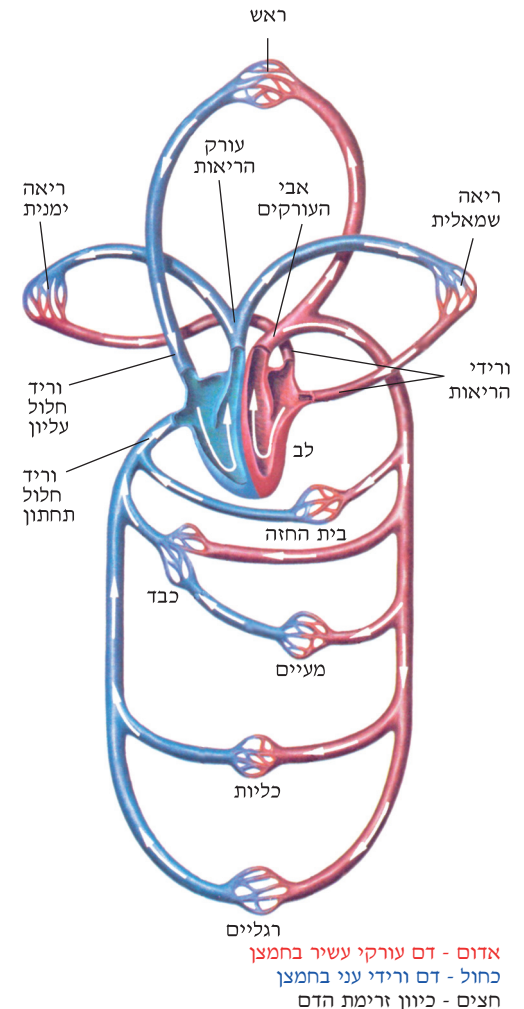
במחזור הריאות (איור א-10), דם עני בחמצן, שמגיע מכל חלקי הגוף אל הצד הימני של הלב, זורם ממנו אל הריאות דרך **עורק הריאות** (pulmonary artery). עורק הריאות מתפצל לשני עורקים: לעורק הריאה הימנית ולעורק הריאה השמאלית. העורקים בכל ריאה מסתעפים לעורקים קטנים יותר, ואלה מסתעפים לעורקים, המסתעפים לנימים. בנימים שבריאות מתבצעים חילופי הגזים, והדם העשיר בחמצן חוזר מן הריאות דרך ורידים, שמתלכדים ל**ווריד הריאות** (pulmonary veins), אל הצד השמאלי של הלב. למעשה, רק כאשר הדם מגיע אל הצד השמאלי של הלב, מסתיים מחזור זרימה שלם.

הלב

הזרימה המחזורית של הדם מתאפשרת הודות לפעילות הלב. הלב הוא איבר שבנוי משריר - שריר הלב. גודלו של הלב כגודל אגרופו של האדם שבגופו נמצא הלב, ומשקלו באדם בוגר הוא כ-300 גרם. הלב מונח במרכז בית החזה, בין הריאות, וקצהו התחתון פונה לצד שמאל. הלב של האדם הוא, למעשה, משאבת דחיסה כפולה שפועלת בפעילות. משאבה אחת דוחסת את הדם למחזור הגוף ומשאבה אחרת דוחסת את הדם למחזור הריאות. מבנה הלב מותאם לפעולה של הזרמת הדם בשני מחזורים.

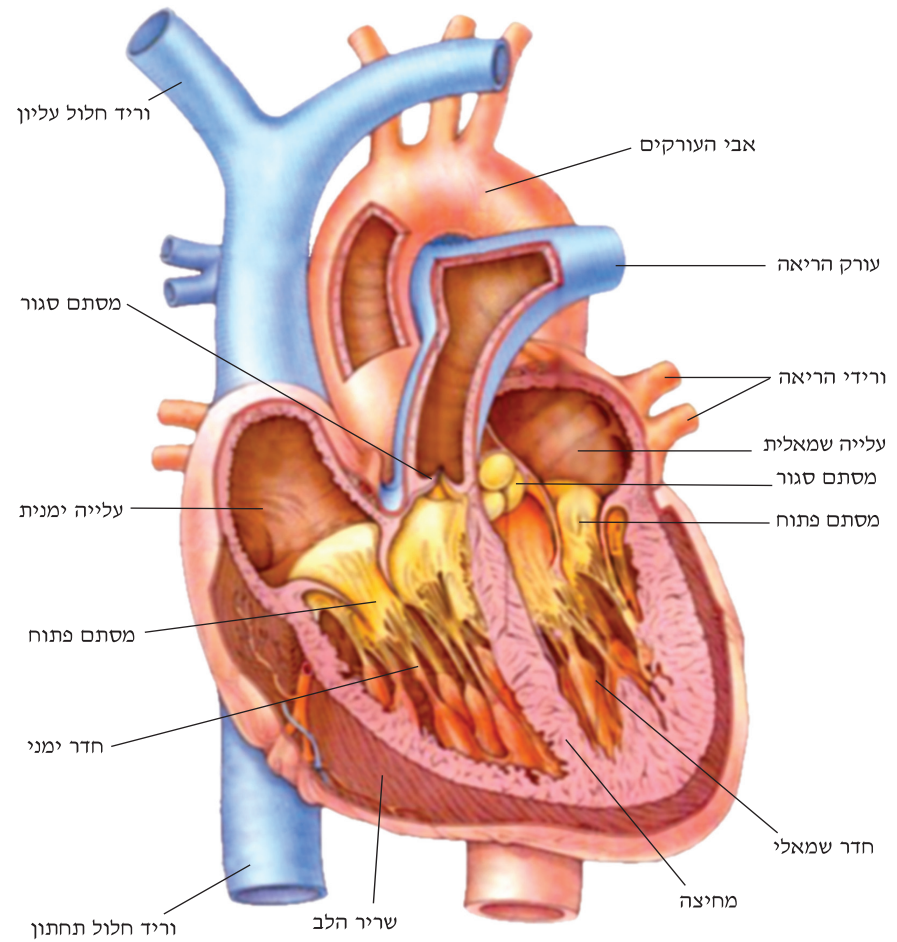
מבנה הלב

הלב מחולק לאורכו לשני חלקים (איור א-11), ובכל אחד מהם יש שני חללים: (א) חלל עליון, **עלייה** (atrium) שאליה נאסף הדם מן הוורידים הראשיים; (ב) חלל תחתון, **חדר** (ventricle) שממנו נדחס הדם אל העורקים הראשיים. בין הצד הימני לצד השמאלי של הלב יש **מחיצה** (septum) שמונעת מעבר דם מצד אחד לצד האחר. דופנות העליות



שימו לב שבאיור יש תמונת ראי של מחזור הדם; צד ימין של האיור הוא למעשה צד שמאל של מחזור הדם, וצד שמאל של האיור הוא צד ימין של מחזור הדם.

איור א-10: מחזור הדם הכפול באדם



איור א-11: מבנה הלב

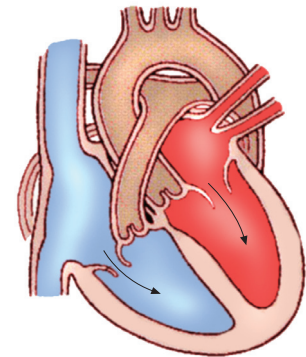
שימו לב שבאיור יש תמונת ראי של הלב; צד ימין של האיור הוא למעשה צד שמאל של הלב, וצד שמאל של האיור הוא צד ימין של הלב.

והחדרים בנויים מרקמת שריר לב. עובי הדפנות קובע את הכוח שיוכלו להפעיל החדרים או העליות כדי לדחוס את הדם מהם החוצה, כשהשריר מתכווץ. שתי העליות, שדוחסות את הדם אל החדרים שמתחתן צריכות להפעיל מעט כוח, יחסית, ולכן הדפנות השריריים שלהן דקים. לעומתן, שני החדרים דוחסים את הדם אל הריאות או לשאר חלקי הגוף והם בעלי דפנות שריריים עבים יותר. כל חדר מהווה משאבה שדוחסת את הדם למחזור אחר: החדר השמאלי דוחס את הדם למחזור הגוף, ואילו החדר הימני דוחס את הדם למחזור הריאות.

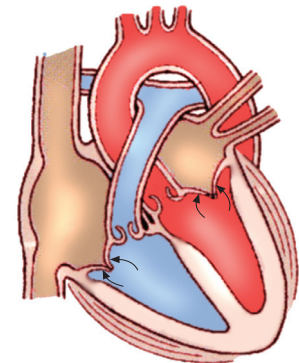
שני מחזורי הדם שונים מאוד באורכם ובמספר הכולל של כלי הדם שבהם זורם הדם. ההתנגדות לזרימת הדם גדולה יותר במחזור הגוף, בהשוואה להתנגדות במחזור הריאות ולכן, הדפנות של החדר השמאלי עבים יותר מהדפנות של החדר הימני.

זרימת הדם אל הלב, בתוך הלב ואל מחוץ ללב, היא חד-כיוונית ומוסתתת על ידי ארבעה **מסתמים** (valves), שניים בכל צד של הלב. המסתמים נפתחים ונסגרים לסירוגין ובכך מאפשרים מעבר חד-כיווני של דם בעת התכווצות הלב. פתיחת המסתמים וסגירתם היא פסיבית לחלוטין, והיא מופעלת על ידי זרימת הדם בלב. שני המסתמים שנמצאים בין העליות לבין החדרים נקראים **מסתמי מפרשים**, והם נפתחים בעת זרימת הדם מן העליות אל החדרים. הדם ש"מנסה" לחזור מן החדרים אל העליות גורם לסגירת מסתמי המפרשים, וכך נמנעת חזרתו של הדם מן החדרים אל העליות (איור א-12). שני מסתמים נוספים שנקראים **מסתמי כיסים** נמצאים בפתח העורקים הראשיים - אבי העורקים ועורק הריאה - במקום יציאתם מחדרי הלב. מסתמי הכיסים מבטיחים את הזרימה החד-כיוונית של הדם מן החדרים אל העורקים. בעת התכווצות הלב, מסתמי הכיסים נפתחים ומאפשרים זרימת דם אל העורקים; בעת הרפיית החדרים מסתמי הכיסים נסגרים ומונעים את זרימת הדם בחזרה אל החדרים.

הלב, כמו כל איבר בגוף, זקוק לדם עשיר בחמצן ובחומרי מזון כדי לפעול. הוא מקבל דם מכלי דם מיוחדים שנקראים **עורקים כליליים** (coronary arteries) (איור א-13). העורקים הכליליים מכתרים את הלב מכל עבריו (מכאן מקור השם: כליל=כתר, עטרה). מוצא העורקים הכליליים הוא באבי העורקים.



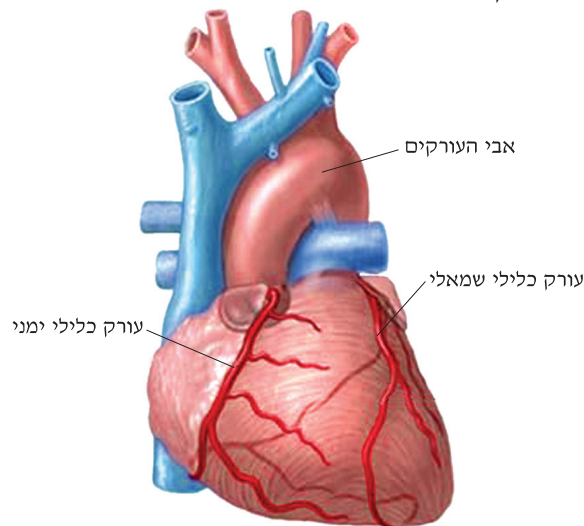
א. מסתמים פתוחים בין עליות לחדרים



ב. מסתמים סגורים בין עליות לחדרים

אדום - דם עורקי עשיר בחמצן
כחול - דם ורידי עני בחמצן

איור א-12: פתיחה וסגירה של מסתמים
בין עליות לחדרים (מסתמי מפרשים)



איור א-13: כלי הדם הכליליים

זרימת הדם בלב

בעזרת איור א-14 נעקוב אחר זרימת הדם בלב (עקבו אחר המספרים באיור).

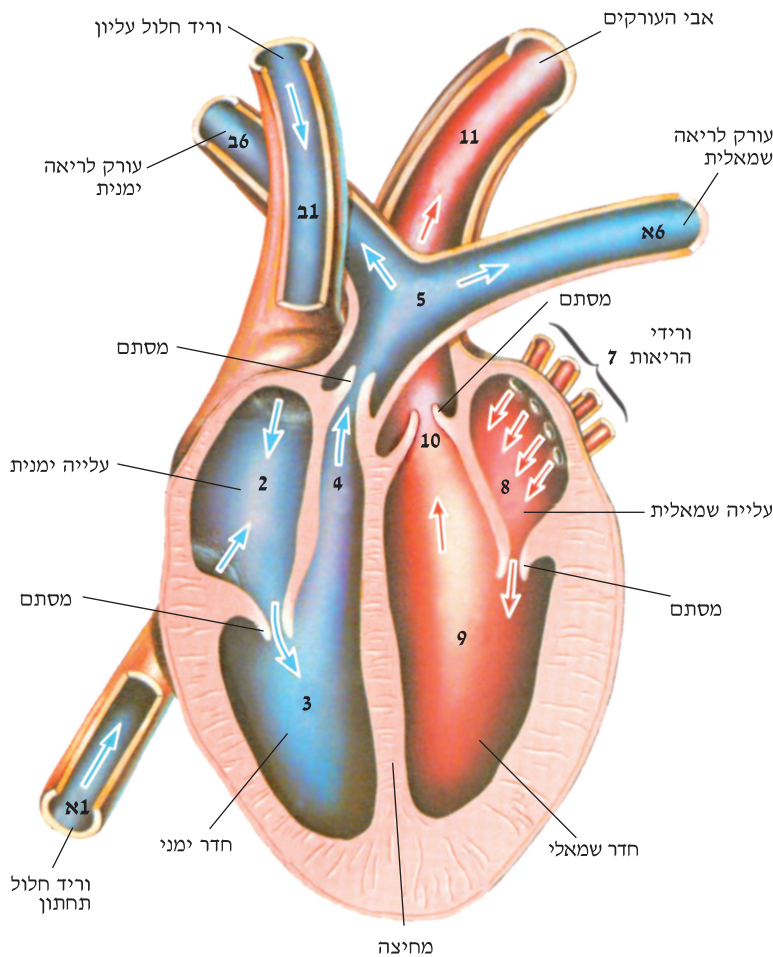
הדם חוזר מן הגוף אל הלב כשהוא עני בחמצן, באמצעות הווריד החלול התחתון (א1) והווריד החלול העליון (ב1). שני הוורידים החלולים מזרימים את הדם אל העלייה הימנית (2).

מן העלייה הימנית עובר הדם אל החדר הימני (3). מחלקו העליון של החדר הימני (4) עובר הדם אל עורק הריאה (5).

סמוך ליציאתו מהלב, מסתעף עורק הריאה לשני עורקים: אחד מוביל את הדם לריאה השמאלית (א6), והאחר - לריאה הימנית (ב6).

ארבעה ורידי הריאות (שניים מכל ריאה) (7) מזרימים דם עשיר בחמצן אל העלייה השמאלית (8).

מן העלייה השמאלית זורם הדם אל החדר השמאלי (9). מחלקו העליון של החדר השמאלי (10) נדחף הדם החוצה, דרך אבי העורקים (11) לכל חלקי הגוף.



אדום - דם עורקי עשיר בחמצן
 כחול - דם ורידי עני בחמצן
 חצים - כיוון זרימת הדם

איור א-14: זרימת הדם בלב

לפתוח את הלב – הכרת מבנה הלב של תרנגול הודו

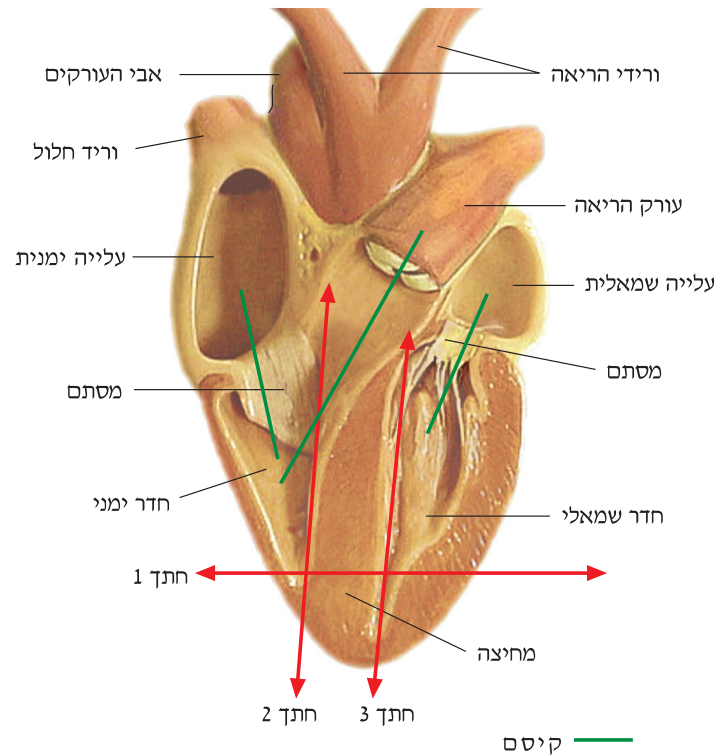


כלים וחומרים

משטח עבודה
סיכות
קיסמים
סכין חיתוך
מלקטת (פינצטה)
סרגל מדידה
לב של תרנגול הודו

מהלך העבודה

1. הסירו את הקרום המכסה את הלב (אם עדיין לא הוסר) וחשפו את הלב.
2. הניחו את הלב על משטח העבודה באופן שקצהו המחווד כלפי מטה, בסיסו העליון האדום כלפי מעלה וחלקו הקדמי מופנה אליכם.
3. התבוננו במבנה החיצוני של הלב.
 - א. זהו את כלי הדם הכליליים ותארו אותם.
 - ב. הסבירו את תפקידם.
4. זהו את העליות, פרסו אותן והצמידו אותן למשטח העבודה, באמצעות סיכות. הכניסו בזהירות שני קיסמים: אחד מן העלייה הימנית אל תחתית החדר הימני, והאחר מן העלייה השמאלית אל תחתית החדר השמאלי (איור א-15).
5. באמצעות סכין עשו חתך לרוחב הלב, בשליש התחתון (איור א-15, חתך 1). נתקו את קצה הלב כך שתוכלו לראות את שני החדרים ואת המחיצה שביניהם. קצות הקיסמים יאפשרו לאתר את החדרים.
6. מדדו את עובי הדפנות של (א) החדר הימני; (ב) החדר השמאלי; (ג) המחיצה.
 - א. רשמו את הממצאים.
 - ב. איזה חדר מותאם לעמוד בלחץ גבוה יותר? הסבירו.
 - ג. תארו את המחיצה והסבירו את חשיבותה.
7. עשו חתך לאורך דופן החדר הימני, סמוך למחיצה (איור א-15 חתך 2). פרסו את דופן החדר הימני והצמידו אותו בסיכות אל משטח העבודה.
 - א. תארו את ההבדלים בין העלייה לחדר.
 - ב. הסבירו מדוע יש הבדלים.



איור א-15: ניתוח הלב של תרנגול הודו

8. זהו את מסתם המפרש בין העלייה הימנית לחדר הימני.
 - א. תארו את מבנה המסתם.
 - ב. מהו תפקיד המסתם?
 - ג. כיצד תוכיחו שהמסתם הוא חד-כיווני?
9. חתכו את הדופן של החדר השמאלי לאורכו, סמוך למחיצה (איור א-15, חתך 3). פרסו את הדופן והצמידו אותו אל משטח העבודה, באמצעות סיכות. זהו את מסתם המפרש שבין העלייה השמאלית לחדר השמאלי.
 - א. ציירו את המסתם ותארו אותו.
 - ב. מה הם ההבדלים בין המסתם הזה לבין המסתם של החדר הימני?
10. החדירו בזהירות קיסם מן החדר הימני לתוך עורק הריאה (איור א-15).
 - א. האם הקיסם חדר בקלות? הסבירו.

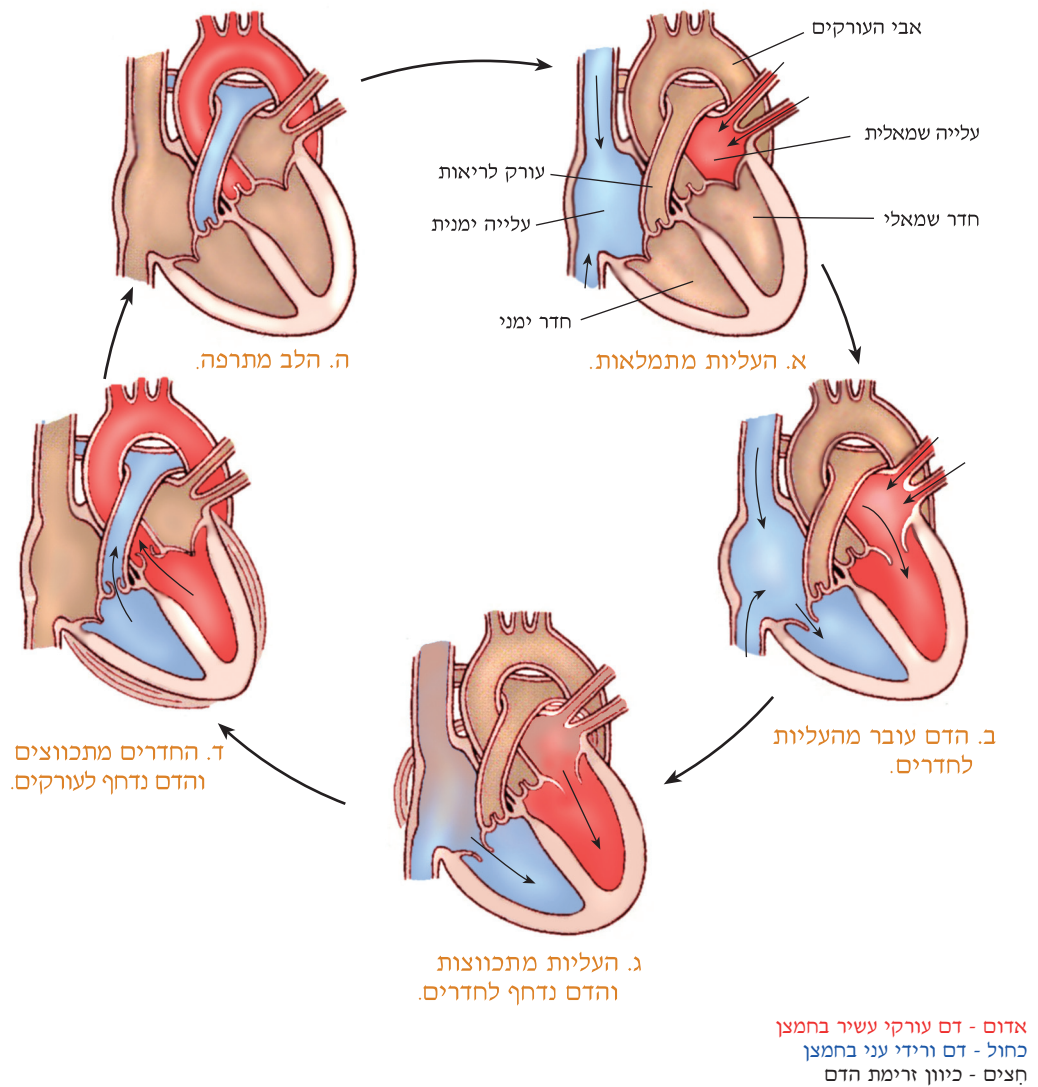
- ב. אילו ניסיתם להחדיר את הקיסם בכיוון ההפוך, האם היה אפשר לעשות זאת באותה מידה? הסבירו.
11. החדירו קיסם אחר, בדרך דומה, מן החדר השמאלי לאבי העורקים.
- א. התבוננו באבי העורקים ובעורק הריאה ותארו את צורתם.
- ב. מדדו את הקוטר ואת עובי הדופן של אבי העורקים ושל עורק הריאה. ציינו את ההבדלים ביניהם.
- ג. בדקו את גמישות העורקים. מהי חשיבותה של תכונה זו?
12. עשו חתך רוחב באבי העורקים ובעורק הריאה, סמוך ליציאה מן החדרים.
- א. זהו את מסתמי הכיסים, תארו אותם וציירו.
- ב. מהו תפקיד מסתמי הכיסים?
- ג. השוו בין מסתי המפרשים למסתמי הכיסים.

פעילות הלב

במשך יום אחד מבצע הלב יותר מ-100,000 פעולות דחיסה. פעולת דחיסה אחת, משלב חדירת הדם אל הלב ועד ליציאת הדם ממנו, נקראת **פעילת לב**. בכל פעימה זורם הדם בלב, מן העליות אל החדרים ומן החדרים אל העורקים. בפעימה אחת, הנמשכת כ-0.8 שניות, יש שלושה שלבים שמתרחשים בזה אחר זה: התכווצות העליות, התכווצות החדרים והרפיית הלב (איור א-16). שלבי ההתכווצות של העליות והחדרים נקראים **סיסטולה**. שלב ההרפיה של העליות והחדרים נקרא **דיאסטולה**. תהליך ההתכווצות וההרפיה מתרחש בו-זמנית בשני חלקי הלב - הימני והשמאלי.

בדיאסטולה הלב נמצא במצב הרפיה, העליות רפויות ורחבות, הלחץ בהן נמוך, והדם זורם לתוכן וממלא אותן (איור א-16, א). מסתמי המפרשים נפתחים ומאפשרים זרימה בכיוון אחד בלבד: מן העליות אל החדרים (איור א-16, ב). בשלב זה הלחץ בעליות גבוה מן הלחץ בחדרים, ולכן המסתמים נשארים פתוחים, והחדרים מתמלאים בהדרגה.

בסיסטולה חלה התכווצות קצרה ומהירה של שתי העליות. הלחץ בהן מגיע לשיאו והן דוחסות את יתרת הדם שהייתה בהן אל החדרים (איור א-16, ג). מיד לאחר התכווצות העליות, מתכווצים החדרים בעוצמה רבה. הלחץ שנוצר בהם סוגר את מסתמי המפרשים והדם אינו יכול לחזור לעליות. לעומת זאת, מסתמי הכיסים בפתחי העורקים נפתחים, והדם זורם מן החדרים לעורקים (איור א-16, ד): מן החדר הימני - לעורק הריאה, ומן החדר השמאלי - לאבי העורקים. לאחר שהעורקים התמלאו בדם, הלחץ שנוצר בפתחי העורקים סוגר את מסתמי הכיסים, והדם אינו יכול לחזור אל החדרים. מיד אחר כך מתרפה הלב והוא מוכן לפעימה הבאה (איור א-16, ה).



איור א-16: זרימת הדם בלב במחזור פעימה אחד

”דפיקות הלב” – קולות סגירת המסתמים



כאשר מאזינים ללב באמצעות סטטוסקופ שמוצמד לבית החזה, שומעים בדרך כלל שני צלילים. צליל אחד הוא קול סגירת מסתמי המפרשים וצליל אחר הוא קול סגירת מסתמי הכיסים. משך הזמן בו נשמעים שני הקולות מייצג את משך הסיסטולה - התכווצות הלב, ואילו ההפסקה בקולות מייצגת את הדיאסטולה - הרפיית הלב. נוסף לקולות סגירת המסתמים, ניתן לשמוע בעזרת הסטטוסקופ גם את קול זרימת הדם לתוך החדרים ועוד קול שקשור להתכווצות העליות. הקולות האלה מעידים על פעילות תקינה של הלב. אולם לעתים, נשמע גם רשרוש שעלול להעיד על פגם כלשהו בלב, למשל: זרימה במערבולות של הדם בין חלקי הלב. חשוב להדגיש שאצל אנשים רבים נשמע רשרוש שאינו נגרם כתוצאה מפגם בלב. רשרוש כזה הוא חסר חשיבות מבחינה רפואית. השימוש בסטטוסקופ מסייע לאבחון פגמים מסוימים בלב.

האזנה לקולות הלב באמצעות סטטוסקופ

1. הצמידו את הסטטוסקופ אל חלקו העליון של בית החזה, כעשרה ס"מ מתחת לבסיס הצוואר, מעט ימינה מן המרכז.
2. אתרו את האזור שבו קליטת הקולות היא הטובה ביותר והאזינו לקולות הלב של עצמכם. שימו לב לקצב הלב, לאיכותו ולעוצמת קולות הלב במנוחה.
 - א. מהו הקול הראשון בכל פעימה?
 - ב. מהו הקול השני בכל פעימה?
 - ג. תארו את מצב הלב כאשר לא נשמעים קולות.
3. בדקו את מספר הפעימות שלכם בדקה, בזמן מנוחה, ואת מספר פעימות הלב של שני תלמידים אחרים.
 - א. השוו את התוצאות שקיבלתם.
 - ב. אם נמצא הבדל, מה יכול להיות הגורם להבדלים האלה? הסבירו.
4. כדי להקשיב לקולות לב תקינים ולרשרושים, כפי שהם נשמעים באמצעות סטטוסקופ, היכנסו לאתר הזה: http://www.3m.com/us/healthcare/professionals/littmann/jhtml/littmann_heart_sounds.jhtml

השפעת הטמפרטורה על קצב פעימות הלב של דפניה



על השפעת הטמפרטורה על קצב פעימות הלב נוכל ללמוד ממעקב אחר פעולת הלב של סרטן מים - דפניה (איור א-17). הדפניה שייכת לקבוצת פרוקי הרגליים והיא בעלת מערכת דם פתוחה. היא חיה במים מתוקים, באגמים ובברכות. בגלל היותה זעירה ושקופה אפשר לראות את הלב שלה בהגדלה הקטנה של המיקרוסקופ, ולעקוב אחר פעימותיו.

הדפניה היא יצור פזיקלותרמי, כלומר: טמפרטורת הגוף שלה וחילוף החומרים בגופה מושפעים מטמפרטורת הסביבה (ראו עמ' 197). השינויים בקצב חילוף החומרים משפיעים על קצב פעולת הלב. בעבודה 3 נחקור את השפעת הטמפרטורה על קצב פעולת הלב בדפניה. אפשר לבצע את הבדיקה גם ביצורים אחרים שקופים למחצה, כמו ראשן.

כלים	חומרים
טפי בעל פייה רחבה	מי בריכה ובתוכם דפניות
זכוכיות נושאות ומכסות	קרח
צלחת פטרי גדולה	מים חמים בטמפרטורה של 40°C
צלחת פטרי קטנה	מי שלולית, רצוי מסוננים
2 פיפטות	
מזרק 10 מ"ל	
צמר גפן	
מדחום	
שעון עצר או שעון בעל שניות	
מיקרוסקופ	

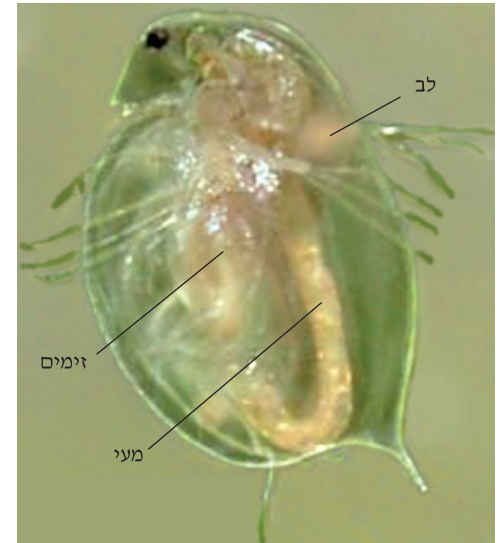
מהלך העבודה

- קחו חתיכה קטנה של צמר גפן והניחו אותה באמצע צלחת פטרי קטנה.
- בחרו דפניה אחת גדולה ובעזרת טפי העבירו אותה לצמר גפן. הוסיפו מיד מי שלולית לצלחת הפטרי עד שהדפניה תהיה מכוסה כולה במים.
- מדדו את טמפרטורת המים שבהם מצויה הדפניה ורשמו אותה.
- הניחו את צלחת הפטרי מתחת לעדשת המיקרוסקופ והסתכלו בלב הפועם. הלב ממוקם

- בצד הגבי מעל המעי (איור א-17). שימו לב שאתם אכן מסתכלים על פעימות הלב ולא על תנועות הזימים או תנועות המעי.
5. בעזרת שעון העצר, ספרו את פעימות הלב במשך 15 שניות. הכפילו את מספר הפעימות שהתקבל ב-4 כדי לקבל את מספר פעימות הלב בדקה, ורשמו את התוצאה. שימו לב, קצב פעימות הלב הוא מהיר מאוד ולכן רצוי לספור אותו על ידי סימון קווים על נייר.
 6. חזרו על הספירה שלוש פעמים וחשבו את מספר הפעימות הממוצע לדקה.
 7. הכניסו את הצלחת עם הדפניה לצלחת פטרי גדולה. מלאו את הצלחת הגדולה בקרח וחכו כחמש דקות. מדדו מדי פעם את טמפרטורת המים בצלחת הקטנה עד שהטמפרטורה תתייצב. רשמו את הטמפרטורה שאליה הגיעו המים בצלחת הקטנה.
 8. הניחו את הצלחת הקטנה כשבתוכה הדפניה מתחת לעדשת המיקרוסקופ וספרו (במהירות) את פעימות הלב של הדפניה, לפני שתשתנה הטמפרטורה. חשבו את מספר הפעימות הממוצע לדקה.
 9. שפכו את הקרח מן הצלחת הגדולה ומלאו אותה במים רותחים. הכניסו את הצלחת שבתוכה הדפניה לצלחת הגדולה וחכו כחמש דקות. הוציאו את הצלחת הקטנה שבתוכה הדפניה, שפכו את המים מן הצלחת הגדולה ומלאו אותה מחדש במים רותחים. חכו כחמש דקות נוספות, תוך כדי מדידת הטמפרטורה בצלחת הקטנה, עד שהטמפרטורה תתייצב. רשמו את הטמפרטורה שאליה הגיעו המים בצלחת הקטנה.
 10. בדקו את קצב פעימות הלב בטמפרטורה הגבוהה ורשמו את הקצב.
 11. סכמו את ממצאי העבודה:
- א. הכינו טבלה ורשמו בה את ממצאי הבדיקות.

הממוצע של מספר פעימות הלב בדקה	הטמפרטורה

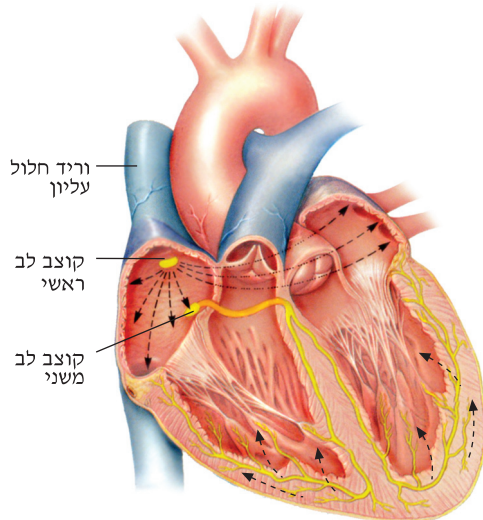
- ב. ציירו עקום שיתאר את השפעת הטמפרטורה על קצב פעימות הלב של הדפניה.
- ג. תארו את השפעת הטמפרטורה על קצב פעימות הלב של הדפניה והסבירו.
- ד. מהו היתרון שיש לדפניה מן העובדה שקצב פעימות הלב שלה משתנה בהתאם לטמפרטורת הסביבה?
- ה. אילו תוצאות היו מתקבלות, אם הניסוי היה מתבצע בעוף או ביונק? הסבירו.



איור א-17: דפניה

הפעילות החשמלית של הלב

אצל מבוגר, הלב פועם בקצב קבוע של כ-70 פעימות לדקה. היכולת לפעול בפעימות, ייחודית לשריר הלב, והיא נובעת מאופיה המיוחד של הפעילות החשמלית של הלב. כאשר מוציאים לב של בעל חיים ומניחים אותו בתמיסה מתאימה, הלב ממשיך לפעום במשך כמה שעות למרות היותו מנותק ממערכת העצבים. מכאן ניתן לשער שמקור הגירוי הוא בלב עצמו ולא במערכת העצבים. ואמנם, תפקודו התקין של הלב מתאפשר הודות לפיקוחה של מערכת הולכה חשמלית, המצויה בלב עצמו. המערכת הזאת מייצרת גירויים חשמליים קבועים וסדירים ומוליכה אותם לחלקי הלב השונים, במשך כל החיים. את הגירויים החשמליים מייצרים שני קוצבי לב (איור א-18). כל **קוצב לב** (pacemaker) מורכב מקבוצה של תאי שריר מיוחדים, בעלי מוליכות חשמלית גבוהה, אשר יכולים ליצור גירויים חשמליים. הגירויים החשמליים שנוצרים בקוצב הלב עוברים במהירות בלב, ובהגיעם אל שרירי החדר או אל שרירי העלייה הם גורמים להתכווצותם.



חצים - כיוון התפשטות הגירוי החשמלי

איור א-18: קוצבי הלב

בדופן האחורי של העלייה הימנית, במקום כניסת הוריד החלול העליון, נמצא קוצב שנקרא **קוצב הלב הראשי** שנקרא גם "קשת הגת". הגירויים החשמליים שקוצב הלב הזה מייצר מגיעים אל העליות וגורמים להן להתכווץ. הגירויים החשמליים עוברים מן העליות לחדרים דרך אזור שנמצא בין העלייה לחדר. האזור הזה נקרא **קוצב הלב המשני**. הגירוי בחדרים גורם להתכווצות הדרגתית של החדרים, ולהתרוקנות יעילה מדם. הפעולה המשותפת של שני קוצבי הלב יוצרת הדרגתיות בכיווץ של חלקי הלב השונים: רק לאחר שהעליות התכווצו ורוקנו את הדם שבתוכן לתוך החדרים, מתחילים החדרים להתכווץ. הפרש הזמן שבין התכווצות העליות להתכווצות החדרים הוא 0.2 שניות. הפרש הזמן הזה נוצר מכיוון שההולכה של הגירויים החשמליים דרך קוצב הלב המשני היא איטית בהשוואה להולכה החשמלית דרך קוצב הלב הראשי. פעילות קוצבי הלב מאפשרת תיאום מדויק בין פעולת חלקי הלב השונים, והדיוק הזה חיוני להזרמה סדירה של דם בזמן, בכיוון ובכמות המתאימים לצורכי הגוף.

קוצב לב מלאכותי

יש אנשים שסובלים מהפרעות בקצב הלב. הפרעות כאלה יכולות לבוא לידי ביטוי בדפיקות לב מהירות שמופיעות באופן פתאומי, בעייפות, בקוצר נשימה, בסחרחורת ובהתעלפויות. לעתים, האנשים האלה עלולים למות מדום לב או לסבול מאירוע מוחי.

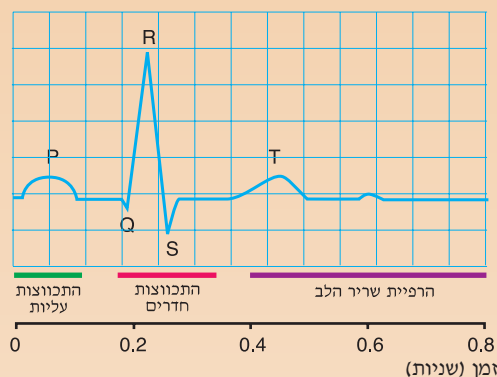


אחד הפתרונות לבעיות בפעילות קוצב הלב הוא השתלה של קוצב לב מלאכותי. קוצב הלב המלאכותי מחקה את פעולת קוצב הלב הטבעי, כלומר: הוא קובע באופן מלאכותי, את הקצב התקין של פעימות הלב. קוצב הלב המלאכותי מסוגל להתאים את קצב הלב לצרכים המשתנים של הגוף. הוא בנוי ממחשב קטן שמופעל על ידי סוללה חשמלית. הסוללה מייצרת גירוי חשמלי שעובר אל שריר הלב וגורם להתכווצותו, ויש להחליפה כל כמה שנים. הקוצב מוחדר אל מתחת לשרירי בית החזה בניתוח פשוט, בהרדמה מקומית, תוך כדי צילום רנטגן.

בדיקת אק"ג

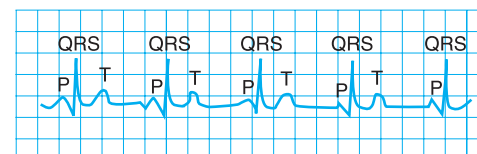


ליקויים בהולכה החשמלית של הלב אפשר לאבחן בעזרת בדיקת אק"ג. בדיקת אק"ג מתעדת את השינויים החשמליים שמתרחשים במהלך פעימות הלב. את השינויים החשמליים מודדים בעזרת אלקטרודות שאותן מחברים לידיים, לרגליים ולחזה. השינויים החשמליים נרשמים על נייר, והרישום שמתקבל נקרא אלקטרוקרדיוגרם (electrocardiogram) - רישום פעולות הלב או בקיצור אק"ג (ECG) (איור א-19).

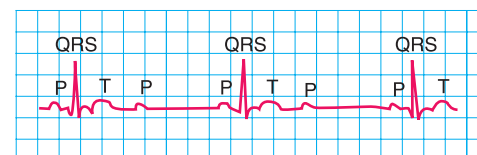


איור א-19: תרשים אק"ג של פעימת לב אחת

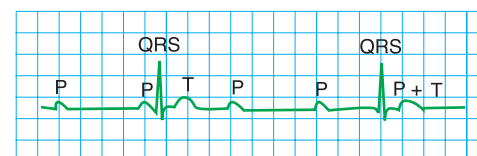
בתרשים אק"ג, גל P מציין את התכווצות העליות, גל QRS נוצר בתחילת התכווצות החדרים, וגל T מייצג את סיום התכווצות החדרים ואת תחילת ההרפיה של שריר הלב. כאשר יש בעיה בהולכה של שריר הלב, משתנה הדגם של האק"ג (איור א-20 ב, ג). על פי השינוי הרופא יכול לאבחן את הפגם שבלב.



א. תרשים אק"ג תקין



ב. תרשים אק"ג לא תקין



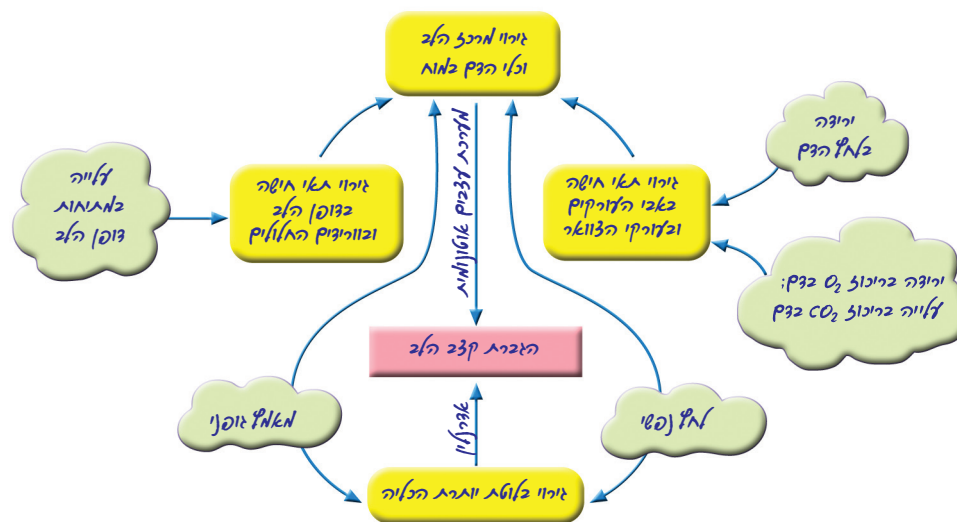
ג. תרשים אק"ג לא תקין

איור א-20: תרשימי אק"ג לא תקינים בהשוואה לתרשים תקין

ויסות קצב הלב

אמנם, קוצב הלב הראשי מפיק גירויים חשמליים באופן עצמאי, אך הוא מבוקר על ידי מערכת העצבים ועל ידי המערכת ההורמונלית, המגבירות את קצב הלב (איור א-21) או מאיטות אותו לפי צורכי הגוף.

הפיקוח העצבי על קצב פעולת הלב מבוצע על ידי מרכז שנמצא במוח המוארך (איור ב-17 בעמ' 111), ונקרא **מרכז הלב וכלי הדם**. מרכז הלב וכלי הדם מקבל גירויים מתאי עצב תחושתיים (תאי חישה) שנמצאים בלב, בוורידים החלולים, באבי העורקים ובעורקי הצוואר. בדופנות העלייה הימנית של הלב ובוורידים החלולים יש תאי חישה שקולטים גירויים של מתיחות בדפנות. כאשר נפח גדול של דם מגיע אל הלב, דופנות הלב נמתחים ותאי החישה המגורים מעבירים דחפים אל מרכז הלב במוח. מרכז הלב במוח שולח גירויים אל קוצב הלב הראשי באמצעות מערכת העצבים האוטונומית (ראו עמ' 38). הגירויים האלה מגבירים את קצב הלב ואת עוצמת ההתכווצות. נוסף לכך, באבי העורקים ובעורקי הצוואר יש תאי חישה שרגישים לשינויים בלחץ הדם. כאשר לחץ הדם בעורקים האלה נמוך, תאי החישה מעבירים את הגירוי למרכז הלב במוח, ומשם נשלחים גירויים, באמצעות העצבים, והגירויים האלה מגבירים את קצב הלב.



א'ור א-21: ויסות הגברת קצב הלב

גורם נוסף שמשפיע על הויסות העצבי של קצב הלב הוא שינוי בריכוזי החמצן וה- CO_2 בדם. שינוי הריכוז של החומרים האלה מעורר תאי חישה שנמצאים גם הם בדופנות אבי העורקים ובדופנות עורקי הצוואר. כשרמת החמצן בדם יורדת או כשרמת ה- CO_2 עולה, נשלח גירוי מתאי החישה האלה אל מרכז הלב שבמוח, והוא פועל להגברת קצב פעימות הלב. לשינוי בריכוזי הגזים בדם יש, בדרך כלל, השפעה פחותה על קצב הלב, בהשוואה לגורמים אחרים. במקביל לפעולת המערכת העצבית, מופעלת המערכת ההורמונלית. במצבי לחץ ובמאמץ גופני, בלוטת יותרת הכליה מפרישה את ההורמון **אדרנלין**, שמגיע באמצעות הדם אל הלב. האדרנלין מגביר את קצב פעולת הלב, בדומה למערכת העצבים (איור א-21). השוני בין שתי המערכות הוא בזמן התגובה ובמשך ההשפעה. מערכת העצבים מגיבה תוך 1-3 שניות והתגובה נמשכת זמן קצר. האדרנלין, לעומת זאת, משפיע תוך 20-30 שניות, והשפעתו נמשכת לאורך זמן. במצבים מיוחדים מערכת העצבים פועלת להאטת קצב הלב. כאשר, למשל, לחץ הדם באבי העורקים ובעורקי הצוואר גבוה, תאי החישה שרגישים לשינויים בלחץ הדם שולחים גירוי אל מרכז הלב וכלי הדם במוח. מן המוח נשלחים גירויים אל קוצב הלב הראשי שגורמים להאטת קצב הלב.

מערכת העצבים האוטונומית



מרכז הלב וכלי הדם שבמוח שולח גירויים אל קוצב הלב הראשי, באמצעות שלוחות עצבים של מערכת העצבים האוטונומית. מערכת העצבים האוטונומית מפקחת כמעט על כל הפעולות הקשורות לקיום ההומיאוסטזיס בגוף. היא מבקרת ומווסתת את פעילות הלב וכלי הדם, את מערכת הנשימה, את מערכת העיכול, את מערכת ההפרשה ואת ויסות טמפרטורת הגוף. פעולת מערכת העצבים האוטונומית היא עצמאית ובלתי רצונית ומכאן שמה. מערכת העצבים האוטונומית מורכבת משתי חטיבות אשר פועלות באופן מנוגד זו לזו: חטיבה פֶּאֶרְאֶסִימְפְּטִית וחטיבה סִימְפְּטִית. מן המוח מגיעים אל הלב עצבים של שתי החטיבות. גירוי החטיבה הפאראסימפתטית מאט את קצב הלב. גירוי החטיבה הסימפתטית מגביר את הקצב והעוצמה של התכווצות שריר הלב. בעת פעילות נמרצת או במצבי לחץ, כמו: מתח נפשי, התרגשות ופחד, החטיבה הסימפתטית משמשת כמערכת חירום המגויסת לפעולה.

תפוקת הלב

תפוקת הלב היא נפח הדם שמוזרם בדקה אחת מכל אחד מחדרי הלב. זוהי גם כמות הדם הכללית שזורמת במחזור הדם במשך דקה. תפוקת הלב באדם בוגר, במצב מנוחה, היא

5-6 ליטר. כמות הדם שמוזרמת מן הלב אל הגוף תלויה לא רק בקצב פעימות הלב, אלא גם בכמות הדם הנדחפת אל הגוף בכל פעימה - **נפח הפעימה**.
את תפוקת הלב ניתן לחשב כך:

תפוקת הלב (ליטר לדקה) = קצב הלב (פעימות לדקה) x נפח הפעימה (ליטר לפעימה)

לדוגמה, אצל אדם בוגר, במצב מנוחה, הלב פועם בקצב של 70 פעימות בדקה, ובכל פעימה נדחפים מן הלב אל הגוף 75 מ"ל דם. כלומר, תפוקת הלב במנוחה היא 5,250 מ"ל (5.25 ליטר) דם בדקה. הלב יכול להגיב לצרכים המשתנים של הגוף. לדוגמה, מתח או פעילות גופנית מעלים את תפוקת הלב, ומנוחה ורוגע נפשי מקטינים את תפוקתו.

תפוקת הלב במאמץ גופני

בזמן מאמץ גופני, דרושה אנרגיה רבה לפעילותם הנמרצת של שרירי הגוף. במצב כזה, מוגבר קצב חילוף החומרים של תאי השריר והם צורכים חמצן וגלוקוז בשיעור גבוה מן הרגיל, כדי להפיק אנרגיה בתהליך הנשימה התאית. במקביל, מוגבר גם קצב יצירת תוצרי הלוואי, ביניהם CO_2 , שיש להרחיק מן התאים. ככל שהרקמות יותר פעילות כך עולה הכמות של CO_2 בדם. תאי חישה בכלי הדם קולטים את העלייה בריכוז ה- CO_2 ומעבירים את הגירוי למרכז הלב במוח המוארך, ודרך מערכת העצבים הגירוי עובר ללב. הגירוי מגביר את קצב פעימות הלב ומגדיל את נפח הפעימה. בפעילות גופנית נמרצת, קצב הלב יכול לעלות ל-180 פעימות בדקה, נפח הפעימה יכול לעלות ל-110 מ"ל בדקה, ותפוקת הלב - ל-21 ליטר דם בדקה. בזמן פעילות גופנית, תפוקת הלב יכולה אפוא לגדול פי 4 בהשוואה לתפוקת הלב במצב מנוחה. לבם של אנשים בעלי כושר גופני, פועם פחות פעמים בדקה, הן בזמן מנוחה והן בזמן פעילות, בהשוואה ללבם של אנשים שאינם עוסקים בפעילות גופנית. אימון גופני לאורך זמן ובאופן קבוע, מחזק את שריר הלב ומגדיל את נפח חללי הלב, וכתוצאה מכך בכל פעימה נדחסת כמות גדולה יותר של דם מן הלב, כלומר, נפח הפעימה גדל. לדוגמה, קצב הלב של רץ מרתון בזמן מנוחה יכול להיות 50 פעימות בדקה, ונפח הפעימה 105 מ"ל, כלומר, תפוקת הלב שלו היא 5,250 מ"ל דם בדקה. כדי שאדם שאינו מתאמן יגיע לתפוקת לב כזאת, לבו צריך לפעום בקצב של 70 פעימות בדקה.

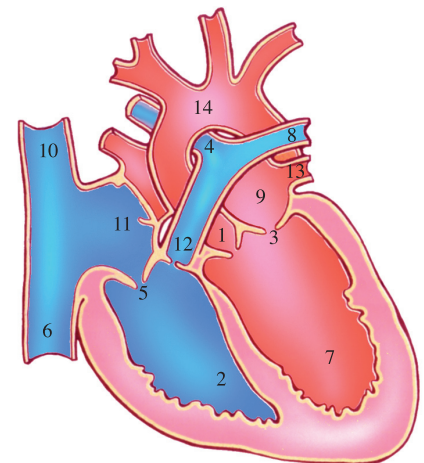
סיכום

- מערכת הדם בגוף מורכבת ממחזור דם כפול: מחזור הגוף (המחזור הגדול) ומחזור הריאות (המחזור הקטן). במחזור הגוף, דם עשיר בחמצן יוצא מן הלב, זורם אל כל חלקי הגוף

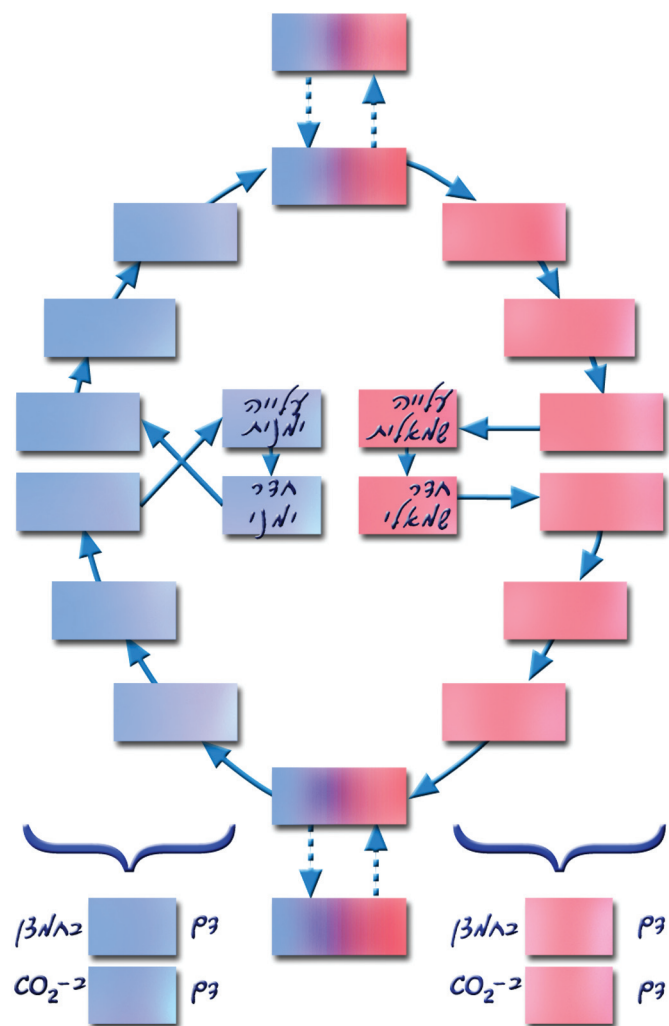
- וחוזר אל הלב כשהוא עני בחמצן. במחזור הריאות, דם עני בחמצן, שמגיע מכל חלקי הגוף אל הלב, זורם ממנו אל הריאות, ודם עשיר בחמצן חוזר מן הריאות אל הלב.
2. הלב הוא שריר המתפקד כמשאבת דחיסה. הוא קולט מן הגוף דם עני בחמצן ועשיר ב- CO_2 ומזרים דם עשיר בחמצן אל כל חלקי הגוף.
 3. הלב מחולק לאורכו לשני חלקים: ימני ושמאלי. בכל חלק יש חדר ועלייה ובין החדר לעלייה יש מעבר. בין הצד הימני לצד השמאלי יש מחיצה שמונעת מעבר של דם מצד לצד.
 4. בין העליות לחדרים ובין החדרים לעורקים נמצאים מסתמים שמאפשרים זרימה חד-כיוונית בלבד. כיוון הזרימה הוא מן העליות אל החדרים ומן החדרים אל העורקים.
 5. פעימת הלב מורכבת משלב הסיסטולה - התכווצות העליות והחדרים, ומשלב הדיאסטולה - הרפיית העליות והחדרים.
 6. דם עני בחמצן, שמגיע מן הגוף, זורם אל העלייה הימנית, ממנה אל החדר הימני ומשם אל הריאות. באותו זמן, דם עשיר בחמצן זורם מן הריאות אל העלייה השמאלית, משם אל החדר השמאלי ומשם - אל הגוף.
 7. בזמן מנוחה הלב מתכווץ כ-70 פעם בדקה. במצבים מיוחדים, כגון: פעילות גופנית נמרצת, סכנה או מחלה, עולה קצב פעימות הלב והוא עשוי להגיע ל-180 פעימות בדקה ואף יותר.
 8. קצב פעולתו של הלב מבוקר על ידי מערכת העצבים ומערכת ההורמונים, והוא מושפע משינויים במתיחות של דופן הלב, משינויים בריכוז החמצן וה- CO_2 בדם, ומשינויים בלחץ הדם.
 9. קוצבי הלב שולחים גירויים חשמליים שגורמים להתכווצות ולהרפייה של כל תאי שריר הלב באותו הקצב.
 10. קצב הלב הוא מספר הפעימות של הלב בדקה. נפח הפעימה הוא נפח הדם שהחדר (שמאלי או ימני) דוחס לעורק במהלך פעימת לב אחת. תפוקת הלב היא נפח הדם שהחדר (שמאלי או ימני) דוחס לעורק בדקה (מכפלה של קצב הלב בנפח הפעימה).
 11. אדם שעוסק בפעילות גופנית הוא בעל קצב לב נמוך יותר, בהשוואה לאדם שאינו עוסק בפעילות גופנית.



1. באיור א-22 חסרים השמות של חלקי הלב. במקומם מופיעים מספרים. רשמו את השם המתאים לכל חלק. היעזרו ברשימה הזאת: עלייה ימנית; חדר ימני; עלייה שמאלית; חדר שמאלי; אבי העורקים; וריד חלול עליון; וריד חלול תחתון; ורידי הריאה; עורק ריאה ימני;



איור א-22: מבנה הלב



איור א-23: מחזור הגוף ומחזור הריאות

עורק ריאה שמאלי; מסתם מפרש ימני; מסתם מפרש שמאלי; מסתם כיס ימני; מסתם כיס שמאלי.

2. דרגו את הרקמות לפי סדר יורד של רמת החמצן שיש בהן.

עלייה ימנית; עורקי הריאה; עורקי הגוף; עלייה שמאלית; עורקים בגוף; נימים בגוף; חדר שמאלי; ורידים בגוף; חדר ימני; ורידונים בגוף; אבי העורקים; ורידים חלולים; ורידי הריאות.

3. העתיקו את התרשים המתאר את מחזור הגוף ואת מחזור הריאות (איור א-23). החצים המלאים באיור מציינים את כיוון זרימת הדם;

החצים המקווקווים מציינים את כיוון מעבר הגזים. א. השלימו את המושגים החסרים באיור. היעזרו ברשימת המושגים הזאת: עשיר, עני, נימים, נימים בריאות, עורקים, עורקים בריאות, ורידים, ורידים בריאות, ורידי הריאה, עורק הריאה, ורידונים, ורידונים בריאות, ריאות, תאי גוף. (שימו לב! יש מושגים שיופיעו בתרשים יותר מפעם אחת).

ב. בצבע אחד צבעו בתרשים את החצים המציינים את זרימת הדם במחזור הגוף, ובצבע אחר - את החצים המראים את הזרימה במחזור הריאות.

4. העתיקו את המשפטים שלפניכם והשלימו אותם בעזרת המלים האלה: נפתחים, נסגרים, מתכווצים/ות, נרפים/ות, הוורידים, העורקים, החדרים, העליות, עולה, יורד. (שימו לב! יש מושגים שיופיעו במשפטים יותר מפעם אחת).

בדיאסטולה, העליות והחדרים _____, הלחץ בהם _____ ודם זורם מן _____ הראשיים אל _____. כתוצאה מכך, הלחץ בעליות _____, מסתמי המפרשים _____ ודם זורם מן _____ אל _____.

בסיסטולה, העליות _____ ויתרת הדם עוברת מן _____ אל _____. מיד אחר כך, החדרים _____ והלחץ בהם _____. כאשר הלחץ בחדרים הוא מרבי, מסתמי המפרשים _____, ואילו מסתמי הכיסים _____. במצב הזה, דם זורם מן _____ אל _____ הראשיים. כאשר הלחץ בעורקים הראשיים _____, מסתמי הכיסים _____.

5. בטבלה א-1 מתוארת ההשפעה של מאמץ גופני על משך השלבים של פעימת הלב.

טבלה א-1: השפעת מאמץ גופני על משך שלבי פעימת הלב

בעת מאמץ גופני	בעת מנוחה	
0.16	0.27	משך הסיסטולה (בשניות)
0.14	0.53	משך הדיאסטולה (בשניות)

א. חשבו את משך פעימת הלב בעת מנוחה ובעת מאמץ גופני.

ב. כיצד משפיע המאמץ הגופני על משך הפעימה, על משך הסיסטולה ועל משך הדיאסטולה? הסבירו את התופעה.

ג. האם היחס בין משך הסיסטולה לבין משך הדיאסטולה נשאר זהה בעת מנוחה ובעת מאמץ גופני? הסבירו את התופעה.

6. באיור א-24 מוצגים תרשימי אק"ג של שני נבדקים, במצב מנוחה ובפעילות גופנית. אחד הנבדקים הוא אדם מאומן (אתלט) והאחר בלתי מאומן. לגבי כל תרשים, ציינו מי הוא הנבדק ובאיזה מצב נעשתה הבדיקה (תרשים אחד מתאים לשני הנבדקים).

7. טבלה א-2 מתארת את השפעת האימון והמאמץ הגופני על קצב הלב ונפח הפעימה.

טבלה א-2: השפעת האימון והמאמץ הגופני על קצב הלב ונפח הפעימה

קצב הלב (פעימות/דקה)	נפח הפעימה (מ"ל)	
70	75	אדם בלתי מאומן במנוחה
55	95	אדם מאומן במנוחה
190	110	אדם בלתי מאומן במאמץ מרבי
190	132	אדם מאומן במאמץ מרבי

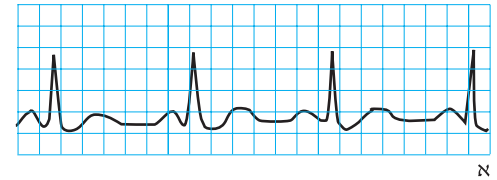
א. חשבו את תפוקת הלב בארבעת המצבים.

ב. פי כמה גדולה תפוקת הלב במאמץ מרבי בהשוואה למצב מנוחה אצל אדם מאומן, ופי כמה אצל אדם לא מאומן?

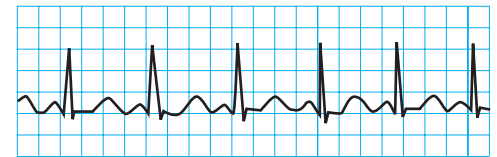
ג. הסבירו כיצד השינוי בתפוקת הלב בזמן מאמץ מותאם לצורכי הגוף.

ד. כיצד תורם העיסוק בפעילות גופנית לבריאות?

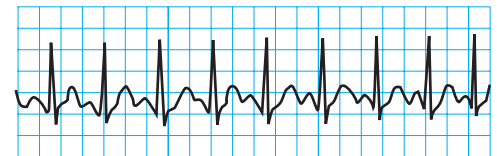
ה. הסבירו כיצד לומדים זאת מן הנתונים שבטבלה.



א

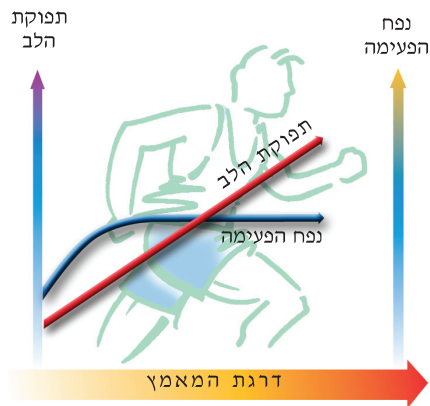


ב

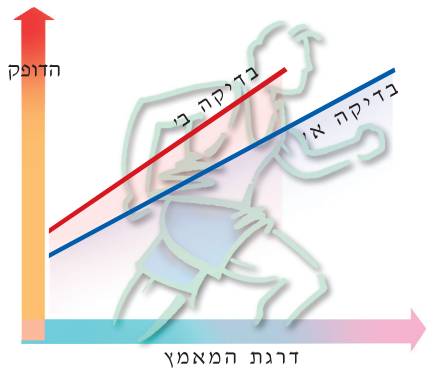


ג

איור א-24: תרשימי אק"ג



איור א-25: השפעת המאמץ הגופני על תפוקת הלב ועל נפח הפעימה



איור א-26: שינויים בדופק כתגובה למאמץ גופני בשתי רמות של כושר גופני

8. העקומים באיור א-25 מתארים את ההשפעה של דרגת המאמץ הגופני על תפוקת הלב ועל נפח הפעימה.

א. תארו את הקשר שבין דרגת המאמץ הגופני ובין תפוקת הלב.

ב. תארו את הקשר שבין דרגת המאמץ הגופני ובין נפח הפעימה.

ג. הסבירו מדוע בשלב מסוים נפח הפעימה מפסיק לגדול למרות העלייה בדרגת המאמץ.

ד. הסבירו מדוע העקומים אינם מתחילים מראשית הצירים (מאפס).

ה. מה הקשר בין תפוקת הלב לנפח הפעימה?

ו. כיצד עולה תפוקת הלב כאשר נפח הפעימה נשאר קבוע?

9. העקומים באיור א-26 מתארים תגובת דופק (קצב לב) בשתי בדיקות שנעשו אצל גבר שמבצע אותה פעילות גופנית. בדיקה אחת נעשתה כאשר הנבדק היה בכושר גופני לקוי, והבדיקה האחרת נעשתה לאחר כמה חודשים של אימון גופני, שבהם השתפר כושרו הגופני. איזו מן הבדיקות מעידה על כושר גופני טוב יותר? הסבירו.

10. במצבי לחץ או במאמץ גופני עולה קצב פעימות הלב.

א. אילו מערכות מווסתות את קצב הלב במצבים האלה?

ב. מה היתרון בקיומן של שתי מערכות מקבילות לוויסות קצב הלב?

ג. גם בעת מחלה עולה קצב הלב. מהי החשיבות של הגברת קצב הלב במצבי לחץ, במאמץ גופני ובעת מחלה?



יישום מחשב, שעוסק במבנה הלב ותפקודו, נמצא ביחידת הלימוד **תפקוד הלב ומערכת**

הדם באתר http://agribio.snunit.k12.il/main/upload/ab/id_heart.html

ביישום **מבנה הלב ותפקודו** לומדים בצורה הדרגתית על מבנה הלב ועל התפקוד שלו, תוך כדי ניתוח אינטראקטיבי מונחה של אנימציה שממחישה את פעולת הלב. ביישום יש גם הפניות לאתרים אחרים.

כלי הדם וזרימת הדם

מערכת הלב וכלי הדם היא כה יעילה בגוף האדם, עד כי כל הדם שבגוף (5-6 ליטר) מגיע לכל אזורי הגוף במשך פחות מדקה. אספקת דם רצופה ומהירה מגיעה אל תאי הגוף הודות לפעולתו הבלתי פוסקת של הלב, והודות למבנה המיוחד של כלי הדם. ליונקים יש שלושה סוגים של כלי דם: עורקים, ורידים ונימים. הבסיס להגדרתם של כלי הדם הוא כיוון הזרימה של הדם.

בעורקים זורם הדם מן הלב לעבר חלקי הגוף האחרים;

בוורידים זורם הדם מחלקי הגוף אל הלב;

בנימים זורם הדם מעורק לעורק.

מבנה כלי הדם

כל כלי הדם הם למעשה צינורות חלולים והם נבדלים זה מזה בקוטר החלל ובעובי הדפנות שלהם. העורקים והוורידים הקרובים ביותר ללב הם כלי הדם הרחבים ביותר, הן מבחינת קוטר חללם והן מבחינת עובי דופןותיהם (טבלה א-3). ככול שכלי הדם מסתעפים ומתרחקים מן הלב, כך נעשה הקוטר שלהם קטן וגם עובי הדופן שלהם קטן. קוטר החלל של אבי העורקים הוא 26 מ"מ (כמו קוטר של צינור השקיה ביתי). הקוטר של נים הוא רק 0.001 מ"מ, כלומר: העובי של 10 נימים יחד שווה לעובי של שערה אחת.

דופן כלי הדם בנוי משלוש שכבות (איור א-27):

שכבה חיצונית - מורכבת מ**רקמת חיבור** בשילוב עם סיבים אלסטיים (קפיציים), שמקנים גמישות לכלי הדם. דרך רקמת החיבור עוברים כלי דם קטנים שמזינים את תאי הדופן. כלי הדם הקטנים חסובים במיוחד כשהם נמצאים בצינורות הגדולים שדופןותיהם עבים מאוד.

שכבה אמצעית - מורכבת בעיקר מ**סיבי שריר** טבעתיים שמחוברים ביניהם על ידי רקמת חיבור וכן מסיבים אלסטיים. סיבי השריר מסוגלים להרחיב ולהצר את כלי הדם והסיבים האלסטיים תורמים לגמישותם.

שכבה פנימית - מרפדת את החלק הפנימי של כלי הדם. שכבה זו בנויה משכבת **תאי אנדותל** שטוחים וצפופים, שיוצרים משטח חלק. שכבת האנדותל מפחיתה את החיכוך של הדם בדופן הצינורות ומונעת קרישת דם בתוכם. את שכבת האנדותל עוטף **קרום בסיס** שמורכב מחלבונים ומסוכרים.

טבלה א-3: קוטר החלל ועובי הדופן של כלי הדם השונים

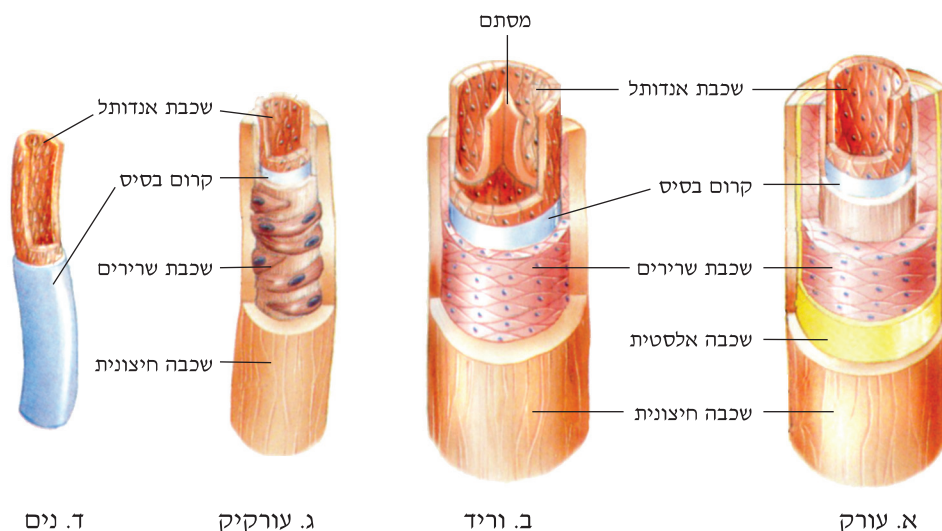
סוג כלי הדם	קוטר החלל (מ"מ)	עובי הדופן (מ"מ)
אבי העורקים	26	3
עורק	4	1
עורקיק	0.03	0.02
נים	0.007	0.001
ורידון	0.02	0.002
וריד	6	0.5
וריד חלול	32	1.5

כלי הדם שונים זה מזה במבנה הדפנות שלהם (איור א-27), והמבנה שלהם מותאם לתפקיד המיוחד של כל כלי דם.

דופן העורקים עבה ואלסטי (איור א-27, א). הדם שזורם בעורקים נדחף מן הלב בלחץ חזק. הדפנות העבים והאלסטיים של העורקים מקנים להם גמישות, ומאפשרים התרחבות של העורקים וחזרה לקוטר המקורי. האלסטיות מקנה עמידות ללחץ הדם ומאפשרת את הזרימה המהירה. ככול שהעורקים קרובים יותר ללב הם בנויים מדופן עבה יותר, שמכיל יותר סיבים אלסטיים. לעומתם, העורקים המרוחקים מן הלב, מכילים פחות סיבים אלסטיים ויותר סיבי שריר. לעורקים המתפצלים מן העורקים יש דפנות דקים יותר ויש בהם כמות רבה יותר של סיבי שרירים טבעתיים (איור א-27, ג).

דופן הוורידים דק יותר ופחות גמיש מדופן העורקים. הזרימה בוורידים בכיוון אל הלב הרבה יותר איטית, ונעשית בלחץ נמוך בהרבה מזה שבעורקים. דופנות הוורידים, בעלי האלסטיות הנמוכה, עומדים בלחץ הזה ללא קושי. בדופנות הוורידים יש מסתמים שמאפשרים זרימה בכיוון אחד בלבד, ומונעים זרימה בכיוון ההפוך (איור א-27, ב).

דופן הנימים בנוי משכבה אחת של תאי אנדותל, והם מסודרים בצפיפות זה לצד זה (איור א-27, ד). במקומות החיבור שבין תאי האנדותל יש נקבים קטנים. הדפנות הדקות החד-שכבתיות של הנימים והמרווחים בין התאים בדופן מאפשרים מעבר יעיל של חומרים מן הדם שבנימים לתאים.



איור א-27: מבנה הדופן של כלי הדם

זרימת הדם בכלי הדם

זרימת הדם בגוף מתאפשרת הודות למפל בלחץ הדם, לאורך מסלול הזרימה (איור א-28). **לחץ הדם** (blood pressure) הוא הלחץ שמפעיל הדם על דופן כלי הדם עקב התכווצויות הלב.

מדוע נוצר מפל בלחץ הדם לאורך מסלול הזרימה?
בתחילת המסלול של תנועת הדם, הלב הפועם יוצר לחץ דם גבוה. ההשפעה של התכווצות הלב הולכת ופוחתת ככול שמתרחקים מן הלב, בגלל החיכוך של הדם בדופנות הצינורות. לכן, בסוף המסלול לחץ הדם נמוך יותר מאשר בתחילתו. הדם זורם תמיד מן האזור שבו לחץ הדם גבוה אל האזור שבו הלחץ נמוך יותר. בנקודת ההתחלה, בחדר השמאלי של הלב ובאבי העורקים, לחץ הדם הוא הגבוה ביותר, ובנקודה של השלמת המחזור, בכניסה לעלייה הימנית, הלחץ הוא הנמוך ביותר. במחזור הריאות יש מצב דומה: הלחץ בחדר הימני הוא הגבוה ביותר, והלחץ בכניסה לעלייה השמאלית הוא הנמוך ביותר. כך נוצרים מפלי לחצים שמאפשרים זרימה רצופה של הדם בכל אחד מן המחזורים.

קצב זרימת הדם

הזרימה במחזור הדם אמנם רציפה אך הקצב שלה משתנה לאורך מסלול הזרימה והוא מושפע בעיקר משני גורמים: (א) קוטר כלי הדם, (ב) התנגדות כלי הדם לזרימה. ככול שכלי הדם צר יותר, כך הזרימה בו מהירה יותר. ניתן להשוות זאת למים שזורמים בנהר: כאשר המים עוברים מקטע שבו הנהר רחב לקטע שבו הנהר צר, הזרימה נעשית מהירה יותר. באבי העורקים הדם זורם במהירות של 500 מ"מ לשנייה, ואילו בנימים המהירות היא 0.5 מ"מ לשנייה. לכאורה, יש סתירה בין הנתונים האלה ובין הקביעה שהזרימה מהירה יותר בכלי דם צר. אולם, יש להביא בחשבון שבאבי העורקים, בכל מחזור, עוברת כל כמות הדם המוזרמת לגוף בפעימה אחת, ואילו בכל נים זורם דם בכמות שהיא פחות מאחד חלקי מיליארד של אותה כמות. לכן, את ההשוואה הנכונה יש לעשות בין זרימת הדם באבי העורקים לבין זרימת הדם בכל הנימים בגוף. מאחר שהדם שיוצא מן הלב בפעימה אחת מתפזר בין כל נימי הדם, יש להתייחס אל כל הנימים כאילו הם צינור דם אחד. סכום הקוטר של כל נימי הדם בגוף קרוב ל-38 ס"מ. כלומר: כלל הנימים בגוף מצטרפים לצינור שרוחבו גדול בהרבה מרוחבו של אבי העורקים, ולכן הזרימה בהם איטית בהרבה מהזרימה באבי העורקים.

כאשר משווים בין מהירויות זרימה של נוזל בצינורות, נוח יותר להתייחס לשטח של חתך הרוחב של הצינור (שטח העיגול שמתקבל אם חותכים את הצינור לרוחבו) ולא לקוטר שלו.

במערכת הדם יש להתייחס לשטח חתך הרוחב הכללי של צינורות הדם. שטח חתך רוחב כללי הוא סכום שטחי הרוחב של כל צינורות המערכת. כך למשל, שטח חתך הרוחב הכללי של נימי הדם הוא סכום שטחי הרוחב של כל הנימים בגוף. שטח חתך הרוחב הכללי של כלי הדם השונים ומהירות הזרימה בהם מובאים בטבלה א-4.

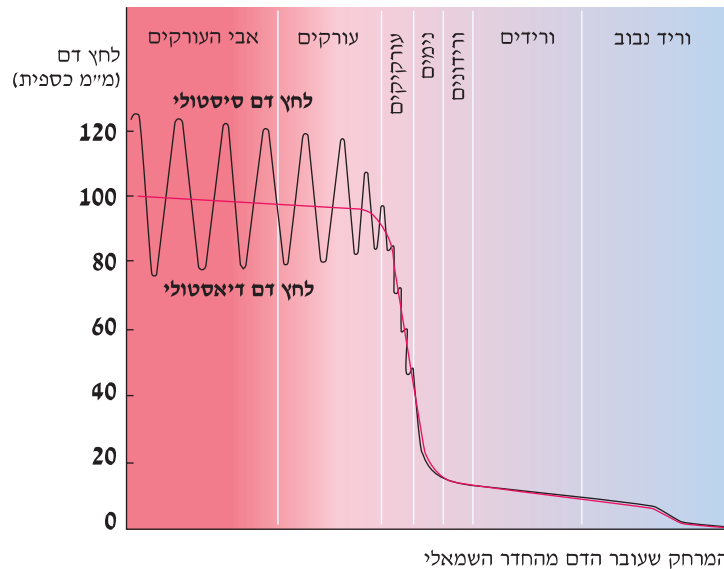
טבלה א-4: השטח של חתך הרוחב הכללי של כלי הדם ומהירות הזרימה בהם

סוג כלי הדם	השטח של חתך הרוחב הכללי (סמ"ר)	מהירות הזרימה הממוצעת (מ"מ לשנייה)
אבי העורקים	4.5	450
עורקים	20	250
עורקים	400	50
נימים	4,500	0.5
ורידונים	3,000	15
ורידים	40	30
וריד חלול	18	100

גורם חשוב נוסף שמשפיע על קצב זרימת הדם הוא ההתנגדות לזרימה. ככול שההתנגדות לזרימה גדולה יותר, כך קצב הזרימה איטי יותר. בעורקים, יש התנגדות רבה מאוד לזרימה בגלל מידת האלסטיות של דופנות העורקים שהיא נמוכה מאוד. זאת ועוד, שטח פני הדפנות של העורקים, שבא במגע עם הדם, הוא עצום ולכן החיכוך גדול. ההתנגדות של העורקים לזרימת הדם נקראת **התנגדות היקפית** (משום שהעורקים מצויים בהיקף הגוף).

לחץ הדם

כדי לאפשר זרימה מהירה של דם, לאורך כל המחזור, זרימה שתספק את צורכי הגוף, **לחץ הדם העורקי** חייב להיות גבוה במידה מספקת. פעולת הדחיפה של הלב בצד האחד של העורקים, וההתנגדות ההיקפית של העורקים בצד האחר, גורמים ללחץ דם גבוה בעורקים (איור א-28).



איור א-28: לחץ הדם בכלי הדם השונים

לחץ הדם בעורקים אינו קבוע; הוא משתנה בתנודות חדות מאוד. התנודות בלחץ הדם הן תוצאה של התכווצות החדרים בהתאם לפעימות הלב. למרות העובדה שהחדרים מזרימים דם אל אבי העורקים אך ורק בשלב הסיסטולה (שלב התכווצות העליות והחדרים), זרימת הדם בעורקים היא רציפה; כאשר החדר השמאלי מתכווץ ומזרים דם לאבי העורקים, לחץ הדם שבאבי העורקים עולה ודופנותיו מתרחבים. בשלב הדיאסטולה (שלב ההרפיה של העליות והחדרים), כאשר החדר השמאלי מפסיק להתכווץ ולהזרים דם אל אבי העורקים, חוזרים דופנותיו של אבי העורקים למצבם הרגיל. הודות לכך, הלחץ בעורקים אינו יורד לאפס וגם בשלב הדיאסטולה עדיין יש לחץ בעורקים, והדם ממשיך לזרום מן העורקים לעורקים.

לחץ הדם הנמדד בעורקים הגדולים בשלב הסיסטולה נקרא **לחץ דם סיסטולי**, וערכו הממוצע (הנמדד בעורק הזרוע) במצב מנוחה, אצל אדם בריא הוא 120 מ"מ כספית. לחץ הדם הנמדד בשלב הדיאסטולה נקרא **לחץ דם דיאסטולי**, וערכו הממוצע (בעורק הזרוע) במצב מנוחה הוא

מ"מ כספית - יחידה למדידת לחץ; 1 מ"מ כספית הוא הלחץ שעמוד כספית בגובה 1 מ"מ יוצר בתחתיתו.

80 מ"מ כספית (איור א-28). צורת הכתיבה המקובלת ללחץ דם כזה היא: 120/80. לחץ דם סיסטולי, שנמדד בעורק הזרוע בזמן מנוחה, נחשב לתקין אם הוא בגבולות 110-140 מ"מ כספית. לחץ דם דיאסטולי תקין בעורק הזרוע הוא 70-90 מ"מ כספית. העורקים אצל אדם בריא יכולים להתכווץ ולהתרחב בהתאם לכמות הדם שמוזרמת בהם. כל זמן שגמישות העורקים נשמרת, נשאר לחץ הדם תקין. לחץ דם תקין שונה מאדם לאדם והוא נוטה להשתנות עם הגיל. עורקים "זקנים" מאבדים מגמישותם ונעשים קשיחים יותר. הלחץ בעורקים קשיחים גדול יותר וזוהי אחת הסיבות העיקריות לעליית לחץ הדם עם הגיל. לחץ הדם משתנה ללא הרף בשעות היממה, בהתאם לסוג הפעילות ולמידת הפעילות, בהתאם לתנוחת הגוף ולמצב הנפשי. כל דבר שגורם ללב לפעום במהירות מוגברת, מגדיל את לחץ הדם. כך למשל, פעילות גופנית, התרגשות, או כעס מגבירים באופן זמני את לחץ הדם. לחץ הדם מושפע גם מקור או מחום קיצוניים, וכן ממידת הצריכה של מלח, קפאין, ניקוטין ואלכוהול.

לחץ דם לא תקין



כאשר במדידת לחץ הדם נמצא שבאופן קבוע הרמה גבוהה מ-150/90, מוגדר אותו נבדק כמי שסובל מ**לחץ דם גבוה** (high blood pressure). במצב של לחץ דם גבוה, שריר הלב "נאלץ" לעבוד קשה יותר, כדי לדחוף דם לעורקים ומהם אל כל הגוף. היום ברור, שלחץ דם גבוה הוא אחד הגורמים העיקריים לפגיעה בכלי הדם, בלב וגם באיברים אחרים, כמו: המוח, הכליות והעיניים. לכן, לחץ דם גבוה נחשב לאחת הבעיות העיקריות והנפוצות ביותר שעולם הרפואה מתמודד אתן. ואולם, לרוע המזל, מי שסובל מלחץ דם גבוה אינו מודע למצבו, כי בשלבים הראשונים של המחלה אין כל סימני אזהרה והמצב אינו מלווה בכאבים.

הסיבה המדויקת ללחץ דם גבוה אינה ידועה, ואולם במרבית המקרים נמצא קשר הדוק בין התפתחות המחלה לבין אורח החיים המודרני. תזונה לקויה, מצבי לחץ, העדר פעילות גופנית, עודף משקל ועישון, כל אלה תורמים להתפתחות לחץ דם גבוה.

כאשר מדידות לחץ הדם מראות באופן קבוע שהרמה נמוכה מ-120/80 מוגדר אותו נבדק כמי שסובל מ**לחץ דם נמוך** (low blood pressure). לחץ דם נמוך אינו מהווה סכנה וגם לא ידוע אם הוא גורם נזק בטווח הארוך. עם זאת, לחץ דם נמוך עלול לפגוע באיכות החיים ולגרום לתופעות כמו: סחרחורת, חולשה כללית, טשטוש ראייה ולעתים אפילו התעלפות ואובדן הכרה. הסיבה לתופעות האלה היא אספקה לקויה של דם למוח ולאיברי גוף אחרים. ולכן במקרים כאלה, הרופאים ימליצו להיעזר באמצעים שממריצים את מחזור הדם, משפרים את גמישות כלי הדם או מגבירים את ייצור האנרגיה.

זרימת הדם בוורידים

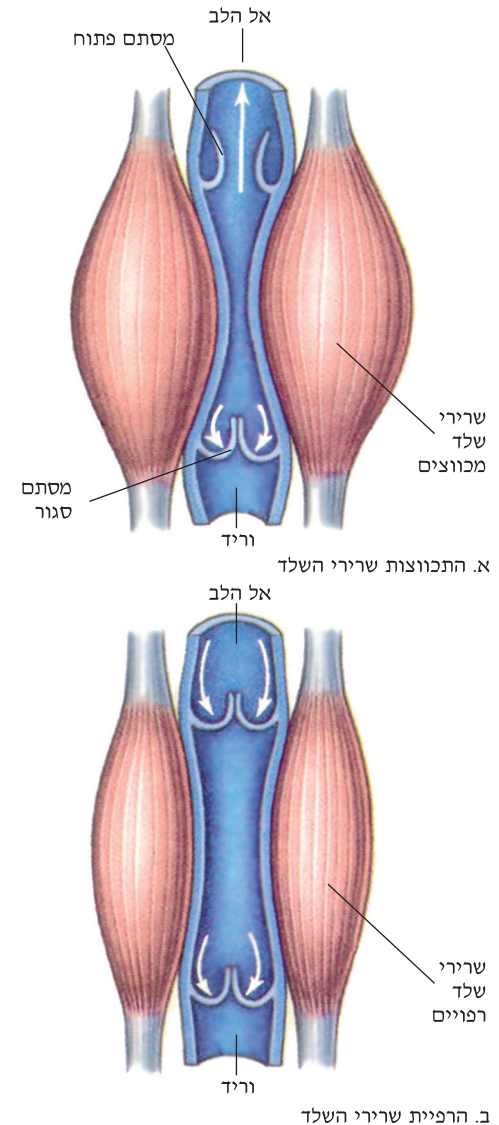
הדם שמגיע אל הוורידים, בדרכו חזרה אל הלב, כבר איבד את רוב הלחץ שלו; **לחץ הדם הווריד** יורד מתחת ל-20 מ"מ כספית (איור א-28). כוח התכווצותו של הלב, שהוא המקור הראשוני ללחץ הדם הגבוה בעורקים, אינו מספיק להנעת הדם חזרה אל הלב. לכן, זרימת הדם בוורידים איטית ביותר, לעומת הזרימה המהירה בעורקים. הדם בוורידים חוזר ללב בסיוע שלושה כוחות:

התכווצויות שרירי השלד - רוב הוורידים מוקפים בשרירים שנמצאים בתנועה כל הזמן. ההתכווצויות וההרפיות של השרירים, גם כשהן קלות מאוד, לוחצות על דופנות הוורידים מבחוץ. בשל הדופן הדקה, הוורידים אינם קשיחים והם משנים בקלות את צורתם בשעה שמופעל עליהם לחץ על ידי השרירים שמקיפים אותם. תנועות השרירים דוחפות את הדם שנמצא בוורידים לכיוון הלב (איור א-29, א).

"משאבת" עליות הלב - בעת התכווצות חדרי הלב, חלה ירידה חדה בלחץ שבתוך העליות. פעולה זו גורמת מפל לחצים בין הוורידים החלולים ובין העליות ולכן הדם נשאב אל תוך העליות.

מסתמים בדופן הוורידים - בוורידים יש מסתמים חד-כיוונים, ולכן הדם זורם בהם רק לכיוון הלב. אם הדם זורם בכיוון ההפוך, המסתמים מתמלאים בדם, נסגרים וחוסמים את המעבר (איור א-29, ב).

על הוורידים שנמצאים בחלק התחתון של הגוף (מתחת ללב) פועל גם כוח הכובד. אלמלא פעולת שרירי השלד, היה כוח הכובד גורם להצטברות דם בוורידים (תופעה מוכרת שמתרחשת כאשר עומדים זמן רב ללא תנועה). במצב כזה נוצרת תגובת שרשרת: מעט מן הדם מוחזר אל הלב, תפוקת הלב יורדת ועל כן יורד גם לחץ הדם בעורקים, ובהמשך יורד הלחץ גם בכל כלי הדם. לעתים קורה שתפוקת הלב יורדת לדרגה כה נמוכה, עד כדי אי-אספקת דם למוח בכמות הדרושה לתפקודו. הדבר עלול להסתיים בהתעלפות, כלומר, אובדן הכרה זמני חולף. ההתעלפות מלווה, בדרך כלל, בצניחה על הקרקע ובשכיבה בתנוחה מאוזנת. במצב כזה הראש נמצא בגובה הלב, כוח הכובד אינו פועל וזרימת הדם אל הראש מתחדשת. עם התחדשות זרימת הדם חוזרת גם ההכרה.



איור א-29: שרירי השלד מסייעים בהזרמת הדם בוורידים

"רגלי הציפור" של האסטרונאוטים



על פני כדור הארץ, כוח הכובד מושך את הדם כלפי מטה ורוב הדם מתרכז ברגליים. הלב מפעיל מאמצים ניכרים כדי להעלות את הדם אל חלקי הגוף העליונים ולוודא כי אל המוח מגיע דם בכמות מספקת. בחלל, כמות גדולה יותר של דם זורמת לחלקי הגוף העליונים, שכן כוח הכובד אינו מנוגד למאמצי הלב. כתוצאה מכך, כאשר האסטרונאוטים נמצאים בחלל, הפנים שלהם מתנפחים. גם כלי הדם בחלקי הגוף העליונים מתרחבים עקב גודש הדם שמגיע אליהם, במקביל, הרגליים נעשות דקות יותר. לתופעה הזאת קוראים האסטרונאוטים בשם "רגלי ציפור".

לזרימת הדם בגופו של אדם שנמצא בחלל יש גם יתרונות. על פני האדמה, בני אדם מנצלים רק כשליש מנפח הריאות בנשימה סדירה. עיקר תהליך הקליטה של חמצן מתבצע בחלק התחתון של הריאות, החלק שבו מתרכז רוב הדם. בתנאי חוסר משקל, בחלל, הדם אינו מצטמצם בחלק התחתון של הריאות, ותהליך הנשימה מנצל את כל נפח הריאות, דבר המשפר את יעילות התהליך בכ-30%. רופאי חלל מעריכים כי התופעה הזאת עשויה לסייע בטיפול במחלות ריאה, למשל בשחפת. בעתיד, אולי ישוגרו חולי השחפת להבראה בחלל, במקום להבראה בהרים גבוהים, כפי שנהוג כיום.

מעבר חומרים בין הדם לתאי הגוף

דיפוזיה דרך דופנות הנימים

העורקים והוורידים מאפשרים את זרימת הדם, אך לא מאפשרים יציאה וכניסה של דם דרך דופנותיהם. רק כאשר הדם זורם בנימים יש מעבר של חומרים בין הדם לתאים. כמויות גדולות של מים, חמצן ושאר חומרים חיוניים עוברים בדיפוזיה דרך קרום תאי האנדותרל שבדופנות הנימים. מעבר החומרים מתבצע לפי מפל ריכוזיהם: ממקום ריכוז גבוה, מן הדם שבנימים, אל הנוזל הבין-תאי שבו הריכוז נמוך יותר, ומשם אל תוך התאים. חומרי פסולת עוברים מן התאים שבהם הריכוז גבוה, אל הדם שבנימים שבהם הריכוז נמוך יותר. הקרום של תאי הדופן בנימים הוא בעל חדירות בררנית; מים ומולקולות קטנות, כמו: חמצן, CO_2 , מלחים, חומצות אמיניות וגלוקוז, עוברים בקלות את דופן הנים, אבל מולקולות גדולות של חלבון (אלבומין ונוגדנים) ותאי דם אדומים אינם עוברים. היכולת הבררנית של דופנות הנימים שונה באזורים שונים בגוף. לדוגמה: במעי הדק או בכליות, הנימים מאפשרים מעבר

של חומרים רבים, ואילו במוח, הנימים מאפשרים רק מעבר של חמצן, של מים ושל סוכר. כך נמנעת כניסתם של חומרים מסוכנים, כמו נגיפים, למוח. הבררנות השונה של הנימים נובעת מהבדלים במבנה הדופן שלהם.

יש כמה גורמים שמאפשרים דיפוזיה יעילה בין הדם שבנימים לבין התאים.

זרימה איטית של הדם - שטח החתך הכללי הגדול של כל הנימים והחיכוך הרב שנוצר בין הדם לבין דופנות הנימים מאיטים מאוד את מהירות הזרימה. מהירות הזרימה בנימים היא כ-0.5 מ"מ בשנייה. משך הזרימה של דם לאורך נים (באורך ממוצע) הוא 1-2 שניות. הזרימה האיטית והשתהות הדם בנימים למשך זמן רב יחסית, מאפשרים דיפוזיה יעילה ומעבר של חומרים בשני הכיוונים.

קרבה של הנימים לתאי הגוף - הנימים פרוסים ברשת רחבה מאוד בכל הגוף, ומרבית תאי הגוף קרובים ביותר לנימי הדם שברקמה. המרחק המרבי בין תא כלשהו ברקמה לבין נימת דם הוא 0.15 מ"מ. מספרם העצום של הנימים והמרחק הקטן בינם לבין התאים מגדיל את יעילות הדיפוזיה של החומרים.

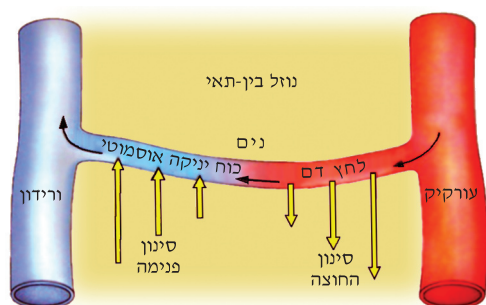
קוטר קטן של הצינור - בשל קוטרם הצר של הנימים, תאי הדם האדומים עוברים בתוכם בשורה, בזה אחר זה. תופעה זו מבטיחה שכל הדם יעבור כשהוא צמוד מאוד לדופן הנימים, ודרכו מתבצעת הדיפוזיה.

דופן דק - הדופן של הנימים הוא חד-שכבתי דק, ועוביו 0.001 מ"מ. הדופן הדק מאפשר דיפוזיה מהירה של חומרים דרכו.

שטח פנים גדול של הדפנות - הודות לפיצול הרב של הנימים, שטח הפנים הכולל של דופנותיהם, שבא במגע עם הדם, הוא עצום. שטח הפנים הכולל של הנימים בגוף מגיע ל-6,300 מ"ר (יותר מ-6 דונם)! הודות לשטח הפנים הגדול, הדיפוזיה מהירה והיא מותאמת לצורכי התאים.

סינון דרך דופנות הנימים

רוב הנוזלים והמומסים יוצאים מנימי הדם בדיפוזיה, דרך קרום תאי האנדותרל. חלק מזערי של הנוזלים והמומסים (כ-2% מנוזל הדם) יוצאים בתהליך של סינון דרך המרווחים שבין תאי האנדותרל. הסינון דרך דופנות הנימים מתרחש הודות לשני כוחות הפועלים בכיוונים מנוגדים: לחץ הדם והלחץ האוסמוטי של פלסמת הדם. לחץ הדם "דוחף" את נוזל הדם החוצה, אל הנוזל הבין-תאי, והלחץ האוסמוטי "יונק" את הנוזל הבין-תאי אל תוך הנים. מקור הלחץ האוסמוטי הוא בחלבונים פלסמת הדם. החלבונים האלה אינם מסוגלים לעבור דרך קרומי התאים ולכן הריכוז שלהם בנים גבוה פי 4 מריכוזו בנוזל הבין-תאי. מפל הריכוזים



חצים שחורים - כיוון זרימת הדם

איור א-30: סינון דרך דופנות הנימים

הזה מהווה כוח יניקה אוסמוטי שגורם למעבר הנוזל הבין-תאי פנימה אל הנימים. בקצה של הנימים, שמקושר לעורקיק (הקצה העורקי), לחץ הדם גדול מן הלחץ האוסמוטי ולכן מים ומומסים מסתננים החוצה מן הנימים אל הנוזל הבין-תאי. עם התקדמות הדם בנים, לחץ הדם יורד בהתמדה ואילו הלחץ האוסמוטי אינו משתנה. בקצה הווריד של הנימים, הלחץ האוסמוטי גדול מלחץ הדם, ולכן הנוזל מסתנן פנימה. 90% מן המים שיצאו בתהליך הסינון מן הנימים בקצה העורקי, חוזרים אליו בקצה הווריד, בתהליך של סינון פנימה (איור א-30). הנוזלים, שהסתננו החוצה מן הנימים ולא חזרו בסינון פנימה (10% הנוותרים), מוחזרים אל נימי הדם על ידי מערכת הלימפה (ראו עמ' 90).

הסינון בנימי הדם אמנם תורם להעברת חומרים בין הדם לתאים, אך תרומתו העיקרית היא בשמירה על התפלגות הנוזל בין הדם לרקמות. כמות הנוזל בדם קובעת את נפח הדם, ונפח הדם משפיע על לחץ הדם. כאשר נפח הדם יורד בבת אחת, בגלל דימום חזק, יורד לחץ הדם. במצב כזה, מנגנון הסינון פנימה אל הנימים יכול להזרים נוזל בין-תאי למחזור הדם וכך לסייע בשמירה על לחץ דם תקין. לחץ דם גבוה מאוד עלול להגביר יותר מדי את תהליך הסינון החוצה מן הנימים, וליצור הצטברות של עודפי נוזלים בחללים שבין הרקמות. מצב כזה נקרא **בצקת** (edema). בצקת נוצרת גם במקרים שבהם יורד ריכוז החלבון בדם, בגלל רעב או מחלות שונות. בצקת קלה נוצרת גם בעת פעילות גופנית, כאשר העורקיקים מתרחבים באזורי רקמה רבים. הבצקת גורמת להפרעה במעבר החומרים התקין בנימי הדם ולנפיחות ברקמה.

הזרימה בנימים

כלים וחומרים

רשת דיג קטנה

צלחת פטרי

שני אגדים של צמר גפן (עבה ודק)

שני חצאים של זכוכיות נושאות

טפי

מיקרוסקופ רגיל

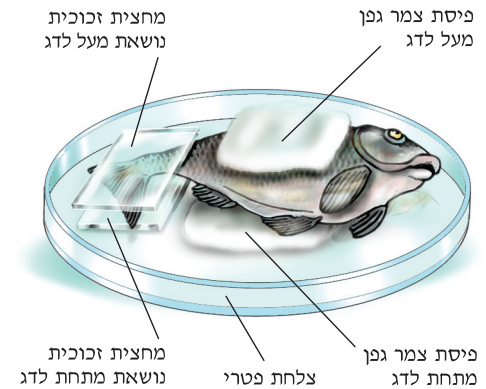
סרגל

דג גופי (או גמבוזיה או ראשן) בקערית מים



מהלך העבודה

1. הרטיבו במים חתיכה של צמר גפן דק, ושטחו אותה על כמחצית מקרקעית צלחת פטרי. במחצית האחרת הניחו את מחצית הזכוכית הנושאת. הרטיבו חתיכת צמר גפן עבה כהכנה לשלב הבא.
2. בעזרת רשת הדיג הוציאו את הדג מן המים. הניחו אותו בצלחת פטרי כך שראשו וגופו יהיו מונחים על הצמר גפן הלח, וזנבו על מחצית הזכוכית הנושאת. שימו את החתיכה הרטובה של הצמר גפן העבה על גופו של הדג, ואת מחצית הזכוכית הנושאת האחרת – על זנבו. הזנב צריך להיות מונח בין שתי הזכוכיות (איור א-31).
- הערה: אם הדג מוציא את זנבו מחוץ לזכוכיות, יש להחזיר אותו למקומו. כמו כן רצוי לטפטף מדי פעם, בעזרת הטפי, כמה טיפות מים על הצמר גפן העבה, כדי שישמר לח.
3. הניחו את צלחת הפטרי על שולחן המיקרוסקופ, כך שזנב הדג יימצא מעל לפתח בשולחן המיקרוסקופ. מצאו קטע מן הזנב שבו תראו באופן ברור את הנימים ואת הדם שזורם בהם. חפשו עורקים ומצאו את מקום התפצלותו לצינורות דקיקים עוד יותר. הצינורות האלה הם הנימים.
4. מדדו את הקוטר של כל אחד מן הנימים שיוצאים מן העורקים ורשמו את הממצא. מדדו את הקוטר של העורקים. האם סכום הקוטר של הנימים גדול יותר או קטן יותר מקוטר העורקים שממנו הם הסתעפו?
5. על סמך ממצאי המדידות, האם זרימת הדם בנימים היא איטית יותר או מהירה יותר, בהשוואה לזרימה בעורקים שמהם הסתעפו הנימים? הסבירו.
6. הגופיפים הקטנים הנעים בתוך הנימים הם תאי הדם האדומים.
 - א. שימו לב לצורתם. ציירו אותם.
 - ב. כמה תאי דם אדומים יכולים לעבור בתוך הנים כשהם זורמים זה ליד זה?
7. מצאו ניס שניתן לראות בו בבירור את זרימת הדם. עקבו אחר הנים עד שהוא מתחבר לנים אחר ויוצר צינור קצת יותר גדול – ורידון.
 - א. האם הדם בוורידון זורם במהירות גדולה יותר או קטנה יותר מאשר בנימים?
 - ב. האם הקוטר של הוורידון שווה לקוטר של העורקים שממנו הסתעפו הנימים או שונה ממנו?
8. עם סיום ההסתכלות, החזירו את הדג לקערית המים!



איור א-31: זרימת הדם בגוף של דג גופי

ויסות זרימת הדם לרקמות

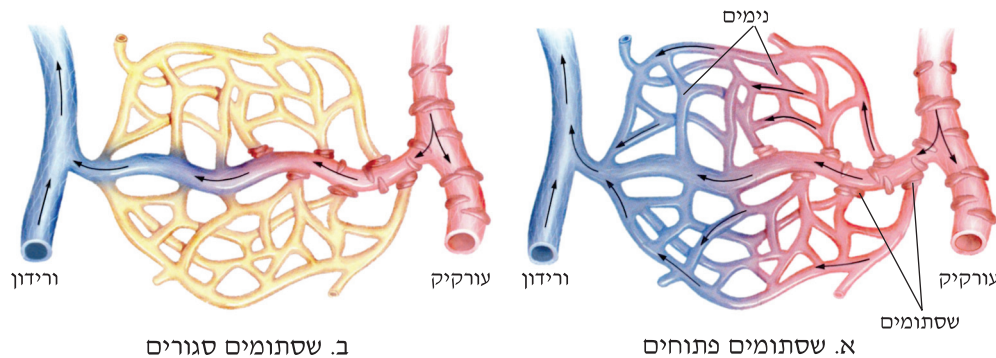
כל איבר או רקמה בגוף מקבלים כמות של דם בהתאם לפעילותם ולצורכיהם בזמן מסוים. ככול שרקמה פעילה יותר, כך היא צורכת יותר חומרים חיוניים, וכך גם יצטברו בה יותר חומרי פסולת; במילים אחרות, רקמה כזאת זקוקה לאספקת דם עשירה יותר. נפח הדם הכללי בגוף אינו משתנה, לכן, אם אספקת הדם לאיבר פעיל גדלה, אספקת הדם לאיברים אחרים, בלתי פעילים, פוחתת. כאשר הקיבה, לדוגמה, מלאה מזון ומבצעת פעולות עיכול במלוא המרץ, שרירי מערכת העיכול זקוקים להרבה דם וכמות הדם שמוזרמת למערכת העיכול גדלה. לעומת זאת, במהלך פעילות גופנית, פחות דם מוזרם למערכת העיכול ויותר דם – לשרירי השלד, לשריר הלב ולעור (טבלה א-5). כמות הדם לדקה שמוזרמת לרקמות, בזמן פעילות, עולה בהשוואה לכמות שמוזרמת בזמן מנוחה. במצב כזה מואצת פעילות הלב ותפוקת הלב גדלה.

טבלה א-5: חלוקת הדם בגוף בזמן מנוחה ובמאמץ גופני ותפוקת הלב בשני המצבים

הרקמה	כמות הדם במנוחה (מ"ל לדקה)	כמות הדם במאמץ גופני (מ"ל לדקה)
הלב	250	1,000
המוח	750	750
שרירים פעילים	650	20,850
שרירים לא פעילים	650	300
העור	500	1,100
איברי גוף פנימיים	3,100	600
תפוקת הלב (מ"ל לדקה)	5,900	24,600

בעת מנוחה, מרבית נפח הדם (54%) נמצאת בוורידים. הוורידים משמשים ככלי קיבול לדם שזורם לרקמות בזמן פעילות. ויסות זרימת הדם אל הרקמות נעשה על ידי כיווץ והרפייה של השרירים הטבעתיים בדופן העורקיקים. כאשר שרירים טבעתיים בדופן העורקיקים מתכווצים, חלל העורקיקים נעשה צר. צמצום קוטר העורקיקים מגדיל את ההתנגדות ההיקפית, ופחות דם זורם דרכם אל הנימים המזינים את הרקמה. כאשר השרירים מתרפים, חלל העורקיקים מתרחב, ההתנגדות ההיקפית קטנה ויותר דם זורם דרכם. פעולות כיווץ

והרפיה של שרירים, שמשמשים כשסתומים בין העורקיקים לנימים, גם הן מווסתות את זרימת הדם לרקמות. פתיחה וסגירה של השסתומים מווסתת את כמות הדם שחודרת אל הנימים (איור א-32).
 הפיקוח על חלוקת הדם לרקמות מתאפשר הודות לשילוב של שני מנגנונים: **מנגנון ויסות מקומי ומנגנון ויסות מרכזי** (איור א-33).

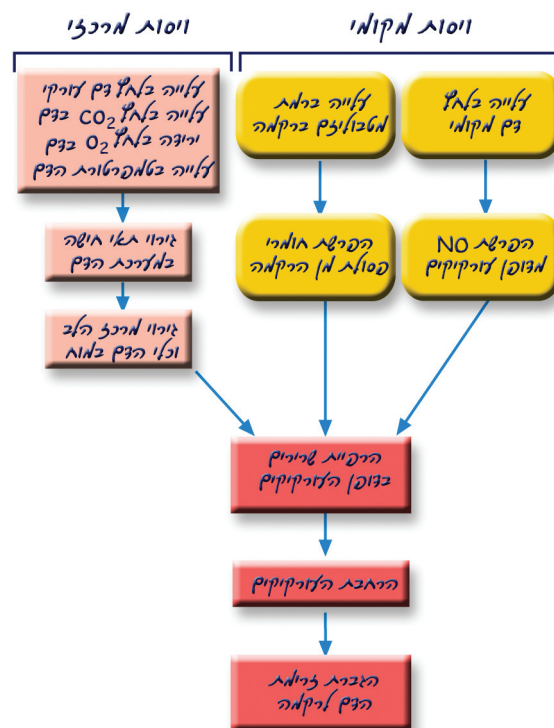


איור א-32: ויסות זרימת הדם לרקמות באמצעות שסתומים

הוויסות המקומי

לרקמות יש כושר ויסות עצמי, כלומר: הן מסוגלות לווסת בעצמן את זרימת הדם שמגיעה אליהן. כושר הוויסות הזה מפותח בעיקר בכליה, בשרירי השלד, במוח, בכבד ובשריר הלב. מקור הוויסות המקומי יכול להיות חומרים שמופרשים מדופן כלי הדם המובילים אל הרקמות, או חומרים שמופרשים מן הרקמות עצמן.

החומרים שמופרשים מדופן כלי הדם - משכבת האנדותרל של העורקיקים מופרשים חומרים שונים שמסוגלים לגרום לכיווץ או להרחבת העורקיקים ולשינוי ההתנגדות ההיקפית, בהתאם למצב הגוף. החומר העיקרי שמופרש מן האנדותרל וגורם להרחבת העורקיקים הוא NO - **חנקן חד-חמצני**. NO משתחרר מתאי האנדותרל בתגובה ללחץ שמפעיל זרם מהיר של דם על שכבת האנדותרל (איור א-33).



איור א-33: מנגנוני הפיקוח על ויסות זרימת הדם לרקמות

פרס נובל לגילוי השפעת NO

שלושה מדענים אמריקאיים - רוברט פורכגוט (Robert Furchgott), לואיס איגנארו (Louis Ignarro) ופריד מוראד (Ferid Murad) - זכו בשנת 1998 בפרס נובל לרפואה על גילוי מנגנון פעולתו של חנקן חד-חמצני בגוף. המולקולה הקטנה של NO מוכרת כגז שנפלט ממנועי המכוניות והיא אחד הגורמים העיקריים לזיהום האוויר. בגוף, לעומת זאת, NO חיוני מאוד כחומר שמעורב בשידור או בקליטה של אותות באיברים וברקמות רבות; הוא מעורב בשינויים מורכבים במוח, בפעילות הלב, בהרחבת כלי הדם, בוויסות פעילות המעיים ובמערכת החיסון.



אצל אנשים שלוקים במחלת לב כלילית (ראו עמ' 68), שריר הלב אינו מקבל אספקת דם נאותה בשל היצרות העורקים שמוזינים את הלב. כבר שנים רבות משתמשים בניטרוגליצרין לטיפול במחלה, ועל ידי כך מגדילים את קוטר העורקים תוך שיפור אספקת הדם ללב. כאשר מוראד (רופא ופרמקולוג), חקר כיצד משפיע ניטרוגליצרין על הרחבת כלי הדם, הוא גילה שהניטרוגליצרין משחרר בגוף חנקן חד-חמצני (NO), וזהו החומר אשר גורם להרפיית השרירים. כאשר NO נוצר בתאי האנדותרל, הוא עובר במהירות דרך קרומי התאים לתאי השריר בדופן העורקים, וגורם להרפיית תאי השריר. כתוצאה מכך, מתרחבים העורקים וזרימת הדם מוגברת.

החומרים שמופרשים מן הרקמות - חומרי פסולת של חילוף החומרים, כמו: CO_2 , חומצת חלב ויוני K^+ , נוצרים בגוף כאשר רקמה פעילה. כאשר רמת החומרים האלה בדם עולה, הם גורמים להרפיה של השרירים הטבעתיים בדופנות העורקים ושל השסתומים בין העורקים לנימים. ההרפיה גורמת להרחבת העורקים, וכמויות גדולות של דם מוזרמות אל הרקמה הפעילה. כך מוגברת אספקת החמצן ואספקת החומרים החיוניים לפעילות התאים (איור א-33).

הוויסות המרכזי

נוסף למנגנוני הוויסות המקומיים קיים גם ויסות מרכזי (איור א-33). תאי חישה מיוחדים במערכת הדם קולטים מידע על משתנים אחדים בדם, כמו: לחץ, נפח, הרכב וטמפרטורה. תאי החישה מעבירים את המידע בגירויים עצביים אל מרכז הלב וכלי הדם במוח. המוח שולח גירויים עצביים אל השרירים הטבעתיים שבדופנות העורקים, ואלה גורמים לעורקים להתכווץ או להתרפות לפי הצורך. עלייה בלחץ הדם העורקי, מעוררת בעורקים תאי חישה שרגישים ללחץ מתיחה, וגורמת להרחבת העורקים. ירידה בלחץ העורקי, לעומת זאת, גורמת להצרת העורקים. תאי חישה כימיים (כימורצפטורים) באבי העורקים ובמוח מגיבים לירידה בלחץ החמצן שבדם ולעלייה בלחץ ה- CO_2 . גירוי תאי החישה האלה מגביר בעיקר את קצב הנשימה ואת עומק הנשימה, אבל גם גורם להרחבת העורקים.

סיכום

1. מערכת הדם מורכבת משלושה סוגים עיקריים של כלי דם: עורקים, שמובילים דם מן הלב אל הגוף; ורידים, שמחזירים את הדם מן הגוף אל הלב; נימים, שבהם מתבצע מעבר החומרים בין הדם לתאי הגוף.
2. הדם זורם בגוף במחזוריות, הודות למפל בלחץ הדם שקיים לאורך מסלול הזרימה. לחץ הדם בכלי הדם נוצר עקב התכווצויות הלב. בעורקים, לחץ הדם הוא גבוה, יחסית, והוא הולך ופוחת ככול שמתרחקים מן הלב.
3. קצב הזרימה של הדם, בכלי הדם השונים, מושפע משטח החתך הכללי של כלי הדם ומההתנגדות לזרימה. בעורקים הזרימה היא המהירה ביותר ובנימים היא האיטית ביותר.
4. מבנה הדופן של כלי הדם מותאם לזרימת הדם בהם. לעורקים יש דפנות עבים ואלסטיים המותאמים לזרימה מהירה בלחץ גבוה. לעורקים, לנימים ולוורידים יש דפנות דקות ופחות אלסטיים. דפנות אלה מותאמים לזרימה איטית בלחץ נמוך.
5. מעבר החומרים בין הדם לתאים נעשה בנימים, בדיפוזיה ובסינון.
6. החזרת הדם ללב נעשית בעזרת (א) ההתכווצויות של שרירי השלד; (ב) השאיבה של הלב; (ג) המסתמים החד-כיווניים בוורידים, שמאפשרים זרימה של הדם אל הלב בלבד.
7. ויסות זרימת הדם לאיברים, בהתאם לתצרוכת שלהם, נעשה על ידי כיווץ או הרפייה של העורקים המובילים דם לאיברים האלה. מנגנון מרכזי (מערכת העצבים) ומנגנון מקומי (הרקמות עצמן) מווסתים את זרימת הדם לאיברים.

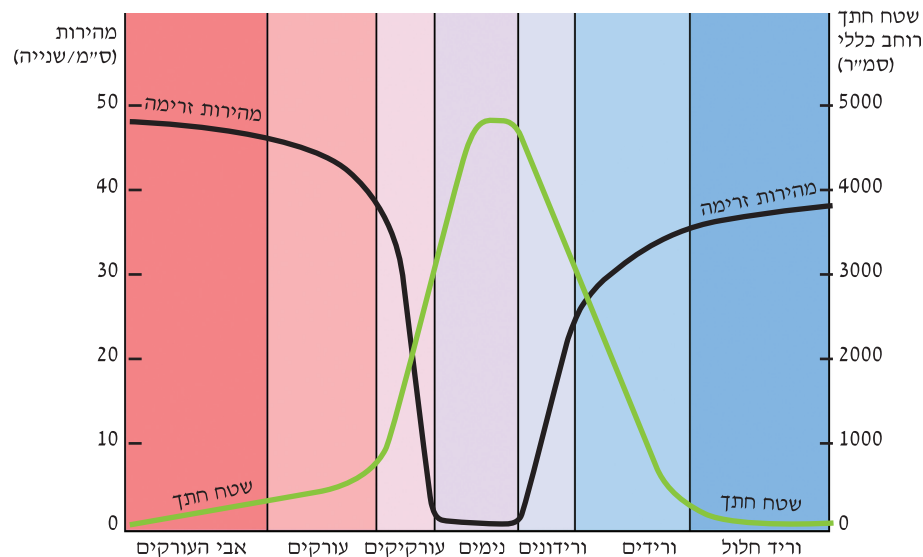
טבלה א-6: התפלגות נפח הדם בכלי הדם של מחזור הגוף, בעת מנוחה

אחוז מנפח הדם בגוף	כלי הדם
2%	אבי העורקים
8%	עורקים
1%	עורקים
5%	נימים
54%	ורידונים
	ורידים
	ורידים חלולים



1. בטבלה א-6 יש נתונים על התפלגות נפח הדם בכלי הדם השונים של מחזור הגוף, בעת מנוחה.
 - א. על פי הטבלה, אילו כלי דם משמשים כמאגר למרבית נפח הדם בעת מנוחה?
 - ב. מהו אחוז נפח הדם המצוי במחזור הגוף בעת מנוחה?
 - ג. היכן מצויה יתרת נפח הדם שבגוף? (צינו שני מקומות).
 - ד. לכל קבוצת כלי הדם שמופיעה בטבלה התאימו את הפעילות שנעשית בה: מעבר חומרים וגזים בין הדם לתאי הגוף; אגירת דם; הובלת דם מן הנימים אל הוורידים; הובלה מהירה של דם; ויסות חלוקת הדם לרקמות; הובלת דם מן הוורידים אל הלב; הובלת דם מן הלב אל העורקים; ויסות נפח הדם.

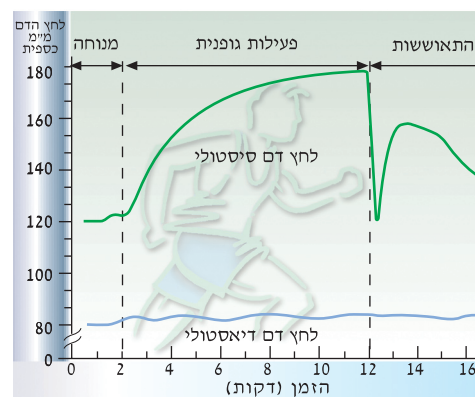
2. האם בזמן שינה, יורד לחץ הדם בהשוואה ללחץ הדם בזמן של עירנות? הסבירו.
3. חיילים הניצבים דום שעה ארוכה עלולים להתעלף.
 - א. מהי הסיבה לכך?
 - ב. מדוע אדם שעומד להתעלף נהיה חיזור מאוד?
 - ג. מדוע הטיפול הראשוני לאדם שהתעלף הוא הנמכת הראש והרמת הרגליים?
4. שינויים בלחץ הדם הם מרכיב חשוב באבחון עבריינים ב"מכונת אמת". הסבירו מדוע.
5. לחץ דם גבוה נחשב ל"רוצח השקט". הסבירו מדוע.
6. התבוננו בעקומים באיור א-34 והשיבו על השאלות האלה:
 - א. תארו את שינוי מהירות הזרימה בכלי הדם השונים.
 - ב. מהו הקשר בין מהירות הזרימה בכלי הדם השונים לבין שטח חתך הרוחב הכללי שלהם? תארו והסבירו.
 - ג. היכן הזרימה היא האיטית ביותר ומהו היתרון בכך?
 - ד. אילו גורמים אחרים משפיעים על מהירות הזרימה בכלי הדם? הסבירו.



איור א-34: מהירות זרימת הדם בכלי דם שונים ושטח חתך הרוחב הכללי שלהם

7. הקוטר של נים דומה מאוד לקוטר של תא דם אדום. כיצד משפיעה העובדה הזאת על מעבר החומרים?

8. כיצד משפיעה עלייה מהירה וממושכת במעלה מדרגות (א) על קצב הלב; (ב) על אספקת הדם לקיבה; (ג) על לחץ הדם? הסבירו את תשובותיכם.
9. התבוננו בטבלה א-5 (בעמ' 55) וענו על השאלות האלה:
- א. באילו רקמות גדלה צריכת הדם בזמן פעילות גופנית, באילו רקמות היא יורדת בזמן פעילות, ובאילו רקמות לא חל כל שינוי בצריכת הדם בזמן פעילות גופנית?
- ב. הסבירו את השינויים שמתרחשים באספקת הדם לרקמות בזמן פעילות גופנית.
- ג. תארו מצב אחר, שבו גדלה אספקת הדם לרקמות מסוימות והסבירו את הצורך בכך.
10. מדוע לא מומלץ לעסוק בפעילות גופנית נמרצת מיד לאחר ארוחה?
11. תלמיד רכב על אופני ספורט במשך עשר דקות. הרכיבה הייתה מאוד מאומצת, ולאחריה התלמיד חש חולשה ניכרת והיה על סף עילפון. לחץ הדם של התלמיד בזרוע נמדד במהלך הרכיבה וגם חמש דקות לאחר מכן. השינויים בלחץ הדם של התלמיד מוצגים בעקומים באיור א-35.



איור א-35: לחץ הדם במהלך פעילות גופנית

- א. מהי הסיבה להבדלים שהתקבלו בין לחץ הדם הסיסטולי ללחץ הדם הדיאסטולי?
- ב. תארו את השינויים בלחץ הדם הסיסטולי (א) בין 0 ל-12 דקות; (ב) בין 12 ל-16 דקות. הסבירו את הסיבות לשינויים.
- ג. מדוע היה התלמיד על סף עילפון מיד לאחר שסיים את הרכיבה המאומצת?
- ד. כיצד היה התלמיד יכול למנוע את תחושת העילפון בסיום המאמץ הגופני? הסבירו.
12. מדוע נוצרת בצקת מחסור בחלבון בדם?



3 יישומי מחשב, שעוסקים בלחץ הדם, נמצאים ביחידת הלימוד תפקוד הלב ומערכת הדם, באתר http://agribio.snunit.k12.il/main/upload/.ab/id_heart.html

1. השפעת הגיל על לחץ הדם

ביישום יש ניתוח מחקר מדעי על הקשר בין הגיל לערכי לחץ הדם; התלמיד נדרש לשלב מיומנויות בגיליון אלקטרוני, כמו: סרטוט גרף, נוסחאות מערכת ונוסחאות תא, מיון וסינון.

2. השפעת המלח על לחץ הדם

ביישום יש ניתוח מחקרים מדעיים על הקשר האפשרי בין צריכת מלח בתזונה לבין לחץ דם גבוה; התלמיד נדרש לשלב מיומנויות בגיליון אלקטרוני, כמו: סרטוט גרף, נוסחאות מערכת ונוסחאות תא, ניתוח סטטיסטי, מיון, סינון, והסקת מסקנות תוך התייחסות לאמינות התוצאות.

3. שכיחות יתר לחץ דם באוכלוסיה הבוגרת

ביישום יש ניתוח תוצאות סקר של שכיחות לחץ דם באוכלוסיה הבוגרת, תוך השוואה בין אחוז הגברים לבין אחוז הנשים שלוקים בלחץ דם גבוה; ניתוח התוצאות נעשה באמצעות גיליון אלקטרוני ומשולבות בו מיומנויות של סרטוט גרף, נוסחאות מערכת ונוסחאות תא וניתוח סטטיסטי.

את היישום **התפלגות הדם במצבי פעילות שונים** ניתן למצוא באתר

http://agribio.snunit.k12.il/main/upload/.ab/id_dam.html

היישום הוא במתכונת של הזמנה לחקר. ביישום משולבים נתוני מחקר שיש לעבד בגיליון האלקטרוני.

מחלות לב וכלי דם

סקרים רבים מראים שמחלות לב וכלי דם מהוות אויב מספר אחד של האנושות. הן אחראיות לכמחצית מן התמותה בעולם המערבי בכלל ובארצנו בפרט. דעות החוקרים עדיין חלוקות לגבי הגורמים המדויקים להופעתן של מחלות הלב מאחר שקיימים כמה תהליכים שמשפיעים על התפתחותן. המלחמה במחלות לב וכלי דם מרכזת תשומת לב רבה ומשאבי עתק של עולם הרפואה.

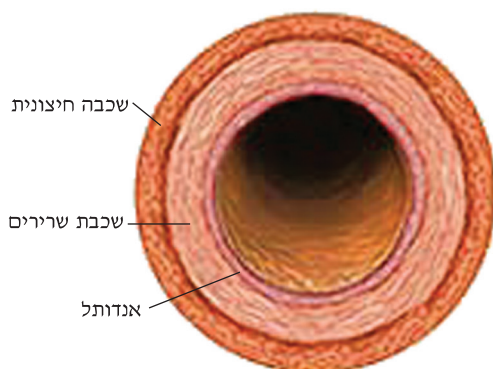
מחלות לב יכולות להיות (א) מחלות לב כליליות, שבהן נפגעת אספקת הדם ללב; (ב) מחלות שנובעות מפגיעה בשריר הלב; (ג) מחלות שנובעות מבעיות בהולכה החשמלית של הלב. מחלות כלי דם יכולות להיות מחלות בעורקים ומחלות בוורידים. רוב מחלות העורקים הן מחלות חסימתיות, כאשר אחד העורקים נחסם בהדרגה עד לאפשרות של חסימה מלאה. החסימות נגרמות על ידי משקעים שומניים, קרישי דם, בועות אוויר או כל חומר אחר. חסימות בעורקים מפריעות לזרימת הדם אל האיברים השונים ולכן חלה ירידה בתפקוד האיברים הפגועים.

במחלות ורידים, נגרם נזק למסתמים הוורידיים, בגלל פגמים בדופן הווריד שגורמים להתרחבותו של הדופן. הנזק במסתמים גורם להפרעה בזרימת הדם אל הלב. הדם מצטבר בוורידים וגורם לנפיחות והיווצרות דליות. דליות ברגליים היא בעיה נפוצה בעולם המערבי, וסובלים ממנה כמחצית מן האנשים בני חמישים שנה ויותר. השמנה, עמידה או ישיבה ממושכות, היריון ושינויים הורמונליים גורמים לדליות ברגליים.

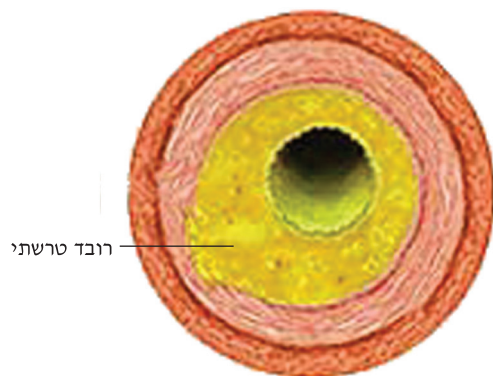
טרשת העורקים

מחלת כלי הדם השכיחה ביותר היא חסימת העורקים על ידי משקעים שומניים והיא נקראת **טרשת העורקים** (atherosclerosis). המחלה הזאת פוגעת בכל מערכת זרימת הדם והיא גורם התחלואה והתמותה העיקרי בעולם המערבי.

הטרשת נוצרת כתוצאה מהצטברות משקעים של חומרים שומניים, כולסטרול, שיירי תאים, סידן ופיברין בדופן הפנימי של העורקים. כשהחומרים האלה שוקעים הם יוצרים בדופן כלי הדם שכבה שנקראת **רובד טרשתי** (plaque) (איור א-36, ב). לפי השערה אחת, הגורם העיקרי ליצירת הרובד הטרשתי הוא רמות גבוהות של שומנים בדם, ששוקעים בדופן העורק. לפי השערה אחרת, פגיעה בתאי האנדותרל שמצפים את הדופן הפנימי של העורק, היא



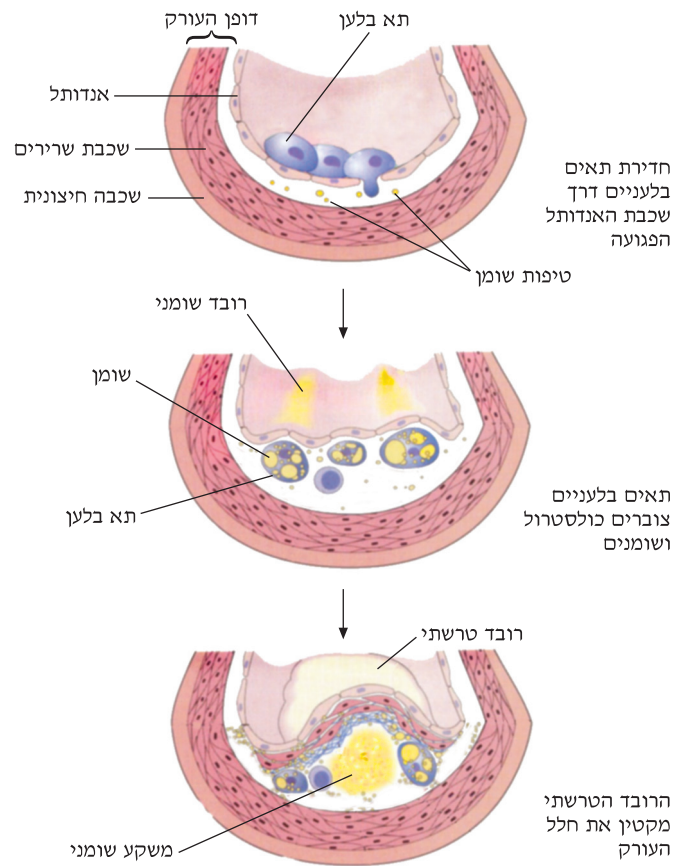
א. חתך רוחב בעורק תקין



ב. חתך רוחב בעורק טרשתי

איור א-36: חתכי רוחב בעורק תקין ובעורק טרשתי

שגורמת לשומנים שבדם לשקוע באזור הפגוע (איור א-37). תאים בלעניים (ראו עמ' 235) שחודרים לשכבת האנדותרל הפגועה, מצטברים שם וצוברים כולסטרול ושומנים. התאים האלה תופחים ולכן מצטמצם החלל הפנימי שבו זורם הדם.



איור א-37: שקיעת שומנים באזור פגוע בדופן העורק

כאשר חלל העורק נעשה צר, פחות דם מגיע לרקמה שהוא מזין. אם ההיצרות קטנה, כמות הדם שמגיעה לרקמה עשויה להספיק לפעילותה התקינה של הרקמה; אבל כאשר מדובר בפעילות מאומצת, כשדרושה כמות דם גדולה מהרגיל, יהיו הפרעות בתפקוד הרקמה. המשקעים ששוקעים בדופן כלי הדם בתהליך הטרשתי, יוצרים שטח פנים מחוספס ולא אחיד. שטח כזה מפריע לזרימת הדם ואף מגרה את טסיות הדם ליצור קרישים (ראו עמ' 80). קריש דם כזה עלול להיתקע באזור שנעשה צר ולגרום חסימה מלאה של העורק. כך קורה שהאזור שעליו מופקד העורק החסום אינו מקבל אספקת חמצן.

התהליך הטרשתי הוא תהליך ארוך ומתמשך ומתחיל מוקדם בחיים. בתהליך הזה יש עורקים שנפגעים בצורה חמורה ויש עורקים שכמעט לא נפגעים. העורקים העיקריים שנפגעים הם העורקים הכליליים שמספקים דם ללב, ולעורקי המוח. היצרות של העורקים הכליליים, שמובילים דם ללב, גורמת למחלת לב כלילית (ראו עמ' 68). היצרות של כלי דם שמובילים דם למוח גורמת לשבץ מוחי. שבץ מוחי עלול לגרום לשיתוקים חולפים, לעיוורון חולף, להפרעה פתאומית בדיבור, ועוד.

מדוע נוצר הרובד הטרשתי?



ההסבר המקובל ביותר להתפתחות טרשת העורקים הוא ריכוז גבוה של חומר שומני, כולסטרול, בדם. נהוג להבדיל בין שני סוגי כולסטרול: LDL - הכולסטרול ה"רע" ו-HDL - הכולסטרול ה"טוב". הכולסטרול הרע נקרא כך כי בהיותו בעודף הוא שוקע בדופנות העורקים וחוסם אותם. כאשר הכולסטרול הזה מתחמצן, קצב השקיעה שלו מוגבר. בתהליך החמצון, מולקולות חמצן פעילות, שנקראות רדיקלים חופשיים, מתחברות אל הכולסטרול הרע. הרדיקלים החופשיים נוצרים כתוצאה ממחלות ומהשפעות של חומרים סביבתיים, כמו: עשן סיגריות. כאשר הרדיקלים החופשיים מתחברים לכולסטרול הם מגבירים בו את התכונות הטרשתיות, והוא נעשה "רע" עוד יותר; הוא נקלט בקלות רבה אל דופן העורק, לא כמו הכולסטרול הרע הרגיל, שקליטתו איטית ומוגבלת. לעומת הכולסטרול הרע, הכולסטרול הטוב מונע התפתחות טרשת. לכן רצוי שהרמה שלו בדם תהיה גבוהה.

הכולסטרול מגיע לדם משני מקורות: (א) ממזונות; (ב) מייצור עצמי בכבד. במרבית המקרים, הגורם לעודף כולסטרול בדם הוא חוסר איזון בייצור שלו בכבד. ולכן, דיאטה דלת כולסטרול מסייעת רק למעט מן החולים. כדי לסייע להורדת רמת הכולסטרול בדם, ממליצים להרבות באכילת סיבים.

בשנים האחרונות התברר שעודף הומוציסטאין בדם מעודד התפתחות טרשת עורקים. הומוציסטאין נוצר בגוף בתהליך הייצור של החומצה האמינית ציסטאין, שנחוצה מאוד לגוף. אבל כשנוצר עודף של הומוציסטאין, הוא נוטה להצטבר ברקמות וגורם תהליכים הרסניים, כמו: פגיעה בדופנות כלי הדם, קרישת דם מוגברת ויצירת רובד טרשתי. הגורם ליתר הומוציסטאין בדם הוא מחסור בוויטמינים, בעיקר, ויטמין B_6 , B_{12} וחומצה פולית. הוויטמינים האלה משתתפים בהפיכת ההומוציסטאין לציסטאין. על ידי תזונה נכונה או על ידי נטילה מבוקרת של ויטמינים אפשר להוריד את רמת ההומוציסטאין.

הטיפול בטרשת העורקים

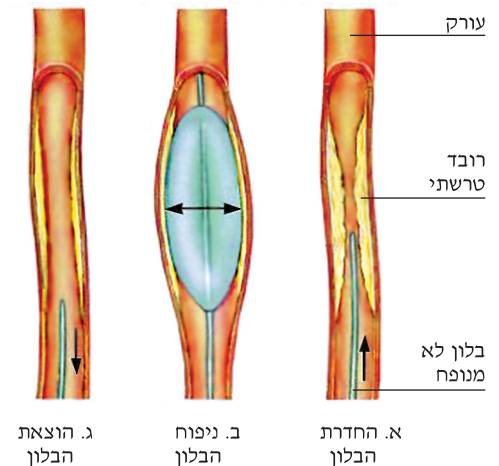
דרכי הטיפול המקובלות בכלי דם שנעשו צרים או שנחסמו הן טיפול תרופתי, טיפול בהרחבת כלי הדם בעזרת בלון וטיפול כירורגי.

הטיפול התרופתי מבוסס על תרופות שמרפות את השרירים שבדופנות העורקים וכך גורמות להרחבת העורקים ולשיפור הזרימה. תרופות אחרות מונעות יצירת קרישים, ויש תרופות שמגבירות את הגמישות של תאי הדם האדומים, ומקלות על ידי כך את מעברם בחללים צרים.

דרך אחרת להרחיב את חלל העורק היא בעזרת קטטר (צינורית) שבקצה שלו נמצא בלון קטן. מחדירים את הקטטר לעורק וכאשר מגיעים לאזור החסום מנפחים את הבלון. הבלון לוחץ מבפנים, דוחף את דופנות העורק ומרחיב את החלל (איור א-38).

אחת הבעיות של שיטת הבלון היא היצרות חוזרת של העורק. בשנות ה-90 של המאה ה-20 הוכנס לשימוש קפיץ מתכתי שמוחדר לתוך העורק (stand), וכמו הבלון הוא מרחיב את חלל העורק ונדבק לדופנותיו. את הקפיץ הזה מצפים בתרופה שמונעת היצרות חוזרת של העורק. הקפיץ נתפס בדופן העורק ועם הזמן צומחת רקמה טבעית שמצפה אותו, כך שהקפיץ נעשה חלק מדופן העורק.

כאשר לא מצליחים לפתוח את החסימה בעזרת תרופות, בלון או קפיץ, מבצעים ניתוח מעקפים. בניתוח הזה יוצרים מעקף לאזור הסתום בעזרת כלי דם חלופיים (איור א-39). לשם כך אפשר להשתמש בעורק אחר מגוף החולה. ואולם, מספר העורקים שמתאימים למטרה הזאת קטן ביותר. אפשרות אחרת היא להשתיל עורקים מתורם זר, אבל כאן קיימת בעיית הדחייה. התחליפים הנפוצים היום הם עורקים סינתטיים או ורידים. יתרונם העיקרי של הוורידים הוא היותם חומר טבעי, שהוא תמיד עדיף מחומר סינתטי. לצורך השתלת מעקפי עורקים כליליים של הלב, משתמשים בוורידים שמוציאים מן הרגל.



איור א-38: פתיחת עורק חסום בעזרת בלון

יצירת מעקפים חדשים בגוף



בגוף יש מנגנון שמזהה מצבים של סתימה בכלי הדם ויכול ליצור כלי דם חדשים - מעקפים - שמחליפים את כלי הדם שנסתמו. אחד הגורמים שמעוררים יצירת כלי דם חדשים הוא חלבון שנקרא "גורם הגידול של רקמת האנדותרל". התברר, כי במצבים של חוסר חמצן, רוב התאים בגוף מפרישים את החומר הזה, וכלי הדם שמצויים בסביבה חשים בו וגדלים לכיוון התאים המפרישים. בארה"ב, החלו לעשות ניסויים בבני אדם שסובלים מחסימות בגפיים, כתוצאה ממחלת הסוכרת, במטרה לעודד יצירת כלי דם עוקפים. אם הניסויים האלה יצליחו, ימשיכו לנסות את יצירת המעקפים במערכות הלב.

אם רוצים למנוע התפתחות של טרשת העורקים, חשוב לשמור על אורח חיים בריא, על תזונה נבונה, להקפיד על פעילות גופנית ולבצע בדיקות תקופתיות.

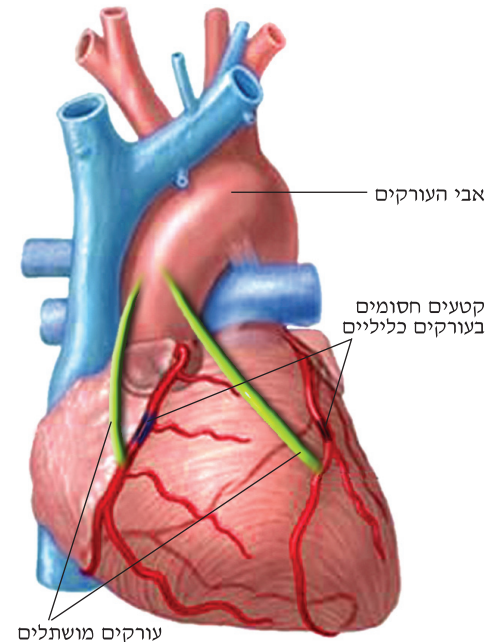
עשרת הדברות למניעת טרשת עורקים

1. אל תעשנו טבק (סיגריות או נרגילה).
2. אל תשהו במחיצת מעשנים.
3. שמרו על משקל גוף תקין.
4. הימנעו מתזונה עתירת שומנים.
5. בדקו את רמת הכולסטרול הטוב והכולסטרול הרע בדם.
6. אכלו הרבה פירות, ירקות ודגנים מלאים.
7. הפחיתו את צריכת המלח מן המזון.
8. עסקו בפעילות גופנית לפחות 30 דקות כל יום.
9. בדקו את לחץ הדם לפחות פעם בשנה עד פעם בשנתיים.
10. הימנעו ממתח ולחץ נפשי.

מחלת לב כלילית

טרשת העורקים יכולה להיות מסוכנת ביותר כאשר היא פוגעת בעורקים הכליליים (איור א-39). עורקים כליליים טרשתיים, אינם יכולים לספק מספיק דם לשריר הלב ולכן נפגעת יכולת הלב לפעול. לתופעה הזאת קוראים **מחלת לב כלילית**. אדם שחולה במחלת לב כלילית חש כאבים שמעיקים על אזור החזה, בייחוד בזמן מאמץ או במצבי התרגשות. לתופעה הזאת קוראים **תעוקת לב** (angina pectoris).

כאשר יש חסימה חלקית של אספקת הדם לשריר הלב, נוצרת מערכת כלי דם שעוקפת את העורק החסום. מערכת עורקים עוקפת עשויה לשפר את הרגשת החולה. ואולם, כאשר יש חסימה מלאה של העורק הכלילי או של אחד מעורקיקיו, אזור מסוים בלב שמוזן על ידי אותו עורק, לא מקבל אספקת חמצן ומזון ולכן הוא מפסיק לתפקד. לתופעה הזאת קוראים **התקף לב** או **אוטם שריר הלב**, והוא בא כאירוע פתאומי שמלווה בכאבים חזקים ולחץ בחזה. בזמן התקף לב חשים כאבים בזרועות, בצוואר ובכתפיים, מופיעה זיעה קרה ויש קוצר נשימה. אוטם שריר הלב יכול לגרום גם להפרעות בהולכה החשמלית של הלב, כלומר, להפרעות קצב. הפרעות כאלה יכולות לבוא לידי ביטוי, למשל בקצב לב מואץ, בקצב לב מואט ובקצב לב בלתי סדיר. כאשר ההפרעה החשמלית חמורה, עלול להתפתח מצב שבו שריר הלב אינו מתכווץ כלל, תופעה שנקראת **דום לב**. דום לב עלול לגרום למוות מיידי. לאחר התקף לב (שלא התפתח לדום לב) ממשיך הלב לתפקד באופן לא מלא עד לתהליך הריפוי. הריפוי נעשה על ידי רקמת חיבור שמחליפה את האזור שנפגע.



איור א-39: ניתוח מעקפים של עורקים כליליים סתומים

תאי גזע עשויים לתקן לב

חוקרים הפיקו במעבדה תאי גזע ממוח עצם (ראו עמ' 74) של עכברים והזריקו את התאים ישירות ללב של עכברים שחוללו בהם התקף לב. תאי הגזע שהוזרקו, התמיינו לתאי שריר לב, לתאי שריר שבדופנות העורקים, ולתאים שמרפדים את דופנות כלי הדם. יעילות התפקוד של החדר השמאלי של הלב אצל העכברים המטופלים הייתה גדולה בכ-40% לעומת היעילות אצל עכברים שלא טופלו.

תאי גזע ממוח העצם עשויים לסייע להחלמה מהתקפי לב, על ידי זירוז התפתחות תאים חדשים באזורים שבהם נפגעו הרקמות. התברר, שתאי גזע של מוח העצם הם רב-תכליתיים הרבה יותר מכפי שחשבו, ויש ביכולתם ליצור כל מיני רקמות, מלבד תאי



דם אדומים ולבנים. אם ממקמים את תאי הגזע בלב הם יתפתחו לרקמת לב ויחליפו רקמות שנפגעו כתוצאה מהתקף לב. השימוש בתאי גזע, שנלקחים ממוח העצם של חולה לב, יפתור למעשה שתי בעיות: את הבעיה האתית של שימוש בתאים שנלקחים מעוברים (שהם המקור המקובל לתאי גזע), ואת החשש מדחיית הרקמות כאשר הן מושתלות מתורם זר.

גורמי סיכון להתקף לב

להתקפי לב יכולים להיות גורמים שונים.

גיל - לקשישים יש יותר סיכוי לפתח התקף לב, בגלל ההזדקנות של המערכות השונות בגוף.

מין - גברים נוטים לפתח מחלות לב יותר מנשים. נשים מוגנות יותר מפני מחלת לב עד כ-10 שנים לאחר הבלות (הפסקת המחזור החודשי).

סוכרת ולחץ דם גבוה - שתי המחלות האלה גורמות פגיעה מצטברת בדפנות של כלי הדם.

ריכוז גבוה של שומנים בדם - רמה גבוהה של כולסטרול בדם ושל שומנים אחרים מעודדת את יצירת הרובד הטרשתי בעורקים.

עישון - גורם הסיכון המשמעותי ביותר להתקף לב מתחת לגיל 50 (ראו עמ' 134, 135); הפסקת העישון מפחיתה את הסיכון לחלות במחלות לב, ואם לא מעשנים במשך 5-7 שנים, מתבטל הסיכון הזה לחלוטין.

העדר פעילות גופנית - פעילות גופנית קבועה מפתחת את שריר הלב, תורמת להפחתת לחץ הדם, מסייעת להפחתת משקל ולשחרור ממתח.

גורמים גנטיים - אנשים שבמשפחתם יש היסטוריה של מחלות חסימת עורקים, בעיקר אם הופיעו המחלות בגיל צעיר, הם בעלי סיכון גבוה יותר לחלות במחלות לב. לכן, אנשים כאלה צריכים להישמר הרבה יותר מגורמי הסיכון.

התגלה גן שגורם להתקף לב

בנובמבר 2003 זיהו חוקרים (בקליבלנד, ארה"ב) גן שמשפיע על התפתחות מחלת לב כלילית ועל התקף לב. הגן שנקרא ME2A נמצא בכרומוזום 15, והוא היה הגן הראשון שהתגלה והיה מזוהה עם מחלת לב. הגן הזה התגלה הודות למיפוי גנטי שנעשה לבני משפחה מאיווה (Iowa), אשר במשך כמה דורות, רבים מבניה סבלו ממחלת לב כלילית ומהתקף לב.



הגן MEF2A מקודד חלבון שאחראי לביטוי של מאות גנים, ואולי אפילו של אלפי גנים, בשכבת האנדותרל של העורקים. במיפוי הגנטי נמצא שאצל אותם בני משפחה שסבלו מן המחלה, הייתה מוטציה מסוג חסר (deletion mutation); נמצא חסר של 21 זוגות נוקלאוטידים, שמשמעותו חסר של 7 חומצות אמיניות בחלבון שהגן מקודד. לפי השערת החוקרים, המוטציה גרמה לכך שהאנדותרל היה חשוף לחדירה של תאים בלעניים, ואלה גרמו ליצירת הרובד הטרשתי ולהתפתחות מחלת הלב הכלילית. המוטציה הזאת אמנם נדירה, אך לאנשים בעלי המוטציה הזאת יש 100% סיכויים לסבול מהתקף לב או לפתח מחלת לב כלילית.

זיהוי הגן הזה מהווה פריצת דרך למחקרים נוספים, אשר במהלכם יבדקו את התפקיד של זוגות הנוקלאוטידים החסרים בגן הפגוע, ועל ידי כך יוכלו לחקור את הגורמים להתפתחות מחלת הלב הכלילית והתקפי הלב. בכוונת החוקרים לחפש מוטציות אחרות, באותו גן או בגנים אחרים, אשר גורמות אף הן להתפתחות מחלת לב כלילית. העובדה שגן אחד כבר התגלה, נותנת סיכוי לגלות עוד גנים שקשורים לאותה מחלה. לאחר שמגלים את הגן שגורם מחלה, ניתן לפתח תרופות שימנעו תופעות של המחלה ויהיה אפשר גם לאבחן בני משפחה בעלי סיכוי לחלות עוד לפני שמופיעים סימני המחלה.

סיכום

1. טרשת עורקים היא מחלה שנגרמת כתוצאה מהצטברות רובד של כולסטרול ושומנים על הדפנות הפנימיים של העורקים. כתוצאה מכך, חלל העורק נעשה צר וחלים שיבושים באספקת הדם אל האיבר שמוזן על ידי העורק החסום.
2. מחלת לב כלילית נגרמת כאשר מתפתחת טרשת בעורקים הכליליים. חסימה של עורקים כאלה אינה מאפשרת להם לספק דם לשריר הלב בכמות מספקת. אדם שחולה במחלת לב כלילית יחוש תעוקת לב.
3. במקרה של חסימה מלאה של עורק כלילי, האזור בלב שלא קיבל אספקת דם יפסיק לתפקד. תופעה כזו נקראת התקף לב או אוטם שריר הלב.
4. מחלות לב נגרמות על ידי כמה גורמים: עישון, רמת שומנים גבוהה בדם, יתר לחץ דם, מין, סוכרת, עודף משקל, חוסר פעילות גופנית, תורשה ולחץ נפשי. פיקוח ובקרה על גורמי הסיכון, שנמצאים בשליטתו של האדם, יכולים להפחית במידה ניכרת את הסיכון לחלות במחלות לב.



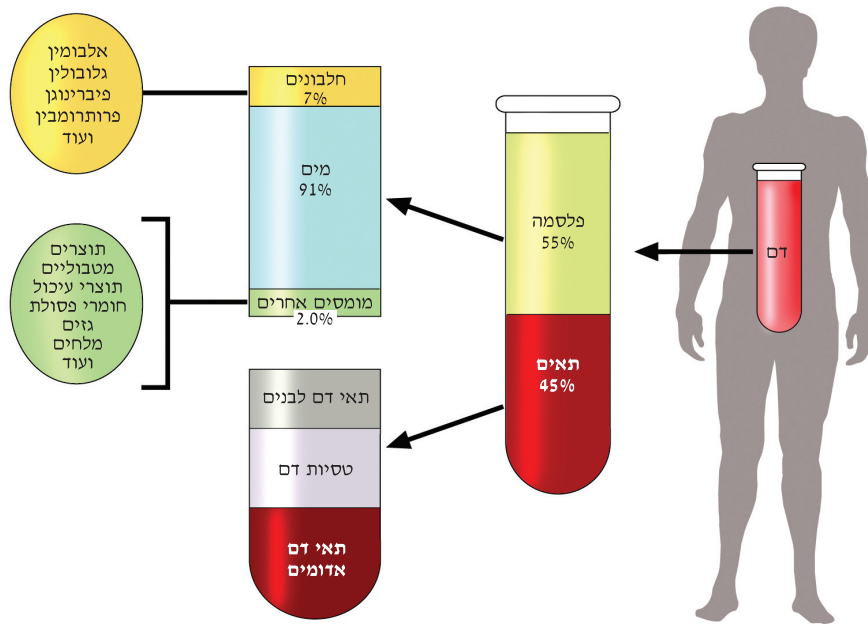
1. כיצד נוצרות דליות ברגליים, ומדוע תופעה זו נפוצה בעולם המערבי?
2. בשנים האחרונות הולכת ופוחתת התמותה ממחלות לב בארצות המערב וביניהן ישראל, אך עדיין הן מהוות סיבה עיקרית למוות. מהי, לדעתכם, סיבת הירידה בהיקף התמותה ממחלות לב בחלק מארצות המערב?
3. חלקו את הגורמים למחלות לב, לשתי קבוצות: גורמים שבשליטתנו וגורמים שאינם בשליטתנו.
4. כיצד ניתן להפחית את הסיכון לחלות במחלות לב? התייחסו לכל אחד מן הגורמים שבשליטתנו ופרטו.
5. יש מי שסבור שבגיל צעיר מותר לאכול כל מה שרוצים ורק כשמגיעים לגיל מבוגר, צריך להקפיד על אורח חיים בריא. מה דעתכם? התייחסו בתשובתכם למחלות לב וכלי דם.
6. רשמו ממצאים חדשים או פיתוחים חדשים שקשורים במחלות לב וכלי דם (אבחון, ריפוי ומניעה). היעזרו לשם כך באינטרנט, בעיתונות היומית והמקצועית, בדפי פרסום של קופות החולים או בכל מקור מידע מעודכן אחר.



יישום המחשב גורמי סיכון למחלות לב כליליות נמצא ביחידת הלימוד **תפקוד הלב ומערכת הדם** באתר http://agribio.snunit.k12.il/main/upload/.ab/id_heart.html במשימת היישום הנ"ל יש לבחור גורם אחד שעלול להוות סיכון למחלות לב כליליות, ולאסוף מידע רלוונטי אודותיו. ביישום יש הפניות לאתרים אחרים וכן למנועי חיפוש.

רקמת הדם

רקמת הדם שונה משאר הרקמות בגוף; כל מרכיביה נמצאים בתנועה מתמדת. הדם מורכב מנוזל שנקרא **פלסמה** (plasma), ומתאים וחלקי תאים (איור א-40).



איור א-40: הרכב הדם

הפלסמה

הפלסמה היא החלק הנוזלי של הדם. היא מהווה 55% מנפח הדם. כ-90% מן הפלסמה הם מים והשאר - חומרים מומסים שונים. באמצעות הפלסמה, עוברים המים והחומרים המומסים בהם ממקום אחד למקום אחר בגוף. במקומות מסוימים הם עוברים מן הפלסמה אל הנוזל הבין-תאי, וממנו הם מגיעים אל התא עצמו. חלק ממרכיבי הפלסמה, למשל: חלבוני הפלסמה, אינם עוברים אלא נשארים בדם רוב הזמן.

מקורם של מומסי הפלסמה הוא במזון, בנשימה ובתהליכים מטבוליים אחרים שמתרחשים בתאים. תוצרי עיכול שמקורם במזון, כמו: פחמימות, מלחים, חומצות אמיניות וחומצות

שומן, נספגים במעי ומועברים בפלסמת הדם לחלקי הגוף השונים. מבין הפחמימות, הגלוקוז הוא אחד החומרים החשובים המצויים בפלסמת הדם. הריכוז של הגלוקוז בדם קבוע (100-80 מ"ג ל-100 מ"ל דם). הוא נשאר קבוע הודות לשיווי משקל שקיים בין שני תהליכים: תהליך אגירתו בכבד ובתאי השריר, בצורת גליקוגן, ותהליך שחרורו מן הכבד ובתאי השריר לדם, בהתאם לצורכי התאים. המלחים, שמגיעים עם המזון, מפורקים ליונים. הכמות שלהם בפלסמה קטנה מאוד, אולם הם חיוניים לתפקוד התקין של הגוף. בפלסמה מובלים גם חומרי פסולת, כמו: שתנן, CO_2 , וחומצת חלב. חלבוני הפלסמה הם המרכיב העיקרי של החומרים שמומסים בפלסמה, והם נוצרים בעיקר בכבד. אחד מתפקידיהם החשובים של החלבונים בדם, בפרט של האלבומין, הוא שמירה על לחץ אוסמוטי גבוה בנימים. לחץ כזה מאפשר ספיגה חזרה של נוזלים לזרם הדם. אלבומין וחלבונים אחרים, שנקראים גלובולינים, עוזרים גם להוביל חומרים, כמו: ברזל ושומנים, על ידי היצמדות אליהם והעברתם ממקום למקום. גלובולינים מסוימים, שנקראים אימונוגלובולינים (נוגדנים), עוזרים להילחם נגד גורמי מחלות. חלבוני דם אחרים, כגון: פיברינוגן ופרותרומבין, משתתפים בתהליך קרישת הדם (ראו עמ' 80). הרכב הפלסמה מדגים את כושרו של הגוף לשמור על הומיאוסטזיס - על סביבה פנימית יציבה - למרות שינויים שחלים בסביבה. בדם של אדם בריא יש ריכוז קבוע של חלבונים, מלחים וגלוקוז, בלי קשר לסוג התזונה שלו. כל סטייה מן הריכוזים הקבועים האלה מסכנת את תפקוד הגוף ומעידה על מחלה.

טבלה א-7: חומרים המובלים בדם - מאין הם מגיעים ולאן הם נעים?

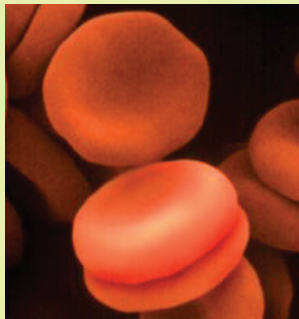
החומר	מגיע/ים אל הדם	נע/ים בדם
חמצן	מן הריאות	אל כל הרקמות
CO_2	מכל הרקמות	אל הריאות
גלוקוז, חומצות אמיניות, מלחים	מן המעי הדק	אל כל הרקמות
חומצות שומניות	מצינורות הלימפה	אל כל הרקמות
חלבוני פלסמה	מן הכבד	רובם אינם עוזבים את הדם
נוגדנים	מקשרי הלימפה דרך מערכת הלימפה	אל כל הרקמות
הורמונים	מבלוטות הפרשה פנימיות	אל איברי מטרה
מים	מן המעי הגס	אל כל הרקמות
שתנן	מן הכבד	אל הכליות

תאי הדם

45% מנפח הדם הם תאים וחלקי תאים. בדם יש שלושה סוגי תאים: תאי דם אדומים, תאי דם לבנים וטסיות הדם (איור א-41). תאי הדם האדומים מובילים חמצן ו- CO_2 לכל מקום בגוף, באמצעות חלבון ההמוגלובין שנמצא בהם. תאי הדם הלבנים פועלים בהגנה על הגוף מפני גורמי מחלות, ואילו טסיות הדם מעורבות בתהליך קרישת הדם. מקורם של תאי הדם הוא בתאי גזע שנמצאים במוח העצם. **תאי גזע** (stem cells) הם תאים ראשוניים שעדיין לא עברו התמיינות. חלק מתאי הגזע של הדם מתרבים אך לא מתמיינים וכך נשמר מאגר של תאי גזע. שאר תאי הגזע של הדם מתמיינים לתאי מוצא: תא גזע מילואידי ותא גזע לימפואידי (איור א-41). מתא גזע מילואידי מתמיינים במוח העצם לתאי דם אדומים, טסיות דם וחלק מתאי הדם הלבנים. מתא גזע לימפואידי מתמיינים, במערכת הלימפה, לתאי דם לבנים מסוג לימפוציטים. תאי הדם מגיעים אל זרם הדם כאשר הם בשלים לביצוע תפקידיהם. חלק מן התפקידים של תאי הדם מתבצעים בתוך כלי הדם, למשל, העברת חמצן ו- CO_2 על ידי תאי הדם האדומים. התפקידים של תאי הדם הלבנים מחייבים אותם לצאת מכלי הדם לחללים הבין-תאיים. יציאה זו מתרחשת בנימי הדם.



תאי הדם האדומים



השם: תא דם אדום (Erythrocyte)

שם האב: תא גזע מילואידי

מקום הלידה: מוח העצם

משך החיים: 120 יום

הגודל: 0.007 מ"מ

הצורה: דסקית קעורה משני צדיה

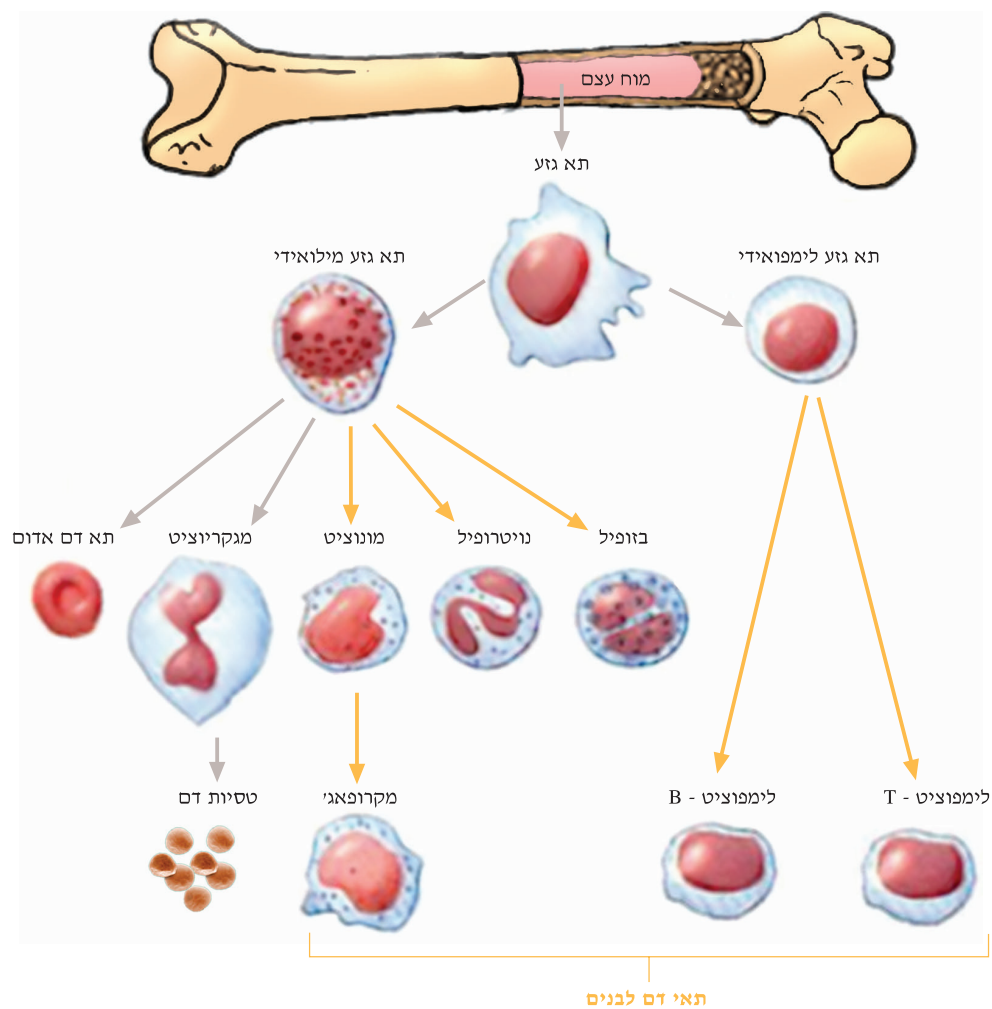
הצבע: אדום

תכונות מיוחדות: חסר גרעין וחלק

מאברוני תא; מלא בהמוגלובין

הכתובת: כל נוזל הדם

העיסוק: מוביל חמצן ו- CO_2



איור א-41: מסלולי התמיינות תאי הדם מתא גזע

תאי הדם האדומים (erythrocytes; erythros=אדום; kytos=תא) הם אוכלוסיית התאים הגדולה ביותר בדם. במיליליטר אחד של דם יש כחמישה מיליארד (5×10^9) תאי דם אדומים, והם הקטנים ביותר מבין תאי הגוף. הקוטר של תא דם אדום הוא כ-7 מיקרומטר (0.007 מ"מ). יש להם צורה של דסקית קעורה משני צדיה (איור א-42). צורה זאת מגדילה

מאוד את שטח הפנים שלהם, בהשוואה לתאים בעלי אותו נפח שצורתם כדורית. תאי הדם האדומים גמישים ויכולים להידחק לנימים בעלי קוטר קטן ולהיצמד לדופןותיהם. הודות לשטח הפנים הגדול והודות להיצמדות לדופןות הנימים, גדל השטח הזמין לדיפוזיה בין תאי הדם האדומים לתאי הגוף.

תאי הדם האדומים, כמו שאר תאי הדם, נוצרים מתאי גזע שבמוח העצם. במהלך התפתחותם, נוצרים בהם חלבונים (בעיקר, המוגלובין) ובמקביל הגרעין ואברונים אחרים מתכווצים, נדחקים לקרום התא ונפלטים מן התא. כאשר תאי הדם האדומים הבוגרים יוצאים לזרם הדם הם דומים לדסקיות מוקפות בקרום. הקרום מאפשר העברה בררנית של חומרים אל התאים ומן התאים, ומשמש גם כמקום פעולתם של אנזימים רבים.

בתאי דם אדומים בוגרים אין גרעין ולכן הם אינם יכולים להתחלק. גם מיטוכונדריה אין להם, ולכן הם יכולים להפיק רק מעט אנרגיה מן הגלוקוז שמגיע אליהם.

המרכיב העיקרי של תאי הדם האדומים הוא החלבון **המוגלובין** (hemoglobin). ההמוגלובין הוא פיגמנט (צבען) אדום, והוא מקנה לדם את צבעו האדום. בכל תא דם אדום יש כ-250 מיליון מולקולות המוגלובין. כמות ההמוגלובין בדם היא 12-18 גרם ב-100 מ"ל דם. הכמות הגדולה של ההמוגלובין מאפשרת לתאי הדם האדומים למלא את תפקידם העיקרי: קשירה והובלה של חמצן לכל תאי הגוף. מולקולות ההמוגלובין משמשות "כלי תחבורה" יעיל ביותר להעברת החמצן בדם (ראו עמ' 120). הן נקשרות לחמצן בריאות ומובילות אותו אל התאים. ההמוגלובין משמש גם להעברת חלק קטן של ה- CO_2 מן התאים אל הריאות.

הבקרה על ייצור תאי הדם האדומים

בכל שנייה נוצרים במוח העצם 2-3 מיליון תאי דם אדומים חדשים. ייצור תאי הדם האדומים בגוף מבוקר על ידי רמת החמצן בגוף. כאשר זרימת הדם לאיברים משתבשת או כאשר הריאות אינן מספקות די חמצן לדם, יורדת רמת החמצן ברקמות. ירידה ברמת החמצן גורמת לתאים מיוחדים בכליות להגביר את הייצור ואת ההפרשה של הורמון שנקרא **אֶרִיתְרוֹפּוֹיֵטִין** (erythros = אדום; poiesis = יצירה). האריתרופויטין גורם לתאי גזע במוח העצם להתחלק ולהבשיל לתאי דם אדומים. עלייה בכמות ההורמון מעל לרמתו הרגילה, מגבירה את קצב הייצור של תאי הדם האדומים, ויותר חמצן מגיע לרקמות. כאשר רמת החמצן עולה במידה מספקת, הכליות שבות ומאיטות את קצב הפרשת ההורמון, ייצור תאי הדם האדומים פוחת, ופחות חמצן מגיע לרקמות.

המנגנון שאחראי להגברת ייצור תאי דם אדומים, כתגובה לירידה ברמת החמצן בגוף, חשוב לתפקוד בהרים גבוהים. בגבהים מעל 3,000 מ', לחץ החמצן נמוך, ולכן יש ירידה בלחץ החמצן ברקמות. ירידה כזאת גורמת קשיי נשימה וקשיים בתפקוד. הגברת קצב ייצור תאי הדם האדומים וכתוצאה מכך הובלה מספקת של חמצן לתאים מאפשרת לאנשים שגרים בשפלה לתפקד גם בהרים גבוהים (ראו עמ' 126).

משך החיים של תא דם אדום הוא כ-120 יום. בתום התקופה הזאת, נבלעים תאי הדם האדומים ומפורקים על ידי תאים מיוחדים בטחול, שמזהים תאי דם אדומים זקנים. הכמות הכללית של תאי דם אדומים בגופו של אדם בריא נשארת קבועה, הודות לאיזון שבין מספר התאים שנהרסים לבין מספר התאים שנוצרים. עם זאת, קורה שיש ירידה בכמות תאי הדם, בגלל דימום (עקב פציעה) או בגלל מחלות שגורמות להרס התאים. במקרה כזה תהיה עלייה משמעותית (עד פי 20) בקצב ייצור התאים במוח העצם.

מדליות זהב בזכות מוטציה



הגולש הפיני איירו מנטירנטה (Eero Mäntyranta) זכה בשנת 1964 בשתי מדליות זהב, על הישגיו בגלישה על קרח למרחקים ארוכים. הגולש הפיני נחשד כמשתמש בסמים. לאחר שהגולש נבדק, התברר שהוא היה נקי מסמים, והוא הצליח להשיג הישגים מרשימים בגלל מוטציה נדירה שהתרחשה בגופו. המוטציה הזו גרמה לגופו לייצר תאי דם אדומים הרבה יותר מאשר מייצר אדם רגיל, ולכן שריריו נהנו מכמות רבה של חמצן והוא היה יכול לעמוד בהצלחה במאמצים הגופניים הקשים.

אנמיה - חסר דם

למרות הבקרה המתמדת של הגוף, שמווסתת את מספר תאי הדם האדומים ואת רמת ההמוגלובין, יש מצבים שבהם האיזון לא נשמר. אחד המצבים שבהם יש ירידה במספר תאי הדם האדומים או שיש ריכוז נמוך של המוגלובין בדם נקרא **אנמיה** (anemia; בלי; haima=דם). כשאדם סובל מאנמיה, חלה ירידה באספקת החמצן לתאי הגוף. המחסור בחמצן גורם חולשה, עייפות וסחרחורות, כאבי ראש, חוסר תיאבון, בחילות, תחושת קור בגפיים, דפיקות לב ולפעמים גם עלייה בקצב הלב. המחסור בתאי דם אדומים גורם לחיוורון. האנמיה יכולה להיות כתוצאה מכמה סיבות.

מחסור בברזל - יון הברזל מהווה מרכיב חיוני במולקולת ההמוגלובין, ולכן מחסור בברזל פוגע בייצור ההמוגלובין וגורם ירידה בריכוזו בתוך תאי הדם האדומים. בשלב מאוחר יותר, נפגע ייצור תאי הדם האדומים ומספרם בדם פוחת.

מחסור בוויטמין B_{12} - ויטמין B_{12} מצוי במוצרים מן החי והוא מסייע בייצור ההמוגלובין. מחסור בוויטמין זה פוגע בייצור ההמוגלובין ועלול לגרום אנמיה.

מחסור בחומצה פולית - פוגע במוח העצם; כתוצאה מכך חל שיבוש בהבשלת תאי הדם האדומים.

הרס מוגבר של תאי דם אדומים - כתוצאה ממחלות במוח העצם, בכליות או בטחול.

דימום מוגבר - כתוצאה מפציעה, ממחלות ממאירות או בגלל כיבים במערכת העיכול.

מוטציה גנטית - שפוגעת בייצור ההמוגלובין: למשל, אנמיה חרמשית (איור א-42).

אנמיה חרמשית (Sickle Cell Anemia)



אנמיה חרמשית היא מחלה תורשתית קשה שעלולה להסתיים במוות. מוטציה בגן מסוים בכרומוזום 11 גורמת ייצור המוגלובין פגום. ההמוגלובין הפגום גורם עיוות המבנה של תאי הדם האדומים, והם נראים כמו להב של חרמש (מכאן, שם המחלה) (איור א-42). תאים "חרמשיים" כאלה נהרסים על ידי מערכת החיסון, וכתוצאה מכך יורד מספרם הכללי של תאי הדם האדומים בדם. אם האדם נושא שני גנים פגומים (אחד מכל הורה), כמות ההמוגלובין הפגום גבוהה עוד יותר וצורתם של תאי הדם האדומים מעוותת לגמרי. כתוצאה מכך, נפגמת העברת החמצן לתאי הגוף. החולים באנמיה חרמשית סובלים מחולשה גופנית, מפיגור בהתפתחות ולעתים הם מתים בגיל צעיר. מחקרים הראו, שעירווי דם תכופים לילדים חולים, במקביל להשגחה צמודה, יכולים להקטין את שכיחות הסיבוכים ממחלה זו.



איור א-42: תא דם אדום חרמשי בהשוואה לתאי דם אדומים נורמליים

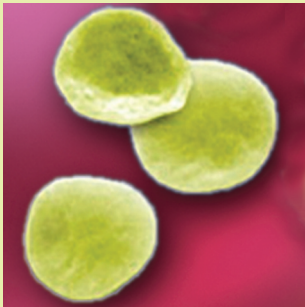
תאי הדם הלבנים

במיליליטר אחד של דם יש כעשרה מיליון (10^7) תאי דם לבנים (כאלפית ממספר תאי הדם האדומים). **תאי הדם הלבנים** (leukos; leukocyte = לבן; kytos = תא) נוצרים גם כן במוח העצם, אך הם שונים מאוד מתאי הדם האדומים. לעומת התאים האדומים שכולם זהים במבנה ובתפקוד, תאי הדם הלבנים נחלקים לכמה קבוצות לפי צורתם, גודלם ותפקודם (איור א-41). תאי הדם הלבנים הם המרכיבים העיקריים של מערכת ההגנה והחיסון של הגוף. כל תאי הדם הלבנים מגנים על הגוף מפני גורמים זרים שהצליחו לחדור לגוף ולהגיע לרקמות

או לזרם הדם. לכל קבוצה של תאים לבנים יש תפקיד אחר בהגנה על הגוף. כאשר תאי דם לבנים קולטים מידע על פולש זר בגוף, הם נודדים בזרם הדם, יוצאים מן הנימים באזור הפלישה ותוקפים את הפולש. פעולת ההגנה שלהם מתבצעת רק כשהם נמצאים בין תאי הרקמות ולא כאשר הם נישאים בזרם הדם. על המבנה של תאי הדם הלבנים ועל דרכי פעולתם קראו בפרק ה' "מערכת החיסון" (עמ' 235-238, 243-252).

טסיות הדם (לוחיות הדם)





השם: טסית דם (platelet) או לוחית דם

שם האב: תא גזע מילואידי

מקום הלידה: מוח העצם

משך החיים: 10 ימים

הגודל: 0.003 מ"מ

הצורה: חלקיקי תאים דמויי טס (מגש)

הכתובת: בכל נוזל הדם

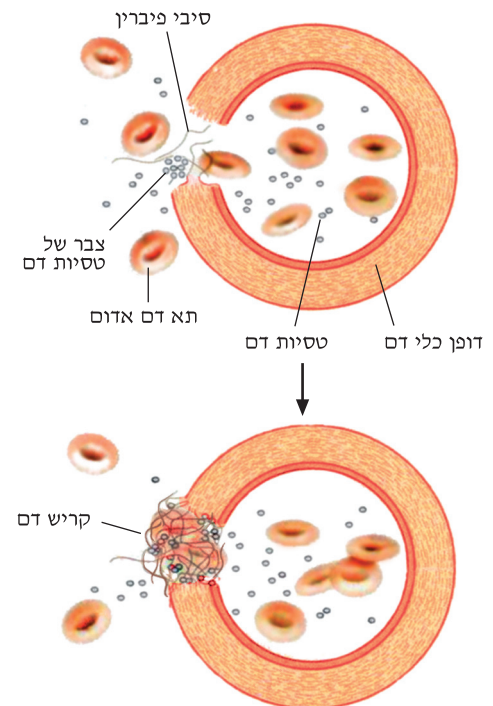
העיסוק: עצירת דימום על ידי יצירת קריש דם

טסיות הדם הן חלקיקי תאים שהתנתקו מתאי ענק (מקרוציטים) שנמצאים במוח העצם (איור א-41). הטסיות קטנות מאוד ושטוחות כמו מגש (טס) או לוחית, וזה מקור השם שלהן. במיליליטר אחד של דם יש 250-450 מיליון טסיות דם. בטסיות הדם יש אברונים חיוניים, בעיקר גרנולות (שלפוחיות) הפרשה, יש מיטוכונדריה וליזוזימים, אולם אין בהן גרעין. לכן, הן יכולות ליצור רק כמות מועטה של חלבונים והן מתקיימות בזרם הדם כ-10 ימים בלבד. לטסיות הדם יש תפקיד מרכזי בתהליך עצירת דימום, בעת פציעה של כלי דם.

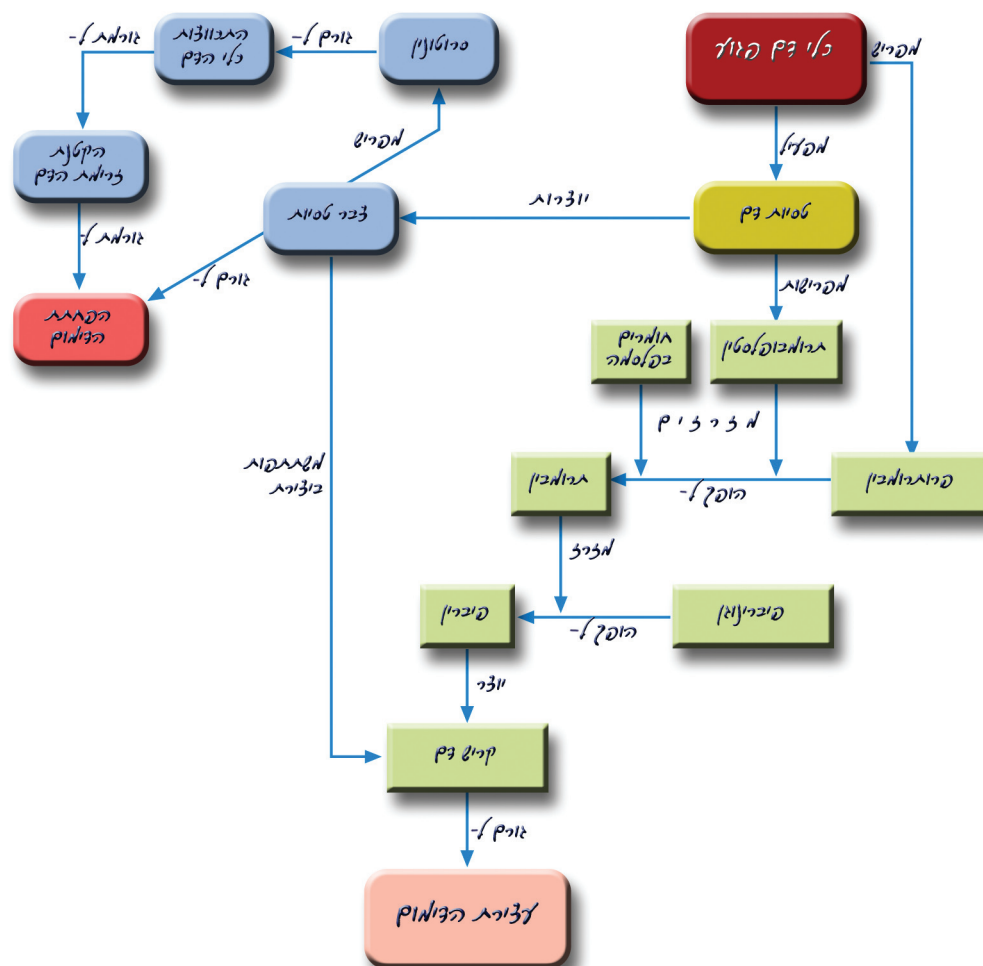
מנגנון עצירת הדימום

הטסיות רגישות מאוד והן מופעלות בתגובה לכל הפרעה בזרימת הדם, למשל, בפציעה של כלי דם (איור א-44). כאשר כלי דם נפצע, נפגעת שכבת תאי האנדותרל המרפדת את הדופן שלו, וסיבים של חומר שנקרא **קולגן**, נחשפים מתחת לתאי האנדותרל. הדם שזורם באזור הפצע בא במגע עם סיבי הקולגן החשופים. טסיות הדם נצמדות אל סיבי הקולגן ומפרישות ADP. מולקולות ה-ADP נקשרות לקרום הטסיות וגורמות לשינויים בשטח הפנים שלהן. השינויים האלה מאפשרים לטסיות להיצמד זו לזו, ותוך שניות אחדות נוצר צבר של טסיות. צבר הטסיות סותם באופן ראשוני את הפצע ומונע דליפת דם. מן הטסיות שבצבר משתחררים כל מיני חומרים, ביניהם **סרוטונין**. הסרוטונין גורם להתכווצות כלי הדם, והתכווצות כלי הדם מקטינה את זרימת הדם לאזור הפגוע, ומקטינה את הסכנה של איבוד הדם (איור א-44). הסרוטונין גם מגביר את הנטייה של טסיות הדם להיצמד זו לזו ולהיצמד אל סיבי הקולגן. חומרים אחרים שמשתחררים מן הטסיות מעורבים בתהליך קרישת הדם.

קרישת הדם (blood clotting) הוא התהליך העיקרי בעצירת הדימום. תהליך קרישת הדם הוא תגובת שרשרת של שלבים רבים שמסתיימים ביצירת קריש דם, תוך 2-5 דקות מזמן הפציעה. היתרון של תגובת השרשרת הוא בעובדה שיש בדרך שלבי בקרה, ואם בטעות התהליך מתחיל בכלי דם תקין, הוא יכול להיעצר בכל אחד מן השלבים. חשוב למנוע היווצרות מיותרת של קרישים, מאחר שקרישי דם מפריעים לזרימה התקינה של הדם. בתהליך קרישת הדם מעורבים חומרים רבים. חלקם משתחררים מן הטסיות ואחרים נמצאים בפלסמה. החומרים שבפלסמה נמצאים בה כל הזמן, בצורה לא פעילה, והם נעשים פעילים כאשר מתחיל תהליך הקרישה. הפעלה של חומרים מצויים חוסכת זמן, ומאפשרת תגובה מהירה שחיונית לעצירת הדימום, לעומת הזמן הדרוש ליצירה של חומרים כאלה. תהליך הקרישה מתחיל ברגע שמתרחשת פציעה בכלי דם. באזור הפציעה, מופרש מדופן כלי הדם חומר בלתי פעיל שנקרא **פרותרומבין** (איור א-44). הטסיות שהצטברו באזור הפצע משחררות חומרים (למשל, תרומבופלסטין) וביחד עם חומרים מן הפלסמה, הם הופכים את הפרותרומבין לחומר פעיל - **תרומבין**. התרומבין הוא אנזים שמעורב בתהליך של הפיכת **פיברינוגן**, שהוא חלבון מסיס, ל**פיברין**, שהוא חלבון בלתי מסיס. לפיברין יש צורה אופיינית של רשת סיבים דקיקים. הסיבים האלה נצמדים אל הצָבֵר של טסיות הדם, שהצטברו במקום הפגוע, ומחזקים את הצבר על ידי כליאת תאי דם אדומים בין הסיבים. בדרך זו נוצר קריש הדם שעוצר את הדימום (איור א-43).



איור א-43: יצירת קריש דם הסותם כלי דם פגוע



בין החומרים הרבים שמשותפים בתהליך של קרישת הדם יש "גורמי קרישה" (חלבונים) שמעורבים ברוב השלבים. מחסור של אחד מגורמי הקרישה מונע תהליך קרישה תקין. במחלת הדממת (הֶמוֹפִּיִּלְיָה), למשל, חסר גורם קרישה מסוים והתוצאה היא דימום רב בכל מקרה של חבלה.

דממת (המופיליה)

מעניין
לדעת



דממת היא מחלה שנגרמת בגלל הפרעה בקרישת הדם. לאנשים שסובלים מדממת, חסר גורם קרישה שנקרא פקטור VIII. חולה דממת סובל מדימום ממושך מכל פצע, ומדימומים פנימיים ללא סיבה ברורה. המחלה היא גנטית והיא מופיעה אצל זכרים הרבה יותר מאשר אצל נקבות. הגן לפקטור VIII נמצא בכרומוזום X. לנשים יש שני כרומוזומי X ולכן גם אם באחד מהם הגן פגוע, עדיין נוצר מספיק פקטור VIII בעקבות הימצאות גן תקין על כרומוזום X האחר. לגברים יש כרומוזום X אחד, ואם הגן בו פגום לא נוצר כלל פקטור VIII. הדממת הייתה נפוצה במשפחות המלוכה באירופה ולכן נקראה "המחלה המלכותית". המוטציה התרחשה, כנראה, אצל המלכה ויקטוריה או אצל אביה. המלכה ויקטוריה הורשה את הגן הפגום לצאצאיה ודרכם לבתי מלוכה אחרים באירופה, שהרבו להתחתן בינם לבין עצמם. חולי דממת מטופלים במנות מרוכזות של פקטור VIII שלוקחים מתרומות דם ושומרים בבנק הדם. בעבר, היו מקרים רבים שחולי דממת חלו באיידס או בדלקת כבד זיהומית. מאז שבודקים כל מנת דם, הסכנה פחתה בהרבה. בשנים האחרונות, לאחר שזיהו את הגן לפקטור VIII, מייצרים את החומר בתרבית תאים במעבדה ומקטינים את סכנת ההידבקות.

התרופה שעוצרת את הדימום

מעניין
לדעת



תרופה שמייצרת חברה דנית, בשיטות של הנדסה גנטית, הצילה את חייהם של עשרות פצועים בארץ ובעולם. התרופה מכילה ריכוז גבוה של אחד מגורמי הקרישה (פקטור VII) שנמצא בכמויות קטנות מאוד בדמו של כל אדם. על ידי העלאת הריכוז של גורם הקרישה פי 3,000 מריכוזו בדם, התרופה גורמת לייצור מהיר של קריש דם. במקור, התרופה פותחה לחולי המופיליה, ובעזרת מחקר שנעשה בישראל, בשיתוף עם צה"ל וצבא ארה"ב, היא נמצאה יעילה בעצירת דימומים קריטיים אצל פצועים מתאונות ומפגיעות, ואצל חולים שמערכת קרישת הדם שלהם קורסת במהלך ניתוחים או לידות. התרופה מצילה חיים כאשר אף טיפול אחר אינו עוצר את הדימום. עד כה נמנעו רופאים מלהשתמש בתרופה בגלל החשש שהיא תגרום לקרישת דם בכל הגוף, אבל התברר כי היא פועלת רק באזור הפגיעה. התרופה נקשרת לטסיות דם שפועלות אך ורק באזור הפגוע, והיא מעין "טיל מונחה" שגורם לקרישה מקומית בלבד ואינו גורם ליצירת קרישי דם במקומות בלתי רצויים.

קרישת יתר

קרישת הדם חיונית ביותר לגוף כאשר היא מתרחשת במצבים של פציעה או דימום. ואולם, במצבים מסוימים, מנגנוני קרישת הדם עלולים להיות מסוכנים. הפרעה לזרימת הדם שנגרמת כתוצאה מקרישת יתר, עלולה לגרום סתימה של הצינורות, ירידה באספקת דם וחמצן לרקמות, ועל ידי כך לפגוע בתפקודם של איברים שונים. היווצרות קרישי דם מהווה אחד הגורמים העיקריים להתפתחות מחלות, כמו: טרשת עורקים, מחלות לב כליליות ומחלות אחרות של כלי הדם. שינויים ביוכימיים שמתרחשים בדם עלולים לפגוע באיזון העדין של תהליכי הקרישה. שינויים כאלה מתרחשים בעיקר בגיל מבוגר, כתוצאה מחשיפה לגורמים מזיקים שונים ובגלל מחסור ברכיבים תזונתיים.

לגוף יש מנגנונים שמונעים יצירת קרישים בתוך כלי הדם, ומנגנונים שגורמים לפירוק של קרישי דם לאחר שאלה נוצרו. בכבד ובתאי הדם הלבנים נוצרים חומרים, כמו הפריין, שמונעים היווצרות קרישי דם, על ידי עיכוב הפיכת הפרותרומבין לתרומבין. גם הכבד "מסלק" חלק מן החומרים שמשתתפים בתהליך הקרישה, ויש גם מערכת אנזימתית שמפרקת את הפיברין. קריש דם שלא פורק יכול להינתק ממקומו ולהיסחף עם זרם הדם. כשהוא מגיע לכלי דם דק יותר, הוא עלול ל"היתקע" ולהפריע לזרימת הדם. ההפרעה בזרימת הדם מסוכנת בייחוד אם קריש הדם נסחף ומגיע למוח, ללב או לריאות. אנשים בעלי סיכון ליצירת קרישים ואנשים שבגופם כבר נוצרו קרישי דם, מטופלים בחומרים נוגדי קרישה (כמו הפריין) שמעכבים את תהליך הקרישה.

מניעת קרישי דם בזמן טיסות



כאשר טסים טיסות ארוכות יש סכנה שייווצרו קרישי דם בוורידים הרגליים, כנראה בגלל העדר זרימת דם לרגליים, בשעה שיושבים זמן ממושך ובגלל שינויים פתאומיים בלחץ האוויר. קרישי דם ברגליים עלולים להיות קטלניים אם הם יגיעו לאיברים חיוניים, למשל לריאות. שם הם עלולים לחסום את תהליך חילוף הגזים. אם הם יגיעו למוח, הם יגרמו לשבץ קטלני. רופא ישראלי פיתח מכשיר שמונע היווצרות קרישי דם בזמן הטיסה. המכשיר שנקרא "סקאיי ווקר" (sky walker) בנוי משתי דוושות שניצבות למרגלות הנוסע. על גבי הדוושות מניע הנוסע את רגליו בתנועות דמויות הליכה, ועל ידי כך משמר את זרימת הדם לרגליים. המכשיר שימש עד כה לטיפול בחולים שאינם יכולים ללכת או באנשים שיושבים שעות רבות לצורך עבודתם. עד שיכניסו את המכשיר לשימוש בטיסות, ממליצים לקום להליכות קצרות בזמן הטיסה. במקרים שיש נטייה ליצירת קרישים, רצוי להתייעץ עם הרופא

המטפל ולקחת כדור אספירין שמונע היווצרות קרישים ומעכב תהליכים דלקתיים שגורמים סתימת עורקים.

העלוקה הרפואית



היתושים, העלוקות ושאר הטפילים מוצצי הדם מצאו "פתרון" לבעייה של קרישת הדם; הם מצאו דרך להשאיר את הדם נוזלי עד שהם מסיימים למצוץ אותו. כשהם מתחילים למצוץ את הדם, הם מחדירים חומר מונע קרישה למחזור הדם של הקורבן. העלוקה הרפואית מייצרת נוגד קרישה, הירודין, והוא מעכב את פעילות האנזים תרומבין. בעלוקה משתמשים לריפוי חולים שסובלים מיתר קרישה. העלוקה נצמדת למטופל, כמעט בלי לגרום לו כאבים, ומחדירה לגופו של המטופל את החומר שמונע קרישה. לאחר שהעלוקה מתמלאת, היא נושרת מעל המטופל.

העלוקה הרפואית תרמה למחקר של פיתוח תרופות נוגדות קרישה. במהלך המחקר על מנגנון הפעולה של ההירודין, התגלו עוד חומרים שמעכבים פעילות תרומבין. את החומרים האלה מייצרים ומשתמשים בהם כתרופות נוגדות קרישה.

בדיקת דם

בדיקת דם היא אחת הדרכים המקובלות לקבל מידע על מצבו הבריאותי של האדם. את בדיקת הדם מבצעים, בדרך כלל, בדם שנלקח מן הזרוע. הדם הזה מייצג את הדם בגוף כולו. בבדיקת דם בודקים, בדרכים שונות, את הרכבו של הדם: תאי הדם (אדומים, לבנים, טסיות), חלבונים (אלבומינים, גלובולינים ועוד), סוכרים (בעיקר, גלוקוז), שומנים (למשל, כולסטרול), מינרלים (כגון: נתרן, אשלגן, סידן, ברזל), הורמונים, ויטמינים ועוד. הרכב הדם מעיד על תפקודו של הגוף.

בטבלה א-8 נרשמו נתונים מטופס תוצאות של בדיקת דם. בעמודה 1 מופיע המדד הנבדק; הוא נרשם בראשי תיבות שמקובלים בשפה האנגלית. בעמודה 4 מופיעים מספרים שמציינים את "תחום הייחוס" של המדד הנבדק. תחום הייחוס הוא טווח התוצאות שמעיד על בריאות תקינה. בעמודה 5 מסומן המיקום של תוצאות הנבדק ביחס לתחום הייחוס, בעזרת סימון גרפי (סולמית או כוכבית). כאשר הסימון מופיע במסגרת הטווח (.....#.....), התוצאה תקינה. כאשר הסימון מופיע מחוץ לטווח, משמאל (.....#) או מימין (#.....), התוצאה אינה תקינה.

טבלה א-8: חלק מטופס תוצאות של בדיקת דם

השם המלא של המונחים המקובלים:
WBC (White Blood Cells) - תאי דם לבנים
RBC (Red Blood Cells) - תאי דם אדומים
HGB (Hemoglobin) - המוגלובין
HCT (Hematocrit) - היחס בין כמות תאי הדם האדומים לכמות נוזל הדם
MCV (Mean Corpuscular Volume) - נפח ממוצע של תא דם אדום
PLT (platelets) - טסיות דם

1	2	3	4	5
בדיקה	תוצאה	יחידות	תחום ייחוס	טווח
GLUCOSE	68	mg%	65–110	(.....#)
WBC	5.55	K/UL	4–11	(.....#.)
RBC	4.32	M/UL	4–5.2	(.....#.)
HGB	12.8	G/dL	12–16	(.....#.)
HCT	36	%	36–46	(.....#)
MCV	82.9	fL	80–96	(.....#.)
PLT	297.0	K/UL	130–450	(...#...)
ALBUMIN	3.90	G/DL	3.50–5.50	(.....#)
BILIRUB.TOTAL	1.10	mg%	0.00–1.10	(#.....)

אצל אדם בריא תוצאות הבדיקה נעות בתוך תחום מסוים של ערכי מינימום ומקסימום. חריגה מן התחום הזה מעידה בדרך כלל על בעיה בריאותית. לדוגמה: אם לאחר צום של לפחות 8 שעות, הערכים של גלוקוז בדם גבוהים מ-126 מ"ג ל-100 מ"ל דם (mg%) ייתכן שהנבדק חולה במחלת הסוכרת. רמת בילירובין (תוצר פירוק המוגלובין) שגבוהה מ-2.5 מ"ג ל-100 מ"ל דם מעוררת חשד למחלת הצהבת. כמויות נמוכות של אלבומין בדם (מתחת ל-3.4 גרם ב-100 מ"ל דם) מעידות אולי על מחלת כבד (שם נוצר האלבומין) או על מחלת כליות שגורמות לאיבוד אלבומין בשתן.

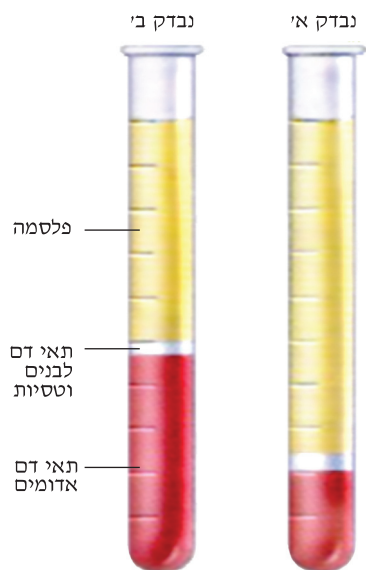
סיכום

1. הפלסמה זורמת בתוך כלי הדם ומקיפה את תאי הדם. היא מכילה מים ומומסים שונים. המים הם המרכיב העיקרי של הפלסמה (כ-90%).
2. חלבוני הדם הם המרכיב העיקרי של מומסי הפלסמה, והם מסייעים בשמירה על הלחץ האוסמוטי של הדם, משתתפים בתהליך קרישת הדם ובהובלת חומרים, כגון: ברזל ושומנים, וכן בהגנה על הגוף מפני גורמי מחלות.
3. הפלסמה מכילה גם חומרים שמקורם במזון: מלחים, סוכרים, חומצות אמיניות, וחומצות שומן. החומרים האלה יוצאים מכלי הדם אל התאים ברקמות.
4. בדם יש שלושה סוגי תאים: תאי דם אדומים, תאי דם לבנים וטסיות דם.

5. תאי הדם האדומים "אחראים" להובלת חמצן לכל תאי הגוף ולסילוק חלק מן ה- CO_2 מכל התאים. הפעולות האלה נעשות באמצעות חלבון ההמוגלובין שמצוי בתאי הדם האדומים.
6. תאי הדם הלבנים "אחראים" להגנת הגוף מפני גורמים זרים שהצליחו לחדור לגוף ולהגיע לרקמות או לזרם הדם.
7. טסיות הדם פועלות בתהליך קרישת הדם ועצירת דימום.



1. בבדיקת דם אפשר למדוד את ריכוז האלבומין בפלסמה.
 - א. מה ניתן ללמוד מתוצאות של בדיקה כזאת?
 - ב. על אילו פעולות בגוף ישפיע ריכוז נמוך של אלבומין?
2. א. חשבו את השטח הכולל (במטרים רבועים) של תאי הדם האדומים בגוף, על פי הנתונים האלה:
 - במיליליטר (אלפית הליטר) של דם יש 5 מיליארד (5×10^9) תאי דם אדומים.
 - בגוף של אדם בוגר יש 5.5 ליטר דם.
 - שטח הפנים של תא דם אדום הוא 100 מיקרומטרים רבועים (מיקרומטר = אלפית מילימטר).
- ב. איזה יתרון יש לשטח הפנים הגדול של התאים האדומים?
3. איזה יתרון יש לעובדה שתא דם אדום "מאבד" את האברונים השונים תוך כדי היווצרותו?
4. יש ספורטאים שנוטלים אריתרופויטין סינתטי כדי לשפר את הישגיהם. הסבירו מדוע.
5. כל אחד מהמצבים שרשומים להלן עלול להשפיע על קצב ייצור תאי דם אדומים בגוף. הסבירו כיצד הוא משפיע.
 - א. שהייה ממושכת במקומות גבוהים
 - ב. פציעה שגרמה דימום קשה
 - ג. פגיעה בריאות
 - ד. ירידה למקום נמוך לאחר שהייה ממושכת במקום גבוה
6. כאשר תורמים דם, תרומת הדם לא גורמת אנמיה. הסבירו מדוע.
7. אצל אנשים שסובלים מאנמיה, שנגרמת כתוצאה ממחסור בהמוגלובין, מוצאים לעתים



איור א-45: בדיקת דם של שני נבדקים

מספר גבוה מהרגיל של תאי דם אדומים. כיצד אפשר להסביר את התופעה הזאת?
8. במזרק שמשתמשים להוצאת דם יש תמיסה שמונעת את הפיכתו של הפרותרומבין לתרומבין. מדוע?

9. את הדם שלוקחים בבדיקת דם, אפשר להפריד במבחנה ל-3 שכבות: בתחתית המבחנה נוצר משקע אדום של תאי הדם האדומים, בחלק העליון של המבחנה יש שכבת נוזל שקוף של פלסמת הדם, ובין שתי השכבות האלה נוצרת שכבה דקה בצבע לבן, שבה נמצאים תאי הדם הלבנים וטסיות הדם.

איור א-45 מתאר תוצאות של בדיקת דם שנעשתה בשני בני אדם.

א. במה שונה ובמה דומה הרכב הדם של שני הנבדקים?

ב. למי מן הנבדקים יש הרכב דם תקין ולמי יש הרכב לא תקין? הסבירו.

ג. מאיזו תופעה סובל הנבדק שיש לו הרכב דם לא תקין? הסבירו.

ד. ציינו גורמים שונים שיכולים לגרום לתופעה הזאת.

10. בטבלה א-9 נרשמו תוצאות בדיקות הדם של ארבעה נבדקים.

א. התבוננו בטבלה ורשמו איזה נבדק סובל מאנמיה. הסבירו כיצד קבעתם.

ב. לפי תוצאות הבדיקה, מהי הסיבה לאנמיה שממנה סובל הנבדק.

ג. אילו תופעות עלולות להופיע אצל הנבדק הזה ומדוע?

ד. כיצד הייתם מציעים לנבדק הזה לטפל במחלת האנמיה?

ה. איזה מן הנבדקים סובל מזיהום? איזה מהם סובל מבעיה של קרישת דם? מי סובל מליקוי במערכת החיסונית? הסבירו את קביעותיכם.

טבלה א-9: תוצאות בדיקות הדם של ארבעה נבדקים

המדד הנבדק	התוצאות של נבדק א	התוצאות של נבדק ב	התוצאות של נבדק ג	התוצאות של נבדק ד	יחידות	תחום הייחוס
GLUCOSE	68	86	95	71	mg%	65–110
WBC	15.2	6.5	5.55	3.1	K/UL	4–11
RBC	4.7	4.2	3.2	5.0	M/UL	4–5.2
HGB	12.2	14.0	8.5	13.5	G/dL	12–16
HCT	36	38.5	30	41.1	%	36–46
MCV	82.9	92.7	83.5	90.5	fL	80–96
PLT	297	30	305	150	K/UL	130–450
VITAMIN B12	350	540	70	360	PMOL/L	130–675

מערכת הלימפה

לבד ממערכת הדם, יש בגופנו (כמו בגופם של רוב החולייתנים) מערכת הובלה מקבילה – מערכת הלימפה. מערכת זו בנויה מרשת של נימים וצינורות לימפה ודרכם נישאים לדם מומסים שונים, בנוזל הלימפה. **נוזל הלימפה** מכיל 94% מים ומומסים, שזהים בהרכבם לחומרים שמומסים בדם. בנוזל הלימפה יש תאי דם לבנים, אך אין בו תאי דם אדומים, ולכן צבעו צהבהב בהיר, שקוף. הזרימה של נוזל הלימפה אינה מחזורית; הוא זורם בכיוון אחד בלבד, מכל חלקי הגוף אל הלב.

למערכת הלימפה יש שלושה תפקידים עיקריים:

שמירה על הרכב הדם - מערכת הלימפה קולטת מים וחלבונים שדלפו מן הדם ומחזירה אותם אל מחזור הדם.

הגנה על הגוף מפני זיהומים - מערכת הלימפה מובילה תאי דם לבנים, מסוג לימפוציטים, מקשרי הלימפה אל כל האיברים בגוף.

הובלת שומנים - מערכת הלימפה מובילה את תוצרי הפירוק של השומנים מן המעי אל הדם.

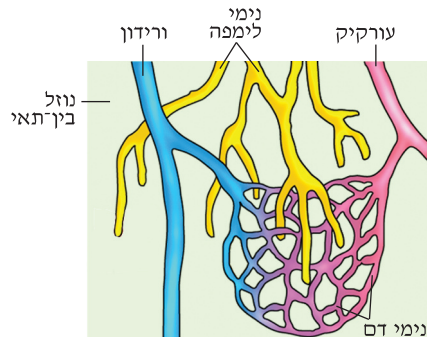
המבנה של מערכת הלימפה

מערכת צינורות הלימפה פרוסה בכל הגוף, כמו מערכת צינורות הדם (איור א-46). מערכת הלימפה מורכבת מנימים, מצינורות, מקשרים ומאיברי לימפה.

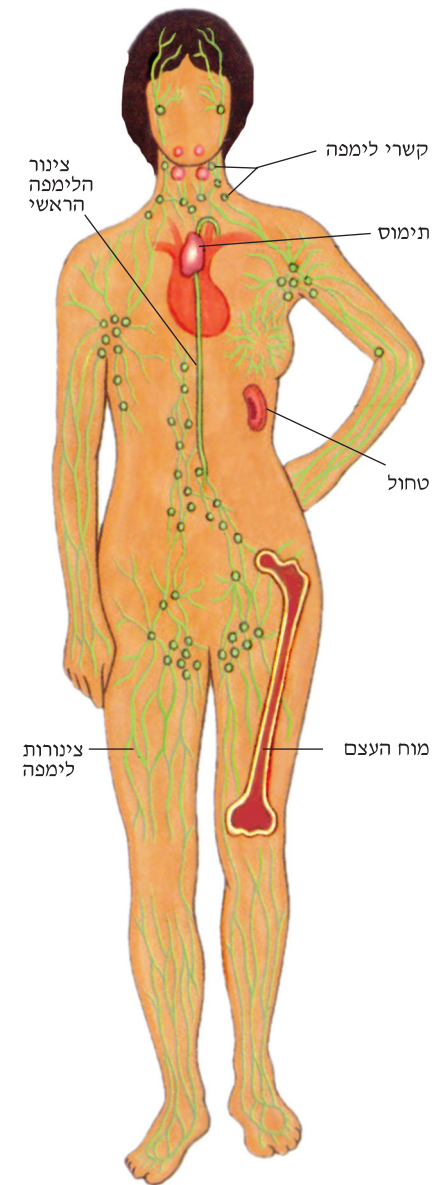
נימי הלימפה (lymph capillaries) הם רשת של צינורות דקיקים שנמצאים בין התאים. בניגוד לנימי הדם, בנימי הלימפה אין חיבור לצינורות משני הצדדים; קצה אחד מחובר לצינור לימפה והקצה האחר סגור (איור א-47).

בנימי הלימפה יש חלל גדול יותר מאשר בנימי הדם, והם גם יותר חדירים. נימי הלימפה בנויים משכבה אחת של תאי אנדותל שטוחים ובין תאי האנדותל יש מרווחים רבים. המרווחים האלה יוצרים פתחים גדולים יחסית והם מאפשרים חדירה של חומרים שאינם יכולים לחדור בקלות לנימי הדם.

נימי הלימפה מסתעפים ומגיעים כמעט לכל הרקמות בגוף. כאשר כמה נימי לימפה מתלכדים הם יוצרים **צינורות לימפה** (lymphatic ducts).



איור א-47: נימי הלימפה ונימי הדם



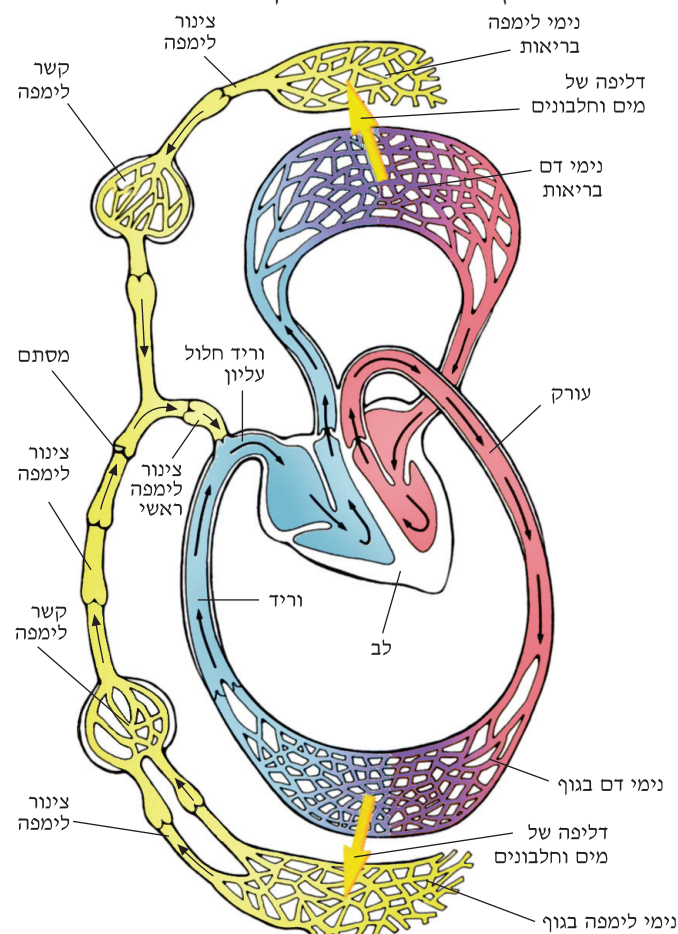
איור א-46: מבנה מערכת הלימפה

רחבים יותר (איור א-48), שדומים במבנה שלהם לוורידים. ואולם, להבדיל מן הוורידים, הדפנות של צינורות הלימפה דקים יותר ויש בהם יותר מסתמים. כל נוזל הלימפה מתנקז בסופו של דבר מכל צינורות הלימפה לצינור ראשי, שנמצא בבית החזה. הצינור הזה מתחבר לווריד החלול העליון, דרך הוורידים שבבסיס הצוואר. מן הווריד החלול העליון מגיע נוזל הלימפה, כשהוא מעורב בנוזל הדם, אל הלב.

מכיוון שצינורות הלימפה, אינם קשורים ללב ב"מעגל סגור", הלב אינו מתפקד כמשאבה להזרמת הלימפה בגוף. זרימת הלימפה מתאפשרת הודות ללחץ שרירי השלד שמקיפים

את צינורות הלימפה, הודות לתנועות מערכת העיכול והודות להתכווצות סיבי השריר בדפנות של כלי הדם הגדולים. גם סיבי השריר שבדפנות של צינורות הלימפה מתכווצים ודוחפים את נוזל הלימפה. המסתמים שבתוך צינורות הלימפה מאפשרים זרימה של נוזל הלימפה בכיוון אחד בלבד – מכל חלקי הגוף אל הלב.

במקומות מסוימים, לאורך צינורות הלימפה, פזורים **קשרי הלימפה** (lymph nodes) (איורים א-46, א-48). קשרי הלימפה מפוזרים בכל מערכת הלימפה, אך ריכוזים גדולים במיוחד נמצאים סביב פתחים בגוף ובמקומות של ניקוז איברים: במפשעות, בבתי השחי, בצוואר, מתחת ללסתות וסביב הגרון (שקדים). הממדים של קשרי הלימפה נעים ממילימטרים בודדים עד גודל של זית. קשרי הלימפה פעילים במערכת החיסון של הגוף, בהגנה מפני גורמים זרים. נוסף לצינורות ולקשרי הלימפה יש כמה **איברי לימפה** בגוף, כמו: **הטחול והתימוס** (איור א-46). באיברים האלה לא זורם נוזל לימפה, ובכל זאת הם שייכים למערכת הלימפטית, מכיוון שהם מעורבים בהתמיינות ובאגירה של תאי דם לבנים מסוג לימפוציטים.



איור א-48: הקשר בין מערכת הלימפה למערכת הדם

תפקידי מערכת הלימפה

שמירה על הרכב הדם - מערכת הלימפה תורמת לשמירה על הרכב הדם על ידי החזרה של מים וחלבונים מן הנוזל הבין-תאי אל הדם. עודפי מים ומומסים שדלפו אל הנוזל הבין-תאי, עוברים אל נימי הלימפה, ובאמצעות מערכת הלימפה מוחזרים אל הדם. חלק מן החלבונים שדולפים מנימי הדם (בגלל לחץ הדם על הנימים), לא חוזרים ישירות אל הדם, בעיקר בגלל הכמות הקטנה של הפתחים בדופן הנימים ובגלל גודל הפתחים. החלבונים האלה חודרים לנימי הלימפה דרך הפתחים הגדולים והמרובים שבדופןותיהם; הם נעים בנוזל הלימפה וחוזרים אל הדם, כאשר הלימפה מתערבבת עם הדם. החזרת החלבונים היא איטית מאוד, אך מכיוון שהכמויות שדולפות מן הדם הן קטנות, קצב ההחזרה מספיק לאזן את ריכוז החלבונים בדם. במצבים מיוחדים, כאשר החלבונים לא מוחזרים אל מחזור הדם, הדבר מביא להצטברותם בנוזל הבין-תאי, לשאיבת נוזלים מנימי הדם ולהתהוות בצקת. גם כאשר נפח הנוזל הבין-תאי עולה על כושר הניקוז או כאשר צינורות הלימפה נחסמים, הנוזל הבין-תאי מצטבר ומתהווה בצקת. הבצקת מפריעה לחילוף החומרים התקין בנימי הדם, ויוצרת נפיחות ברקמה.

הגנה מפני זיהומים - מערכת הלימפה אחראית להבשלה של תאי הדם הלבנים מסוג לימפוציטים. בפציעות וגם בזיהומים שונים, חודרים לגוף חיידקים, נגיפים וגורמים זרים אחרים. אלה שמגיעים אל מערכת הלימפה, מעוררים בקשרי הלימפה ובאיברי הלימפה הבשלה מוגברת של לימפוציטים. הלימפוציטים תוקפים ומפרקים את הגורמים הזרים שהגיעו אל מערכת הלימפה. כאשר הזיהום חמור, מתפתחת דלקת בקשרי הלימפה והם מתנפחים וכואבים, אך הם פועלים כמסננים וכבלמים יעילים למניעת התפשטות החיידקים בגוף. (על פעילותה של מערכת הלימפה בהגנה על הגוף, ראו בעמ' 243-257).

הובלת שומנים - מערכת הלימפה מובילה את תוצרי פירוק השומנים מן המעי אל הדם. בניגוד לסוכרים ולחומצות אמיניות, תוצרי הפירוק של השומנים במעי (חומצות שומן וגליצרול) אינם מועברים ישירות מן המעי הדק אל הדם. בגלל מבנה הדופן של נימי הדם הם אינם יכולים לעבור דרכם אל הדם. הם יוצאים אל הנוזל הבין-תאי ומשם חודרים אל נימי הלימפה שמגיעים אל המעי.

סיכום

1. מערכת הלימפה היא מערכת צינורות הפרוסים בגוף במקביל לכלי הדם. במערכת הלימפה זורם נוזל הלימפה. מערכת הלימפה מורכבת מנימים, מצינורות, מקשרים ומאיברי לימפה.

2. נוזל הלימפה מכיל מים, מומסים ותאי דם לבנים. נוזל הלימפה זורם בכיוון אחד בלבד – מכל חלקי הגוף אל הלב.
3. מערכת הלימפה מהווה מערכת ניקוז, שמחזירה מים וחלבונים מן הנוזל הבין-תאי אל הדם.
4. מערכת הלימפה משתתפת בהגנה על הגוף מפני זיהומים.
5. מערכת הלימפה מובילה את תוצרי הפירוק של השומנים ממערכת העיכול אל הדם.



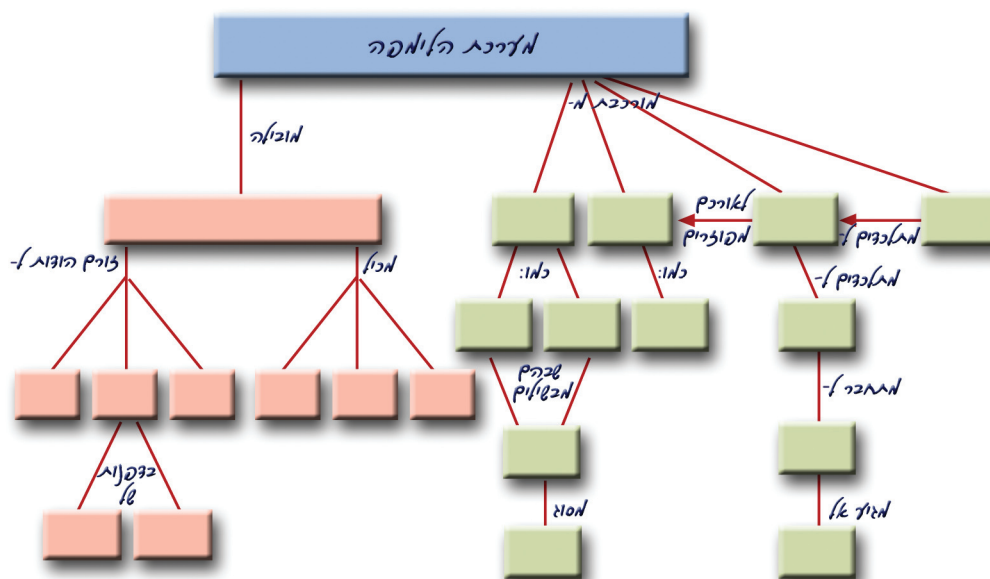
1. השוו, באמצעות טבלה, בין מערכת הדם למערכת הלימפה. התייחסו למדדים האלה: (א) תפקידיה של כל מערכת; (ב) המרכיבים של כל מערכת; (ג) מבנה הנימים; (ד) מבנה צינורות הלימפה בהשוואה למבנה הוורידים; (ה) הרכב הנוזל בכל מערכת; (ו) כיוון זרימת הנוזל; (ז) הגורמים שמשפיעים על זרימת הנוזל.

2. כיצד מסייעת מערכת הלימפה בשמירה

על ההומיאוסטזיס בגוף? הסבירו.

3. העתיקו את מפת המושגים של מערכת

הלימפה (איור א-49) והשלימו את המושגים שחסרים בה. היעזרו ברשימת המושגים הזאת: הלב; שקדים; נוזל לימפה; כלי דם גדולים; צינור לימפה ראשי; תימוס; לחץ שרירי השלד; לימפוציטים; התכווצות סיבי שריר; קשרי לימפה; מומסים; טחול; תאי דם לבנים; צינורות לימפה; תנועות מערכת העיכול; איברי לימפה; מים; וריד חלול עליון; נימי לימפה. (שימו לב! יש מושגים שופיעו יותר מפעם אחת).



איור א-49: המבנה והרכב של מערכת הלימפה

פרק ב

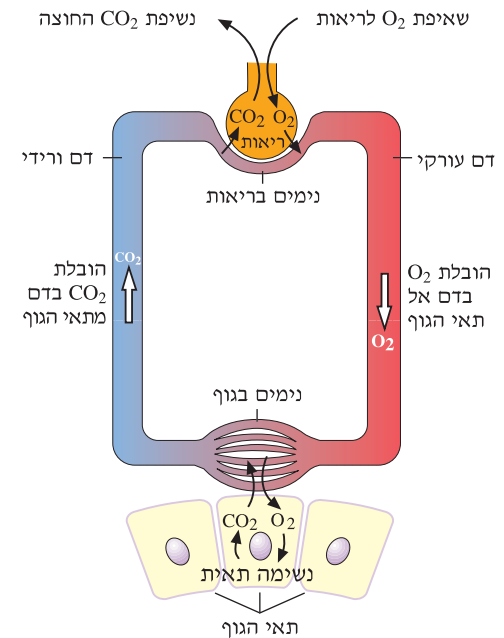
נשימה באדם ובבעלי חיים

נשימה בבעלי חיים

לכל תא בגוף בעלי החיים דרוש חמצן, המאפשר לו להפיק אנרגיה מן המזון בתהליך הנשימה התאית. בנשימה התאית משתחרר פחמן דו-חמצני (CO_2) ויש להרחיקו מן התאים. ביצורים חד-תאיים החמצן נקלט מן הסביבה המימית החיצונית שבה הם חיים וה- CO_2 מורחק אל הסביבה המימית הזאת. ביצורים רב-תאיים החמצן נקלט מן הסביבה המימית הפנימית שמקיפה את התאים (הנוזל הבין-תאי) וה- CO_2 מורחק אל הסביבה המימית הזאת. ליצורים רב-תאיים יש מערכת נשימה* שמותאמת במיוחד לחילוף גזים בין הסביבה החיצונית לבין הסביבה הפנימית. מערכת הנשימה מבצעת **חילוף גזים**: היא קולטת חמצן מן הסביבה החיצונית, ומובילה אותו אל התאים לתהליך הנשימה התאית; היא אוספת CO_2 מן התאים ומרחיקה אותו מן הגוף (איור ב-1).

יש אורגניזמים שמסתפקים במעט מאוד חמצן, ולעומתם יש אורגניזמים שצורכים הרבה מאוד חמצן. יש אורגניזמים שמקור החמצן שלהם הוא האוויר ויש כאלה שקולטים את החמצן מן המים. בני אדם ויונקים אחרים מתקשים לנוע ולנשום בגובה של 6,000 מטר, שבו האוויר דליל מאוד ומכיל מעט חמצן, ואילו העופות נושמים ביעילות בגובה של 9,000 מ'. בעלי חיים יכולים לפעול בסביבות שונות הודות למערכות נשימה שמותאמות במבנה ובתפקוד שלהן לכמות החמצן שבעל החיים צורך, ולסביבה שממנה הוא קולט את החמצן.

* כאשר אנו משתמשים בשפת היומיום במילה "נשימה" אנו מתכוונים לפעולות חילוף הגזים - השאיפה והנשיפה (breathing). בשפה המדעית, נשימה (respiration) היא תהליך הפקת אנרגיה מחומרים אורגניים ביצורים חיים (תהליך הנשימה התאית). מכיוון שהמילה "נשימה" היא זו שמשמשת אותנו בחיי היומיום, נשתמש בה גם כשמדובר בחילופי גזים.



איור ב-1: חילוף גזים במערכת הנשימה ובתאי הגוף של יונקים

יצורים חד-תאיים, כמו אמבה וסנדלית (איור א-1 בעמ' 9) או יצורים רב-תאיים קטנים מאוד, כמו הידרה (איור א-2 בעמ' 10) יכולים לקלוט את כל החמצן הדרוש להם ולפלוט CO_2 דרך מעטה גופם. הדיפוזיה של הגזים שמתבצעת דרך שטח גופם מספקת את צורכי חילוף הגזים של האורגניזמים האלה. לתולעים שטוחות (פלנריה, לדוגמה), שמבנה גופן שטוח (איור א-3 בעמ' 10), אין תאים שמרוחקים ממעטפת גופן, וחילוף הגזים דרך מעטה הגוף מספיק לצורכיהן. גם בתולעי הפרקים, שחיות במים או באדמה הלחה (כמו השלשול), כל חילוף הגזים נעשה דרך העור.

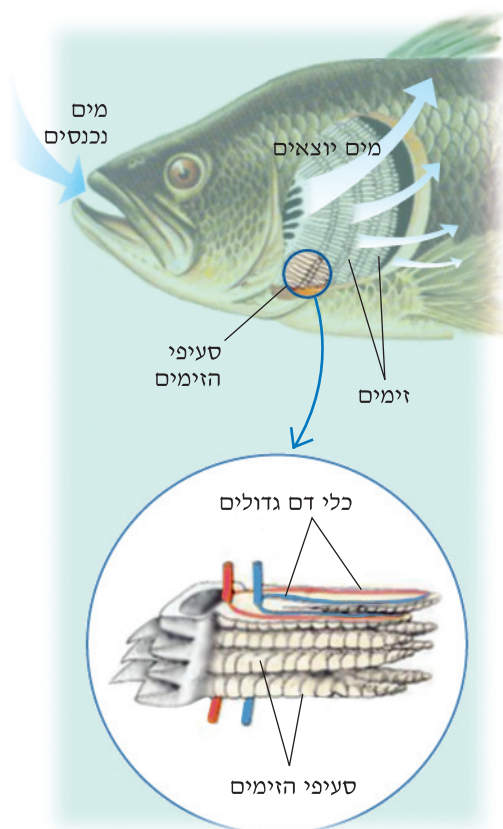
יצורים רב-תאיים גדולים אינם יכולים להסתפק בחילוף גזים בדיפוזיה דרך השטח של פני הגוף מאחר ששטח פני הגוף קטן יחסית לנפח, ואינו יכול לספק את צורכי הגוף (ראו עמ' 11). גם המרחק שמולקולות הגזים צריכות לעבור הוא גדול יחסית, וקצב הדיפוזיה אינו יכול לספק את הצרכים של כל תא ותא.

במהלך האבולוציה התפתחו ביצורים רב-תאיים איברים מיוחדים, בעלי שטח פנים גדול, לחילוף הגזים בין התאים לסביבתם. האיברים לחילוף הגזים הם: (א) זימים בדגים; (ב) טרכאות בחרקים; (ג) ריאות ביונקים, בעופות ובזוחלים. כמו כן, התפתחו מערכות שבהן מובלים הגזים בגוף במהירות רבה יותר מאשר לו עברו בדיפוזיה בלבד.

נשימה בדגים

מקור החמצן של בעלי חיים ימיים, כמו: דגים וראשנים, הוא בחמצן המומס במים. המים דלים בחמצן, מאחר שמסיסות החמצן במים היא נמוכה, כלומר: רק חלק קטן מהחמצן שבאוויר מתמוסס במים. לדוגמה, בטמפרטורה של 15°C ריכוז החמצן במים מגיע ל-0.7%, לעומת 21% באוויר. בעלי החיים שנושמים במים יכולים לחיות בסביבה דלה בחמצן הודות למבנה מיוחד של מערכת חילוף הגזים שמאפשר להם לקלוט כ-85% מן החמצן המומס במים. בעלי חיים יבשתיים קולטים באמצעות הריאות רק כ-25% מן החמצן שבאוויר.

חילוף הגזים במים מתאפשר הודות לאיברי נשימה מיוחדים שנקראים **זימים** (gills) (איור ב-2). לזימים יש מבנה המותאם לקליטה יעילה של חמצן במים. הזימים בנויים מקרומים רבים דקים מאוד, בעלי מבנה מפוצל הדומה לסעיפי נוצה מקופלים. מספרם הרב של הזימים והמבנה המסועף והמפוצל שלהם מקנים שטח פנים גדול לחילוף הגזים. הקרומים הדקים מאפשרים חדירה טובה של החמצן. הקצוות של כל שני זימים סמוכים חופפים זה לזה; המבנה הזה מגדיל את ההתנגדות לזרימת המים, ותנועת המים המואטת מאפשרת קליטה רבה יותר של חמצן.

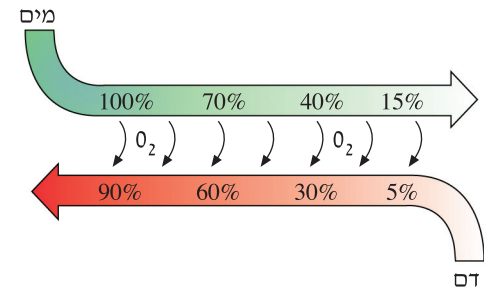


איור ב-2: ראש של דג שמכסה הזימים הוסר ממנו

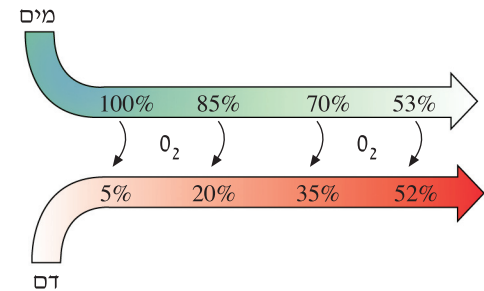
נוסף למבנה הזימים, גם הזרימה המתמדת של מים על פני הזימים תורמת לקליטה היעילה של החמצן. כאשר פיו של הדג נפתח, מים נשאבים אל הזימים. כשהפה נסגר, המים שעברו על פני הזימים נדחפים החוצה דרך פתחי הזימים. תנועות הפתיחה והסגירה של הפה גורמות לזרימה מתמדת של מים טריים, עשירים יחסית בחמצן, על פני הזימים, ומאפשרת קליטה רבה יותר של חמצן (איור ב-2).

בזמן שהמים עוברים על פני הזימים, החמצן חודר מן המים אל נימי הדם שנמצאים בזימים, והדם מוביל את החמצן מן הזימים אל תאי הגוף. מספרם הרב של הנימים בזימים מאפשר מעבר מהיר ויעיל של החמצן. נימי הדם מובילים גם CO_2 מתאי הגוף אל הזימים, ובזימים ה- CO_2 יוצא אל המים.

קליטת החמצן מהמים יעילה גם הודות למנגנון של **זרימה נגדית** (countercurrent flow) שמתקיים בזימים; כיוון זרימת הדם בנימים מנוגד לכיוון זרימת המים על פני הזימים (איור ב-4). במערכת הזרימה הנגדית, ככל שהדם מתעשר בחמצן, הוא בא במגע עם מים שריכוז החמצן בהם גבוה יותר (איור ב-3, א). באופן כזה נשמר תמיד מפל ריכוזים של חמצן בין המים לדם, והדיפוזיה של החמצן מן המים אל הדם נמשכת. כתוצאה מכך, כ-85% מן החמצן שבמים נקלטים בדם.

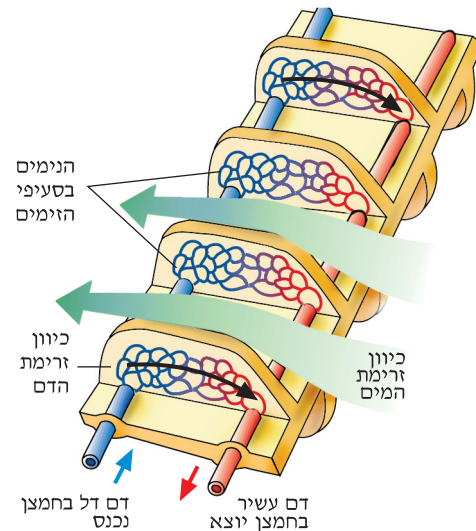


א. דיפוזיה של חמצן בזרימה נגדית



ב. דיפוזיה של חמצן בזרימה מקבילה

איור ב-3: דיפוזיה של חמצן בזרימה נגדית ובזרימה מקבילה (המספרים מציינים את אחוזי החמצן)



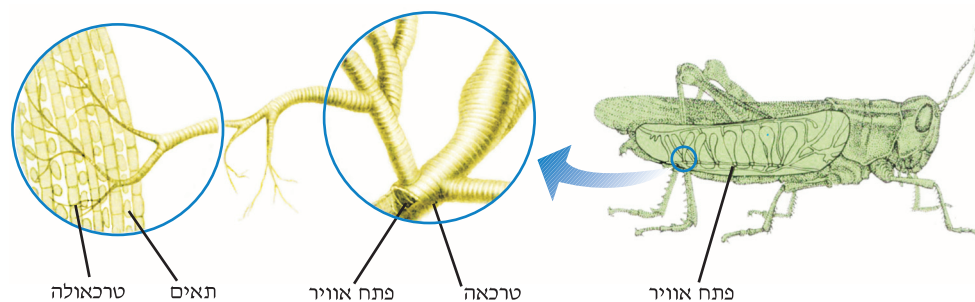
איור ב-4: זרימה נגדית של מים ודם בזימים

אם הזרימה לא הייתה נגדית אלא זרימה באותו כיוון, הדם בכלי הדם, והמים שנעים על פני כלי הדם היו זורמים בזרימה מקבילה. במצב כזה, ההפרש בין הריכוז של החמצן בדם ובין ריכוז החמצן במים היה גדול בתחילת הזרימה וקטן מאוד בסופה (איור ב-3, ב). ריכוז החמצן במים היה הולך וקטן ואילו ריכוז החמצן בדם היה עולה. כאשר ריכוזי החמצן במים ובדם היו משתווים, הדיפוזיה של החמצן אל הדם הייתה נפסקת, וכמות גדולה של חמצן הייתה נשארת במים.

נשימה בחרקים

בחרקים, חילוף הגזים בין הסביבה לבין הגוף נעשה דרך פתחי אוויר שממוקמים לאורך גופו של החרק (איור ב-5). פתחי האוויר נפתחים ונסגרים על פי הצורך בעזרת שרירים מיוחדים. בשעת מנוחה הם כמעט סגורים ובשעת פעילות מאומצת הם נפתחים לרווחה. שערות דקיקות, המכסות את הפתחים, מונעות כניסת חלקיקים גסים ומקטינות את איבוד המים.

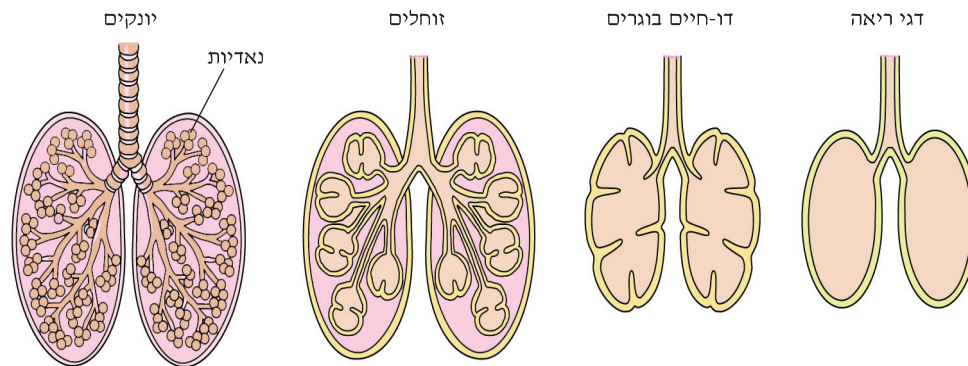
מפתחי האוויר נמשכת רשת של צינורות שנקראים **טרכאות** (tracheae) (איור ב-5). הטרכאות מתפצלות ומסתעפות בתוך גוף החרק ומסתיימות בצינוריות מיקרוסקופיות מלאות נוזל. הצינוריות נקראות **טרכאולות** (tracheoles), ובקצותיהם הדקיקים מתבצע חילוף הגזים עם התאים. קצות הטרכאולות לחים, והחמצן שבאוויר מתמוסס בנוזל ועובר בדיפוזיה אל תוך התאים. CO_2 שמסיסותו במים גבוהה וריכוזו באוויר נמוך, נפלט בקלות מן התאים אל הטרכאולות ומהן לסביבה. באמצעות מערכת הטרכאות מתבצעים אפוא גם חילופי הגזים בין הגוף לסביבה וגם הובלת הגזים בתוך הגוף.



איור ב-5: חילוף גזים באמצעות טרכאות בחרק

נשימה בחולייתנים יבשתיים

בחולייתנים יבשתיים (זוחלים, עופות ויונקים) חילוף הגזים נעשה בריאות. גם לחלזונות יבשתיים יש ריאות, גם לדגים אחדים (דגי ריאה), ולרוב הדו-חיים הבוגרים. הריאות (lungs) הן שקים אלסטיים שמתנפחים ומתכווצים. הריאות נמצאות עמוק בתוך הגוף, וכך נמנעת התייבשות של שכבה לחה שעוטפת אותן. מערכת צינורות מסועפת מובילה את החמצן מן הסביבה החיצונית אל הריאות ומסלקת מן הריאות את ה- CO_2 אל הסביבה החיצונית. בבעלי חיים לא מפותחים יחסית, כמו: דגי ריאה, הריאות הן שני שקים פשוטים, וחילוף הגזים בהן תלוי בדיפוזיה בלבד (איור ב-6). בבעלי חיים מפותחים יותר, כמו: דו-חיים, יש התקפלויות של השטח הפנימי של הריאות והן מגדילות את שטח הפנים לחילוף הגזים. בזוחלים, התפצלויות רבות של צינורות הנשימה יוצרות חללים פנימיים בעלי שטח פנים גדול לחילוף הגזים. ההתפתחות האבולוציונית הגיעה לשיאה בעופות וביונקים. צינורות הנשימה שלהם מתפצלים בריאות למיליוני שלפוחיות זעירות שנקראות **נאדיות** (alveoli) (איור ב-6). הנאדיות מגדילות מאוד את שטח הפנים ומייעלות את תהליך חילוף הגזים. עופות ויונקים שומרים על טמפרטורת גוף פחות או יותר קבועה ולשם כך דרושה להם כמות גדולה של אנרגיה. האנרגיה הזאת מופקת בתהליך הנשימה התאית, תוך כדי ניצול כמות גדולה של חמצן. לריאות של יונקים ועופות יש שטח פנים גדול מאוד וקרומי התאים שלהם דקים במיוחד. כתוצאה מכך, כמות גדולה של חמצן ו- CO_2 יכולה לעבור דרכם. אצל עופות ויונקים יש גם תנועה של אוויר - **אוורור** (ventilation) - בסביבת הריאות. התכונות של שרירים בפעולת הנשימה מאפשרת את אוורור הריאות, על ידי הזרמת אוויר פנימה והחוצה, ועל ידי כך מייעלת את חילופי הגזים.



איור ב-6: אבולוציה של הריאות

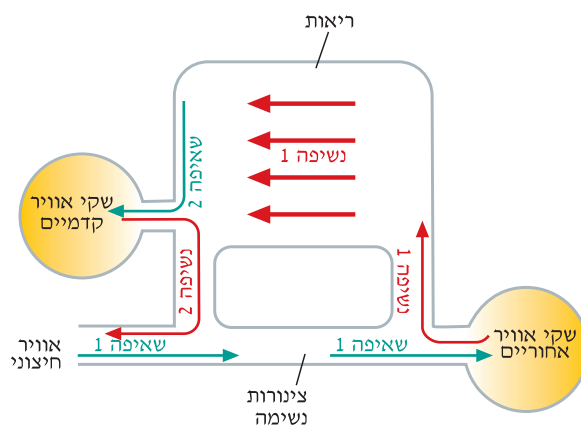


איור ב-7: מערכת הנשימה בעופות

ליצורים הנושמים בעזרת ריאות יש מערכת כלי דם שצמודה לריאות (איור ב-1). זרם הדם מאפשר תנועה מהירה של הגזים, מן הריאות אל התאים ומן התאים אל הריאות. הזרימה המתמדת של הדם גם שומרת על מפל ריכוזים של הגזים בין הדם לריאות. ריכוז גבוה יותר של חמצן בריאות מאפשר דיפוזיה שלו אל הדם, וריכוז גבוה יותר של CO_2 בדם מאפשר דיפוזיה שלו אל הריאות. ככל שמפל הריכוזים גבוה יותר, הדיפוזיה של הגזים מהירה יותר.

נשימה בעופות

מערכת חילוף הגזים של העופות מותאמת לצריכת כמות גדולה של חמצן והיא יעילה יותר מזו של היונקים. זרימת האוויר בעופות שונה מאוד מזו של היונקים. נוסף לזוג ריאות, יש לעופות שקי אוויר (air sacs) אחדים שתופסים נפח רב מחלל גופם ואף חודרים לחללים בעצמות העוף (איור ב-7). לשקי האוויר אין אספקת דם וכמעט שאינם משתתפים בחילופי הגזים. הסידור שלהם מאפשר זרימה חד-כיוונית של האוויר בריאות (איור ב-8).



איור ב-8: זרימת אוויר חד-כיוונית בריאות של עופות

בשאיפה הראשונה, האוויר שנשאף זורם דרך צינורות נשימה אל שקי האוויר האחוריים. בנשיפה הראשונה, האוויר נע מן השקים האחוריים אל הריאות. בשאיפה השנייה, האוויר נע מן הריאות אל השקים הקדמיים ובנשיפה השנייה, האוויר נע מן השקים הקדמיים אל מחוץ לגוף. באופן כזה האוויר בריאות נע תמיד בכיוון אחד - קדימה, גם בשאיפה וגם בנשיפה. חילוף הגזים בריאות של עופות נעשה דרך הדפנות של צינורות דקיקות ואלה פתוחות בשני

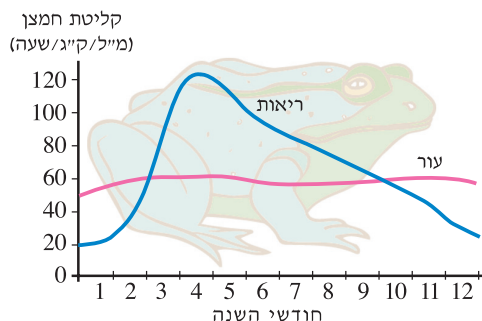
הקצוות ומאפשרות מעבר חד-כיווני של האוויר. זרימת האוויר בכיוון אחד גורמת לכך שהאוויר הנשאף תמיד "טרי" ועשיר בחמצן. לעומת זאת, בריאות של היונקים, חילוף הגזים נעשה בנאדיות, שהם "קצה התיב" של תנועת האוויר. זרימת האוויר אצל היונקים היא דו-כיוונית; פנימה אל הריאות בכיוון אחד, והחוצה מן הריאות בכיוון הנגדי. כתוצאה מכך, האוויר הנכנס לריאות בכול שאיפה מתערבב עם אוויר "ישן", שכבר שהה זמן-מה בריאות. באוויר מעורב כזה, ריכוז החמצן קטן יותר ופחות חמצן עובר אל הדם. נוסף לכך, בריאות של העופות קיימת זרימה נגדית שדומה למנגנון הזרימה הנגדית בזימי הדגים. כיוון זרימת האוויר בריאות מנוגד לכיוון זרימת הדם שבנימים, והדם "פוגש" כל הזמן אוויר שיש בו ריכוז גבוה של חמצן. בזכות מנגנון הזרימה הנגדית נוצר מפל ריכוזים גבוה בין ריכוז החמצן באוויר לבין ריכוזו בדם, וקליטת החמצן לדם יעילה יותר.

סיכום

1. באמצעות מערכת הנשימה מתבצע חילוף חמצן ו- CO_2 בין הגוף לבין הסביבה (הגוף קולט חמצן ופולט CO_2).
2. ביצורים חד-תאיים ורב-תאיים פשוטים מתבצע חילוף הגזים בדיפוזיה, דרך מעטה הגוף.
3. ביצורים רב-תאיים גדולים התפתחו מערכות נשימה שונות במהלך האבולוציה. למערכות האלה יש שטח פנים גדול ביחס לנפח הגוף של היצור. המערכות האלה הן: זימים (בדגים), טרכאות (בחרקים) וריאות (בזוחלים, בעופות וביונקים).
4. אצל רוב היצורים הרב-תאיים, הגזים מובלים ממערכת הנשימה אל התאים ומן התאים אל מערכת הנשימה באמצעות הדם. הדם מזרז את מעבר הגזים ושומר על מפל ריכוזים שמאפשר דיפוזיה יעילה.
5. אצל חרקים, הובלת הגזים אל התאים נעשית בצינורות אוויר בלבד (טרכאות) ולא באמצעות הדם.
6. מנגנונים של הזרמת אוויר (אוורור) או של הזרמת מים מאיצים את חילופי הגזים במערכות הנשימה.
7. לדגים ולעופות יש מנגנוני זרימה נגדית של אוויר ושל דם, ומנגנונים אלה מייעילים מאוד את הדיפוזיה של החמצן אל הדם.
8. בעופות, המנגנון של זרימת אוויר חד-כיוונית דרך שקי אוויר גורם לכך שהאוויר הנשאף הוא תמיד אוויר "טרי", עשיר בחמצן.



1. אדם יכול לחיות כמה ימים בלי כבד או כליה, אבל הוא ימות אם יישאר 5 דקות בלי נשימה או בלי זרימת דם. הסבירו מדוע.
2. אצל דגים, שהם שחיינים מהירים, שטח הפנים של הזימים גדול לעתים פי 10 משטח גופם. בדגי קרקע (שלא מרבים לנוע), שטח הפנים של הזימים גדול רק פי 2 משטח גופם. הסבירו את הקשר בין שטח הפנים של הזימים לבין פעילותו של הדג.
3. בדו-חיים רבים (למשל, צפרדע), חילוף הגזים נעשה גם דרך העור וגם דרך הריאות. העקום באיור ב-9 מראה את קצב קליטת החמצן בצפרדע, דרך העור ודרך הריאות, בחודשים שונים בשנה.
 - א. השוו בין קליטת החמצן דרך העור לבין קליטת החמצן דרך הריאות במהלך השנה.
 - ב. מתי מתרחשת מרבית קליטת החמצן דרך העור ומתי היא מתרחשת דרך הריאות?
 - ג. בעונה הקרה, הצפרדעים טומנות עצמן בקרקעית של מקווי מים ונכנסות לתרדמה, עד בוא האביב. בעת התרדמה, קצב חילוף החומרים בגופן נמוך מאוד. כיצד מסביר מידע זה את הנתונים המובאים בעקומה?
 - ד. באיזה תהליך נעשה חילוף הגזים דרך העור?
 - ה. הסבירו מדוע קצב קליטת החמצן דרך העור נשאר פחות או יותר קבוע במהלך כל השנה.
 - ו. מה יקרה לצפרדע שעורה יתייבש? הסבירו.
 - ז. בטבלה ב-1 מוצג קצב חילוף הגזים דרך הריאות ודרך העור של הצפרדע, בטמפרטורה של 15°C .



איור ב-9: קצב קליטת החמצן בצפרדע, דרך העור ודרך הריאות, במהלך שנה אחת

טבלה ב-1: קצב חילוף הגזים דרך הריאות ודרך העור של הצפרדע ב- 15°C (מ"ל/ק"מ/שעה)

חמצן	CO_2	
ריאות	100	30
עור	65	120

- השוו בין קצב חילוף הגזים של החמצן לקצב חילוף הגזים של ה- CO_2 דרך העור ודרך הריאות. איזה איבר יעיל יותר בקליטת חמצן, ואיזה איבר יעיל יותר בפליטת CO_2 ?
- ח. לדו-חיים ממיינים מסוימים יש קפלים רבים בעור. איזה יתרון מקנים קפלים אלה?

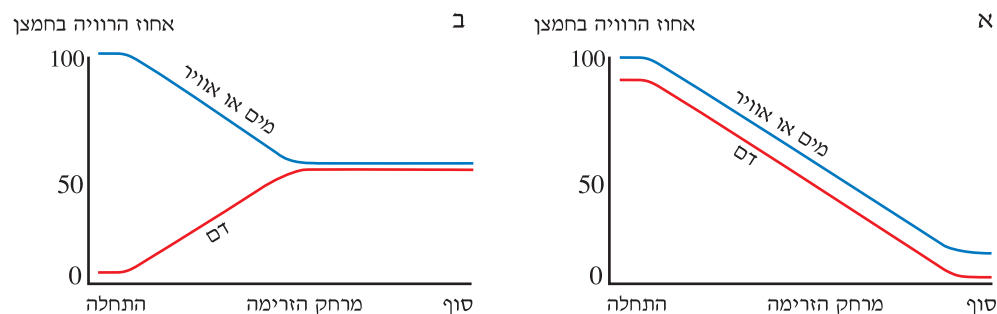
- ט. ציינו יתרונות וחסרונות בחילוף גזים דרך העור ויתרונות וחסרונות בחילוף גזים דרך הריאות.
4. תארו כיצד מוגדל שטח הפנים במערכות הנשימה השונות: (א) בטרכאות; (ב) בזימים; (ג) בריאות.
5. כיצד מסייע תהליך האוורור לקיומה של דיפוזיית גזים יעילה?
6. הכינו טבלה והשוו בה את מערכות הנשימה של 4 מחלקות בעלי חיים: יונקים, חרקים, דגים ועופות. התייחסו בטבלה למדדים האלה: (א) איברי חילוף הגזים; (ב) התאמת האיברים לחילוף הגזים; (ג) מקור החמצן; (ד) האם יש אוורור או זרימה מתמדת של מים? (ה) האם יש מנגנון זרימה נגדית? (ו) האם יש מערכת דם להובלת הגזים?
7. דגים גדולים, כמו: כרישים ודגי טונה, חייבים להימצא בתנועה מתמדת כדי להזרים מים רבים דרך הזימים. הסבירו מדוע.
8. בניסוי שבו נבדקה השפעת טמפרטורת המים על דגי זהב, נמדדו ריכוז החמצן במים וקצב זרימת המים דרך הזימים. תוצאות הניסוי מתוארות בטבלה ב-2:

טבלה ב-2: השפעת הטמפרטורה על ריכוז החמצן במים, ועל קצב זרימת המים דרך הזימים של דג זהב

זרימת המים דרך הזימים (ליטר/ק"ג/שעה)	ריכוז החמצן במים (אחוזים)	הטמפרטורה של המים (°C)
1.3	0.9	5
9.0	0.7	15
32.0	0.6	25
60.0	0.5	35

- א. כיצד משפיעה העלייה בטמפרטורה על ריכוז החמצן במים? הסבירו מדוע.
- ב. מדוע מדדו בניסוי את קצב זרימת המים דרך הזימים? הסבירו.
- ג. כיצד מושפעת זרימת המים דרך הזימים מן השינויים בטמפרטורת המים? הסבירו מדוע.
9. א. באילו בעלי חיים תנועת החמצן באיברי הנשימה היא חד-כיוונית ובאילו בעלי חיים היא דו-כיוונית?
- ב. איזה מבין שני אופני הזרימה יעיל יותר לתהליך חילוף הגזים? הסבירו.

10. שני העקומים שבאיור ב-10 מתארים את אחוז הרוויה של החמצן בדם ובמים (או באוויר) כתלות במרחק הזרימה לאורך רקמות חילוף הגזים (קרומים בזימים או נאדיות בריאה). עקום אחד מתאר זרימה נגדית והעקום האחר מתאר זרימה מקבילה.



איור ב-10: אחוז הרוויה בחמצן כתלות במרחק הזרימה

- הסבירו מהי זרימה נגדית ומהי זרימה מקבילה באיברי חילוף הגזים.
- איזה עקום מתאר זרימה נגדית ואיזה עקום מתאר זרימה מקבילה? הסבירו.
- חשבו, על פי העקומים, איזה אחוז מן החמצן עובר מן המים או מן האוויר לדם בזרימה הנגדית ואיזה אחוז עובר בזרימה המקבילה. הסבירו את חישוביכם.
- באילו בעלי חיים יש זרימה נגדית ובאילו הזרימה היא מקבילה?
- למה הזרימה הנגדית חשובה במיוחד בבעלי החיים שציינתם?



את יישום המחשב סקירה השוואתית של הנשימה ביצורים שונים - מבט אבולוציוני, ניתן למצוא באתר http://agribio.snunit.k12.il/Breath_site/virtual_pre2.html

היישום עוסק באבולוציה של התפתחות מערכת הנשימה בבעלי חיים על סמך מידע מאתרי אינטרנט. היישום נמצא במסע וירטואלי להכרת מבנה ותפקוד מערכת הנשימה בעקבות מולקולת החמצן, בתוך יחידת הלימוד הנשימה - מבנה, תפקוד ומה שביניהם. את יחידת הלימוד ניתן למצוא באתר

http://agribio.snunit.k12.il/main/upload/.ab/id_resp.html

נשימה באדם

מערכת הנשימה באדם מותאמת לצריכה רבה של חמצן מן האוויר, ולחיים ביבשה – מקום מחייה שנוטה לאבד מים לסביבתו.

חילוף הגזים באדם, בין הסביבה החיצונית לתאי הגוף, נעשה באמצעות שילוב של שתי מערכות:

- א. מערכת נשימה להובלה ולחילוף הגזים בין הסביבה החיצונית לריאות;
- ב. מערכת דם להובלה ולחילוף הגזים בין הריאות לתאי הגוף.

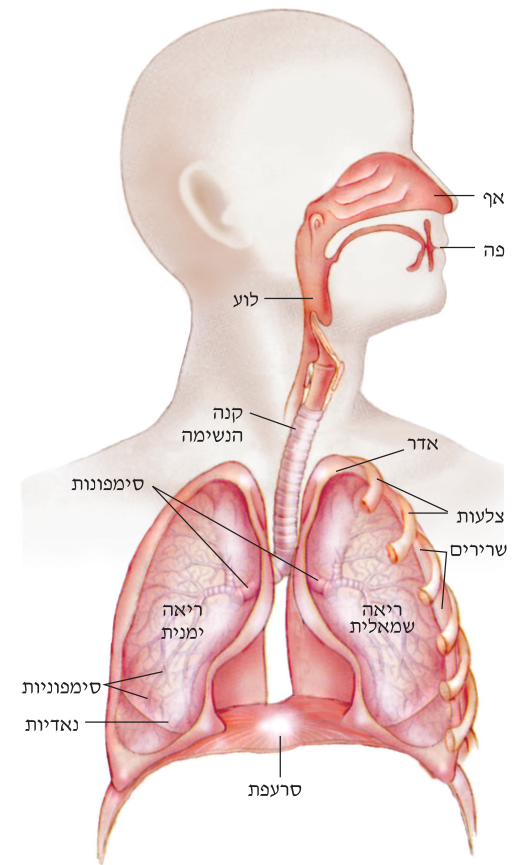
המבנה של מערכת הנשימה

במערכת הנשימה של האדם יש פתחי נשימה שדרכם נכנס ויוצא האוויר, צינורות להובלת האוויר, וריאות שבהן מתבצע חילוף הגזים עם הדם (איור ב-11).

פתחי הנשימה הם האף והפה; בדרך כלל נושמים דרך האף בלבד אולם גם הפה משמש כפתח לחילוף גזים בעת הצורך. באף קיימת מערכת סינון יעילה שתפקידה לשמור על הריאות מפני אוויר מזוהם, קר מדי או יבש מדי. חלל האף מרופד בשערות והן עוזרות חלקיקי אבק ולכלוך שנמצאים באוויר, ומונעות את כניסתם לריאות. חלקיקים כאלה שחודרים לאף או לקנה הנשימה מעוררים באיברים האלה את תגובת העיטוש או השיעול, ועל ידי כך הם נפלטים החוצה. מתחת לשערות מצויים קרומים לחים שמעלים את לחות האוויר שחודר פנימה. ספיגת הלחות על ידי האוויר מייעלת את התהליך של חילופי הגזים, שמתבצע בסביבה המימית של הגוף. אוויר קר שחודר מבחוץ מתחמם במחילות האף. כאשר אדם נושם דרך הפה עובר האוויר דרך קצרה ורחבה יותר מאשר דרך האף והסינון, החימום וההרטבה של האוויר לא מתבצעים במלואם.

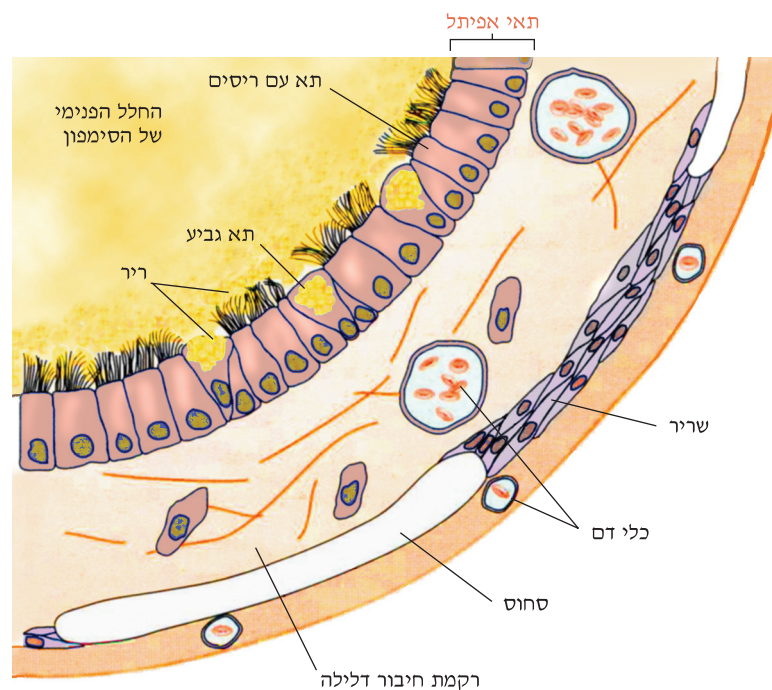
מפתחי הנשימה עובר האוויר **ללוע** (pharynx) ודרך הגרון הוא מועבר אל הריאות באמצעות מערכת של צינורות: **קנה הנשימה** (trachea) ו**הסימפונות** (bronchi). קנה הנשימה מתפצל לשני סימפונות – צינורות שמעבירים את האוויר לשתי הריאות.

לקנה הנשימה ולסימפונות יש דפנות עבים; שטח המגע בינם לבין האוויר קטן יחסית וכלי הדם בהם מעטים (איור ב-12). המבנה הזה אינו מאפשר חילוף גזים יעיל בין הדם לבין האוויר שעובר בהם. בדפנות של צינורות הנשימה יש סחוס ושרירים והם מרופדים בצדם הפנימי בתאי אפיתל. תאי האפיתל הם בעלי ריסיס וביניהם יש תאי בלוטה שנקראים **תאי גביע**.

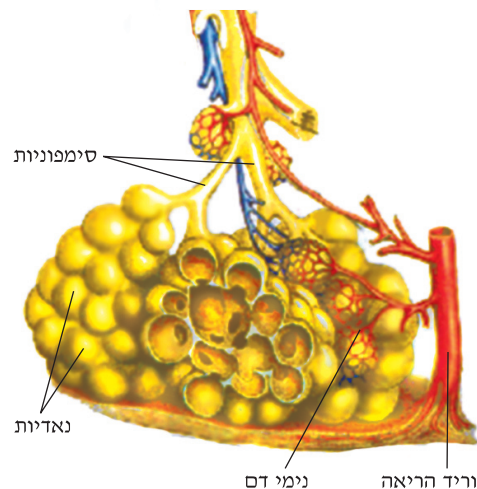


איור ב-11: מערכת הנשימה באדם

המונח סימפונות מקורו במילה סימפוזיה, מכיוון שהאוויר שעובר בצינורות משמיע את קולות הנשימה והקולות האלה הם כמו סימפוזיה.



איור ב-12: מבנה הדופן הפנימי של הסימפונות



איור ב-13: נאדיות הריאה

תאי הגביע מפרישים ריר שמדביק אליו את החלקיקים הזרים שחדרו לצינורות האוויר. הריסים נעים ללא הפסק בתנועה מתואמת ומסלקים חלקיקים זרים כאלה לעבר בית הבליעה. שני המנגנונים האלה - הפרשת הריר ותנועת הריסים - תורמים להגנת הריאות והגוף כולו מפני זיהום. פגיעה בפעילות הריסים או בהפרשת הריר גורמת נזק והפרעות במערכת הנשימה.

הסימפונות מגיעות אל הריאות ומתפצלות שוב ושוב עד לצינורות דקים ביותר – **סימפוניות** (bronchiole). הסימפוניות מסתיימות במיליוני שלפוחיות שנקראות **נאדיות** (alveoli) (איור ב-13). הנאדיות הן שקיקים זעירים שמוקפים שכבת תאים אחת וסביבם נימי דם מרובים. בנאדיות הריאה נעשה עיקר חילוף הגזים בין האוויר לדם. נאדיות הריאות והצינורות המובילים אליהן מהווים המשך של הסביבה החיצונית החודרת לתוך הגוף.

חסימת מעברי הנשימה במחלת סיסטיק פיברוזיס



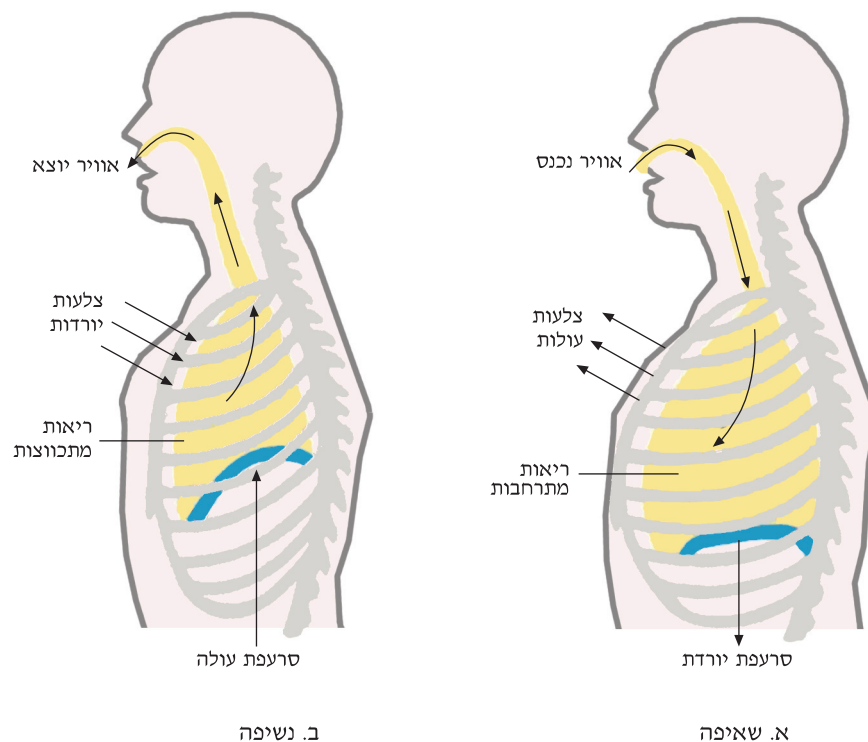
מוטציה בגן מסוים בכרומוזום 7 גורמת מחלה שנקראת סיסטיק פיברוזיס (cystic fibrosis) (CF). המוטציה פוגעת בחלבון CFTR שאחראי להעברת יוני כלור דרך קרום התאים. אצל חולי CF נוצר חלבון פגום ויש הפרעה בהעברת יוני הכלור, בייחוד בתאי בלוטות ההפרשה החיצונית בגוף. בתאי הגביע של צינורות הנשימה, גורמת המוטציה שינוי בריכוז המלחים של הריר המופרש. הריר נעשה סמיך ודביק ואינו מאפשר לריסים להניעו לעבר בית הבליעה. במקום לבצע פעולה של ניקוי, הריר חוסם את מעברי הנשימה. הריר מפריע לחילוף הגזים ומפריע להרחקת חלקיקים וחידקים מצינורות הנשימה. בגלל הזיהומים נוצר מצב דלקתי מתמשך בריאות. כדי להיפטר מ"פקקי" ההפרשה הסמיכים, נעזרים בפיסיותרפיה שמסייעת להרחיק את הריר הסמיך מצינורות הנשימה. טיפולים אנטיביוטיים למניעת זיהומים חוזרים ודיאטה מיוחדת מקלים גם כן על החולים. הודות לאבחון מוקדם, טיפול פסיותרפי, תרופות ודיאטה, עלתה תוחלת החיים של חולי CF מ-20 ל-40 שנה. באוכלוסיית ישראל, ההסתברות להיות נשא של גן פגום היא 1:35 ושכיחות המחלה היא 1:5,000 לידות. בבדיקת דם ניתן לזהות את הגן הפגום ל-CF. כאשר מוצאים ששני בני זוג הם נשאים של הגן הפגום ניתן לקבוע בוודאות, כבר בהיריון, אם העובר שלהם בריא או חולה. ניתן לאתר את הגן הפגום כבר בין השבוע ה-5 לשבוע ה-10 של ההיריון, או לאבחן גנטית עוברים שהופרו מחוץ לרחם. אם העובר מאובחן כחולה, קיימת אפשרות להפסיק את ההיריון על פי רצון המשפחה.

פעולת הנשימה – שאיפה ונשיפה

כדי לאפשר אספקת חמצן לתאים ולאפשר סילוק CO_2 מן התאים חשוב שתהיה החלפה מתמדת של האוויר בריאות. החלפת האוויר שבנאדיות עם אוויר מן הסביבה החיצונית נקראת **אוויר**, והיא נעשית באמצעות פעולות השאיפה והנשיפה. השאיפה (הכנסת אוויר לריאות) והנשיפה (הוצאת האוויר) נעשות על ידי הגדלת נפח בית החזה והקטנתו (איור ב-14).

שינויי הנפח מתבצעים באמצעות (א) שריר הסרעפת; (ב) השרירים הבין-צלעתיים; (ג) קרום האדר.

שריר הסרעפת (diaphragm) נמצא בתחתית בית החזה ומהווה מחיצה שרירית בין חלל



ב. נשיפה

א. שאיפה

איור ב-14: פעולות השאיפה והנשיפה

הבטן לבין חלל בית החזה (איור ב-11). בזמן התכווצות השריר הזה, יורדת השרעפת כלפי מטה ועל ידי כך גדל נפח בית החזה (איור ב-14, א). בזמן הרפיית השריר נעשית השרעפת קמורה, קמרונה בולט לתוך בית החזה, ונפח בית החזה קטן (איור ב-14, ב).

השרירים הבין-צלעתיים נמצאים בין הצלעות (איור ב-11). השרירים האלה מאפשרים הגדלת בית החזה והקטנתו. כאשר השרירים מתכווצים, מתרוממות הצלעות למעלה והחוצה ונפח בית החזה גדל. כאשר השרירים מתרפים, יורדות הצלעות ונפח בית החזה קטן.

האֶדְרָה (pleura) (נקרא גם צֶדֶר) מקיף את הריאות (איור ב-11) ובנוי משני קרומים: קרום אחד צמוד לריאות והאחר - לדופן בית החזה. בין שני הקרומים יש שכבת נוזל שמסייעת להצמיד את הריאות לדופן חלל החזה. כוח מתח הפנים של מולקולות המים שבנוזל גורם לכך ששני הקרומים מחליקים בקלות זה על גבי זה אך לא נפרדים זה מזה; כמו שני לוחות זכוכית

רטובים הצמודים זה לזה; הלוחות מחליקים בקלות זה על פני זה, אך לא נפרדים כאשר מושכים אותם. הריאות עצמן פסיביות לחלוטין, ו"נגררות" בצמידות לדופן בית החזה. הן אינן שואבות את האוויר. האוויר זורם לתוכן ויוצא מהן בהתאם לשינויים שחלים בנפח בית החזה ובלחץ האוויר בתוכו.

התכווצות שרירי הסרעפת והשרירים הבין-צלעתיים מגדילה את נפח בית החזה. הגדלת נפח בית החזה, גוררת ירידת לחץ האוויר בבית החזה ובריאות. לחץ האוויר בנאדיות הריאה נמוך מהלחץ האטמוספרי והאוויר מבחוץ חודר לתוך הריאות בהתאם למפל הלחצים. כניסת האוויר לתוך הריאות נקראת **שאיפה** (inhalation), והיא תהליך אקטיבי שצורך אנרגיה, לצורך הפעלת השרירים המרחיבים את בית החזה.

הרפיית שרירי הסרעפת והשרירים הבין-צלעתיים מקטינה את נפח בית החזה. כאשר נפח בית החזה קטן, הריאות נלחצות ומתכווצות. הירידה בנפח הריאות דוחסת את האוויר שבנאדיות, ויוצרת לחץ שעולה על הלחץ האטמוספרי. האוויר נע בהתאם למפל הלחצים ונפלט מן הריאות. יציאת האוויר מן הריאות נקראת **נשיפה** (exhalation), והיא תהליך פסיבי שאינו צורך אנרגיה. בזמן מאמץ, הנשיפה היא פעולה אקטיבית שמעורבים בה שרירים בין-צלעתיים ושרירי בטן.

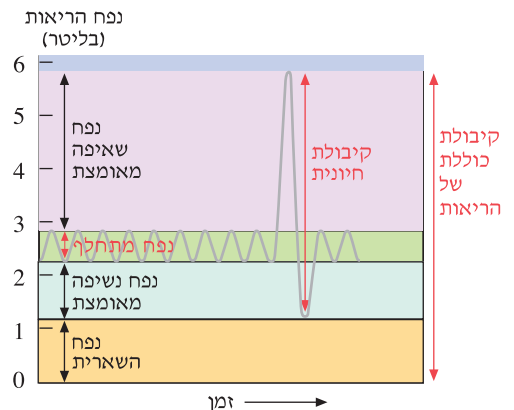
בסוף הנשיפה ולפני השאיפה הבאה, הריאות נמצאות במצב מנוחה. במצב הזה אין הזרמת אוויר, ושרירי הנשימה אינם פועלים. מצב כזה קיים רק כאשר האדם נח וקצב הנשימה שלו נמוך.

נפח האוויר בשאיפה ובנשיפה

נפח אוויר השאיפה או הנשיפה בנשימה אחת נקרא **נפח מתחלף** (איור ב-15). במצב מנוחה, הנפח המתחלף הוא כ-0.5 ליטר. חלקו הגדול של האוויר שנשאף (כ-0.35 ליטר) מגיע אל הנאדיות ומשתתף בחילוף הגזים. חלק אחר של האוויר שנשאף (כ-0.15 ליטר) נקרא **נפח מת**, מכיוון שאינו משתתף בחילוף הגזים. זהו האוויר האחרון שנשאף בכול שאיפה, והוא נשאר בתוך הקנה והסימפונות ונפלט ראשון עם הנשיפה.

בסוף שאיפה רגילה אדם יכול, באופן רצוני, להוסיף לנפח המתחלף 3 ליטרים, ובסוף נשיפה רגילה ניתן להוסיף לנפח המתחלף 1.2 ליטרים. נפח האוויר המרבי שאדם יכול לנשוף לאחר שאיפה מרבית נקרא **קיבולת חיונית**, ושיעורו אצל אדם בוגר הוא 4-5 ליטרים. אימון גופני יכול להגדיל את נפח הקיבולת החיונית ליותר מ-6 ליטרים.

אחרי כל נשיפה, אפילו נשיפה מרבית, נשארת כמות כלשהי של אוויר בתוך הריאות. נפח



איור ב-15: נפח השאיפה והנשיפה

האוויר שנשאב בריאות נקרא **נפח השאירית** והכמות שלו אצל אדם בריא בוגר היא כ-1.2 ליטרים. אוויר השאיפה (אוויר הסביבה) מתערבב תמיד עם נפח השאירית, ולכן ההרכב של האוויר בנאדיות שונה מהרכב אוויר השאיפה (טבלה ב-3).

טבלה ב-3: הריכוזים (באחוזים) של הגזים השונים באוויר השאיפה, בנאדיות, ובאוויר הנשיפה

גז	באוויר השאיפה	בנאדית	באוויר הנשיפה
חמצן	20.8	13.1	15.3
CO ₂	0.04	5.2	4.2

נפח האוויר שנשאב לריאות בדקה נקרא **אורור ריאתי**. כדי לחשב את האורור הריאתי, יש צורך למדוד את הנפח המתחלף ואת קצב הנשימה (מספר השאיפות בדקה).

אורור ריאתי (ליטר לדקה) = נפח מתחלף (ליטר) X קצב נשימה (מספר שאיפות בדקה)

בעת מאמץ גופני, הגוף צורך יותר חמצן, ולכן נושמים עמוק יותר ומהר יותר, והאורור הריאתי מתגבר. במאמץ גדול, האורור עשוי להגיע (תלוי בכושר הגופני) ל-100-200 ליטרים לדקה. אם המאמץ גדול עוד יותר, חשים **בקוצר נשימה**, תחושה של מחסור באוויר. קוצר נשימה יכול להופיע גם במצבים חולניים, שבהם יש הפרעה באורור הריאות, כגון: באסתמה, שבה קוטר הסימפונות מוצר, או במחלת לב, שבה קיימת הפרעה בהובלת החמצן מן הריאות אל הרקמות.

אסתמה (קצרת)

אסתמה היא הפרעה באורור הריאות על רקע אלרגי. היא באה לידי ביטוי בהתקפים של קשיי נשימה, שנובעים מהיצרות הסימפונות. ההיצרות נגרמת כתוצאה מהתכווצות השרירים בדופנות הסימפונות וכתוצאה מתהליך דלקתי שמתפתח בהן. ההתקפים האלה מאופיינים בקוצר נשימה, בתחושת לחץ בחזה, בצפצופים בעת הנשיפה ולעיתים אף בשיעול עם ליחה. הגורמים להתקפי אסתמה הם בעיקר אלרגנים (חומרים מעוררי אלרגיה) שאותם שואפים עם האוויר, כמו:



אבקת פרחים, אבק, כימיקלים שונים ועשן סיגריות. גם אלרגיות למזון, לפרווה ולנוצות מהוות גורם שמשפיע על התפתחות התקפים אסתמתיים. גורמים אחרים הם מצבי לחץ והפרעות רגשיות.

אסתמה מאובחנת באמצעות בדיקת תפקודי ריאות. לאחר שהוכחה אסתמה מבצעים בדיקת רגישות לאלרגנים שונים. חולי אסתמה יכולים לצמצם את תדירות ההתקפים ואת חומרתם על ידי הימנעות ממגע או מחשיפה לאלרגנים. חולי אסתמה מטופלים בתרופות נוגדות דלקת, שניתנות בשאיפה, על מנת למנוע את התהליך הדלקתי. בזמן התקף, ניתנות תרופות שמרפות את השרירים בדופנות הסימפונות. הרפיית השרירים מרחיבה את הסימפונות ומקלה על קוצר הנשימה.

מדידה איכותית של CO_2 שנפלט בנשיפה

את קצב חילוף הגזים בגוף אפשר למדוד על ידי מדידה של כמות ה- CO_2 שנפלטת בנשיפה. CO_2 מומס במים יוצר חומצה פחמתית (H_2CO_3). בעבודה זו נבחן, באמצעות אינדיקטורים, את נוכחות החומצה הפחמתית.



כלים	חומרים
3 כוסות כימיות (50 מ"ל)	50 מ"ל מי סיד צלולים
3 קשיות שתייה	בלון CO_2
3 מבחנות	10 מ"ל NaOH 0.1N (בבקבוק עם טפי)
	10 מ"ל פנול פתלאין 0.5% (בבקבוק עם טפי)

מהלך העבודה

1. לתוך כוס כימית הכניסו 20 מ"ל מי סיד צלולים (שיהוו אינדיקטור ל- CO_2). נשפו דרך קשית לתוך התמיסה עד שיחול שינוי. תארו את השינוי.
2. לתוך כוס כימית הכניסו 20 מ"ל מי סיד צלולים והוסיפו מעט גז מבלון CO_2 עד שיחול שינוי. האם יש הבדל בין תגובת האינדיקטור לנשיפה דרך קשית לבין תגובת האינדיקטור להוספת גז מבלון CO_2 ? הסבירו.
3. לתוך מבחנה הכניסו 5 מ"ל מי ברז. הוסיפו למים 2 טיפות פנול פתלאין (אינדיקטור המשנה את צבעו, בהתאם לשינוי הסביבה מבסיסית לחומצית). הוסיפו למבחנה טיפה אחר טיפה של NaOH וטלטלו את המבחנה לאחר הוספה של כל טיפה. המשיכו להוסיף NaOH עד שיופיע צבע ורוד שאינו נעלם.

4. נשפו דרך קשית לתוך התמיסה שבמבחנה עד שיחול שינוי. תארו את השינוי.
5. לתוך כוס כימית הכניסו 10 מ"ל מי ברז ו-4 טיפות פנול פתלאין. הוסיפו לכוס, תוך כדי טלטול, מעט טיפות של NaOH עד שיופיע צבע ורוד שאינו נעלם.
6. לתמיסה שבכוס הכניסו מעט גז מבלון CO_2 . האם יש הבדל בין תגובת האינדיקטור לנשיפה דרך קשית לבין תגובת האינדיקטור להוספת גז מבלון CO_2 ?
7. העתיקו את טבלה ב-4 וסכמו בה את תגובת האינדיקטורים ל- CO_2 .

טבלה ב-4: תגובת האינדיקטורים ל- CO_2

האינדיקטור	ללא תוספת CO_2	בתוספת CO_2
מי סיד צלולים		
פנול פתלאין		

8. שלב זה יש לבצע בזוגות. חזרו על סעיפים 3 ו-4, ורשמו כמה זמן לאחר תחילת הנשיפה נעלם הצבע הוורוד. באותו זמן בן הזוג יספור כמה נשימות נשמתם.
9. חזרו על סעיף 8 לאחר שתבצעו 40 כפיפות ברך.
10. סכמו את התוצאות בטבלה.
11. כיצד השפיעה הפעילות הגופנית על משך הזמן עד להיעלמות הצבע הוורוד? הסבירו.
12. כיצד השפיעה הפעילות הגופנית על מספר הנשימות עד להיעלמות הצבע הוורוד? הסבירו.

מדידה כמותית של CO_2 שנפלט בנשיפה

כלים וחומרים

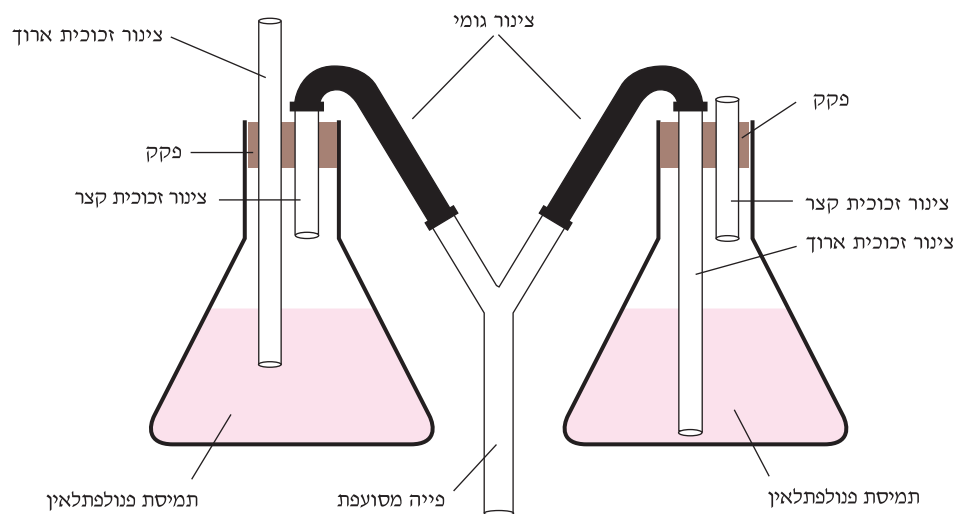
- 2 בקבוקי ארלנמאיר (500 מ"ל)
- 2 פקקי גומי בעלי נקבים
- 2 צינורות זכוכית (15 ס"מ)
- 2 צינורות זכוכית (28 ס"מ)
- 2 צינורות גומי (40 ס"מ) מתאימים לצינורות הזכוכית
- פיפטה (1 מ"ל)
- משורה
- ביורטה (25 מ"ל) מותקנת על כן
- משפך לביורטה



פייה מסועפת
שעון בעל שניות
10 מ"ל פנול פתלאין 0.5%
10 מ"ל 0.1N NaOH

מהלך העבודה

1. הרכיבו מתקן מ-2 ארלנמאירים: באחד - צינור הגומי מתחבר לצינור הזכוכית הקצר ובאחר - מתחבר אל צינור הזכוכית הארוך (איור ב-16).



איור ב-16: מערכת לבדיקה כמותית של CO_2 הנפלט בנשיפה

2. הוציאו את הפקקים והכניסו לתוך כל אחד מן הבקבוקים 100 מ"ל מי ברז ומ"ל אחד פנול פתלאין. נערו והוסיפו לכל בקבוק, בעזרת פיפטה, טיפה אחר טיפה תמיסת NaOH עד להופעת צבע ורוד. הצבע בכול בקבוק חייב להישאר דקה אחת לפחות. החזירו את הפקקים למקומם.

3. נשפו לתוך המתקן ושאפו מתוכו, מבלי להסיר את הפה מן הפייה, עד שיחול שינוי באחד מן הבקבוקים.

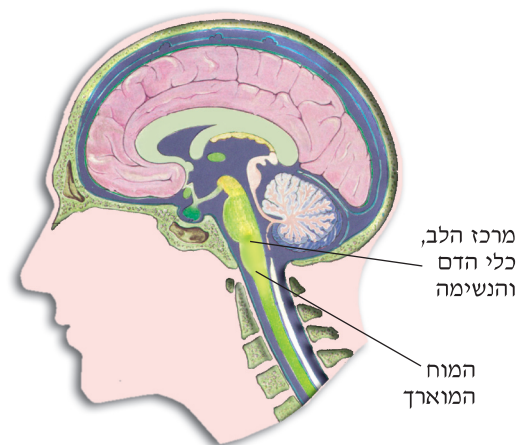
א. מהו השינוי?

ב. איזה תהליך גרם לשינוי?

4. כיצד תקבעו מהי כמות ה- CO_2 שאתם נושפים לתוך המתקן, בזמן נתון?
 1 מ"ל (10 טיפות) של תמיסת NaOH 0.1N מתרכבים עם 100 מיקרומולים של CO_2 .
 5. איזו שאלת מחקר, שקשורה בחילוף הגזים באדם, ניתן לבדוק באמצעות המתקן?
 א. הגדירו את שאלת המחקר.
 ב. תכננו ניסוי כמותי לבדיקת שאלת המחקר.
 ג. מהי ההשערה שתבדקו?
 ד. מהו המשתנה התלוי וכיצד תבדקו אותו?
 ה. מהו המשתנה הבלתי תלוי, וכיצד תשנו אותו?
 ו. מה יהיה מהלך הניסוי?
 ז. לאחר ביצוע הניסוי סכמו אותו ודווחו עליו לשאר התלמידים.

ויסות פעולת הנשימה

פעולת הנשימה היא בדרך כלל פעולה קצבית ובלתי רצונית. על פעולת הנשימה מפקח **מרכז הנשימה**, שמורכב מקבוצת תאי עצב שמצויים במוח המוארך (איור ב-17). מרכז הנשימה קובע את האוויר הריאתי, כלומר: את קצב הנשימה ואת נפח הנשימה, ומתאים אותו לצרכים של הגוף בפעילויות שונות ובתנאים שונים.



איור ב-17: המוח המוארך

האווורור הריאתי (איור ב-18) נקבע בהתאם לשינויים בריכוז החמצן, בריכוז ה- CO_2 , בריכוז של יוני המימן (pH) שבנוזלי הגוף, ובהתאם לשינויים במתיחות דופן הריאות. יוני מימן ו- CO_2 משפיעים על תאי חישה כימיים (כימורצפטורים) שנמצאים בגזע המוח, סמוך למרכז הנשימה (איור ב-17). שינויים בריכוז החמצן משפיעים על כימורצפטורים שנמצאים בקשת אבי העורקים ובעורקי הצוואר שעולים מן הלב אל הראש.

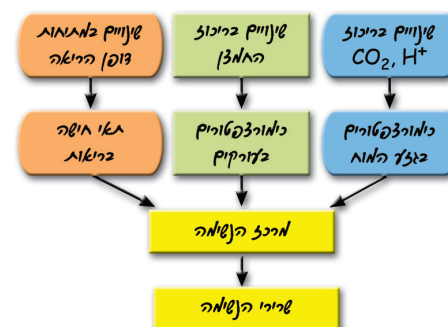
נשימה רגילה מבוקרת בעיקר על ידי ריכוז CO_2 וריכוז יוני מימן. עלייה בריכוז יוני מימן או בריכוז CO_2 מגרה את הכימורצפטורים במוח ואלו שולחים גירויים עצביים למרכז הנשימה. מרכז הנשימה שולח גירוי עצבי אל שרירי הנשימה (שריר הסרעפת והשרירים הבין-צלעתיים). שרירי הנשימה מתכווצים חזק יותר ומהר יותר, פעולה שגורמת להעמקת הנשימה ולהגברת הקצב שלה. אוורור יתר זה מוריד את הריכוז של ה- CO_2 ומעלה את ריכוז החמצן. השינויים האלה משפיעים על מרכז הנשימה בכיוון הורדת האווורור. בויסות הנשימה יש אפוא מנגנון משוב, שמונע שינויים קיצוניים בריכוזי הגזים וב-pH הדם, באמצעות ויסות האווורור הריאתי.

במצבים חריגים, כשריכוז החמצן נמוך במיוחד, הוויסות נעשה בעיקר על ידי ריכוז החמצן. הכימורצפטורים של החמצן רגישים רק לירידה דרסטית בריכוז החמצן. ירידה בריכוז החמצן עד לתחום המסוכן לקיום החיים מגבירה את האווורור הריאתי.

תאי חישה אחרים המשפיעים על האווורור הריאתי הם תאי חישה של מתיחה שנמצאים בריאות. התמלאות הריאות מגרה אותם והם שולחים גירויים עצביים אל מרכז הנשימה. תאי החישה של המתיחה משפיעים בעיקר על משך השאיפה. קיצור משך השאיפה מסייע להגברת האווורור הריאתי בזמן מאמץ גופני.

עצירת נשימה

את הנשימה ניתן לעצור באורח רצוני למשך דקה אחת או שתיים בלבד. כאשר אנחנו מפסיקים את הנשימה, CO_2 מצטבר בדם ומגרה את מרכז הנשימה במוח. כשהגירוי נעשה חזק הוא מתגבר על ההפסקה הרצונית והנשימה מתחדשת. אדם לא יכול אפוא לגרום לעצמו חנק על ידי עצירת הנשימה. עצירת נשימה רצונית יכולה לגרום אובדן הכרה, ואז, במצב של חוסר הכרה, יחזור ויפעל המנגנון האוטומטי.



איור ב-18: גורמים שמשפיעים על האווורור הריאתי

עצירת נשימה מתחת למים



צוללנים מאריכים את זמן עצירת הנשימה מתחת למים על ידי היפרוֹנְטִילָצִיָה (אוורור יתר), באמצעות נשימות רבות ועמוקות במשך כמה דקות לפני הצלילה. פעולה זו משפיעה על מרכז הנשימה במוח באופן שמאפשר את עצירת הנשימה לפרק זמן ארוך יותר. האוורור המוגבר מסלק CO_2 מן הדם במידה כזו, שעובר זמן ארוך יותר עד שעולה ריכוז ה- CO_2 לשיעור שמפעיל את מרכז הנשימה.

זהירות! אוורור יתר של הריאות יכול להיות מסוכן!

באוורור יתר של הריאות יש סכנה של התעלפות. האוורור גורם לירידה בריכוז CO_2 בנאדיות וכתוצאה מכך להאטת קצב הנשימה. ההאטה בקצב הנשימה גורמת לירידה בריכוז החמצן, עד כדי איבוד ההכרה במקרים קיצוניים. אם האוורור נעשה לפני צלילה במים, יש סכנה של התעלפות במים וטביעה.

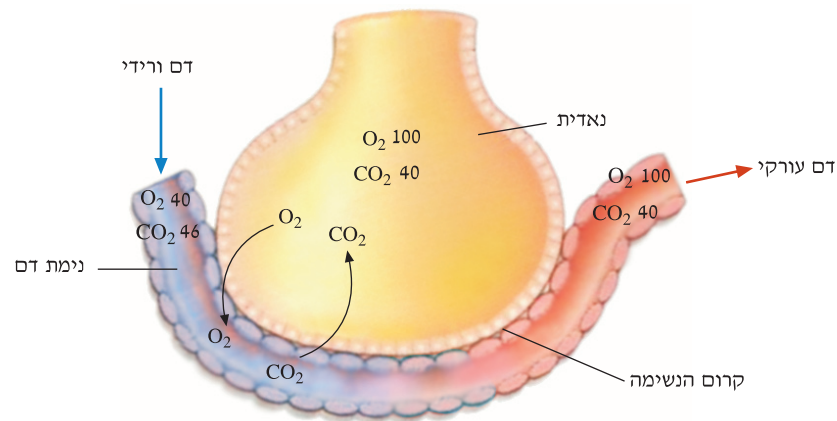
ניתן להציל אדם במקרי טביעה בעזרת הנשמה מפה לפה. בהנשמה מפה לפה מוחדר לריאותיו של המונשם אוויר עשיר ב- CO_2 . הדבר מגרה את מרכז הנשימה שלו ועל ידי כך מגביר את קצב הנשימה.

עצירת נשימה זמנית, בלתי רצונית, מתרחשת בעת דיבור או שירה ובשעה שאנו בולעים מזון. כאשר אנו בולעים מזון, רפלקס הבליעה עוצר את הנשימה ומונע חדירת מזון אל קנה הנשימה. מעל פתח הגרון מצויה לשונית, ובעת בליעת המזון היא סוגרת זמנית את קנה הנשימה. סגירת הלשונית מאפשרת מעבר מזון לושט בלבד, ומונעת את המעבר למערכת הנשימה.

חילוף הגזים בנאדיות הריאה

החמצן שנכנס אל תוך הגוף דרך צינורות הנשימה מגיע אל נאדיות הריאה. מנאדיות הריאה הוא עובר בדיפוזיה לדם, דרך הדפנות של תאי הנאדית ונימי הדם. בו-זמנית, עובר CO_2 , שהשתחרר מתאי הגוף, מן הדם אל נאדיות הריאה. למהירות מעבר הגזים נודעת חשיבות רבה, משום שמשך שהיית הדם בריאות קצר מאוד; כ-100 מ"ל דם שוהים בריאות פחות משנייה ובזמן הזה מתבצע חילוף הגזים. תהליך הדיפוזיה מתבצע ביעילות הודות: (א) לשטח פנים גדול של הנאדיות ונימי הדם; (ב) למרחק דיפוזיה קטן בנאדיות; (ג) לסביבה לחה בנאדיות; (ד) למפל לחצים חלקיים של גזים בין הנאדיות לכלי הדם.

שטח פנים גדול - בריאותיו של אדם מצויות כ-300 מיליון נאדיות בגדלים שונים, ושטח פניהן הכולל מגיע לכ-80 מ"ר, כשטחו של מגרש טניס. מסביב לתאים של הנאדיות יש נימי דם רבים בעלי שטח פנים גדול מאוד, כמעט כגודל שטח פני הנאדיות. דופן הנאדיות ודופן הנימים יוצרים את **קרום הנשימה** הדק, שדרכו עובר החמצן מן הנאדית לדם ו- CO_2 עובר מן הדם לנאדית (איור ב-19). קצב חילוף הגזים מושפע מגודל שטח הפנים של קרום הנשימה. לכן, אם נפגעים קרום הנשימה בגלל מחלות, כמו שחפת, וממזהמי אוויר שונים, יורד קצב חילוף הגזים.



המספרים מציינים את הלחץ החלקי של הגזים במ"מ כספית

איור ב-19: חילוף הגזים בנאדיות הריאה

מרחק דיפוזיה קטן - דופן נימי הדם צמוד לדופן הנאדית, כך שמרחק הדיפוזיה קטן מאוד – 0.1-0.2 מיקרון (0.0001-0.0002 מ"מ).
מפל לחצים חלקיים של הגזים - כדי שתהליך הדיפוזיה יהיה מהיר, חייב להיות הפרש בלחצים החלקיים של הגזים משני צדי קרומי הנשימה.

הלחצים החלקיים של הגזים



את כמות הגזים מקובל למדוד לא ביחידות של ריכוז, אלא ביחידות של לחץ. בגובה פני הים שווה לחץ האוויר, בממוצע, ללחץ של עמודת כספית שגובהה 760 מ"מ. מכאן נהוג לבטא לחץ של גז ביחידות של מ"מ כספית, ומסמנים את הלחץ באות P. הלחץ החלקי של כל אחד מן הגזים, כלומר חלקו של כל גז בלחץ הכולל של התערובת, שווה לחלקו בנפח התערובת.

חלקו של החמצן בתערובת האוויר הוא 21%, לכן הלחץ החלקי של החמצן הוא

$$P_{O_2} = 160 \text{ מ"מ כספית} = 760 \times 0.21 \text{ מ"מ כספית}$$

חלקו של ה- CO_2 באוויר הוא 0.04%, לכן הלחץ החלקי של ה- CO_2 הוא

$$P_{CO_2} = 0.3 \text{ מ"מ כספית} = 760 \times 0.0004 \text{ מ"מ כספית}$$

דיפוזיה של גז דרך קרום התא נעשית בהתאם למפל הלחצים החלקיים של הגז, משני צדי הקרום. גז עובר בדיפוזיה ממקום שבו הלחץ החלקי שלו גבוה למקום שבו הלחץ החלקי שלו נמוך.

חילוף הגזים בנאדיות נעשה בהתאם למפל הלחצים החלקיים בנאדית ובדם (ראו טבלה ב-5 ואיור ב-19). הלחץ החלקי של החמצן באוויר שבנאדיות הוא 100 מ"מ כספית ובדם שמגיע אל הריאות (דם ורידי¹) הוא 40 מ"מ כספית. לכן, יש דיפוזיה של חמצן מן הנאדית לדם. הדיפוזיה נמשכת עד שהלחץ החלקי של החמצן בדם שעוזב את הנאדית (דם עורקי²) הוא 100 מ"מ כספית, תהליך שנמשך כ-3/4 שנייה. הדם הוורדי שנכנס לריאות מכיל CO_2 בלחץ חלקי של כ-46 מ"מ כספית, ואילו אוויר הנאדיות מכיל CO_2 בלחץ חלקי של כ-40 מ"מ כספית, לכן מתקיים מעבר CO_2 מן הדם אל הנאדיות. דיפוזיית ה- CO_2 מהירה פי כמה מדיפוזיית החמצן, לכן מספיק מפל לחץ קטן יחסית לדיפוזיה של CO_2 . זרימת הדם המתמדת שומרת על הפרש הלחצים ולפיכך, על המשך תהליך הדיפוזיה.

¹ דם ורידי - דם עשיר, יחסית, ב- CO_2 ועני, יחסית, בחמצן, גם אם הוא זורם בעורקים (כמו עורקי הריאה).

² דם עורקי - דם עשיר, יחסית, בחמצן ועני, יחסית, ב- CO_2 , גם אם הוא זורם בוורידים (כמו ורידי הריאה).

טבלה ב-5: הלחצים החלקיים של חמצן ו- CO_2 באוויר, בנאדית, בדם העורקי, בתאים ובדם הווריד (במ"מ כספית)

הגז	באוויר	בנאדית	בדם עורקי	בתאים	בדם ורידי
חמצן	160	100	100	30	40
CO_2	0.3	40	40	60-50	46

בתאים, הלחץ החלקי של החמצן הוא כ-30 מ"מ כספית ושל CO_2 הוא 60-50 מ"מ כספית, לכן מתקיימת דיפוזיה של חמצן מנימי הדם אל תאי הגוף ושל CO_2 מן התאים אל נימי הדם. **סביבה לחה** - דופנות הנאדיות מכוסים בשכבה דקה של נוזל. לנוזל הזה יש תפקיד כפול: הוא מאפשר דיפוזיה של גזים אל הנאדיות, הודות למסיסותם בנוזל, והוא מונע התמוטטות של הנאדיות. לחלליות הקטנות של הנאדיות יש נטייה להתכווץ כשהן מרוקנות מאוויר. תכונה זו עלולה לגרום להתמוטטות הנאדיות בכול פעולת נשיפה. הנוזל העוטף את הנאדיות מכיל חומר דמוי סבון (פוספוליפיד) המשמש כחומר מְשִׁטָּח. החומר המשטח מונע את התמוטטות הנאדיות בכול נשיפה.

לפגים אין חומר משטח

ריאותיו של עובר אינן פעילות, כל עוד חילוף הגזים של גופו מתבצע דרך השלייה. לכן, לעובר אין צורך בהפרשת החומר המשטח בריאות, והתאים שמפרישים אותו מתחילים לתפקד היטב החל מן השבוע ה-30 לחיי העובר. פגים שנולדים לפני השבוע ה-30 סובלים בדרך כלל מבעיות נשימה, בגלל מחסור בחומר המשטח. התמוטטות הנאדיות גורמת לכך שהם צריכים "לנפח" מחדש את הנאדיות בכול שאיפה. עד לפני כמה שנים, שיעור הסיבוכים ואחוזי התמותה במקרים כאלה היו גבוהים. כיום ניתן לייצר את החומר המשטח או להפיק אותו מבעלי חיים, ובאמצעות צינור הנשמה הוא ניתן ישירות לריאות של הפגים שמפתחים מצוקה נשימתית.



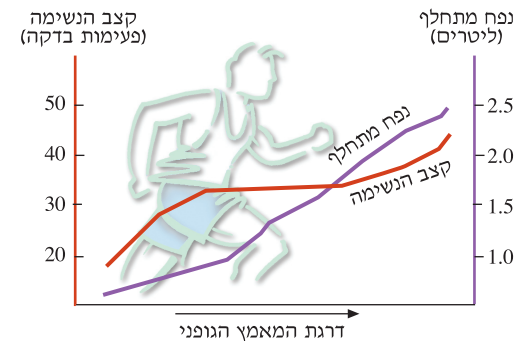
סיכום

1. מערכת הנשימה של האדם (כמו חולייתנים אחרים) כוללת מערכת צינורות נשימה להובלת גזים ולחילוף הגזים עם הסביבה, וכן מערכת דם להובלה ולחילוף הגזים עם תאי הגוף.
2. האוויר מן הסביבה החיצונית נכנס אל האף או אל הפה ועובר אל הריאות דרך הלוע, הגרון, הקנה והסימפונות. הצינורות האלה מקשרים בין הריאות לבין הסביבה שמחוץ לגוף. האוויר החיצוני עובר בדרכו סינון, לחלוח וחימום.
3. שינוי קצבי של נפח בית החזה משנה את נפח הריאות. נפח בית החזה משתנה הודות לפעולת שריר הסרעפת, השרירים הבין-צלעיים וקרומ האדר.
4. קצב הנשימה ונפח האוויר המתחלף משתנים בהתאם לפעילות הגוף.
5. הנשימה היא פעולה בלתי רצונית והיא מבוקרת על ידי מרכז הנשימה במוח.
6. הנשימה מבוקרת בעיקר על ידי ריכוז CO_2 וריכוז יוני המימן (pH) בנוזלי הגוף. רק במצבים חריגים, הנשימה מבוקרת על ידי ריכוז החמצן בדם.
7. חילוף הגזים בריאות ובתאי הגוף נעשה בדיפוזיה בהתאם למפל הלחצים החלקיים של כל גז. החמצן עובר מנאדיות הריאה אל נימי הדם, ומן הדם אל תאי הגוף. CO_2 עובר מתאי הגוף אל הדם ומן הדם אל נאדיות הריאה.

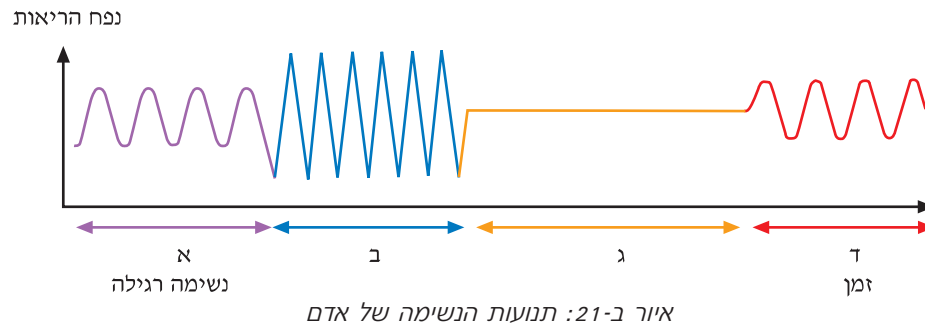


1. ציינו כמה מנגנונים באדם ובבעלי חיים שונים, שמסייעים לשמור על איברי הנשימה מפני התייבשות ומפני חדירת זיהומים.
2. הרופאים טוענים ששאיפה דרך האף עדיפה על שאיפה דרך הפה. הסבירו מדוע.
3. האם הריאות שייכות לסביבה הפנימית של הגוף או לסביבה החיצונית? הסבירו.
4. האוויר שבנאדיות שונה מאוויר השאיפה (אוויר הסביבה).
 - א. במה הוא שונה?
 - ב. מה גורם לשינויים האלה?
 - ג. מהי החשיבות של השינויים האלה?
5. אילו גורמים משפיעים על האוויר הריאתי? כיצד משפיע כל גורם?
6. בדקו את קצב הנשימה שלכם בשני מצבים, על ידי ספירת מספר השאיפות בדקה (כל תלמיד בודק את קצב הנשימה שלו).
 - א. ספרו את מספר השאיפות שאתם שואפים בדקה במצב מנוחה. רשמו את התוצאה.

- ב. בצעו 30 כפיפות ברך או עלו ורדו 10 מדרגות 5 פעמים. מיד לאחר מכן ספרו שנית את מספר השאיפות שאתם שואפים בדקה. רשמו את התוצאה.
- ג. כיצד השתנה קצב הנשימה? הסבירו מדוע.
7. בעקומים באיור ב-20 מתוארים השינויים בנפח המתחלף ובקצב הנשימה במהלך מאמץ גופני מתגבר.
- א. מהו נפח מתחלף?
- ב. תארו את השינוי בנפח המתחלף בביצוע המאמץ המתגבר.
- ג. תארו את השינוי בקצב הנשימה בביצוע המאמץ המתגבר.
- ד. חשבו ורשמו את האורור הריאתי במנוחה ואת האורור הריאתי במאמץ מרבי.
- ה. פי כמה גדל האורור הריאתי במהלך ביצוע המאמץ המדורג?
- ו. הסבירו מדוע צריך האורור הריאתי לגדול בזמן מאמץ גופני.
- ז. מה הן שתי הדרכים להגדלת האורור הריאתי? הסבירו.
8. באיור ב-21 מתוארים השינויים בנפח הריאות של אדם, לאורך זמן.
- א. תארו את השינויים במהלך הנשימה של הנבדק.
- ב. הסבירו את השינויים בחלק ג ובחלק ד של העקום.



איור ב-20: השינויים בנפח המתחלף ובקצב הנשימה במהלך מאמץ גופני מתגבר



9. במצב של אורור יתר, נהוג לתת לאדם לנשום לתוך שקית סגורה (במשך זמן מוגבל). כיצד עוזרת הנשימה בשקית?
10. הנשמה מפה לפה מבוצעת, לעתים, אצל נפגעים שאיבדו את הכרתם או שנפגע קצב נשימתם. הסבירו כיצד עוזרת ההנשמה לנפגע.
11. מה מונע מעבר חמצן מכלי הדם אל נאדיות הריאה? הסבירו.
12. תרשים הזרימה באיור ב-23 מתאר את תהליך ויסות הנשימה בעת פעילות גופנית. העתיקו את התרשים והשלימו את המושגים החסרים בעזרת רשימת המושגים שלפניכם:

הובלת הגזים בדם

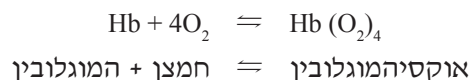
מערכת הדם מובילה חמצן ו- CO_2 בין הריאות לתאי הגוף. החמצן ברובו מובל בתאי הדם האדומים כשהוא קשור למולקולות ההמוגלובין. CO_2 מובל בעיקר בפלסמת הדם.

הובלת החמצן בדם

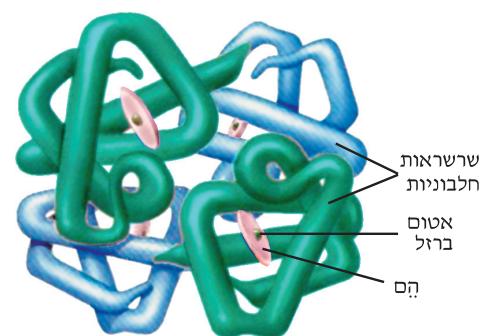
הדם מוביל כ-600 ליטר חמצן ביום, מן הריאות לרקמות. רק כמות מזערית של החמצן מובלת בנוזל הדם (בפלסמה), מאחר שמסיסות החמצן במים נמוכה מאוד. הובלת החמצן בדם מתאפשרת הודות לכך שרוב החמצן מובל כשהוא קשור להמוגלובין בתאי הדם האדומים. מולקולות ההמוגלובין מאפשרות לדם לשאת פי 65 יותר חמצן מאשר כמות החמצן המומסת בפלסמה.

ההמוגלובין (hemoglobin) הוא המרכיב העיקרי של תאי הדם האדומים. מולקולת ההמוגלובין מורכבת מארבע שרשרות חלבוניות, שיוצרות את החלק שנקרא **גלובין** (globus = כדור) (איור ב-24, א). אל כל אחת מן השרשרות האלה קשורים אטומים שיוצרים חלק שנקרא **קבוצת הֶם** (heme group). במרכז של קבוצת הֶם מצוי **יון ברזל** (Fe^{2+}) (איור ב-24, ב). החמצן נקשר ליוני הברזל; כל יון ברזל יכול לקשור מולקולת חמצן אחת, ולכן מולקולת המוגלובין אחת יכולה לקשור ארבע מולקולות חמצן.

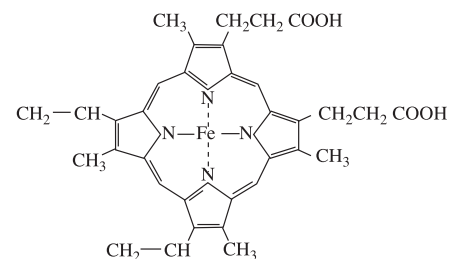
החמצן שבאוויר הנאדיות עובר בדיפוזיה מן הנאדית, דרך דופן נימת הדם אל הפלסמה וממנה אל תוך תאי הדם האדומים, ונקשר להמוגלובין. להמוגלובין הקשור לחמצן קוראים **אוקסי־המוגלובין**. כאשר הדם זורם בנימים בין תאי הגוף, החמצן משתחרר מקשירתו לאוקסי־המוגלובין, ועובר בדיפוזיה לתאים שצורכים אותו. תהליך הקשירה של החמצן להמוגלובין הוא אפוא תהליך הפיך (דו-כיווני). התהליך כולו מסוכם במשוואה:



אם התהליך הוא הפיך, כיצד קורה שההמוגלובין קושר את החמצן דווקא בריאות, ומשחרר אותו בתאי הגוף? מה מונע מן ההמוגלובין לשחרר את החמצן בריאות?



א. מבנה מולקולת המוגלובין



ב. מבנה קבוצת הֶם

איור ב-24: מבנה ההמוגלובין

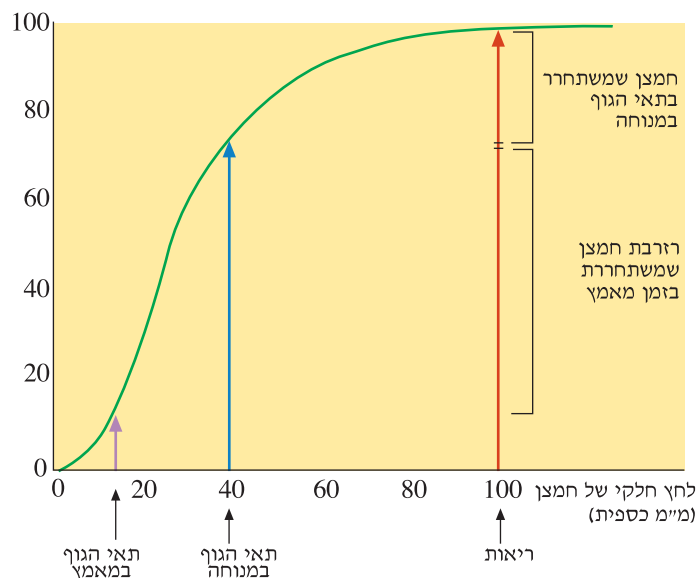
השפעת הלחץ החלקי של החמצן על קשירתו ושחרורו

מתברר, שיעילות קשירת החמצן תלויה בכמות החמצן שנמצאת בסביבת ההמוגלובין. להמוגלובין יש נטייה חזקה לקשור חמצן בסביבה שבה הלחץ החלקי של החמצן גבוה, ולשחרר חמצן בסביבה שבה הלחץ החלקי של החמצן נמוך. לכן, ההמוגלובין מתאים ביותר להעברת החמצן בגוף. בריאות, שם הלחץ החלקי של החמצן גבוה, נקשר החמצן להמוגלובין, וברקמות, שם הלחץ החלקי של החמצן נמוך, הוא משתחרר ועובר בדיפוזיה לתאים.

בנאדיות הריאה, לחצו החלקי של החמצן הוא 100 מ"מ כספית, וכל ההמוגלובין רווי בחמצן (100% ממולקולות ההמוגלובין קשורות לחמצן) (איור ב-25). למעשה, ההמוגלובין מגיע לרוויה כבר בלחץ חלקי של 70 מ"מ כספית. לכן, גם במקומות דלילים בחמצן, כמו הרים גבוהים, שבהם הלחץ החלקי של החמצן הוא 70 מ"מ כספית, כמות החמצן שמובלת בדם מספיקה לצורכי הגוף.

בתאים, הלחץ החלקי של החמצן הוא 30-40 מ"מ כספית ורק 50%-75% מן ההמוגלובין קשור לחמצן. פירוש הדבר ש-25%-50% מן החמצן השתחרר ועבר לתאי הגוף. ברקמות, אם כך, חלק גדול מן החמצן עדיין קשור להמוגלובין. הרזרבה הגדולה הזאת מאפשרת לתאי הגוף לקבל חמצן נוסף כאשר הלחץ החלקי של החמצן יורד, למשל, בזמן מאמץ גופני.

אחוז רוויה בחמצן



איור ב-25: עקום הרוויה של המוגלובין בחמצן

להמוגלובין יש מבנה מיוחד שמתאים לקשירת החמצן ולשחרורו בצורה יעילה. 4 תת-היחידות שמרכיבות אותו פועלות ביניהן באינטראקציה שמשפיעה על קשירת החמצן. כאשר מולקולת חמצן נקשרת לאחת מקבוצות ההם, מתרחש שינוי מבני שמגדיל פי 500 את הנטייה לקשור מולקולות חמצן אחרות לקבוצות ההם האחרות. הקשירה לקבוצת ה-4 תלויה בהימצאותו של חמצן בקבוצת ה-3 סמוכה. תהליך הפוך קורה ברקמות, שם יש מעט חמצן בסביבת ההמוגלובין. הירידה בלחץ החלקי של החמצן, גורמת לשחרור מולקולת חמצן אחת ממולקולת ההמוגלובין הרוויה בארבעת אתריה. עזיבת מולקולת חמצן אחת משנה את מבנה מולקולת ההמוגלובין ומאפשרת את העזיבה של מולקולות החמצן האחרות ביתר קלות.

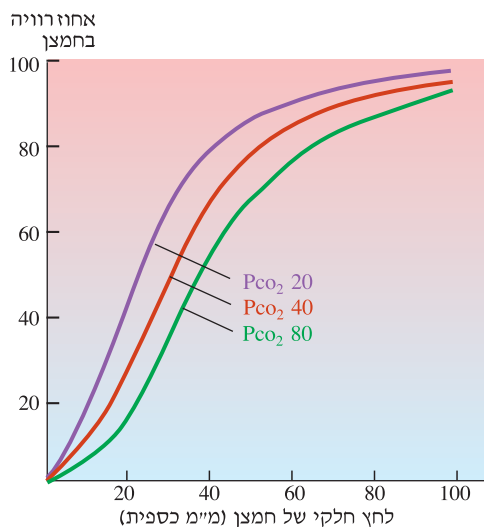
מיוגלובין – מאגר חמצן ברקמות פעילות

העמקה



ברקמות מאוד פעילות, כמו שרירים בעת מאמץ, אספקת החמצן על ידי המוגלובין אינה מספיקה. במצבים כאלה, מסופק החמצן על ידי מולקולה אחרת שנקראת מיוגלובין, והיא מצויה רק בשרירי שלד ובשרירי הלב. המיוגלובין, כמו ההמוגלובין, הוא פיגמנט אדום והוא מקנה לבשר את צבעו האדום. מולקולת המיוגלובין מכילה שרשרת חלבונית אחת (שדומה מאוד לשרשרות שבהמוגלובין) וקבוצת ה-4 שיכולה לקשור מולקולת חמצן אחת. הנטייה של מיוגלובין לקשור חמצן גבוהה מאוד (יותר גבוהה מזו של ההמוגלובין), ולכן הוא קושר חמצן בקלות אך כמעט שלא משחרר אותו. המיוגלובין משחרר את החמצן שקשור אליו רק כשהוא מצוי בסביבה שלחץ החמצן בה נמוך מאוד. המיוגלובין אינו מתאים להובלת חמצן בדם, משום שלחץ החמצן ברוב רקמות הגוף גבוה מכדי שהמיוגלובין ישחרר בהן חמצן. לעומת זאת, המיוגלובין מתאים לאגירת חמצן בשרירים, משום שבהם הוא יכול לשחרר את החמצן בעת פעילות, כאשר לחץ החמצן יורד לרמות מאוד נמוכות.

ביונקים ימיים, שמיטיבים לצלול, רמת המיוגלובין בשרירים גבוהה במיוחד. תכונה זו מאפשרת להם לאגור יותר חמצן ולשהות זמן ממושך מתחת למים.



איור ב-26: השפעת לחץ חלקי של CO_2 על אחוז רוויית המוגלובין בחמצן (אפקט בוהר)

השפעת הלחץ החלקי של CO_2 על קשירת החמצן ושחרורו

גם לכמות ה- CO_2 בסביבת המוגלובין יש השפעה על קשירת החמצן למולקולת המוגלובין. מולקולות CO_2 נקשרות לאתרים מיוחדים בהמוגלובין, וגורמות שינוי במבנה המוגלובין כך שהנטייה לקשור חמצן פוחתת. לכן, ככל שלחצו החלקי של CO_2 גדל, נוטה המוגלובין לשחרר את החמצן שקשור אליו. ככל שלחצו החלקי של CO_2 בדם קטן, גוברת קשירת החמצן על ידי המוגלובין (איור ב-26).

מנגנון הוויסות הזה מאפשר לספק חמצן לתאים לפי התצרוכת שלהם. כאשר ריכוז CO_2 בתאים עולה, המשמעות היא שהנשימה התאית מתגברת והתאים צורכים יותר חמצן. תופעה זו התגלתה בשנת 1904 על ידי החוקר כריסטיאן בוהר (Christian Bohr), ונקראת על שמו **אפקט בוהר**.

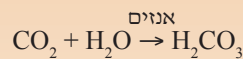
הובלת CO_2 בדם

בתאים של אדם בוגר, בזמן מנוחה, נוצרים בכול דקה כ-200 מ"ל CO_2 . CO_2 עובר בהתאם למפל הלחצים החלקיים מן התאים אל נימי הדם. הוא נישא בדם אל הריאות, עובר מן הדם אל נאדיות הריאה ושם הוא משתחרר באוויר הנשיפה. ה- CO_2 מובל בדם בשלוש צורות: (א) בצורת יוני ביקרבונט; (ב) בצורת קרפאמינוגלובין; (ג) כ- CO_2 מומס.

יוני ביקרבונט - רוב ה- CO_2 נישא בנוזל הדם בצורת יוני ביקרבונט (HCO_3^-). יוני ביקרבונט נוצרים בתאי הדם האדומים מהתרכבות של CO_2 עם מולקולות מים. הביקרבונט מסיס בנוזל הדם יותר מאשר מולקולות ה- CO_2 . לכן, יותר CO_2 יכול לעבור בנוזל הדם כשהוא בצורת הביקרבונט. יוני הביקרבונט נישאים בדם אל הריאות, ובנימי הדם בריאות הם מתפרקים ומשתחרר מהם CO_2 . ה- CO_2 עובר מנימי הדם אל נאדיות הריאה בהתאם למפל הלחץ החלקי שלו. מנאדיות הריאה עובר ה- CO_2 בצינורות הנשימה ומשתחרר לסביבה החיצונית בתהליך הנשיפה.

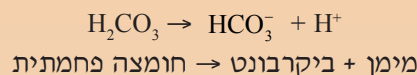
יצירה ופירוק של יוני ביקרבונט

יוני הביקרבונט נוצרים בתוך תאי הדם האדומים בשתי תגובות כימיות (איור ב-27, א). בשלב ראשון CO_2 מתרכב עם מולקולות מים ונוצרת חומצה פחמתית.

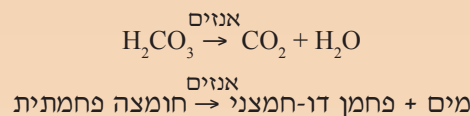
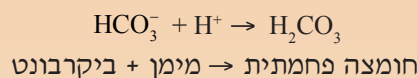


חומצה פחמתית $\rightarrow$ מים + פחמן-דו-חמצני

כאשר התגובה הכימית הזאת מתרחשת בנוזל הרקמות או בפלסמה היא איטית ובלתי יעילה. לעומת זאת, היא מהירה מאוד כאשר היא מתרחשת בתוך תאי הדם האדומים. את התגובה מזרז אנזים שמצוי בתאי הדם האדומים ואינו מצוי בפלסמה. החומצה הפחמתית שנוצרת אינה יציבה, והיא מתפרקת במהירות ליוני ביקרבונט וליוני מימן.



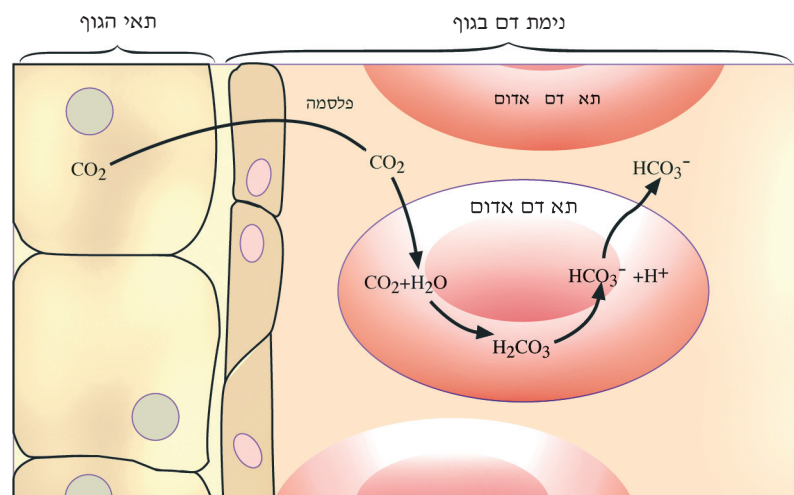
יוני הביקרבונט נישאים בדם אל הריאות, ובריאות משתחרר מהם CO_2 . שחרור ה- CO_2 מיוני הביקרבונט נעשה בשני שלבים (איור ב-27, ב). בשלב ראשון, מתקשרים יוני הביקרבונט ליוני מימן ונוצרת חומצה פחמתית. בשלב שני, החומצה הפחמתית מתפרקת ל- CO_2 ולמים, בזירוז של אנזים.



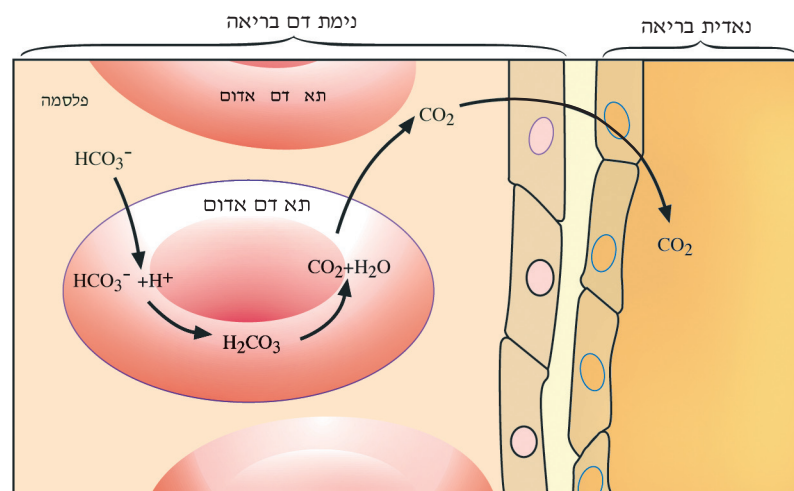
התגובות הכימיות שבהן נוצרים ומתפרקים יוני הביקרבונט הן אפוא תגובות הפיכות שיכולות להתרחש בשני הכיוונים. הכיוון שבו מתרחשות התגובות תלוי ביחסי הריכוזים בין המגיבים ובין התוצרים. בנימי הדם בגוף, הריכוז של ה- CO_2 גבוה יחסית ולכן התהליך מתקיים בכיוון של יצירת יוני ביקרבונט. בריאות, הריכוז של ה- CO_2 נמוך יחסית ולכן התהליך מתקיים בכיוון האחר, כלומר: בכיוון של פירוק יוני ביקרבונט ושחרור CO_2 .



בעת יצירת יוני הביקרבונט משתחררים יוני מימן (H^+), והם נקשרים להמוגלובין. להתקשרות זו יש השפעה חיובית כפולה: (א) היא מסלקת את יוני המימן מנוזל הדם ומונעת עלייה בחומציות הדם; (ב) היא מעודדת שחרור חמצן מן ההמוגלובין ברקמות הפעילות. יוני המימן נקשרים למולקולות ההמוגלובין וגורמים שינוי במבנה המרחבי. כתוצאה מן השינוי משתחרר חלק מן החמצן שנושא ההמוגלובין.



א. יצירת יוני ביקרבונט בנימי הדם בגוף



ב. פירוק יוני ביקרבונט בנימי הדם בריאות

איור ב-27: יצירה ופירוק של יוני ביקרבונט (HCO_3^-) בדם

קרבאמינוהמוגלובין - חלק מן ה- CO_2 בתאי הדם האדומים נקשר לקבוצות האמיניות של ההמוגלובין ומובל כקרבאמינוהמוגלובין (carbaminohegoglobin).
 CO_2 מומס - חלק קטן (5%-7%) ממולקולות ה- CO_2 , שמובלות בדם, מובלות כמולקולות CO_2 מומסות בפלסמה.

נשימה בתנאים חריגים

כאשר מעפילים להרים גבוהים, או כאשר טסים לגובה רב, הירידה בלחץ האוויר מקשה על הנשימה. כאשר יורדים בצלילה למעמקי הים או כורים מחצבים במעמקי האדמה, לחץ האוויר הגבוה ששורר שם מקשה על הנשימה. ניתן להתגבר על חלק מבעיות הנשימה בתנאים חריגים כאלה באמצעות תהליכי הסתגלות והתאמה או באמצעות פיתוחים טכנולוגיים שפותחו לשם כך.

נשימה בגבהים

ככל שעולים לגבהים כך פוחת לחץ האוויר והאוויר נעשה דליל יותר. לחץ האוויר בגובה פני הים הוא אטמוספירה אחת (760 מ"מ כספית), ואילו בגובה של 5,500 מטר, לחץ האוויר הוא חצי אטמוספירה. חלקו של החמצן באוויר אינו משתנה (כ-21%), לכן כשעולים והאוויר נהיה דליל, יורד גם נפחו של החמצן.

כאשר הלחץ החלקי של החמצן באוויר יורד, כמות החמצן שנקשרת להמוגלובין יורדת, וכתוצאה מכך נפגעת אספקת החמצן לתאים. החל מגובה של 2,400 מ' מתחילים הכימורצפטורים להגיב למחסור בחמצן. בהשפעתם מוגבר האורור הריאתי ומוחש קצב פעילות הלב. אולם בגבהים של 3,500 מטר, האמצעים האלה כבר אינם מספיקים, והגוף מתחיל להגיב למחסור בחמצן. התופעות האופייניות הן: חולשה, בלבול, הפרעות בכושר השיפוט, בראייה, בשמיעה וביכולת התנועה.

כאשר אדם עובר מאזור מגוריו לאזור גבוה בעל לחץ אוויר נמוך יותר, הוא סובל מן השינוי. ואולם, כמה ימים לאחר המעבר לאזור הגבוה חל בגופו תהליך כזה: הירידה בכמות החמצן שמגיעה אל הרקמות גורמת לתאי הכליה להגביר את הפרשת ההורמון אריתרופויטין. ההפרשה המוגברת של ההורמון מגבירה את קצב ייצור תאי הדם האדומים (ראו עמ' 76), והגידול במספר תאי הדם האדומים מגביר את כושר הובלת החמצן של הדם. כאשר אדם מרגיל את גופו לאט ובזהירות לשהייה בגבהים, הוא עובר תהליך **הסתגלות** (acclimatization)

לתנאים החדשים. תפוקת הלב והקצב של הנשימה משתנים בהדרגה, והוא איננו סובל מן התגובות החריפות של חוסר חמצן בתאים. אוכלוסיות של אנשים או של בעלי חיים שחיים בגובה רב במשך תקופות ממושכות עוברות תהליך של **התאמה** (adaptation) לתנאי החיים בגובה. ההתאמה של האוכלוסיות באה לידי ביטוי בתכונות תורשתיות שייחודיות לאוכלוסיות האלה ואינן קיימות אצל אוכלוסיות דומות שחיות בתנאים אחרים. לתושבי ההימליה, שחיים בגובה שמעל 4,000 מ', יש ריאות גדולות יותר וגוף קטן יותר בהשוואה לאנשים שחיים באזורים נמוכים. אצל תושבי קבע בהרים גבוהים מתפתחים במרוצת החיים נאדיות וכלי דם רבים בריאות. תכונה זו מקנה להם יכולת אוורור ריאתי גבוהה יותר. גם חדרי הלב שלהם רחבים יותר ורקמת שריר הלב מכילה יותר מיטוכונדריה. הודות לתכונות האלה, הלב שלהם מסוגל לשאוב ולדחוף נפחי דם גדולים יותר בהשוואה ללב של אנשי השפלה.

נשימה במעמקים

כאשר יורדים אל מתחת לגובה פני הים, עולה לחץ האוויר באטמוספירה אחת לכל 10 מ'. בצלילה למעמקים ובירידה למנהרות או למכרות, עולה לחץ האוויר בריאות ובכול הגוף. ככל שהלחץ הולך וגדל, האוויר בריאות נדחס יותר ויותר. לכן, לשם השוואת לחצים, אדם שיורד למעמקים חייב לקבל אספקת אוויר בלחץ. האוויר הדחוס נשאף מתוך בלון. הבלון מצויד בנֶוֶסֶת, המווסת את לחץ האוויר שמגיע לריאות, בהתאם ללחץ החיצוני. באוויר הדחוס, הלחץ החלקי של החמצן, של החנקן ושל גזים אחרים גבוה יותר. עלייה בלחץ החלקי של הגזים מגבירה את שיעור מסיסותם. לכן בשהות ממושכת במעמקים, גדלה כמות הגזים המומסים בנוזלי הגוף. עלייה מהירה לגובה פני הים, גורמת לירידה מהירה במסיסות הגזים, וכתוצאה מכך נוצרות בועות גז בנוזלי הגוף. הבועות האלה "מתאספות" בנימי הדם ומעכבות את זרימת הדם. התופעה הזאת ידועה כ"**מחלת האמודאים**". מחלת האמודאים באה לידי ביטוי בכאבים חזקים בשרירי הגפיים, בקשיי נשימה, בשיתוקים ולעתים אף מסתיימת במוות. ניתן להימנע מתופעות כאלה על ידי עלייה איטית אל גובה פני הים, תוך כדי הורדה איטית של הלחץ; הגזים המומסים בדם משתחררים לאט לאט ועוברים מן הדם לריאות מבלי ליצור בועות אוויר בנימי הדם. העלייה האיטית שומרת גם על ריאותיו של אדם שעולה ממעמקים. שינוי פתאומי בלחץ האוויר שבריאות, וכן שינוי בנפח שלהן עלול לגרום לריאות נזק רב, למשל, פיצוץ הנאדיות. סכנה אחרת בעת צלילה היא **הרעלת חמצן**. הרעלת חמצן נגרמת כתוצאה משאיפת חמצן בעודף (למשל, כשמשתמשים בגז נשימה מועשר בחמצן וצוללים לעומק בלתי סביר). החמצן

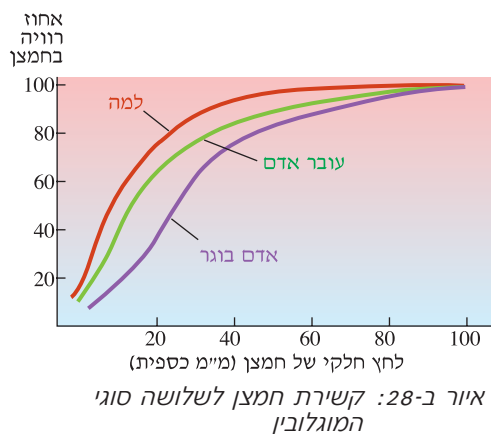
אמנם חיוני לגוף, אבל הוא רעיל ומסוכן כשהוא נמצא בעודף, מכיוון שהוא פוגע במערכות אנזימיות ובמערכת העצבים המרכזית. הרעלת חמצן גורמת התכווצויות בכול חלקי הגוף ואלה מלוות באיבוד ההכרה ועלולות להסתיים אף במוות.

סיכום

1. רוב החמצן מובל בדם, כאשר הוא קשור לאטומי הברזל שבמולקולות ההמוגלובין.
2. יש כמה גורמים שמשפיעים על התקשרות החמצן להמוגלובין, ביניהם: הלחץ החלקי של החמצן והלחץ החלקי של CO_2 .
3. CO_2 מובל בדם ב-3 צורות. רוב ה- CO_2 מובל בדם בצורת יוני ביקרבונט, חלק אחר – בצורת קרבאמינוהמוגלובין וחלק קטן מובל כ- CO_2 מומס.
4. בעלייה לגבהים, הלחץ החלקי של החמצן יורד. כתוצאה מכך יורדת כמות החמצן שנקשרת להמוגלובין, ופוחתת כמות החמצן שמגיעה לתאים.
5. כשעולים בהדרגה לגבהים, שבהם האוויר דליל, הגוף עובר תהליך הסתגלות. אנשים ובעלי חיים שחיים בגבהים עוברים במשך הדורות תהליך של התאמה לתנאי החיים בגבהים.
6. בירידה למעמקים, לחץ האוויר עולה ושיעור מסיסות הגזים עולה. כתוצאה מכך גדלה כמות הגזים בדם. עודף חמצן בדם גורם הפרעות, בעיקר, במערכת העצבים. גם עלייה מהירה ממעמקים גורמת הפרעות, בגלל היווצרות של בועות גז בדם.



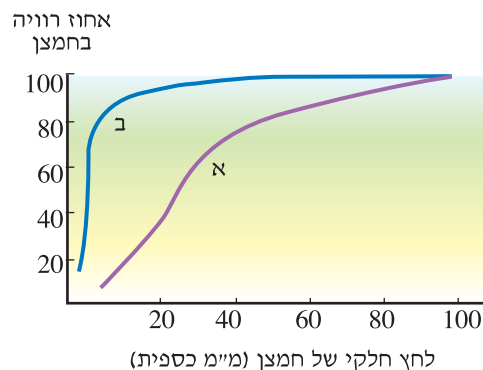
1. ספורטאי נחשד כי לפני תחרות קיבל מנת דם. מה היא התועלת במתן עירוי דם לספורטאי?
2. היעזרו באיור ב-25 בעמ' 121 ובטבלה ב-5 בעמ' 116 וכתבו מהו אחוז הרוויה של ההמוגלובין בחמצן (א) בדם הווריד; (ב) בנאדיות; (ג) בדם העורקי; (ד) ברקמות.
3. כיצד משפיעה העלייה בלחץ החלקי של החמצן על קשירתו להמוגלובין? הסבירו מדוע.
4. הסבירו מדוע הלחץ החלקי של החמצן בדם העורקי גבוה יחסית, ואילו בדם הווריד - נמוך יחסית. התייחסו בתשובתכם להמוגלובין.
5. כיצד ישתנה הלחץ החלקי של החמצן בדם הווריד, שזורם בריאות, בשעת מאמץ גופני? הסבירו.



6. העקומים באיור ב-28 מתארים את קשירת החמצן על ידי 3 סוגים של המוגלובין, השונים במבנה שלהם: המוגלובין של אדם בוגר, המוגלובין של עובר אדם והמוגלובין של למה. העובר מקבל את כל החמצן שלו מדם האם דרך השליה. הלמה חיה במקומות גבוהים. התבוננו בעקומים והסבירו כיצד מותאם ההמוגלובין לצורכי העובר וכיצד הוא מותאם לצורכי הלמה.

7. באיור ב-29 מתוארים עקומי הרוויה של נשאי החמצן: המוגלובין ומיוגלובין. היעזרו בקטע "העמקה" בעמ' 122 והשיבו על השאלות האלה:

- איזה עקום מתאר את ההמוגלובין ואיזה מתאר את המיוגלובין?
- במה דומים העקומים ובמה הם שונים?
- היעזרו בטבלה ב-5 בעמ' 116 והסבירו מדוע המיוגלובין אינו מתאים להובלת חמצן בדם.



איור ב-29: עקומי הרוויה בחמצן של המוגלובין ומיוגלובין

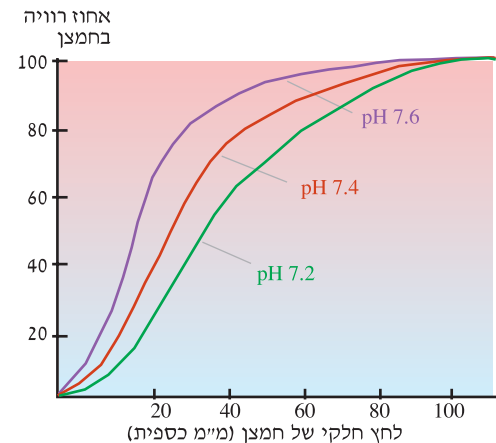
8. היעזרו באיור ב-26 בעמ' 123 והשיבו על השאלות האלה:
- מתי ההמוגלובין קושר יותר חמצן - כאשר הלחץ החלקי של CO_2 נמוך או כאשר הוא גבוה? הסבירו מדוע.
 - איזה חלק בעקומה מתאר מצב דומה למצב שקיים בריאות, ואיזה חלק מתאר מצב דומה למצב בתאי הגוף?
 - כיצד ישפיע הלחץ החלקי של CO_2 בעת מאמץ גופני על אחוז הרוויה של ההמוגלובין בחמצן? הסבירו וצינו כיצד נקראת התופעה?
 - הסבירו כיצד התופעה הזאת תורמת לתפקוד הגוף.

9. היעזרו באיור ב-30 ובקטע ההעמקה בעמ' 123-124 והשיבו על השאלות האלה:
- כיצד משפיע שינוי ה-pH על אחוז הרוויה של המוגלובין בחמצן? הסבירו מדוע.
 - מהו התהליך שגורם שינויים ב-pH, בסביבה שבה נמצא ההמוגלובין בגוף?
 - בפעילות גופנית, תצרוכת החמצן גדלה. הסבירו כיצד שינוי ה-pH תורם להעלאת כמות החמצן ברקמות בעת פעילות גופנית.
 - ריכוז ה- CO_2 בסביבת ההמוגלובין משפיע על שחרור החמצן ממנו באופן ישיר ובאופן עקיף. הסבירו.
10. טבלה ב-6 מציגה את הריכוזים של גזים אחדים במחילות של חפרפרות, בהשוואה לריכוז של אותם גזים באוויר, בגובה 1 מטר מעל פני הקרקע.

טבלה ב-6: הריכוזים של גזים אחדים במחילות של חפרפרות ובגובה 1 מטר מעל פני הקרקע

הגז	ריכוז הגז במחילות של חפרפרות (%)	ריכוז הגז 1 מ' מעל הקרקע (%)
חמצן	16.86	20.95
CO_2	0.42	0.04
חנקן וגזים אחרים	82.72	79.01

- מדוע ריכוז הגזים במחילות שונה מן הריכוז שמעל פני הקרקע?
- החפרפרת והחולדה הן יונקים בעלי גודל גוף דומה אבל החפרפרת חיה במחילות ואילו החולדה חיה על פני הקרקע. ההמוגלובין שלהן מותאם לסביבה שבה הן חיות. הסבירו במה ההמוגלובין של החפרפרת צריך להיות שונה מזה של החולדה וכיצד שוני זה מסייע לכל אחת מהן לחיות בסביבתה הטבעית.
- מהי הסיבה לאספקת חמצן לקויה כשעולים לגבהים?
- מה הם ההבדלים בין הסתגלות להתאמה? מה משותף ביניהם?
- מטוסים טסים באופן שגרתי בגובה של יותר מ-30,000 רגל (10 ק"מ).
 - איזו בעייה פיסיולוגית עלולה להתעורר בגובה כזה? הסבירו.
 - כיצד ניתן למנוע בעיה זו?



איור ב-30: השפעת ה-pH על אחוז הרוויה של המוגלובין בחמצן



5 יישומי מחשב, בנושא הובלת גזים בדם ובנושא הנשימה בגבהים, נמצאים ביחידת הלימוד

הנשימה - מבנה, תפקוד ומה שביניהם, באתר

http://agribio.snunit.k12.il/main/upload/.ab/id_resp.html

1. היישום **הובלת חמצן בדם** עוסק בקישור של חמצן למולקולת ההמוגלובין ובשחרורו באזורים שונים של הגוף. ביישום מתבקשים התלמידים לנתח נתוני מחקר ולעבד את הנתונים בעזרת גיליון אלקטרוני; ביישום משולבות אנימציות, סימולציות, ואתרי אינטרנט.

2. היישום **הובלת פחמן דו-חמצני** בדם עוסק בדרכים שבהן מועבר CO_2 במחזור הדם. הפעילות היא אינטראקטיבית והיא משלבת ניתוח השוואתי של גרפים, וכן איורים והפניה לאתרים אחרים.

3. היישום **השפעת ה-pH על קישור החמצן להמוגלובין** עוסק בהשפעת רמות שונות של pH על קישור החמצן להמוגלובין. ביישום מתבקשים התלמידים לנתח נתונים מחקריים באמצעות גיליון אלקטרוני, לסרטט ולנתח גרפים וקווי מגמה, ולהסיק מסקנות; ביישום משולבות סימולציות ויש איורים מתוך אתרים שונים.

4. ביישום **נשימה בתנאים חריגים** יש ניתוח של מחקר מדעי שעוסק בבעיות פיסיולוגיות שמתעוררות בגבהים. ביישום מתבקשים התלמידים לנתח נתונים באמצעות גיליון אלקטרוני, לסרטט ולנתח גרפים, לחשב נוסחאות תא ולנתח קווי מגמה; ביישום משולבים אתרים אחרים.

5. ביישום **כיצד אנשים שחיים בגבהים מותאמים לנשימה באוויר דל בחמצן?** מתבקשים התלמידים לנתח נתוני מחקר מדעי בעזרת גיליון אלקטרוני. המחקר עורך השוואה בין שני שבטים שחיים בגבהים שונים, בודק את ההסתגלות של אוכלוסיות למעבר מאזורים בגובה פני הים לאזורים גבוהים, ובודק את השפעת הגז NO על ההסתגלות לסביבה דלת חמצן.

נשימת אוויר מזוהם

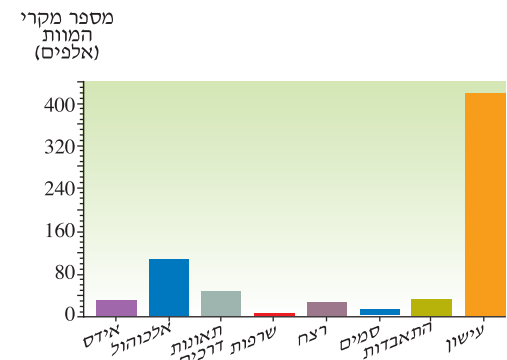
אדם שואף בין 8,000 ל-9,000 ליטר אוויר בכול יום. כאשר יש באוויר חומרים מזיקים בכמות גדולה, החומרים המזהמים נשאפים לתוך דרכי הנשימה, מגיעים לריאות ועוברים באמצעות הדם לתאי הגוף. הנזק העיקרי נגרם למערכת הנשימה, אך גם מערכות רבות אחרות נפגעות. הפגיעה בגוף היא גם עקיפה; חלק מן החומרים הנשאפים פוגעים במנגנון הסינון של דרכי הנשימה וחושפים את הגוף לזיהומים שונים. חלק מן החומרים המזהמים את האוויר הם ממקורות טבעיים אך רובם הם תוצאה של מעשי ידי אדם.

עישון טבק

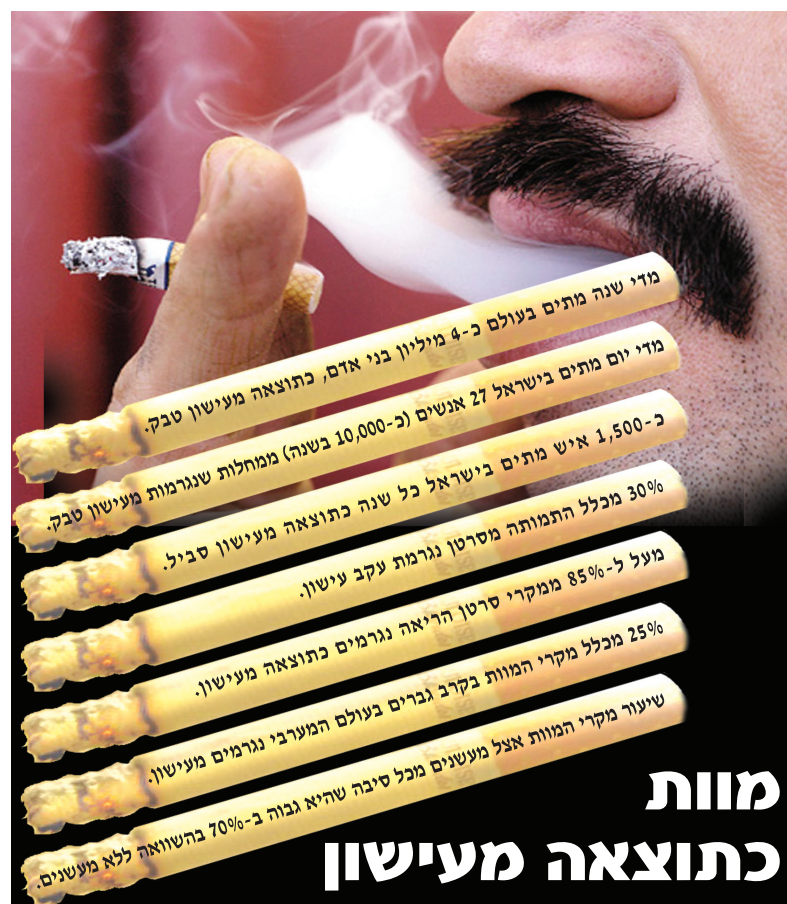
סיגריה בוערת היא "מפעל כימי" שמייצר כ-4,000 חומרים, מהם 400 רעילים. חלק מן החומרים הם בצורת חלקיקים מוצקים וחלקם בצורת גזים. המרכיבים המוצקים העיקריים הם: ניקוטין, עטרן, פחמימנים כבדים, שדומים בהרכבם לנפט ולזפת, פְּנֹלִים ועוד. כ-95% מן הגזים הם תוצרי בערה, כגון: חנקן, CO_2 ופחמן חד-חמצני (CO), ויש גם גזים אחרים, בחלקם רעילים מאוד, כגון: ציאניד, אמוניה, תחמוצות חנקן וחומצות שונות. רבים מן החומרים האלה הוכחו כחומרים גורמי סרטן. חומרי עשן הסיגריות נספגים מהר מאוד דרך מערכת הנשימה, פוגעים במערכות גוף חיוניות, וגורמים עלייה ניכרת בשכיחות מחלות כבר בגיל צעיר.

חלקיקי עשן הטבק יכולים לחדור לגוף גם על ידי עישון סביל, כלומר: בשאיפת העשן על ידי מי שאינו מעשן, אך נמצא בסביבה של מעשנים. העישון הסביל חמור במיוחד בילדים, השוהים במחיצת הורים מעשנים. אצל ילדים להורים מעשנים נמצאה פגיעה משמעותית בתפקודי הריאות. אצל מבוגרים רבים, העישון הסביל גורם רגישות בעיניים וכאבי ראש, גירוי רירית האף ושיעול, וכן גורם לתופעות אלרגיות. בשנים האחרונות דווח על שכיחות גדלה של סרטן הריאות אצל בני זוג של מעשנים.

נזקי העישון מצטברים במשך השנים, והם ברובם בלתי הפיכים. העישון הוא הגורם השכיח ביותר להתפתחות מחלות שגורמות מוות בעולם המערבי (איור ב-31). מצב העישון בעולם והתמותה המלווה אותו הם כמו מגפה קטלנית כלל-עולמית.



איור ב-31: מספר מקרי המוות בשנה כתוצאה מעישון טבק ומגורמים אחרים (ארה"ב, 2003)



נזקי העישון

פגיעה בריאות ובכלי הנשימה - העישון גורם לשתי מחלות ריאה כרוניות ולסרטן בריאות ובדרכי הנשימה. שתי המחלות הכרוניות (דלקת כרונית של הסימפונות ונפחת הריאות) מתפתחות במקביל אצל כל מעשן, אולם דרגת החומרה שלהן שונה בין מעשן למעשן. השינויים ההרסניים הפוגעים בסימפונות וברקמת הריאה אינם ניתנים לתיקון, אולם הפסקת העישון, בכול שלב שהוא, יכולה לעצור את המשך ההידרדרות.

בדלקת כרונית של הסימפונות חל הרס הדרגתי של מנגנוני ההגנה בסימפונות. העשן מגרה את תאי הגביע בדופן, והם מפרישים כמות מוגברת של ריר. ההפרשה המוגברת גורמת הצטברות ניכרת של ליחה. הסימנים הראשונים של דלקת כרונית הם שיעול ופליטת ליחה. העשן גם פוגע בפעולת הריסים עד לשיתוקם המוחלט. בגלל הפגיעה בריסים, חלקיקים שונים מן האוויר, כמו: נגיפים, חיידקים ואלרגנים, לא מסולקים, ומופיעות דלקות חוזרות בדרכי הנשימה. גם הריר עצמו, המופרש בדופן דרכי הנשימה, אינו מפונה, ונוצרת חסימה בדרכי הנשימה ודלקת כרונית של הסימפונות. חסימה חלקית או מלאה של דרכי הנשימה מפריעה לזרימת האוויר אל הנאדיות, והריאות מתקשות למלא את תפקידן העיקרי – חילוף הגזים. כאשר שטח קליטת החמצן בריאות הולך ומצטמצם, מופיע אצל מעשנים קוצר נשימה, בעיקר במצבים של מאמץ. עם הזמן, עלולים להתפתח אצל חלק מן המעשנים קשיי נשימה חמורים. נפחת הריאות היא מחלה שבאה לידי ביטוי בהרס הולך ומתקדם של הריאה, כתוצאה מעיכול עצמי של רקמת הריאה (איור ב-32, א). על סרטן הריאות ודרכי הנשימה ראו בעמ' 135 (התפתחות גידולים ממאירים).

עיכול רקמת הריאה כתוצאה מעישון

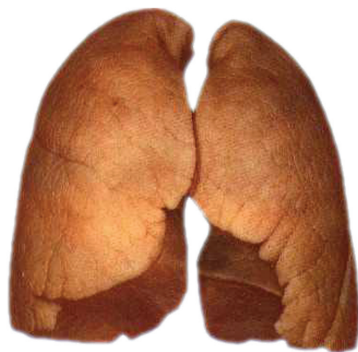


בשנים האחרונות נחקרה השפעת העישון על הרס רקמת הריאה בנפחת הריאות. במחקרים התגלה שהעישון גורם עלייה במספר תאי הדם הלבנים בריאות. התאים האלה בולעים ומעכלים חיידקים וחלקיקים חלבוניים שחודרים לגוף. את החומרים החלבוניים הם מפרקים בעזרת אנזימים שנקראים פרוטאזות. כדי להימנע מעיכול עצמי של רקמות הגוף, נמצאים בתאים האלה ובנוזלי הגוף חומרים שנקראים אנטיפרוטאזות, שתפקידם לסתור את פעולת הפרוטאזות. העישון מפר את שיווי המשקל העדין שקיים בין הפרוטאזות והאנטיפרוטאזות. הפרת שיווי המשקל נובעת מהגדלת כמות הפרוטאזות בריאות, ומהפחתה בכושר הפעולה של האנטיפרוטאזות. כתוצאה מכך, חל עיכול עצמי של רקמת הריאה ומתפתחת מחלת נפחת הריאות.

פגיעה בכלי הדם והלב - הפחמן החד-חמצני (CO) והניקוטין שבעשן הטבק פוגעים בכלי הדם. CO הוא גז רעיל ביותר בגלל נטייתו החזקה להתקשר להמוגלובין. מולקולות CO מתחרות במולקולות חמצן על אותם אתרי קשירה בהמוגלובין. מאחר שהנטייה של CO להתקשר להמוגלובין גבוהה פי 250 מזו של החמצן, כבר בריכוז נמוך מאוד (200ppm) של CO, כמות גדולה יחסית של המוגלובין (20%) נקשרת אליו. כתוצאה מכך, פחות חמצן נקשר להמוגלובין וכמות קטנה יותר של חמצן מגיעה לתאי הגוף. הלב צריך להזרים יותר



א. ריאות פגועות



ב. ריאות בריאות

איור ב-32: חלק לריאות עקב עישון טבק

דם לרקמות כדי לספק את הכמות הדרושה של החמצן, ולכן עולה קצב פעימות הלב וקצב הנשימה. עומס עבודה זה לאורך זמן פוגע בתפקוד הלב. CO יש השפעה הרסנית גם על שריר הלב. בשרירים מצוי מיוגלובין שקושר חמצן. הנטייה של CO להיקשר למיוגלובין גבוהה מאוד (פי 2-3 בהשוואה לקשירה להמוגלובין), לכן חלה ירידה ניכרת באספקת החמצן לשריר. בגלל הירידה באספקת החמצן, שריר הלב צריך "לעבוד" קשה יותר.

מחקרים שנעשו בשנים האחרונות הראו ש-CO גורם ליצירת טרשת העורקים, שגורמת בהדרגה חסימת חלל כלי הדם (ראו עמ' 63). העישון פוגע באספקת החמצן לדופנות העורקים. בעקבות כך, הציפוי הפנימי של דופנות העורקים הופך להיות בצקתי, שלפוחיות מופיעות מתחת לשכבת האנדותרל וכתוצאה מכך שכבת האנדותרל ניתקת במקומות רבים מן השכבות שתחתיה. באזורים האלה מופיעים שטפי דם, שוקעים חומרים ומתפתחת טרשת אופיינית. מחקרים גם הראו שרמת השומנים בדם עולה בעקבות חשיפה ל-CO. אצל מעשנים, רמת הכולסטרול בדם גבוהה ב-10%-15% בהשוואה לרמה אצל לא מעשנים. הפגיעה בדופן כלי הדם יחד עם עלייה בכמות השומנים בדם הם, כנראה, הסיבה לטרשת עורקים אצל מעשנים. טרשת העורקים גורמת להצרת כלי הדם, וכתוצאה מכך פחות דם מגיע לרקמות ואספקת החמצן אליהן נפגעת. התהליך הזה גורם הפרעות קשות, בעיקר, בתפקוד הלב, המוח והכליות וגם מערכות אחרות בגוף נפגעות. מחקרים רבים מאשרים שיש קשר הדוק בין עישון לבין תחלואה ותמותה ממחלות לב טרשתיות. נמצא שכלי הדם של הלב (העורקים הכליליים) רגישים באופן מיוחד לטרשת העורקים שנגרמת בגלל העישון.

גם הניקוטין פוגע בלב ובכלי הדם. הניקוטין גורם להאצת הדופק, לעלייה בלחץ הדם, לעלייה ברמה של החומצות השומניות החופשיות ולשינוי ברמה של חומרים אחרים. השינויים האלה עלולים לגרום נזקים ישירים ועקיפים לשריר הלב ולעורקים הכליליים, הפרעות קצב וליקוי בתפקוד טסיות הדם.

התפתחות גידולים ממאירים - העישון הוא כנראה הגורם השכיח ביותר להתפתחות מחלות ממאירות. עטרן הטבק (החלקיקים המוצקים בעשן) מכיל עשרות חומרים מסרטנים שפוגעים באיברים שונים בגוף. העישון גורם ל-30% מכלל מחלות הסרטן. מחלות הסרטן שנגרמות עקב עישון פוגעות בריאות, בחלל הפה, בלוע, בגרון, בושט, בדרכי השתן, בקיבה, בבלב ובצוואר הרחם. העישון מעלה פי 10 את הסיכון לחלות בסרטן הריאות (איור ב-33) והוא אחראי לכ-85% מכלל מקרי הסרטן של מערכת הנשימה (הריאות, הפה והלוע).

פגיעה בפוריות - העישון גורם להפרעה בפוריות של נשים ולבלות מוקדמת (הפסקת הביוץ והמחזור החודשי). הוא גם פוגע בפוריות הגבר, עקב פגיעות שונות בתאי הזרע, וגורם לאין אונות.

פגיעה בעוברים - החשיפה לנזקי העישון מתחילה אצל רבים עוד בהיותם ברחם אמם. CO שנפלט בעת העישון מתחרה עם החמצן על הקשירה להמוגלובין. רק 90% מן ההמוגלובין שבדם פנוי להובלת חמצן לעובר, ולכן התפתחות העובר עלולה להיפגע. פגיעה בהתפתחות העובר עלולה לגרום מומים אצל היילוד.

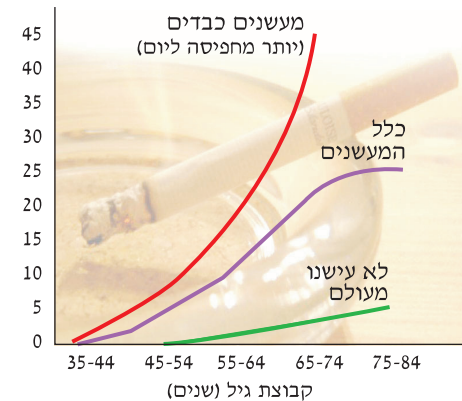
נזקי עישון נרגילה

הנרגילה היא כלי לעישון טבק שמעורב בחומרים ריחניים מפירות שונים, כמו: תפוחים, דובדבנים ואפרסקים. העשן שעולה משרפת הטבק בנרגילה, עובר דרך צינורית ומבעבע בתוך מים. משם הוא נשאף לפה ולריאות.

מכיוון שהריח הנעים של הטבק (ריח פירות) מחפה על ריח העשן של הטבק, רווחת הדעה שעישון נרגילה איננו מזיק לבריאות. הטבק בנרגילה טבול בחומרים שנקראים בערבית "מעסל" שפירושו דבש. השם מעסל מטעה, מכיוון שהוא מתקשר למושגים שקשורים לבריאות. גם המים בנרגילה יוצרים הרגשה נעימה ואשליה שהעישון קל ולכן אינו מזיק. ואולם המים בנרגילה אינם מסננים חומרים כימיים מסוכנים שנמצאים בעשן הטבק.

במחקרים עדכניים נמצא שנזקי עישון הנרגילה חמורים מנזקי עישון הסיגריות, או לפחות זהים להם. עישון נרגילה גורם פליטת CO בריכוז גבוה מעישון סיגריות רגילות. נרגילות קטנות אף מסוכנות יותר, מכיוון שנפח האוויר וכמות המים בהן קטנים יותר ולכן העשן יותר מרוכז. יתרה מזו, עישון הנרגילה נמשך זמן רב יותר מעישון סיגריות, ולכן כמות העשן שנכנסת לריאות גדולה יותר והנזק שנגרם רב יותר.

שיעור תמותה שנתי
(לכל אלף איש)



איור ב-33: תמותה מסרטן הריאות

למה קשה להיגמל מעישון טבק?

מעניין לדעת



לפי ארגון הבריאות העולמי, בכל דקה מתים 8 אנשים מנזקי עישון טבק. ברוב המקרים, האנשים היו מודעים לסכנה שנים רבות לפני המוות. רובם ניסו בשלב כלשהו להפסיק לעשן. למה הם נכשלו? בשאיפת עשן הטבק, הניקוטין נכנס למחזור הדם ותוך כמה שניות מגיע למוח. במוח יש תאים בעלי קולטנים לניקוטין, וכאשר הניקוטין נקשר לקולטנים האלה התאים מפרישים את המוליך העצבי דופמין. הדופמין יוצר תחושות של סיפוק ועירנות במשך כשעה. בתום השעה, רמת הדופמין צונחת ומתעוררת מחדש הכמיהה לניקוטין. ההתמכרות לניקוטין היא בין הקשות ביותר; קשה יותר מהתמכרות לאלכוהול, למשל. אם יימצא חומר שידכא את ייצור הדופמין, ייתכן שתהיה זו תרופה יעילה שתעזור להיגמל מהתשוקה לניקוטין.

המלחמה בעישון

על פי התחזיות של ארגון הבריאות העולמי, עד שנת 2050 ימותו כ-450 מיליון בני אדם בשל נזקי הטבק. נתונים מסוג זה ממחישים את חשיבות המאמצים להפחית את ממדי העישון. מהניסיון שהצטבר בעולם נמצא כי ניתן להפחית את שיעור המעשנים ואת נזקי העישון באופן משמעותי על ידי תכנית פעולה כוללת שמורכבת מכמה גורמים:

1. חקיקת חוקים שיגבילו את העישון ואת הפרסום והמכירה של מוצרי טבק; החקיקה בישראל בתחום זה כוללת חוקים להגבלת עישון במקומות ציבוריים, חוקים להגבלת עישון במקומות עבודה, חוקים המחייבים את חברות הסיגריות לכלול אזהרה מטעם משרד הבריאות על מוצריהם ובפרסומיהם, וחוקים להגבלת פרסום של מוצרי טבק.
 2. אכיפת החוקים על ידי הרשויות בתמיכת הציבור.
 3. חינוך והסברה כדי למנוע התחלת עישון והתרגלות לעישון, בעיקר בקרב בני הנוער.
 4. פיתוח תכניות גמילה למעשנים והורדת מחיריהן, כך שיהיו זמינות גם לבעלי אמצעים מוגבלים.
 5. העלאת מחירי הסיגריות; מסתבר שזהו אחד האמצעים היעילים ביותר להפחתת מספר המעשנים. עם כל עלייה של 10% במחיר הסיגריות, נמצא שחלה ירידה של 4% בצריכת הסיגריות.
- תודות לתכניות פעולה כאלה חלה בעולם ירידה בעישון בכול שכבות הגיל, למעט צעירים בני 18 עד 24 שנים. בישראל, מספר המעשנים באוכלוסיה הכללית ירד מ-42% ב-1983, לכ-24% בשנת 2004. עם זאת, ישראל עדיין נמצאת במקום החמישי בעולם מבחינת מספר המעשנים.

מליארדי דולרים פיצויים לנפגעי העישון

במסגרת המלחמה בעישון והגברת המודעות הציבורית לנזקי הטבק הוגשו בארה"ב כמה תביעות ענק נגד יצרניות הסיגריות הגדולות. הטענה בתביעות אלה היא שחברות הטבק שיווקו במשך שנים סיגריות מבלי לידע את הצרכנים על הסכנות הצפויות להם מן הניקוטין ועל כך שהסיגריות ממכרות. ב-1988, בית המשפט בארה"ב חייב יצרן סיגריות לשלם 400 אלף דולר פיצויים לאדם שאשתו מתה מסרטן ריאות. פסיקה זו היוותה תקדים לתביעות רבות שבאו אחריה. בפלורידה, חויבו יצרניות הסיגריות הגדולות לשלם 145 מיליארד דולר למאות אלפי מעשנים, שחלו בגלל העישון. גם בבתי המשפט בישראל, תלויות ועומדות כמה תביעות ענק נגד חברת טבק מקומית. קופות החולים תובעות גם הן את חברת הסיגריות, בטענה שהיא צריכה לשאת בהוצאות הטיפוליים בנזקים שנגרמים מעישון.



זיהום אוויר

מדי יום נפלטת לאטמוספירה ברחבי העולם טונות של מזהמים טבעיים ומלאכותיים. המזהמים האלה מצטברים באוויר שאנו נושמים. בשנים האחרונות גוברת המודעות למזהמים, שהולכים ומתרבים, מאחר שהם מסכנים את בני האדם, את בעלי החיים וגם את הצמחייה. האוויר המזוהם פוגע בבני אדם ובבעלי חיים, וגורם מחלות, בעיקר, בדרכי הנשימה.

החומרים המזהמים את האוויר

רוב מזהמי האוויר הם גזים שנפלטת לאוויר בעת שרפה בלתי מלאה של דלקים פחמניים (בנזין, נפט, סולר, מזוט, פחם ועצים). בשרפה מלאה של דלקים פחמניים נוצרים אדי מים ו- CO_2 בלבד, ואלה אינם נחשבים מזהמי אוויר. אולם, הדלקים הפחמניים מכילים תוספות שונות, כגון: תרכובות גופרית ועופרת, והבערה נעשית בדרך כלל בתנאים שאינם אופטימליים. לכן, בתהליך השרפה נפלטת לאוויר, גם הגזים האלה: פחמן חד-חמצני (CO), גופרית דו-חמצנית (SO_2), חנקן חד-חמצני (NO) וחנקן דו-חמצני (NO_2). כמו כן, נפלט עשן שמורכב מחלקיקי דלק שרוף למחצה ומחלקיקי עופרת. ברשימת מזהמי האוויר כוללים גם פחמימנים, חלקיקי אבק ואוזון (O_3) (טבלה ב-7).

הגורמים העיקריים לזיהום אוויר בעולם הם: כלי הרכב הרבים במרכזים עירוניים צפופי אוכלוסין (איור ב-34), תחנות הכוח שצורכות כמויות אדירות של דלק ומפעלי התעשייה שמשמשים בדלק במהלך הייצור (איור ב-35). בארץ, כלי הרכב הם מזהמי האוויר העיקריים והקשים ביותר. בכבישי ישראל נוסעים כיום (2005) כ-2 מיליון כלי רכב שפולטים כ-92% מן הכמות של פחמן חד-חמצני באוויר, כמחצית מתחמוצות החנקן ו-44% מן הזיהום של חלקיקים. אנשים סובלים מפליטת כלי רכב יותר מאשר מן הזיהום שפולטים תחנות הכוח, בתי הזיקוק והמפעלים. פליטת עשן ממקורות תעשייתיים מתרחשת בגובה רב ונמהלת ברובה באוויר. לעומת זאת, עשן כלי הרכב נקלט בריאות עוד בטרם נמהל. בישראל מרוכזים רוב מקורות זיהום האוויר סמוך לאזורים צפופי אוכלוסין בעיקר לאורך שפלת החוף. מקצתם הם מוקדי זיהום חמורים שיוצרים מפגעים קשים.



איור ב-34: אוטובוס מעשן



איור ב-35: זיהום אוויר ממפעל במפרץ חיפה

טבלה ב-7: מזהמי האוויר העיקריים ונזקיהם

המזהם	תיאורו	מקורו	הנזק
פחמן חד-חמצני CO	גז חסר צבע או ריח	שרפה בלתי מלאה, בעיקר ממכונות ובחימום ביתי	כאבי ראש, עייפות, סחרחורות, מחנק
גופרית דו-חמצנית SO ₂	גז חסר צבע; בעל ריח אופייני	שרפת דלק עשיר בגופרית, בעיקר, בתחנות כוח ובמכונות	פגיעה בריריות העין ובדרכי הנשימה; יובש בפה; מטרד ריח; כאבי ראש ושיעולים קשים; נזקים לצמחייה; התפתחות גשם חומצי
חנקן חד-חמצני NO	גז חסר צבע או ריח	שרפה בטמפרטורה גבוהה, בעיקר, בתחנות כוח ובמכונות	פגיעה במערכת הנשימה, בעיניים ובכלי דם; פגיעה בצמחייה
חנקן דו-חמצני NO ₂	גז חסר צבע או ריח	חמצון חנקן חד-חמצני באטמוספירה	גירוי לכלי הנשימה; נזק לצמחייה; התפתחות גשם חומצי
אוזון O ₃	גז חסר צבע; בעל ריח אופייני	תוצר תגובות כימיות, בהשפעת קרינת השמש, בהשתתפות פחמימנים ותחמוצת חנקן	קשיי נשימה; פגיעה בראייה; עייפות; הזדקנות העור; נזק לצמחייה
פחמימנים THC	בעיקר אדי דלק	התאדות דלק וממיסים אורגניים; שרפה בלתי מלאה בתעשייה ובמכונות; מקורות טבעיים: צמחייה ויערות	הפרעות בנשימה; פגיעה בראייה; חלק מן הפחמימנים הם חומרים מסרטנים
חלקיקים	חלקיקי אבק ועשן	תעשיות מלט ומחצבות; תנועה בדרכים לא סלולות; מקורות טבעיים: סופות חול	גירוי של כלי הנשימה ושל העיניים; נזק לריאות
עופרת Pb	חלקיקים קטנים	שרפת בנזין שמכיל תרכובות עופרת	פגיעה במערכת העצבים, בעיקר בילדים

נזקי זיהום האוויר

רוב המזהמים משבשים את התפקוד התקין של דרכי הנשימה, פוגעים בחסינות הגוף נגד זיהומים, ומעודדים תהליכים דלקתיים (ראו טבלה ב-7). כתוצאה מכך, נגרמות דלקות ריאה ומתפתחים קשיי נשימה. המצב חמור יותר אצל אנשים שמערכת החיסון שלהם ירודה, למשל, אצל זקנים. החלקיקים המסוכנים ביותר הם החלקיקים הזעירים שגודלם פחות מ-10 מיקרון. החלקיקים הזעירים האלה נשאפים ועוברים דרך מנגנוני הסינון הטבעי וחודרים לעומק דרכי הנשימה. הם גורמים גירוי בדרכי הנשימה ופוגעים בתפקודם. הם פוגעים גם במערכת החיסון וכתוצאה מכך דלקות שכבר קיימות בדרכי הנשימה נעשות חמורות יותר. במחקרים שונים שנעשו בערים גדולות בארה"ב ובאירופה, נמצא שבימים שבהם חלה עלייה ברמת החלקיקים עולה התחלואה של דרכי הנשימה ושל מחלות לב וכלי הדם. המחקרים הראו שיש יותר מקרים של התקפי לב בימים שבהם נמדדה רמה גבוהה של זיהום אוויר.



לונדון ב"מרק אפונה"



אחד מאירועי זיהום האוויר החמורים ביותר בהיסטוריה אירע בלונדון. ב-5.12.52 הטמפרטורה בלונדון ירדה ל- 0.5°C ולחות האוויר הגיעה ל-80%. תנועת אוויר כמעט לא הורגשה, ובשכבת האוויר הקרובה לקרקע הצטברו עשן ולחות. ב-6 בדצמבר הטמפרטורה ירדה ל- 2°C והלחות היחסית הגיעה ל-100%. תנועת האוויר נפסקה לחלוטין ועשן סמיך כיסה את העיר. בגלל הקור, צריכת הדלק והפחם לחימום הבתים עלתה מאוד ואתה עלתה כמות גזי השרפה שנפלטו לאוויר. טיפות המים בערפל הכבד שכיסה את העיר לכדו גופרית דו-חמצנית וחלקיקי עשן. לא הייתה זו הפעם הראשונה שנוצר בלונדון "מרק אפונה" (כינוי שנתנו תושבי לונדון לערפיה; תערובת סמיכה של ערפל, עשן ופיח). אנשים סבלו מצריבות בעיניים, השמיעה הייתה קשה, רבים סבלו מקשיי נשימה והייתה עלייה חדה בתמותה. מעריכים כי 4,000 אנשים מתו כתוצאה מנשימת הערפיה בגלל האירוע האקלימי החרג הזה. מאז נאסר בלונדון השימוש בפחם להסקה ביתית ולבישול.

הפחתת זיהום האוויר בישראל

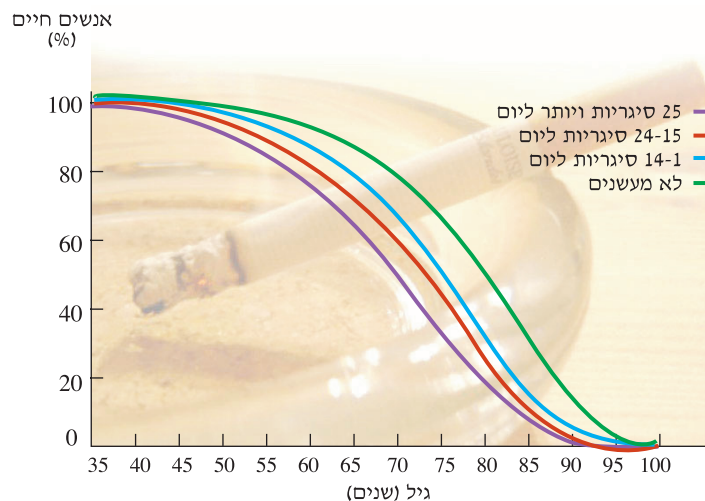
בגלל העלייה ברמת החיים, והתבססות ישראל כמדינה מתועשת, חלה עלייה גדולה בפליטת מזהמי אוויר לאטמוספירה והרעה משמעותית באיכות האוויר בישראל. רוב הפתרונות צריכים להינתן על ידי חקיקת חוקים ואכיפתם של חוקים כאלה. הפתרונות לזיהום צריכים לטפל במייצרי הזיהום: כלי רכב, תחנות כוח ומפעלי תעשייה. כדי לצמצם את הזיהום על ידי כלי הרכב צריך להפחית את השימוש בכלי רכב ממונעים ולהגביר את השימוש בתחליפים, כמו אופניים. אפשר גם לעבור לשימוש בדלקים נקיים יותר ולהתקין ברכבים מתקן שמפחית את המזהמים על ידי שרפה מלאה יותר של הדלק (ממיר קטליטי). לתחנות הכוח עדיין אין פתרונות מספקים להפחתת הזיהום. הפתרונות הקיימים כיום בארץ, למניעת פליטת SO_2 , כוללים ארובות גבוהות, שימוש בפחם דל גופרית והפעלת מערכות בקרה; בתנאים מטאורולוגיים בעייתיים, כאשר ההסתברות לזיהום האוויר גבוהה, מתריע המכון המטאורולוגי, ותחנות הכוח עוברות להשתמש בדלק דל גופרית. מתקנים לסילוק SO_2 מגזי הפליטה, המותקנים בארצות מפותחות, עדיין לא הותקנו בתחנות הכוח בארץ.

סיכום

1. העישון הוא הגורם השכיח ביותר למוות בעולם המערבי.
2. העישון פוגע בריאות ובכלי הנשימה, בלב ובכלי הדם, מעודד התפתחות גידולים ממאירים, פוגע בפוריות ובהתפתחות עוברים.
3. אנשים שאינם מעשנים, אך נמצאים בסביבה של מעשנים, קולטים את עשן הטבק בעישון סביל. העישון הסביל גורם גם הוא נזקים גופניים.
4. נזקי עישון נרגילה חמורים מנזקי עישון סיגריות, או לפחות זהים להם.
5. רוב מזהמי האוויר הם גזים הנפלטים בשעת שרפה בלתי מלאה של דלק פחמני, בעיקר במכוניות, בתחנות כוח ובמפעלי תעשייה.
6. שאיפת מזהמי אוויר פוגעת בעיקר במערכת הנשימה, אך גם במערכות גוף אחרות.
7. הפתרונות להקטנת זיהום הם: הפחתת השימוש בדלקים, שימוש בדלקים נקיים יותר, ממיר קטליטי ברכבים, ארובות גבוהות בתחנות הכוח, שימוש בפחם דל גופרית ומתקנים לסילוק מזהמים מגזי הפליטה.

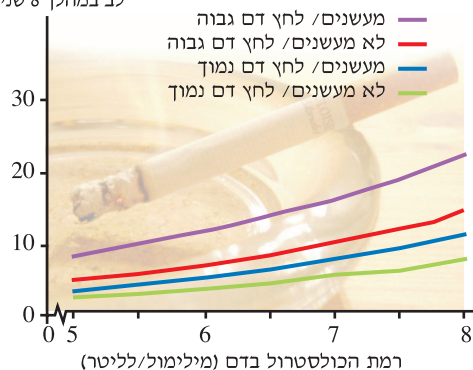


1. במחקר שנמשך 40 שנה (בין 1951 ל-1991) בדקו את השפעת נזקי העישון. תוצאות הניסוי מובאות באיור ב-36. התבוננו בעקומים והשיבו על השאלות האלה:



איור ב-36: השפעת העישון על תמותת אנשים

אחוז הגברים
שסבלו מאירוע
לב במהלך 8 שנים



איור ב-37: השפעת העישון ולחץ הדם על אחוז
אירועי הלב בקרב גברים אמריקאים

א. כיצד בדקו בניסוי את השפעת העישון על בריאות האנשים?

ב. מה הייתה השפעת העישון על בריאות הנבדקים?

ג. מה הייתה ההשפעה של מספר הסיגריות שעישנו ביום על בריאות המעשנים?

2. העוקמים באיור ב-37 מתארים השפעה של כמה גורמים על אחוז התקפי הלב בקרב גברים אמריקאים.

א. לפי העוקמים, אילו גורמים מגדילים את הסיכון להתקפי לב?

ב. הסבירו כיצד כל אחד מן הגורמים האלה מגדיל את הסיכון ללקות בהתקף לב? (היעזרו בפרק א).

ג. לשני אנשים שאינם מעשנים יש לחץ דם גבוה וכולסטרול בריכוז של 5 מילימול לליטר דם. אחד מהם התחיל לעשן ואצל האחר עלה ריכוז הכולסטרול ל-6 מילימול לליטר דם. למי משניהם יש עכשיו סיכוי גבוה יותר ללקות בהתקף לב? הסבירו.

ד. לאדם מעשן ולאדם שאינו מעשן היה לחץ דם נמוך וריכוז כולסטרול של 5 מילימול בליטר דם. ריכוז הכולסטרול של שני האנשים עלה ל-8 מילימול לליטר. פי כמה עלה הסיכון של כל אחד מהם ללקות בהתקף לב? הסבירו.

ה. ציינו לפחות עוד ארבע סכנות שנובעות מעישון. הסבירו כיצד העישון מגביר כל אחת מן הסכנות האלה.

3. ידוע שעישון מעלה את ריכוז הפיברינוגן בדם, מגביר את יצירת צברי הטסיות בדם ומפחית את יכולתם של העורקים להתרחב. היעזרו במידע זה ובפרק א וענו על השאלות האלה:

א. איזו השפעה יש לעישון על לחץ הדם?

ב. כיצד משפיע העישון על יצירת קרישי דם?

ג. כיצד משפיע העישון על הסיכון לחלות במחלת לב כלילית?

4. היעזרו ברשת האינטרנט כדי לחפש מידע על מקרים של אירועי זיהום אוויר חריגים בישראל והשיבו על השאלות האלה:

א. תארו מקרה חריג אחד של זיהום אוויר בישראל.

ב. הוסיפו תמונה ו/או גרף שמתאר את האירוע.

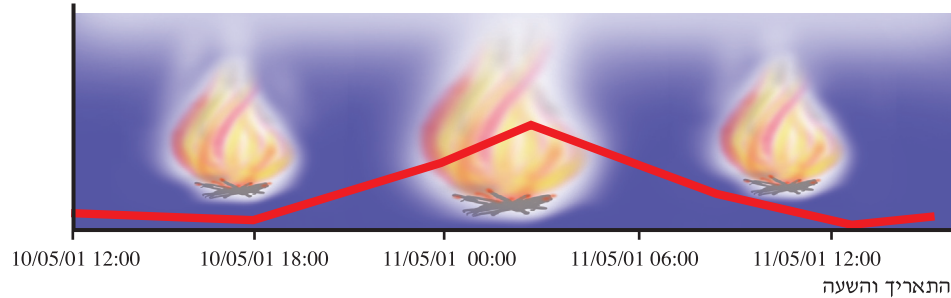
ג. הסבירו מה היו הגורמים לזיהום האוויר?

ד. מה הן הסכנות הבריאותיות של זיהום האוויר שתיארתם?

ה. הציעו פתרונות להפחתת אותו זיהום אוויר, שהתרחש באירוע שתיארתם.

5. בשנת 2001 חל ערב ל"ג בעומר ב-10/05. העקום באיור ב-38 מתאר את השינויים ברמת זיהום האוויר בבאר שבע באותו יום וביום שאחריו.
- א. תארו את השינויים ברמת זיהום האוויר בערב ל"ג בעומר וביום שאחריו.
- ב. הסבירו ממה נובעים השינויים האלה.
- ג. אילו נזקים בריאותיים עלולים להיגרם כתוצאה משינויים אלה? הסבירו.
- ד. כיצד, לדעתכם, משפיעה בערת חומרים, כמו: ניילון, פלסטיק וצבע, על זיהום האוויר? הסבירו.

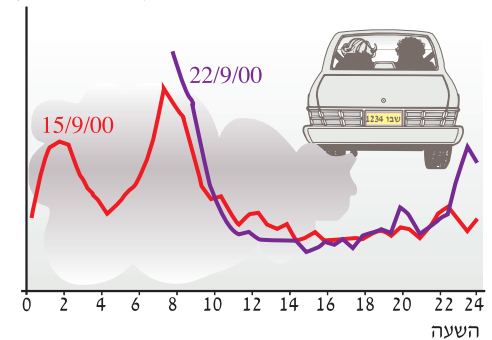
רמת זיהום האוויר
(יחידות יחסיות)



איור ב-38: רמות זיהום האוויר בבאר שבע בל"ג בעומר

6. ביום שישי 22/9/2000 התקיים בתל אביב "יום ללא תנועה". ביום הזה לא הורשתה כניסת מכוניות פרטיות למרכז העיר בין השעות 09.00-16.00, והתנועה הממונעת התאפשרה (כמעט) רק על ידי מוניות ואוטובוסים. העקום באיור ב-39 מתאר את רמות זיהום האוויר שנמדדו באותו יום בהשוואה לרמות זיהום האוויר ביום שישי שלפניו (15/9/2000).
- א. תארו את השינויים ברמות זיהום האוויר במהלך ה"יום ללא תנועה". הסבירו את השינויים האלה.
- ב. מה הן שעות השיא של זיהום האוויר ביום שישי "רגיל"? הסבירו מדוע.
- ג. האם האיסור על כניסת מכוניות פרטיות למרכז העיר הפחית את זיהום האוויר? הסבירו מדוע.
- ד. כיצד צריך לתכנן "יום ללא תנועה" כדי שיפחית בצורה משמעותית את זיהום האוויר?
- ה. ציירו עקום שיתאר את רמות זיהום האוויר בתל אביב במהלך יום כיפור וביום שלפניו.

רמת זיהום האוויר
(יחידות יחסיות)



איור ב-39: רמות זיהום האוויר במרכז תל אביב ב"יום ללא תנועה"

7. אנשי איכות הסביבה מבדילים בין אוזון טוב לאוזון רע.
 א. הסבירו מה ההבדל ביניהם.
 ב. מה הן ההשפעות המזיקות של האוזון?
 ג. באילו אזורים בארץ יש ריכוז גבוה של אוזון? הסבירו מדוע.
 כדי להשיב על השאלות תוכלו להיעזר באתר האינטרנט של המשרד לאיכות הסביבה:
www.environment.gov.il



- יישומי מחשב, שעוסקים בנוזקי עישון, בנוזקי זיהום אוויר ובמחלות בדרכי הנשימה, נמצאים ביחידת הלימוד **הנשימה - מבנה, תפקוד ומה שביניהם** באתר http://agribio.snunit.k12.il/main/upload/.ab/id_resp.html
1. היישום **עישון** עוסק בנוזק שגורם העישון לבריאות האדם. התלמידים מתבקשים לעבד נתוני מחקר מדעי בגיליון אלקטרוני. ביישום משולבות כתבות ויש מאמרים מתוך האינטרנט, וכן נתונים על פרסום והסברה בנושא.
 2. ביישום **השפעת הגז CO על הנשימה** יש תיאור מקרה של הרעלה בגז CO (מתוך מאמר בעיתון). היישום עוסק בהשפעת CO על הובלת החמצן בדם, תוך השוואה להובלת החמצן בחולי אנמיה. התלמידים מתבקשים לעבד נתוני מחקר בעזרת גיליון אלקטרוני. ביישום משולבים אתרים שונים.
 3. היישום **מחלות בדרכי הנשימה** הוא מארז פעילויות שעוסקות במחלות בדרכי הנשימה - פגיעה במערכת הנשימה על ידי גורמים שונים והדרכים להתמודדות; ביישום מתבקשים התלמידים לנתח סקרים ונתוני מחקר בעזרת גיליון אלקטרוני, לבנות תיק מחלה בעזרת חיפוש ומיון של מידע מתוך אתרים שונים. במארז משולבות כתבות מן העיתונות, אנימציות וסימולציות.

נשימה תאית

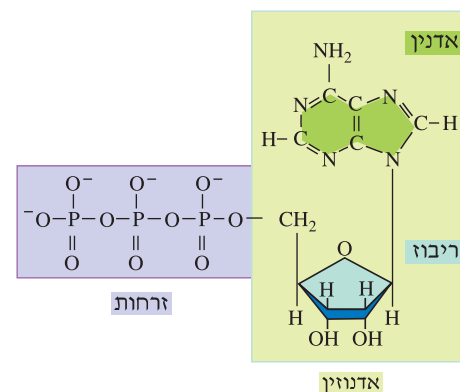
ברוב האורגניזמים, החמצן שנקלט במערכת הנשימה משמש בתהליך הפקת האנרגיה בתאים, וה- CO_2 שנפלט דרך מערכת הנשימה הוא תוצר של התהליך הזה. תהליך הפקת האנרגיה בתאים נקרא **נשימה תאית** (cellular respiration). הנשימה התאית מורכבת משרשרת של תהליכים שבהם חומרים אורגניים עוברים חמצון הדרגתי תוך כדי שחרור אנרגיה. האנרגיה שמשחררת בתאים, כתוצאה מהתרחשותם של תהליכים כימיים, נקראת אנרגיה כימית. חלק ממנה נשאר בצורת אנרגיה כימית והוא מנוצל לתהליכים כימיים אחרים שהם תהליכי החיים. חלק מן האנרגיה הכימית מתגלגל לאנרגיית חום.

תהליך הפקת האנרגיה בנוכחות חמצן נקרא נשימה תאית אווירנית (אירובית) והוא מתרחש ברוב האורגניזמים. יש אורגניזמים שבהם הפקת האנרגיה בתאים נעשית בהעדר חמצן, בתהליך שנקרא נשימה תאית אל-אווירנית (אנאירובית), או בתהליך שנקרא תסיסה. בתנאים מסוימים, מתקיימים תהליכי תסיסה גם ברקמות אחדות של אורגניזמים שבהם רוב האנרגיה מופקת בנשימה תאית אווירנית.

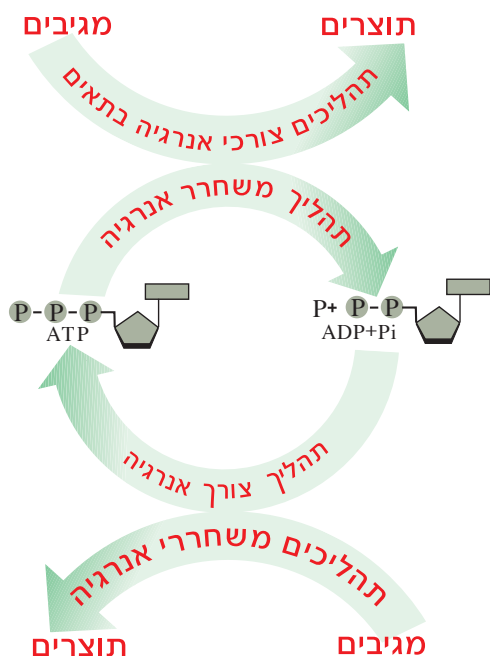
בנשימה התאית משתחררת אנרגיה, כאשר חלים שינויים במבנה מולקולות אורגניות, בשרשרת של תהליכים כימיים. האנרגיה שמשחררת יכולה להיות מנוצלת לצורך "ביצוע עבודה" על ידי התאים. תהליכים צורכי אנרגיה בתאים יכולים להתקיים רק אם צמוד לאותם תהליכים יתרחשו תהליכים משחררי אנרגיה. על פי רוב, שחרור האנרגיה איננו מתרחש במקום או בזמן שבו נצרכת האנרגיה. לכן, יש צורך בחומר מתווך שבאמצעותו מועברת האנרגיה הכימית ממקום שחרורה בתא למקום אחר בתא, למקום שבו היא נצרכת. ברוב התהליכים בתא, החומר המתווך הוא מולקולה שנקראת אַדֶּנוֹזִין טְרי-פּוֹסְפָּט (adenosine tri-phosphate), או בקיצור **ATP**. מולקולת ה-ATP היא מעין "מטבע של אנרגיה". ה"מחיר" האנרגטי של תגובות בתא נמדד במספר מולקולות ה-ATP שנבנות או מתפרקות, כשתגובה כלשהי יוצאת לפועל. מולקולת ה-ATP בנויה מאדנין (בסיס של חומצת גרעין), מריבוז (סוכר בן 5 פחמנים) ומשלוש קבוצות של זֶרְחָה (תרכובת שמכילה זרחן) (איור ב-40). הצירוף של אדנין + ריבוז נקרא אדנוזין. זרחן (בלועזית) = פוספט (Pi). מכאן מקור השם הלועזי של המולקולה: אדנוזין טרי (=שלוש) פוספט.

כאשר מולקולת ATP מגיבה עם מולקולת מים, משתחררת קבוצה אחת של זרחה מן ה-ATP, ומתקבלת מולקולה שנקראת **ADP** (אדנוזין די-פוספט). כאשר משתחררת קבוצת הזרחה הקיצונית, משתנה סידור האלקטרונים במולקולה. כתוצאה מן השינוי הזה, משתחררת אנרגיה. אמנם, בפירוק הקשר הזה, כמו בפירוק כל קשר כימי, מושקעת אנרגיה, אך כמות

תהליכי חמצון-חיזור - תהליכים שבהם אלקטרונים עוברים מחומר "מוסר אלקטרונים" (חומר מחזר שעובר חמצון) אל חומר "מקבל אלקטרונים" (חומר מחמצן שעובר חיזור).



איור ב-40: מבנה מולקולת ATP



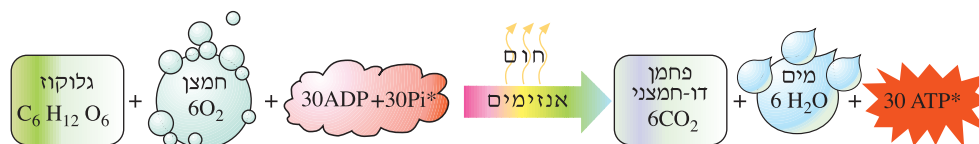
איור ב-41: בנייה ופירוק של ATP צמוד לתהליכים אחרים בתא

האנרגיה שמושקעת קטנה מכמות האנרגיה שמשתחררת כתוצאה מן השינוי בסידור האלקטרונים. תהליך התגובה של ATP עם מים מתרחש צמוד לתהליכים צורכי אנרגיה, והאנרגיה שמשתחררת מפירוק ה-ATP נצרכת בתהליכים האלה (איור ב-41). כאשר נוספת קבוצת זרחה למולקולת ADP, מתקבלות שתי מולקולות: מולקולת ATP ומולקולת מים. יצירת ATP צורכת אנרגיה, והיא מתרחשת צמוד לתהליכים שבהם משתחררת אנרגיה.

הפקת אנרגיה בנוכחות חמצן

נשימה תאית אווירנית

התהליך היעיל ביותר להפקת אנרגיה בתאים הוא **הנשימה התאית האווירנית** (aerobic respiration). בנשימה התאית האווירנית, האורגניזמים משתמשים בחמצן שבאוויר להפקת אנרגיה בתהליך חמצון של מולקולות אורגניות. הנשימה התאית האווירנית היא שרשרת של תהליכים כימיים שבהם מתפרק החומר האורגני בשלבים רבים, כאשר כל תהליך מזורז על ידי אנזים ייחודי. החומר האורגני הנפוץ ביותר המשמש בתהליך הפקת האנרגיה הוא **הגלוקוז**. במהלך הנשימה התאית האווירנית, הגלוקוז מגיב עם חמצן ומתפרק עד ל- CO_2 ולמים. האנרגיה שמשתחררת במנות קטנות, במהלך התהליכים הרבים בשרשרת. חלק מן האנרגיה שמשתחררת נצרכת בתהליך היצירה של ATP וחלק מן האנרגיה נפלטת כחום (איור ב-42).



* מספר המולקולות של ה-ADP, של הזרחן ושל ה-ATP יכול לנוע בין 30 ל-32.

איור ב-42: הנוסחה הכימית הכללית של תהליך הנשימה התאית האווירנית

תהליך הפקת האנרגיה מחמצון הגלוקוז, נעשה בארבעה שלבים עיקריים (איור ב-48).

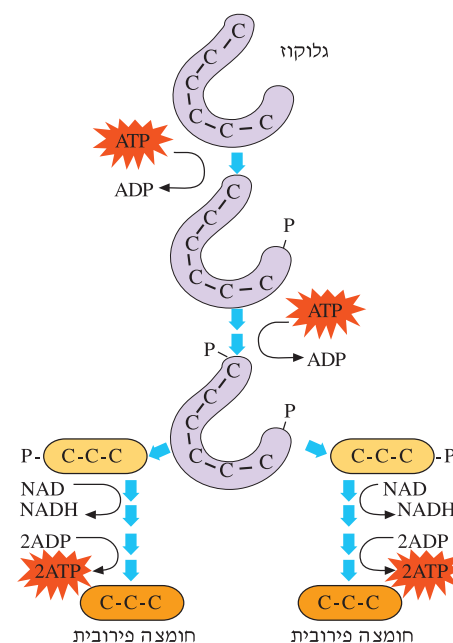
שלב א - גליקוליזה

השלב הראשון בתהליך הפקת האנרגיה מחמצון הגלוקוז נקרא **גליקוליזה** (glykosis = סוכר, lysis = פירוק), והוא מתרחש בציטופלסמה של התאים של כל היצורים. שלב זה אינו

צורך חמצן והוא מתרחש גם בנשימה תאית אווירנית, גם בנשימה תאית אל-אווירנית וגם בתסיסה.

מולקולת הגלוקוז מורכבת משלד בן 6 אטומי פחמן ($C_6H_{12}O_6$). במהלך הגליקוליזה (איור ב-43) מתפרקת כל מולקולת גלוקוז לשתי מולקולות שמורכבות מ-3 אטומי פחמן ($C_3H_4O_6$). המולקולה התלת-פחמנית הזאת נקראת **חומצה פירובית**. פירוק הגלוקוז כולל שלבים אחדים, שכל אחד מהם מזורז על ידי אנזים ייחודי.

במהלך הפירוק של מולקולת הגלוקוז מועברים אטומי מימן מן הגלוקוז למולקולות שמשמשות **כנשאי מימנים** (NAD), ומתקבלות 2 מולקולות של **נשאי מימנים מחוזרים** (NADH). תהליך העברת המימנים מלווה בשחרור אנרגיה, וחלק קטן מן האנרגיה מנוצל לבניית מולקולות ATP. מכל מולקולת גלוקוז, שמתפרקת בשלב הגליקוליזה, נבנות 4 מולקולות ATP. אולם לתחילת התהליך נדרשת השקעה של אנרגיה, והיא מתקבלת מפירוקן של 2 מולקולות ATP. לכן, הרווח האנרגטי מפירוק מולקולה אחת של גלוקוז בשלב הגליקוליזה הוא רק 2 מולקולות ATP. מחצית מן האנרגיה שמשתחררת בשלב הזה נפלטת כאנרגיית חום.



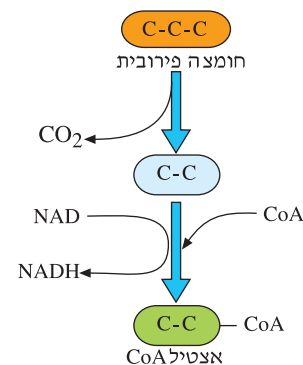
איור ב-43: תהליך הגליקוליזה

שלב ב - בניית אצטיל קואנזים A

החומצה הפירובית שנוצרת בשלב הגליקוליזה עוברת מן הציטופלסמה אל תוך המיטוכונדריון. בתמיסה המימית של המיטוכונדריון, שנקראת **מטריקס** (matrix) (איור ב-46), החומצה הפירובית מתפרקת למולקולה דו-פחמנית (איור ב-44). המולקולה הדו-פחמנית מתקשרת לחומר שנקרא קואנזים A (CoA). קואנזים הוא חומר שמפעיל אנזים או מזרז את פעולתו. כתוצאה מההתקשרות, נוצרת התרכובת **אצטיל קואנזים A** (אצטיל CoA). אטום הפחמן (של החומצה הפירובית) שאינו משתתף ביצירת המולקולה של אצטיל קואנזים A משתחרר כ- CO_2 . במהלך היצירה של אצטיל קואנזים A מועברים אטומי מימן לנשא מימנים (NAD) ומתקבל נשא מימנים מחוזר (NADH).

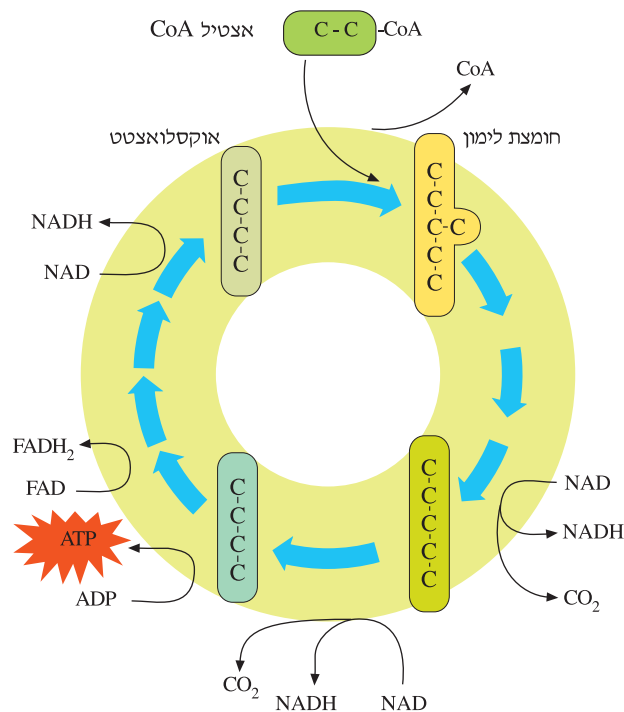
שלב ג - מעגל חומצת הלימון

האצטיל קואנזים A עובר במטריקס של המיטוכונדריון סדרת תהליכים מעגלית. סדרת התהליכים הזאת נקראת **מעגל חומצת הלימון** (citric acid cycle), על שם החומר שנוצר בתחילת המעגל, או **מעגל קרבס** (Krebs cycle) על שם החוקר שגילה אותה. במעגל חומצת הלימון, מולקולת אצטיל קואנזים A נקשרת למולקולה בעלת 4 אטומי פחמן



איור ב-44: ייצור אצטיל קואנזים A במיטוכונדריון

(אוקסלוֹאֶצֶטט) ונוצרת מולקולה בת 6 אטומי פחמן, שנקראת **חומצת לימון** (איור ב-45). בהמשך המעגל, השלד הפחמני של חומצת הלימון עובר שרשרת של תהליכי חמצון עד לקבלת אוקסלוֹאֶצֶטט. במהלך מחזור אחד של המעגל מתקבלים (א) 2 מולקולות CO_2 ; (ב) נשאי מימנים מחוזרים (3 מולקולות NADH ומולקולה אחת FADH_2); (ג) מולקולה אחת של ATP . רק מעט מן האנרגיה שמשתחררת בשלב הזה משמשת באופן ישיר לבניית ATP . מחצית מן האנרגיה שמשתחררת נפלטת בצורת חום.



איור ב-45: מעגל חומצת הלימון (מעגל קרבס)

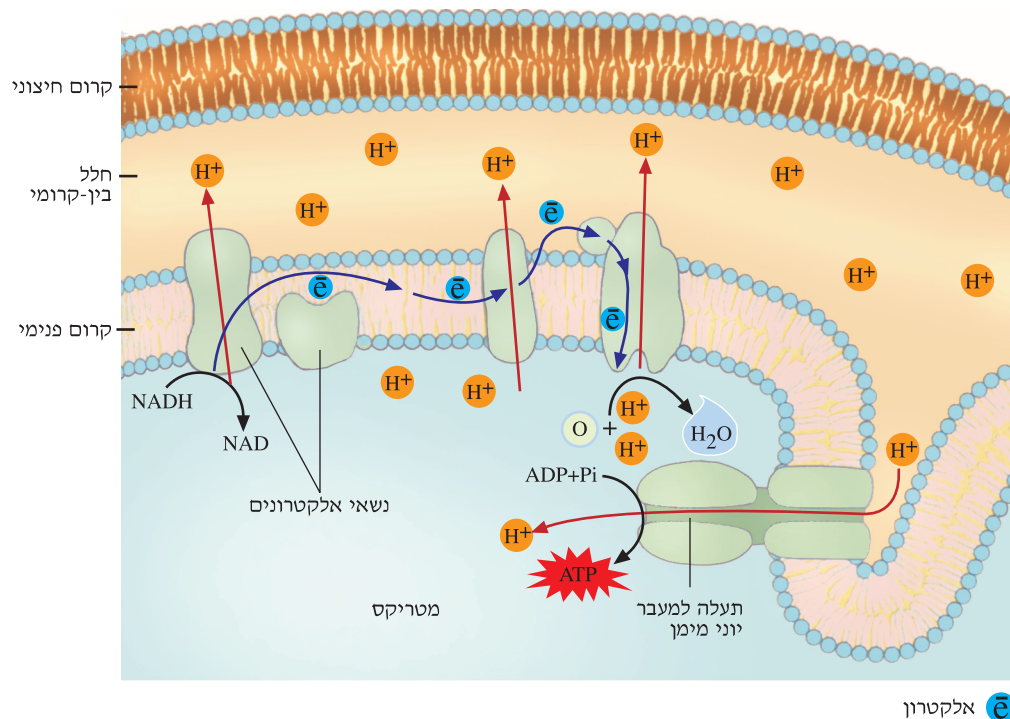
שלב ד - זרחון חמצוני

רוב מולקולות ה- ATP נוצרות בשלב הזרחון החמצוני. בשלב הזה מתרחשת סדרה של תהליכי חמצון-חיזור (מסירת אלקטרונים וקבלת אלקטרונים), ובהם משתחררת אנרגיה רבה. האנרגיה שמשתחררת משמשת לבניית ATP מ- ADP ומזרחה. מאחר שהתהליך הוא זרחון של ADP (תוספת זרחן), תוך כדי חמצון של נשאי מימנים מחוזרים, נקרא התהליך **זרחון חמצוני** (oxidative phosphorylation).

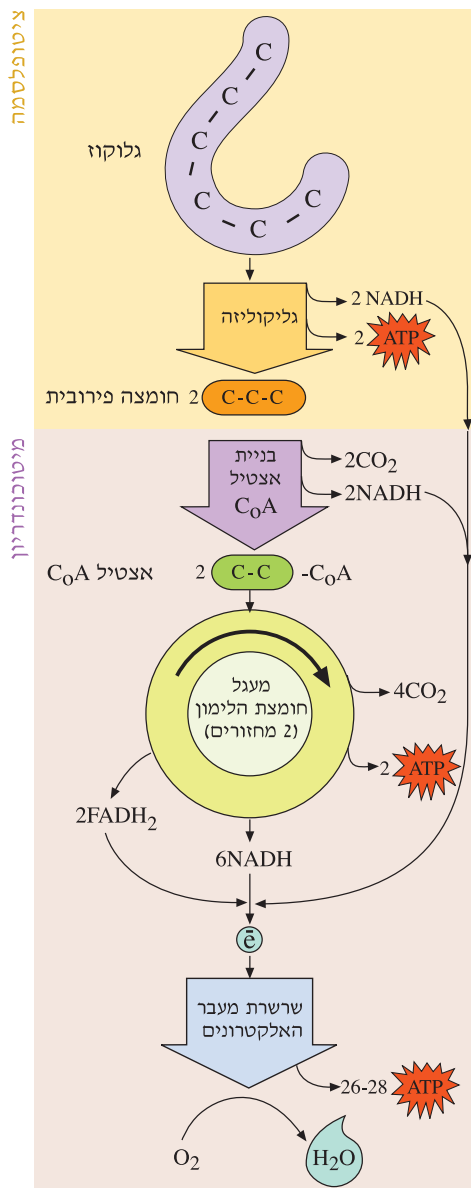
בתהליך הזרחון החמצוני (איור ב-47), נשאי מימנים מחוזרים, שהתקבלו בשלבים הקודמים של הנשימה התאית, מהווים מקור של אלקטרונים. האלקטרונים האלה נמסרים לסדרה של מולקולות שמשמשות כנשאי אלקטרונים. האלקטרונים עוברים מנשא אלקטרונים אחד לנשא אחר, בסדרה של תהליכי חמצון-חיזור, בשרשרת העברת אלקטרונים. המולקולות של שרשרת העברת האלקטרונים מאורגנות בקרום הפנימי של המיטוכונדריון (איור ב-46), ברצף שבו כל נשא הוא מחמצן (מקבל אלקטרונים) חזק יותר מקודמו. במעבר האלקטרונים, משתחררת אנרגיה שמנוצלת להוצאת יוני מימן דרך הקרום הפנימי של המיטוכונדריון. הוצאת יוני המימן יוצרת מפל של ריכוז יוני מימן משני צדי הקרום הפנימי. מקבל האלקטרונים האחרון בשרשרת מעבר האלקטרונים הוא חמצן מולקולרי (O_2), שהוא מחמצן חזק יותר מכל הנשאים הקודמים. החמצן קושר את האלקטרונים וכן את יוני המימן שנמצאים במטריקס, ונוצרות מולקולות של מים.



איור ב-46: מבנה המיטוכונדריון



איור ב-47: זרחון חמצוני בקרום הפנימי של המיטוכונדריון



איור ב-48: שלבי תהליך הנשימה התאית האווירנית

בקרום הפנימי של המיטוכונדריון נמצאים גם האנזימים שמזרזים את היצירה של ATP מ-ADP ומזרחה. התהליך הזה דורש השקעת אנרגיה, והמקור של האנרגיה הזאת הוא מפל ריכוז יוני המימן משני צדי הקרום; יוני המימן שנמצאים "בעודף" בצד החיצוני של הקרום חוזרים לתוך המטריקס דרך תעלות מיוחדות. התעלות האלה מצומדות לאנזימים שמזרזים את יצירת ה-ATP. כאשר יוני המימן עוברים דרך התעלות, נוצר ATP בזירוזם של האנזימים האלה (איור ב-47).

האנרגיה שמופקת בנשימה תאית אווירנית

הרווח האנרגטי מחמצון מולקולה אחת של גלוקוז בנשימה התאית האווירנית, הוא 30-32 מולקולות ATP (איור ב-48).

מולקולות ה-ATP נוצרות ב-3 שלבים של התהליך:

2 מולקולות ATP נוצרות בתהליך הגליקוליזה;

2 מולקולות ATP* נוצרות במעגל חומצת הלימון;

28-26 מולקולות ATP נוצרות בשלב הזרחון החמצוני.

עם זאת, חשוב לציין שזוהי רק תפוקה טיפוסית; תפוקת האנרגיה תלויה בריכוזיהם של המגיבים, של חומרי הביניים ושל התוצרים הסופיים של התגובה. היא תלויה גם בסוג התא ובתנאים ששוררים בו.

בנשימה התאית האווירנית, רק כמחצית מן האנרגיה שמשחררת מחמצון הגלוקוז מנוצלת להרכבת מולקולות ATP. כמחצית מן האנרגיה נפלטת כאנרגיית חום. אנרגיית החום נפלטת בהדרגתיות, באופן מבוקר, במהלך השלבים של תהליך הנשימה התאית. שחרור של החום בבת אחת (כפי שקורה בשרפה של חומר אורגני) היה גורם עלייה גדולה בטמפרטורה ונזק לתאים. אנרגיית החום אינה ניתנת לשימוש חוזר לפעילות החיים בתאים, ולכן היא בבחינת "איבוד" של אנרגיה זמינה. עם זאת, חשוב לציין שאנרגיית החום שנפלטת בנשימה התאית, מסייעת לבעלי חיים אנדותרמיים לשמור על טמפרטורת גופם, כאשר טמפרטורת הסביבה נמוכה (ראו עמ' 201). בתאים רבים, קיים מנגנון שמאפשר ויסות של היחס בין כמות האנרגיה הכימית שנשארת בתא לבין כמות אנרגיית החום שנפלטת. כך למשל, בעלי חיים שנכנסים לתרדמה בחורף, מנצלים חלק גדול מן האנרגיה שנפלטת כחום לשמירה על טמפרטורת הגוף.

* ככול מחזור של מעגל חומצת הלימון מתקבלת מולקולת ATP אחת, אולם בפירוק מולקולה אחת של גלוקוז יש 2 מחזורים של מעגל חומצת הלימון, מכיוון שכל מולקולת גלוקוז מתפרקת ל-2 מולקולות של אצטיל קואנזים A.

מקורות אנרגיה אחרים בנשימה תאית אווירנית

הפחמימות, ובכללן הגלוקוז, אינן מקור האנרגיה היחיד בתא; גם שומנים וחלבונים מהווים מקור אנרגיה. כל החומרים האורגניים בתאים, שמקורם בפירוק המזון או במאגרים של הגוף, יכולים לשמש להפקת אנרגיה. בתהליכי החמצון של שומנים וחלבונים יכולים להתקבל אותם תוצרי ביניים כמו בחמצון פחמימות. תוצרי ביניים אלה מחומצנים גם הם במיטוכונדריון, באותו מסלול של תגובות. בתגובות האלה, כמו בפירוק חומצה פירובית, התוצרים הסופיים הם CO_2 ומים, והאנרגיה שמשתחררת מתגובות אלה נצרכת בהרכבת מולקולות ATP.

סיכום

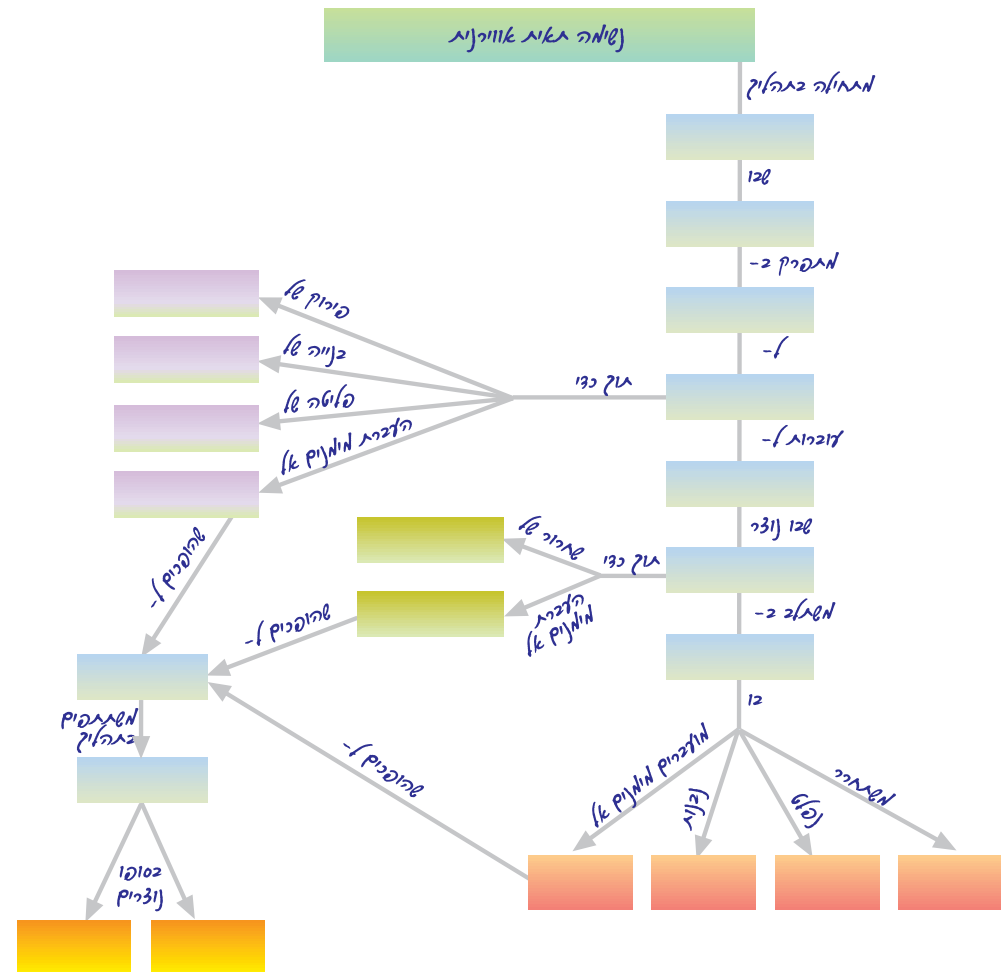
1. בשרשרת התהליכים הכימיים של הנשימה התאית חומרים אורגניים עוברים חמצון ותוך כדי כך משתחררת אנרגיה. חלק מן האנרגיה הזאת נצרך בהרכבת מולקולות ATP וחלק ממנה משתחרר כחום.
1. מולקולות ATP מהוות מעין "מטבעות אנרגיה"; הן מתווכות בין תהליכים משחררי אנרגיה לתהליכים צורכי אנרגיה. יצירת ATP כרוכה בהשקעת אנרגיה, ואילו פירוק ATP מלווה בשחרור אנרגיה.
2. אצל רוב היצורים, האנרגיה בתאים מופקת בתהליך של נשימה תאית אווירנית.
3. תהליך הפקת האנרגיה בנשימה התאית האווירנית נעשה בארבעה שלבים עיקריים:
 - א. גליקוליזה;
 - ב. בניית אצטיל קואנזים A ;
 - ג. מעגל חומצת הלימון;
 - ד. בניית ATP בזרחון חמצוני.
4. בנשימה תאית אווירנית חל חמצון מלא של תרכובות אורגניות, בעזרת חמצן מן האוויר, ותוצרי החמצון הם CO_2 , מים ו-ATP. בתהליך הזה מופקת כמות אנרגיה מרבית.



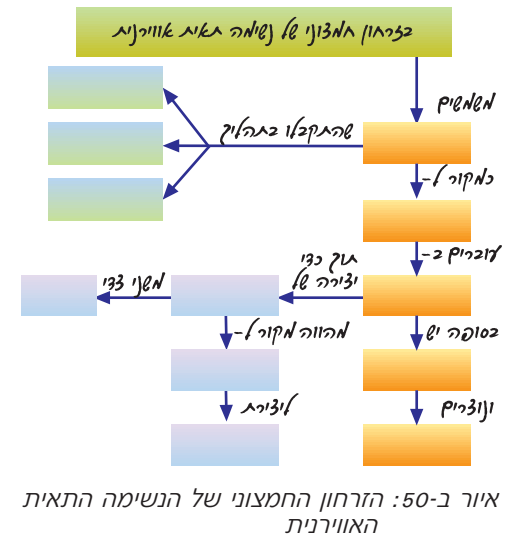
1. העתיקו את מפת המושגים שבאיור ב-49 והשלימו את המושגים שחסרים בה, לסיכום תהליך הנשימה התאית האווירנית. היעזרו ברשימת המושגים הזאת: חום, מים, 2 מולקולות של ATP, 4 מולקולות של ATP; 26-28 מולקולות של ATP, ציטופלסמה, נשאי מימנים, אצטיל קואנזים A, זרחון חמצוני, CO_2 , גלוקוז, מיטוכונדריון, נשאי מימנים

2. מה הם חומרי הגלם הדרושים לתהליך הנשימה התאית האווירנית? כיצד הם מגיעים אל התא?

3. מה הם התוצרים של תהליך הנשימה התאית האווירנית?



4. פירוק הגלוקוז בגוף למים ול- CO_2 נעשה בשלבים רבים. איזה יתרון יש לעובדה הזאת?
5. ציירו תרשים שיתאר את גלגולי האנרגיה מאנרגיית השמש ועד לאנרגיה זמינה לתהליכי החיים בתא של בעל חיים.
6. השוו את תהליך חמצון החומר האורגני בתאים לבערת חומר אורגני (לדוגמה, במדורה). במה שונים התהליכים ובמה הם דומים?
7. כאשר נמצאים באולם הומה אנשים, מרגישים שחם גם כאשר האולם אינו מחומם. הסבירו מדוע.
8. כדי לסכם את שלבי הפקת האנרגיה בתהליך הנשימה התאית האווירנית, הכינו טבלה שיהיו בה העמודות האלה: (א) שלבי התהליך; (ב) מקום ההתרחשות; (ג) החומרים המגיבים; (ד) התוצרים.
9. העתיקו את מפת המושגים שבאיור ב-50 והשלימו את המושגים שחסרים בה, לסיכום תהליך הזרחון החמצוני של הנשימה התאית האווירנית. היעזרו ברשימת המושגים הזאת: ATP, גליקוליזה, מפל ריכוזי יוני מימן, חמצן, נשאי מימנים מחוזרים, אנרגיה, מעגל חומצת הלימון, אלקטרונים, מים, יצירת אצטיל קואנזים A, שרשרת נשאי אלקטרונים, קרום המיטוכונדריון הפנימי.



הפקת אנרגיה ללא חמצן

יש יצורים חד-תאיים רבים שחיים בבתי גידול חסרי חמצן, כמו: מחילות עמוקות או על קרקעית הים. התנאים בבתי הגידול האלה נקראים "תנאים אל-אווירניים" (אנאירוביים). היצורים שחיים בבתי הגידול האלה אינם זקוקים לחמצן לקיומם, ולמקצתם החמצן אפילו מהווה חומר רעיל. היצורים האלה מפיקים את האנרגיה מחמצון גלוקוז ומחמצן חומרי מזון אחרים, ללא נוכחות חמצן. בהעדר חמצן, שהוא קולט האלקטרונים האחרון בנשימה התאית האווירנית, נקלטים האלקטרונים על ידי קולט אלקטרונים אחר. יש שני סוגים של תהליכי הפקת אנרגיה בתאים ללא חמצן: (א) נשימה תאית אל-אווירנית; (ב) תסיסה.

נשימה תאית אל-אווירנית

נשימה תאית אל-אווירנית (anaerobic respiration) היא תהליך נדיר, יחסית, והיא קיימת במינים של חיידקים שחיים בסביבות חסרות חמצן, למשל, בביצות. הנשימה הזאת, בדומה לנשימה תאית אווירנית, נעשית ב-4 שלבים: גליקוליזה, ייצור אצטיל קואנזים A, מעגל חומצת הלימון וזרחון חמצוני. הפקת האנרגיה נעשית בעיקר בשלב הזרחון החמצוני (כמו בנשימה

התאית האווירנית), אולם בהעדר חמצן, נקלטים האלקטרונים על ידי חומרים אנאורגניים אחרים. בחיידקים מסוימים, קולט האלקטרונים הוא ניטרט (NO_3^-), בחיידקים אחרים הוא סולפט (SO_4^{2-}), ויש קבוצה של חיידקים שבהם CO_2 משמש כקולט האלקטרונים. הפקת האנרגיה בנשימה התאית האל-אווירנית יעילה פחות מאשר בנשימה התאית האווירנית.

חיידקים יוצרי זרם חשמלי



מדענים אמריקאיים הצליחו לבנות מכשיר שמסוגל לנצל את תהליך העברת האלקטרונים בנשימה תאית אל-אווירנית של חיידקים ליצירת זרם חשמלי. החיידקים שעליהם מבוסס המכשיר הם חיידקים אל-אווירניים "נושמי ברזל"; הברזל משמש כקולט המימנים הסופי בתהליך הנשימה התאית שלהם. החוקרים גידלו מושבה של חיידקים כאלה על אלקטרודה. האלקטרודה הוכנסה ליכל זכוכית אטום שהכיל תמיסת גלוקוז. החיידקים פירקו את הגלוקוז ושחררו את האלקטרונים אל האלקטרודה. כתוצאה מכך, האלקטרודה נטענה במטען שלילי. כשחיברו בכבל את האלקטרודה הטעונה לאלקטרודה אחרת, נוצר זרם חשמלי. החוקרים אמנם הצליחו לנצל 80% מן האלקטרונים שנוצרו בתהליך, אבל התהליך היה איטי מאוד ועוצמת הזרם החשמלי שנוצר הספיקה בקושי להפעלת מחשבון. אב הטיפוס שנבנה פעל במשך 25 יום, הפעיל נורה של 60 וואט במשך 17 שעות, וניצל כוס סוכר אחת. משרד ההגנה האמריקאי, שמימן חלק מעלות המחקר, מקווה שבעזרת החיידקים יהיה אפשר להפעיל מכשור, שימוקם באזורים מרוחקים, מבלי שיצטרכו להחליף סוללות. מכשירים חשמליים שמבוססים על פעילות החיידקים עשויים לשמש בעתיד פתרון לאנשים במקומות שמרוחקים מכל מקור חשמל אחר.

תסיסה

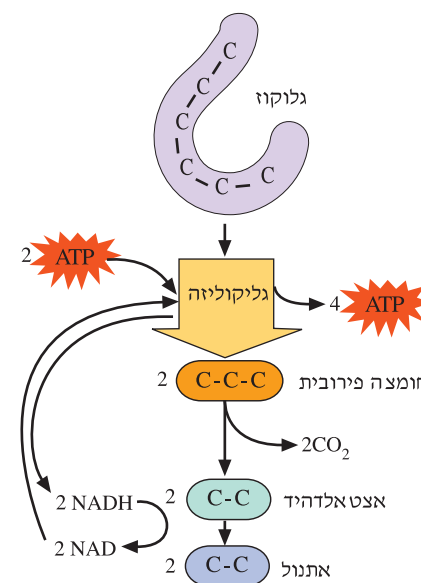
בהעדר חמצן, מינים אחדים של שמרים ושל חיידקים מפיקים אנרגיה מחמצון גלוקוז ומחמצון חומרי מזון אחרים בתהליך שנקרא **תסיסה** (fermentation). תהליך התסיסה מורכב משני שלבים: (א) גליקוליזה; (ב) מחזור נשאי המימנים להמשך קיום תהליך הגליקוליזה. הפקת האנרגיה בתסיסה מתבצעת בציטופלסמה של התאים, בתהליך הגליקוליזה בלבד. כמות האנרגיה שמופקת בתהליך התסיסה קטנה בהרבה, בהשוואה לכמות שמופקת בנשימה תאית (אווירנית ואל-אווירנית). בתהליך התסיסה מופקות רק 2 מולקולות ATP מחמצון של מולקולת גלוקוז אחת (איורים ב-51, ב-52).

תהליכי התסיסה העיקריים המוכרים בטבע הם: התסיסה הכוהלית ותסיסת חומצת החלב.

תסיסה כוהלית

התסיסה הכוהלית (alcohol fermentation) מתרחשת בעיקר בשמרים ובמינים אחדים של חיידקים. השמרים הם סוג של פטריות חד-תאיות שחיות במושבות. בטבע מצויים שמרים בכול מקום, על פני צמחים ובקרקע. כאשר יש חמצן, השמרים מפיקים את האנרגיה בנשימה תאית אווירנית, אבל כאשר אין חמצן, השמרים מפיקים את האנרגיה בתהליך תסיסה. בתסיסה הכוהלית, החומצה הפירובית שנוצרת בגליקוליזה מתפרקת ל- CO_2 ולחומר דו-פחמני - אצטאלדהיד. האצטאלדהיד קולט מימנים מנשאי המימנים המחוזרים שהתקבלו בגליקוליזה. קליטת המימנים הופכת את האצטאלדהיד לכוהל שנקרא אֶתָנֹל (איור ב-51). נשאי המימנים שמסרו את המימנים חוזרים לשמש בתהליך הגליקוליזה ואילו הכוהל וה- CO_2 משתחררים מן התא. ה- CO_2 משתחרר בצורה של בועות גז תוססות, ולכן קוראים לתהליך הזה תסיסה.

התסיסה הכוהלית של שמרים מנוצלת בתעשיית המזון. בתעשיית המשקאות החריפים, משמש תהליך התסיסה הכוהלית לקבלת הכוהל. שחרור בועות הגז בתאי השמרים גורם לתפיחת הבצק, ולכן משמש התהליך הזה גם לאפייה.



איור ב-51: תסיסה כוהלית

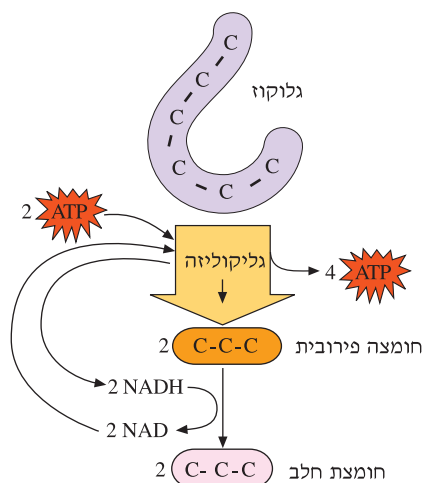
תעשיית היין והבירה



השמרים שמצויים באופן טבעי על פני הענבים מאפשרים להפוך את מיץ הענבים ליין על ידי תסיסה כוהלית. הגלוקוז (סוכר הענבים) הוא מזונם של השמרים האלה. את אשכולות הענבים עורמים בברכות תסיסה, ומניחים עליהם משקולות כבדות. המשקולות מועכות את הענבים וכך נוצר מגע בין השמרים לבין המיץ שבענבים.

סוג היין תלוי בסוג השמרים, בכמות השמרים, במשך התסיסה ובחומר המותסס. כך למשל, אם התסיסה מופסקת בשלב מוקדם, ונותרת כמות גדולה של סוכר שלא הותסס, מתקבל יין מתוק, והוא מכיל אחוז נמוך של אלכוהול. יין "יבש" הוא יין שיש בו 11-12.5% אלכוהול. יין אדום מתקבל מהתססת הענב כולו, ואילו יין לבן מתקבל מהתססת המיץ בלבד.

את הבירה מייצרים מִלְתָּת (גרגרי שעורה מונבטים). הלתת מכיל כמות קטנה של חלבון שדרוש כמזון לשמרים, והוא הכרחי להתהוות הקצף בבירה. לאחר שמבשלים את הלתת כדי להשמיד את חיידקים, מוסיפים ללתת תרבויות שמרים להתססתו. בסופו של תהליך התסיסה מתקבלת הבירה.



איור ב-52: תסיסת חומצת החלב

תסיסת חומצת החלב

בתהליך של **תסיסת חומצת החלב** (lactic acid fermentation), נשאי המימנים המחוזרים שנוצרו בגליקוליזה מחוזרים את החומצה הפירובית. קליטת המימנים הופכת את החומצה הפירובית לחומצת חלב (חומצה לקטית). נשאי המימנים שמסרו את המימנים חוזרים לשמש בתהליך הגליקוליזה ומאפשרים את המשך קיומה (איור ב-52). בתהליך הזה אין שחרור של בועות גז של CO_2 , אבל גם הוא נקרא תסיסה. חומצת החלב, שטעמה חמוץ, מופרשת מן התא. התהליך הזה מתרחש בחיידקי החלב, ומשתמשים בו בייצור מוצרי חלב, כמו: גבינות לבנות, לבן ויוגורט. בייצור ירקות מוחמצים מתרחש תהליך דומה.

תהליך תסיסת חומצת החלב מתרחש גם בתאי השרירים של רוב החולייתנים. בשעת מאמץ. 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, בתהליך גליקוליזה בלבד. חומצת החלב מצטברת בשרירים, והיא שגורמת לתחושת העייפות ולכאבים שאנו חשים בשרירים בעקבות המאמץ.

השריר יכול להפיק אנרגיה בתהליך אל-אווירני במשך זמן קצר בלבד. חומצת החלב שמצטברת גורמת לירידה ב-pH ומונעת את פעילות האנזימים של הנשימה. בזמן מנוחה, חוזרת ומתחמצנת חומצת החלב לחומצה פירובית. לשם כך דרוש חמצן, שתפקידו לקלוט את אטומי המימן.

חיידקי חומצת החלב בתעשייה

בתעשיית מוצרי החלב יש שימוש נרחב לחיידקי חומצת החלב. לשם יצירת חמאה, גבינות וסוגי חלב חמוץ מוסיפים לחלב תרבית של חיידקים רצויים. לכל סוג של חיידקים יש חומרי ניחוח אופייניים. ריכוז חומצת החלב לאחר פירוק סוכר החלב מגיע ל-0.9%. ברמת חומציות כזאת, מקררים את המוצר כדי למנוע החמצת יתר. מרבית החיידקים הפתוגניים (גורמי המחלות) אינם עמידים לחומציות הזאת.

ירקות, כמו: כרוב, מלפפון וזית, עוברים תהליכי החמצה וכיבוש באמצעות חיידקי חומצת החלב. החיידקים האלה עמידים לריכוזי מלח גבוהים (10-20%). ריכוז המלח הגבוה וחומצת החלב שנוצרת מהווים אמצעי לשימור הירקות, והתנאים האלה מונעים התפתחות מיקרואורגניזמים בלתי רצויים.



חיידקי חומצת החלב משמשים גם בייצור תחמיץ (מספוא עסיסי) לבקר. ניתן לשמור ירק בצורתו הטריה על ידי החמצת המספוא. את המספוא העסיסי מכניסים לבתי קיבול סגורים או לחפירות בתוך האדמה ומהדקים אותו היטב. כשתנאי הסביבה הופכים לאל-אווירניים מתחילים החיידקים האל-אווירניים להתסיס אותו. התסיסה של הסוכרים שבמספוא מסתיימת כשריכוז חומצת החלב מגיע ל-2-3%. החומציות הזאת מפסיקה את הפעילות של חיידקי חומצת החלב ושל מיקרואורגניזמים אחרים, שעלולים לקלקל את התחמיץ. תחמיץ מוצלח משתמר, בהעדר אוויר, במשך תקופה ארוכה, אפילו במשך שנים, ואינו נופל כמעט בערכו התזונתי מערכו של חומר המוצא.

לואי פסטר וחקר התסיסה



אחד החוקרים החשובים ביותר שחקרו את תהליכי התסיסה היה לואי פסטר (Louis Pasteur; 1822-1895). לואי פסטר הוכיח שתופעות רבות של פירוק וקלקול מזון נובעות מתהליך התסיסה שנגרם על ידי אורגניזמים בלתי נראים (מיקרואורגניזמים) שמצויים באוויר. פסטר היה הראשון שהבחין בעובדה שבחלק מן המיקרואורגניזמים, התסיסה מהווה מקור יחיד לאנרגיה ואילו במיקרואורגניזמים אחרים, כמו שמרים, התסיסה מתרחשת רק בתנאים אל-אווירניים. בהמשך עבודתו פיתח פסטר את שיטת העיקור על ידי חימום ("פסטור"), למניעת ההתפרקות והקלקול של מזונות, כמו: יין, בירה וחלב. (עוד על מחקריו של פסטר, ראו ב"חיסון", עמ' 260).

סיכום

1. נשימה תאית אל-אווירנית מתקיימת במינים אחדים של מיקרואורגניזמים שחיים בסביבה חסרת חמצן. בהעדר חמצן, קולט המימנים הוא חומר מחמצן אחר ותהליך חמצון הגלוקוז פחות יעיל מאשר בנשימה התאית האווירנית.
2. תהליך התסיסה מורכב מתהליך גליקוליזה ומתהליך מחזור של נשאי מימנים שמאפשר את המשך קיום הגליקוליזה. בתהליך התסיסה מופקת אנרגיה מחמצון חומר אורגני (ללא חמצן) בשלב הגליקוליזה בלבד. כמות האנרגיה המופקת בתהליך התסיסה היא קטנה מאוד.
3. אצל רוב החולייתנים, בעת מאמץ גופני, מופקת אנרגיה בתהליך תסיסת חומצת חלב, כאשר בתאי שריר נוצרים תנאים אל-אווירניים. בתהליך הזה נוצרת חומצת חלב מן החומצה הפירובית שנוצרת בגליקוליזה.

4. תסיסת חומצת החלב במיקרואורגניזמים מנוצלת לייצור מוצרי חלב ולהחמצת ירקות.
5. תסיסה כוהלית מתרחשת במיקרואורגניזמים אל-אווירניים. בתהליך התסיסה הזה נוצרים כוהל ו- CO_2 מן החומצה הפירובית שנוצרת בגליקוליזה. התהליך הזה מנוצל לייצור יין ובירה וגם להתפחת בצק.



1. העתיקו את טבלה ב-8 וסמנו בה (+) או (-) במקומות המתאימים.
- טבלה ב-8: המאפיינים של תהליכי הפקת האנרגיה בתאים**

תסיסת חומצת החלב	תסיסה כוהלית	נשימה תאית אל-אווירנית	נשימה תאית אווירנית	
				מתרחשת רק ביצורים אל-אווירניים
				מתרחשת רק במיקרואורגניזמים
				מתרחשת בנוכחות חמצן בלבד
				מתרחשת רק בציטופלסמה
				מתרחשת בציטופלסמה ובמיטוכונדריון
				נוצר ATP (רשמו את מספר המולקולות שנוצרות מחמצון של מולקולת גלוקוז אחת)
				נוצר CO_2
				נוצרים מים

2. בתעשיית הלחם משתמשים בתסיסת השמרים לשם התפחת הבצק. נסחו את התגובה הכימית המתרחשת והסבירו את התהליך.
3. מה הם החסרונות של תהליך הפקת האנרגיה בשרירים, בתהליך התסיסה?
4. עיקור של ירק לפני הוספת המלח מונע את פעולת ההחמצה. הסבירו מדוע.

5. בתהליכי הפקת האנרגיה בתסיסה, כל ה-ATP נוצר בשלב הגליקוליזה. מדוע, אם כך, החומצה הפירובית שנוצרת בגליקוליזה אינה יכולה להיות התוצר הסופי של תהליכי התסיסה?
6. כל היצורים הרב-תאיים בעולמנו הם אווירניים. הסבירו מדוע.
7. שמרים וחיידקים ממיינים שונים, כמו גם תאי שריר, יכולים להפיק אנרגיה בנשימה תאית אווירנית ובתסיסה.
 - א. מתי מתקיים כל תהליך?
 - ב. מה היתרון של קיום שני התהליכים האלה באותו יצור?
8. איזה שלב בתהליך הפקת האנרגיה מתרחש אצל כל האורגניזמים?
9. מאמן כושר יעץ לאצן לאכול הרבה פסטה לארוחת הערב ביום שלפני תחרות מרתון, ולשתות משקאות עשירים בגלוקוז בזמן הריצה. הסבירו כיצד שתי העצות האלה עשויות לשפר את ביצועיו של האצן בריצת המרתון.
10. לתאי דם אדומים אין מיטוכונדריה אולם הם צורכים ATP. באיזה תהליך נוצר ATP בתאי הדם האדומים? הסבירו.
11. ה-pH בשריר הרגל נבדק בזמן מנוחה ואחרי ריצה מהירה במשך 2 דקות. בזמן מנוחה ה-pH היה 7.2 ואחרי הריצה 6.5. הסבירו מה גרם לשינוי ה-pH ותארו את השפעת השינוי הזה על תהליך הנשימה התאית בשריר.
12. אצן רץ 3 ריצות קצרות, במשך 10, 30 ו-90 שניות. בכול ריצה נבדק אחוז האנרגיה שהופק בשרירים בתהליך אווירני ובתהליך אל-אווירני. תוצאות הבדיקות מובאות בטבלה ב-9.

טבלה ב-9: הפקת אנרגיה בתהליך אווירני ואל-אווירני בריצות למשך זמנים שונים

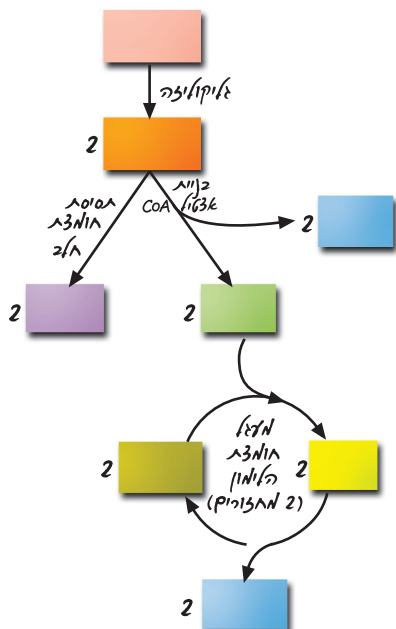
הפקת אנרגיה (%)		משך הריצה (שניות)
בתהליך אל-אווירני	בתהליך אווירני	
97	3	10
72	28	30
54	46	90

- א. תארו והסבירו את השפעת משך הריצה על חלקו של התהליך האווירני ושל התהליך האל-אווירני בהפקת האנרגיה בשרירים.
- ב. שיא העולם בריצת 100 מ' הוא 9.84 שניות. טובי האצנים בעולם עוצרים את נשימתם במהלך ריצת 100 מ'. הסבירו מדוע.
- ג. בבדיקה שנמשכה 90 שניות, מהירות הריצה פחתה לקראת סוף הריצה. הסבירו מדוע.

13. איור ב-53 מתאר את השינויים בשלד הפחמני של מולקולת הגלוקוז בתהליכי הנשימה התאית בגוף האדם. העתיקו את האיור, והשלימו (בריבועים הריקים) את מספר אטומי הפחמן במולקולות שנוצרות ממולקולת הגלוקוז. ליד כל ריבוע רשמו את השם של המולקולה הפחמנית.



היישום נשימה תאית - למה צריך חמצן לנשימה? למה בלי חמצן אין חיים? נמצא ביחידת הלימוד הנשימה - מבנה, תפקוד ומה שביניהם באתר http://agribio.snunit.k12.il/main/upload/.ab/id_resp.html ביישום יש סיור וירטואלי מונחה להכרת תהליך הנשימה התאית. באמצעות סימולציות ואנימציות, מעבדות וירטואליות, סרטי וידיאו, משחקים, משימות ואתרים שונים התלמיד לומד את השלבים השונים של הנשימה התאית.



איור ב-53: השינויים שעוברת מולקולת הגלוקוז בתהליכי הנשימה התאית בגוף האדם

פרק ג

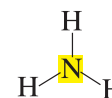
הפרשה באדם ובבעלי חיים

הפרשה בבעלי חיים

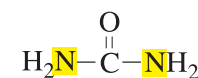
בתהליכי חילוף החומרים המתקיימים בתאים של בעלי חיים נוצרים גם חומרי פסולת. כשחומרים אלה מצטברים בגוף, הם עלולים להיות רעילים; הצטברות כזאת משנה את הסביבה הפנימית הקבועה שבגוף. גם שינויים בריכוז המים והמלחים שבגוף יכולים לשנות את הסביבה הפנימית. מערכת ההפרשה היא המערכת העיקרית שאחראית לסילוק חומרי פסולת של חילוף החומרים ולוויסות מאזן המים, היונים והמלחים בגוף. שימו לב! חומרי פסולת של פירוק המזון מופרשים באמצעות מערכת העיכול (למשל בצואה) ולא באמצעות מערכת ההפרשה. פרק זה עוסק בהפרשת הפסולת של חילוף החומרים ולא בהפרשת הפסולת של פירוק המזון.

אצל בעלי חיים, חומרי ההפרשה העיקריים המסולקים בעזרת מערכת ההפרשה הם חומרי פסולת שמתקבלים מפירוק החלבונים. חומרי הפסולת האלה מכילים קבוצות חנקניות שהצטברות שלהן בגוף רעילה. חומרי הפסולת החנקניים הופכים בגופם של בעלי חיים לאמוניה, לשתנן או לחומצת שתן (איור ג-1).

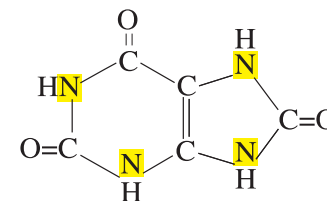
אמוניה (NH_3) היא חומר ההפרשה החנקני של רבים מן האורגניזמים שחיים בסביבה מימית, למשל: דגי גרם וחסרי חוליות ימיים. האמוניה היא גז מסיס במים והיא חומר רעיל מאוד לבעלי חיים. כאשר אורגניזמים שחיים בסביבה מימית מפרישים אותה לסביבה, היא מתמוססת במים והאורגניזמים אינם סובלים מההשפעות המזיקות שלה. בבעלי חיים יבשתיים, המסת האמוניה במים הייתה גורמת איבוד כמות רבה של מים. בבעלי חיים יבשתיים הופכת האמוניה הרעילה לחומרי הפרשה פחות רעילים והפרשתם אינה כרוכה באיבוד מים רבים.



אמוניה



שתנן



חומצת שתן

איור ג-1: המבנה הכימי של חומרי הפרשה חנקניים

השתן (urea) הוא חומר ההפרשה החנקני אצל יונקים, דו-חיים, וחלק מן הדגים (כרישים). השתן מתמוסס היטב במים ורעילותו נמוכה, יחסית לאמוניה. השתן נוצר בכבד, מגיע אל הכליות ומופרש בשתן. סילוק השתן בשתן אמנם מחייב איבוד של מים, שחיוניים לבעלי החיים היבשתיים, אולם כמויות המים שנדרשות לשם סילוק השתן קטנות, בהשוואה לכמויות המים שנדרשות לשם הפרשת האמוניה אצל בעלי חיים ימיים.

חומצת שתן (uric acid) היא חומר ההפרשה החנקני של העופות, של רוב הזוחלים, של החרקים ושל החלזונות היבשתיים. חומצת השתן אינה רעילה וכמעט שאינה מסיסה במים ובכך יתרונה. חומצת השתן מתגבשת ונפרדת מתמיסת השתן, ואילו המים חוזרים ונספגים לגוף. הפרשה כגוש מוצק חוסכת אפוא מן הגוף איבוד רב של מים. ליצירתה של חומצת שתן יש חשיבות מיוחדת בעת התפתחותו של העובר. כמעט כל בעלי החיים שמייצרים חומצת שתן מטילים ביצים. ההפרשה הגבישית מצטברת בביצה במהלך התפתחות העובר, והודות למסיסותה הנמוכה אין היא פוגעת בעובר ואינה מפריעה לחילוף החומרים התקין בגופו. למוצקות של חומצת השתן יש עוד יתרון: העובר שנמצא בביצה אינו מאבד מים בתהליך ההפרשה ולכן הוא יכול להסתפק במלאי המים שבביצה.

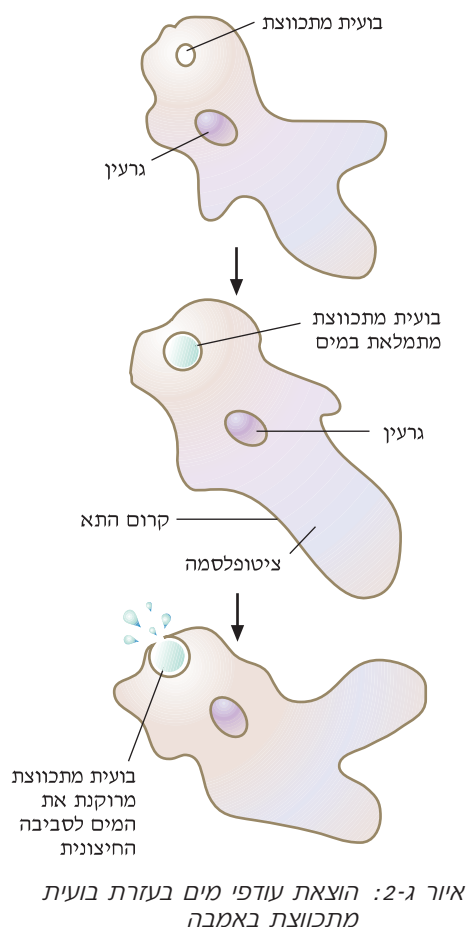
מערכות ההפרשה בבעלי חיים

המבנה והפעילות של מערכות ההפרשה אצל אורגניזמים שונים קשורים לסביבת חייו של האורגניזם, למזונו ולדרגת ההתפתחות שלו.

אמבה וסנדלית הם יצורים חד-תאיים שחיים בסביבה מימית. חומרי הפסולת של האמבה והסנדלית יוצאים מן התאים בדיפוזיה. התא של החד-תאיים, בא במגע עם נפח מים גדול, והאמוניה הרעילה יוצאת מן התא החוצה, מתמוססת מיד במים ונמהלת.

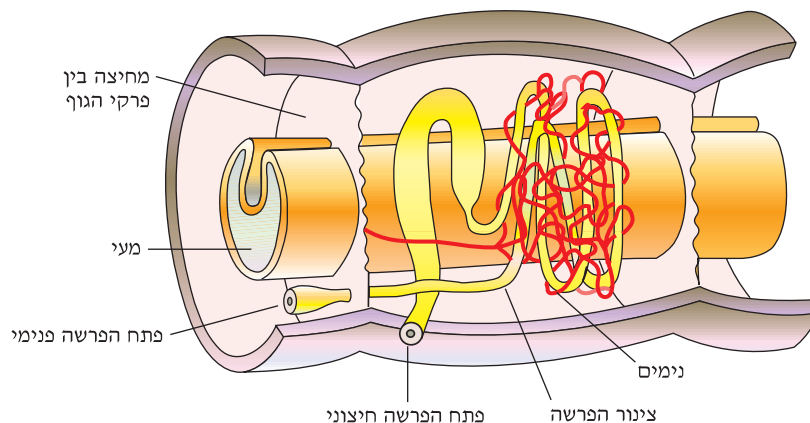
הבעיה העיקרית של חד-תאיים היא הרחקת עודפי מים החודרים לגופם מן הסביבה החיצונית, כל הזמן. ריכוז המומסים במים נמוך בהשוואה לריכוז המומסים בציטופלסמה שלהם, ולכן מים נכנסים בקלות לתוך התא בדיפוזיה. בועית מתכווצת שנמצאת בתא מונעת את התפוצצות התא (איור ג-2). כאשר הבועית מתמלאת מים היא מתחברת לקרום התא, מרוקנת את תכולתה לסביבה החיצונית וכך מסולקים עודפי המים מן התא. הבועית המתכווצת מתמלאת ומתרוקנת במרווחי זמן בהתאם לריכוז המומסים בסביבה.

תולעים שטוחות, כמו הפלנריה, הן בעלי החיים הירודים ביותר שאצלם התפתחו איברים מיוחדים להפרשה. הפלנריה חיה במים מתוקים והמים חודרים אל תאי גופה מן הסביבה החיצונית. מערכת ההפרשה בפלנריה מורכבת ממערכת של צינורות מסועפים בעלי פתחי



הפרשה חיצוניים (ראו איור א-3 בעמ' 10), ודרכם היא מרחיקה את עודפי המים ואת חומרי הפסולת (אמוניה) מגופה. נוזל הגוף שוטף את כל התאים בגוף התולעת, כולל את צינורות ההפרשה. בצינורות ההפרשה יש ריסים שדוחפים את המים ואת חומרי הפסולת בתנועה קצבית לעבר פתחי ההפרשה ומשם אל מחוץ לגוף. חלק אחר מתוצרי הפסולת מופרש בדיפוזיה דרך שטח הפנים של הגוף.

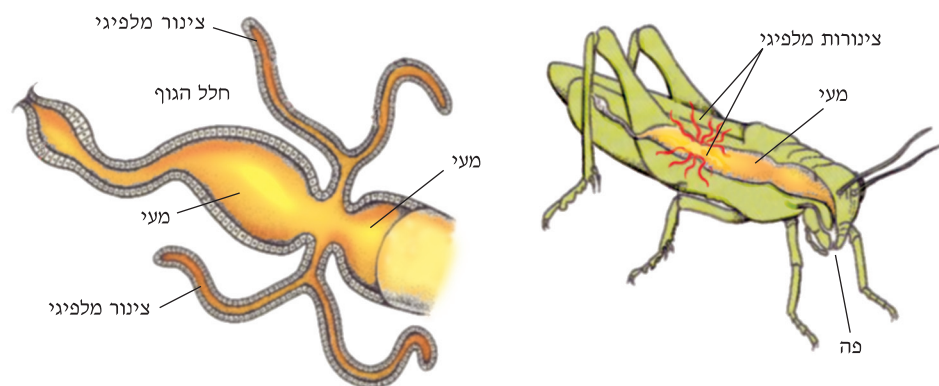
בתולעים טבעיות, כמו השלשול, יש חלל פנימי ובו נוזל, שבתוכו מומסים החומרים המועילים (גלוקוז ומלחים) וגם חומרי הפסולת (אמוניה ושתנן). האמוניה מורחקת בדיפוזיה אל הסביבה החיצונית הלחה שבה חי השלשול, והשתנן מורחק בעזרת מערכת ההפרשה. לשלשול יש זוג צינורות הפרשה ושני פתחי הפרשה בכול פרק של הגוף (איור ג-3). כל צינור פתוח משני קצותיו: קצה אחד פנימי, בצורת משפך שמוקף בריסים, והוא פתוח לתוך חלל הגוף; הקצה האחר חיצוני, והוא פתוח לסביבה החיצונית. נוזל חלל הגוף נכנס בפתח ההפרשה הפנימי וזורם לאורך הצינור. חומרים שחיוניים לשלשול נספגים מחדש לנימים, שמקיפים את הצינור. השתנן נשאר בתוך הצינור ומופרש דרך פתח ההפרשה החיצוני אל מחוץ לגוף. מערכת הפרשה כזו, המבוססת על סינון חומרים מזיקים והחזרת חומרים מועילים, נמצאת ברוב בעלי החיים המפותחים.



איור ג-3: מערכת ההפרשה בשלשול

לחurקים ולעכבישים יש מערכת הפרשה ובה צינורות מיוחדים שנקראים **צינורות מלפיגי** (Malpighian tubules), על שם החוקר מרצילו מלפיגי (Marcello Malpighi; 1628-1694), פיסיוולוג איטלקי שתיאר אותם לראשונה (איור ג-4). יש מינים שיש להם רק שני צינורות

מלפיגי, ויש מינים שגופם מכיל מאות צינורות כאלה. לכל צינור מלפיגי יש קצה אחד סגור שמצוי בתוך חלל הגוף והוא טובל בדם (נוזל הגוף), וקצה אחר שפתוח לחלל המעי (איור ג-4, ב). חומרי פסולת מסתננים מן הדם אל חלל צינורית מלפיגי ומתרוקנים למעי. מים ומלחים חיוניים נספגים מחדש לדם על ידי בלוטות מיוחדות שבקצה המעי, ואילו שאר החומרים מופרשים מן הגוף עם הפסולת של מערכת העיכול. אצל חרקים שחיים במים או חרקים שאוכלים מזון שמכיל כמות גדולה של מים, רק כמות מעטה של מים נספגת חזרה לדם. אצל חרקים שחיים בסביבה יבשה, מרבית המים נספגים חזרה לדם, וחומצת השתן מופרשת בצורת גבישים יבשים.



א. צינורות מלפיגי בחגב ב. צינורות מלפיגי נפתחים אל חלל המעי

איור ג-4: מערכת ההפרשה בחגב

החולייתנים חיים במגוון רחב של סביבות – במים מתוקים, בים, באזורי גאות ושפל וביבשה. איברי ההפרשה העיקריים של החולייתנים הם זוג **כליות** (kidneys) וזוג **צינורות מובילי שתן** (ureters). ברקמת הכליות יש צינורות רבים ומפותלים, ואלה נפתחים לתוך צינורות השתן המוליכים את **השתן** (urine) לפתח יציאה אל מחוץ לגוף. על פי רוב, קיימת **שלפוחית שתן** (urinary bladder), שאוספת את השתן מן הצינורות, וממנה יוצא צינור אחר, שמוליך את נוזל השתן החוצה (איור ג-9).

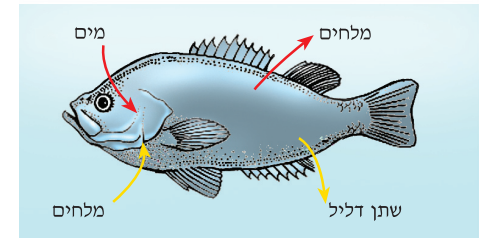
מערכת ההפרשה של החולייתנים קשורה למערכת הובלה יעילה - מערכת הדם הסגורה. כלי הדם צמודים לאיברי מערכת ההפרשה, כך שמתאפשר מעבר מהיר של חומרים בין הדם למערכת ההפרשה. מעבר החומרים מתבצע דרך שטח פנים גדול, בצינורות הרבים והמפותלים שמצויים בכליות. כל הדם עובר סינון בצינורות האלה, וחומרי הפסולת, עודפי מים וחומרים מיותרים אחרים מופרשים אל מחוץ לגוף.

התאמת מערכת ההפרשה של החולייתנים לסביבות מחיה שונות

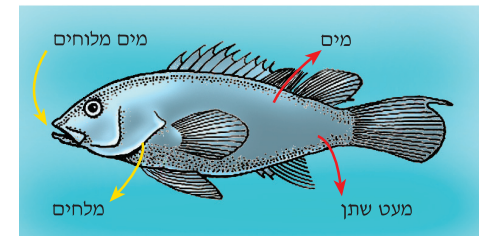
מערכת ההפרשה של החולייתנים מותאמת לחיים במים מתוקים (מים שריכוז המלחים בהם נמוך), במים מלוחים או ביבשה.

בדגים שחיים במים מתוקים, ריכוז המלחים גבוה יותר מריכוז המלחים בסביבתם. המים חודרים בדיפוזיה דרך הקרומים הדקים של הזימים ועלולים לגרום למותם עקב "הצפה פנימית". הפרשת עודפי המים בשתן מונעת את ההצפה הפנימית (איור ג-5, א). הפרשת המים בשתן מתבצעת באופן יעיל, הודות לכליות שהן גדולות במיוחד ומותאמות להפרשת שתן שמכיל כמות גדולה של מים. בגלל מפל הריכוזים בין הדג לסביבתו, המלחים יוצאים מתאי גופו אל הסביבה. בזימים של דגי מים מתוקים התפתחו מנגנונים מיוחדים שקולטים, בצורה פעילה, מלחים מן המים לתוך הגוף. הפסולת החנקנית של הדגים (אמוניה) מורחקת מן הגוף דרך הזימים ולא בשתן.

בדגים שחיים במים מלוחים, ריכוז המלחים נמוך בהרבה מריכוז המלחים שבסביבתם, ויש חשש לאיבוד מים מגופם. הדגים האלה מפרישים אמנם מעט שתן, אולם הם מאבדים מים רבים בדיפוזיה (איור ג-5, ב). את המים שאיבדו, הדגים משלימים על ידי שתיית מי ים. שתיית המים המלוחים מעלה מאוד את ריכוז המלחים בגופם. הדגים מפרישים מעט מן המלחים העודפים באמצעות השתן, ואת מרבית עודפי המלחים הם מפרישים בצורה פעילה על ידי תאים מיוחדים בזימים. גם האמוניה מורחקת דרך הזימים.



א. דג שחי במים מתוקים



ב. דג שחי במים מלוחים

← מעבר בדיפוזיה
→ מעבר פעיל

איור ג-5: יסודות כמות המים והמלחים בדג שחי במים מתוקים ובדג שחי במים מלוחים

אז מאיפה בעצם משתין הדג?

לדג אין איבר השתנה מיוחד וגם אין לו שתן "אמיתי". השתן של הדג מכיל רק מים ומלחים אך, כאמור, הוא אינו מכיל את הפסולת החנקנית. את השתן שלו הדג מפריש מפתח בתחתית בטנו, פתח שנקרא ביב, ואליו מובילים צינורות הכליה. פתח הביב משמש גם את מערכת המין ואת מערכת העיכול, כמו אצל רוב החולייתנים. ההפרדה לאיברי הפרשה שונים, לצוואה ולשתן, היא נחלתם של היונקים בלבד.



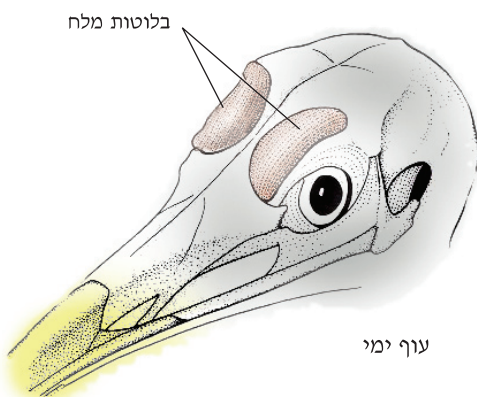


שתיית מים מייבשת

כליותיו של האדם לא מקנות לו יכולת להרוות את צמאונו במי ים. אדם שנסחף לים ואין ברשותו מים מתוקים, נתון בסכנת התייבשות. כליותיו מסוגלות ליצור שתן שמכיל לכל היותר 2.2% מלח. לכן, אם ישתה מי ים, שמכילים 3.5% מלחים, הוא יצטרך לבזבז מים לשם סילוק המלחים העודפים מגופו. במצב כזה, כמות המים שהוא יאבד בשתן תעלה על כמות המים שהוא ישתה, והדבר יגרום להתייבשות שעלולה להסתיים במוות. אפילו אם יאכל דגים חיים, שתכולת המים בהם גבוהה ותכולת המלח שלהם נמוכה יחסית, מצבו לא ישתפר. הסיבה לכך היא שלדגים יש תכולת חלבון גבוהה, דבר שכרוך ביצירת שתן מרובה, והפרשת השתן בשתן גורמת איבוד מים מן הגוף.



זוחל ימי



עוף ימי

איור ג-6: בלוטות מלח בזוחל ימי ובעוף ימי

העופות הימיים והזוחלים הימיים שחיים בסביבה מלוחה מפרישים (כמו כל העופות והזוחלים) חומצת שתן, שדורשת יחסית מעט מים להרחקתה מן הגוף, אולם אין בכך כדי לפתור את בעיית סילוק המלח. באורגניזמים האלה התפתחה בלוטה מיוחדת שיכולה להפריש תמיסת מלח מרוכזת מאוד, בריכוז גדול פי שניים מריכוז מי הים. בלוטה זו נמצאת בקדמת הראש (איור ג-6). תנינים, צבים ימיים וחלק מן העופות הימיים נראים "בוכים", כאשר הם עולים ליבשה. ב"דמעות" האלה מומסים עודפי המלחים שנכנסו לגופם ממי הים.

בחולייתנים היבשתיים הסכנה החמורה ביותר היא סכנת ההתייבשות. סילוק השתן אצל יונקים יבשתיים מחייב איבוד של מים בשתן, מה שמביא לדלדול מלאי המים של הגוף. בכליות של יונקים יבשתיים התפתחו מנגנונים להקטנת כמות המים המופרשת בשתן (ראו עמ' 177). מנגנוני שימור המים משוכללים יותר ככל שבעל החיים חי בסביבה יבשה יותר.

סיכום

1. מערכת ההפרשה בבעלי חיים היא אמצעי חשוב לשמירה על יציבות הסביבה הפנימית של הגוף (ההומויאוסטזיס); היא מסלקת חומרי פסולת שנוצרו בתהליכי חילוף החומרים ומווסתת את מאזן המים, את היונים והמלחים בגוף.
 2. אורגניזמים חד-תאיים מפרישים את חומרי ההפרשה דרך מעטפת גופם. אורגניזמים רב-תאיים פשוטים מפרישים את חומרי ההפרשה דרך מעטפת גופם ודרך צינורות הפרשה. אורגניזמים רב-תאיים מפותחים מפרישים את חומרי ההפרשה רק דרך צינורות הפרשה.
 3. לבעלי חיים שחיים במים מתוקים יש מנגנונים לסילוק עודפי מים ולהחזרת מלחים לגוף.
- בעלי חיים שחיים במים מלוחים קולטים מים מהסביבה להשלמת כמות המים שהם

- מאבדים, ויש להם מנגנונים להפרשת עודפי המלחים מן הגוף.
4. באורגניזמים בעלי מערכת דם סגורה, מערכת הדם צמודה למערכת צינורות ההפרשה ובכך מתייעלים תפקודי מערכת ההפרשה.
5. לחולייתנים יש זוג כליות שמסננות מן הדם את חומרי הפסולת ואת עודפי המים והמלחים. בעזרת צינורות השתן מורחקים החומרים האלה מן הגוף.
6. הפסולת החנקנית, האופיינית לחסרי חוליות שחיים במים, היא האמוניה. האמוניה רעילה לגוף והיא מופרשת דרך שטח פני הגוף אל הסביבה המימית, שם היא נמהלת מיד במים.
7. בעלי חיים יבשתיים הופכים את האמוניה הרעילה לחומרי הפרשה פחות רעילים: לחומצת שתן או לשתן.
8. העופות, הזוחלים והחרקים מפרישים חומצת שתן. הפרשת חומצת שתן בצורת גבישים מקטינה את איבוד המים ומותאמת להתפתחות עוברים בביצים.
9. הפסולת החנקנית של יונקים, של דו-חיים ושל חלק מן הדגים היא שתן. השתן מסיס במים והפרשתו כרוכה באיבוד מים מן הגוף.

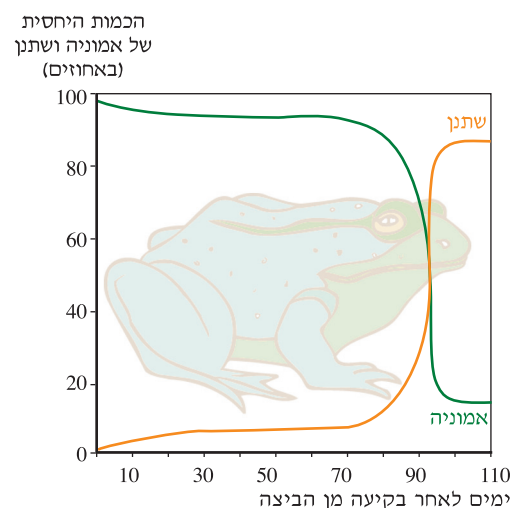


1. טבלה ג-1 משווה בין מערכות ההפרשה, מנגנוני ההפרשה והפסולת החנקנית של קבוצות אורגניזמים שונות. העתיקו את הטבלה והשלימו אותה.

טבלה ג-1: מערכות ההפרשה, מנגנוני ההפרשה והפסולת החנקנית של קבוצות אורגניזמים שונות

קבוצות של אורגניזמים	דוגמה של אורגניזם אחד מן הקבוצה	איברי ההפרשה ומנגנוני ההפרשה	הפסולת החנקנית
חד-תאיים			
תולעים שטוחות			
תולעים טבעתיות			
חרקים			
דגים			
זוחלים			
דו-חיים			
עופות			
יונקים			

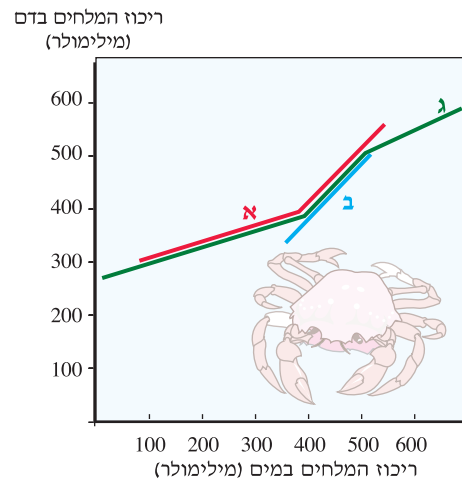
2. איזו השפעה תהיה למצב של שפל מתמשך בים על הפרשת הפסולת החנקנית של היצורים הספוגיים, המדוזות והאלמוגים? הסבירו.
3. תארו מה היה קורה אם חומר ההפרשה החנקני של עובר המתפתח בביצה היה (א) אמוניה; (ב) שתנן.
4. דו-חיים מפרישים שני חומרי פסולת חנקנית: אמוניה ושתנן. העקומים באיור ג-7 מתארים את הכמויות היחסיות של שני חומרי ההפרשה במשך 110 ימים, מרגע בקיעת דו-החיים מן הביצים.



איור ג-7: הכמויות היחסיות של אמוניה ושתנן שמפרישים דו-חיים

- א. תארו את השינויים בכמות היחסית של כל אחד מחומרי ההפרשה במהלך הימים המתוארים בעקומים.
- ב. הסבירו מדוע חלו השינויים האלה.
5. מספר צינורות ההפרשה בפלנריה מותאם למליחות של הסביבה שבה היא חיה. באיזו סביבה מספר צינורות ההפרשה יהיה קטן ובאיזו סביבה מספר הצינורות יהיה גדול? הסבירו.
6. בדג שחי במים מתוקים, הפרשת המים בשתן נעשית בצורה פעילה, ואילו בדג שחי במים מלוחים, הפרשת המים בשתן נעשית בדיפוזיה (איור ג-5). הסבירו מדוע.

7. העקומים באיור ג-8 מתארים את ההשפעה של ריכוז המלחים במים על ריכוז המלחים בדם של שלושה סוגי סרטנים. סרטן אחד חי בימות מלוחות (המליחות בהן גדולה מן המליחות של מי ים) אבל הוא עשוי לעבור גם למים מתוקים. סרטן אחר חי בנהרות אבל שוחה לים לשם הטלת ביצים. סרטן שלישי חי רק בים. ריכוז המלחים במי הים הוא 500-400 מילימולר. כל עקום מציין את טווח ההישרדות של סרטן אחד; בריכוז מלח גבוה או נמוך מטווח העקום, הסרטן אינו שורד.



איור ג-8: ההשפעה של ריכוז המלחים במים על ריכוז המלחים בדם של שלושה סוגי סרטנים

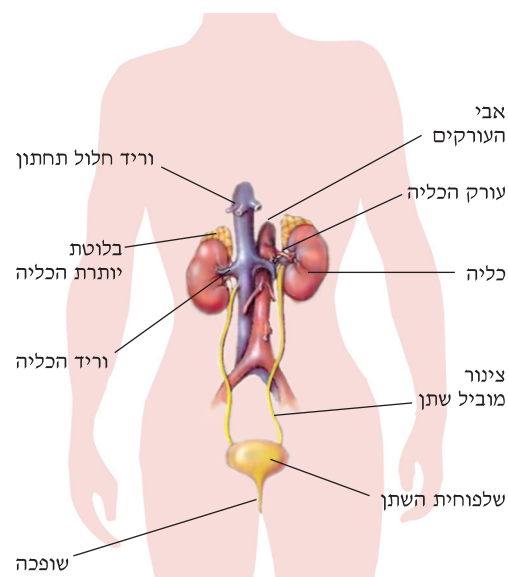
- א. איזה עקום מתאים לכל אחד מן הסרטנים? הסבירו כיצד קבעתם.
- ב. אילו תהליכים יתרחשו בגופו של הסרטן שחי רק בים, אם יעבירו אותו למים בריכוז 600 מילימולר? למים בריכוז 300 מילימולר? הסבירו מדוע.
- ג. הסבירו כיצד יכול הסרטן שחי בנהרות לקיים בדמו ריכוז מלחים גבוה מן הריכוז שבמים.
- ד. הסבירו כיצד יכול הסרטן, שחי בימות מלוחות, לקיים בדמו ריכוז מלחים נמוך מן הריכוז שבמים.

הפרשה באדם

חומרי הפסולת של חילוף החומרים מורחקים מן הגוף באמצעות בלוטות הזיעה, הריאות והשתן. הזיעה מרחיקה מים, מלחים ושתן, הריאות משחררות לסביבה CO_2 ואדי מים, ואולם הדרך העיקרית להרחקת חומרי פסולת של חילוף החומרים (פסולת חנקנית, מים, יונים ומלחים) מן הגוף היא בשתן, באמצעות הכליות. הכליות מסננות ומרחיקות מן הדם את חומרי הפסולת, ובו זמנית שומרות על החומרים החיוניים לגוף. בעזרת פינוי חומרים עודפים ושמירה על חומרים חיוניים, הכליות מווסתות את כמות המים והמומסים בדם ובנוזל החוץ-תאי, ועל ידי כך הן שומרות על סביבה פנימית קבועה.

מערכת ההפרשה

מערכת ההפרשה באדם מורכבת משתי כליות, שני מובילי שתן, שלפוחית שתן ושופכה שיוצאת מן השלפוחית (איור ג-9).



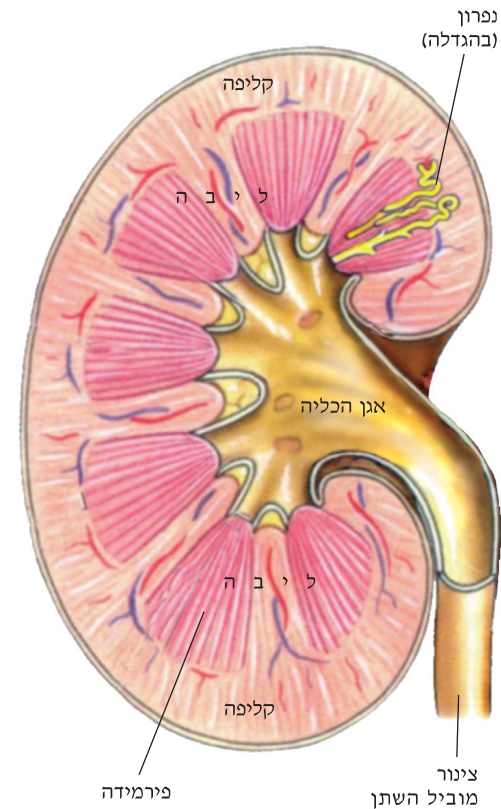
איור ג-9: מערכת ההפרשה באדם

מבנה הכליות

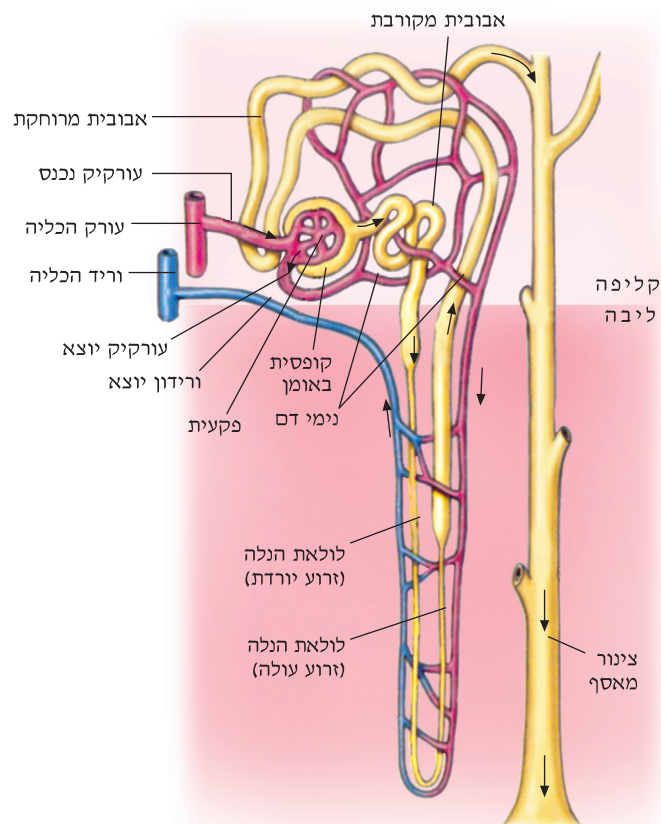
שתי הכליות נמצאות משני צדי עמוד השדרה, בגובה המותניים, מצד הגב (איור ג-9). לכליות יש צורה שדומה לזרע של שעועית וגודלן כגודל אגרוף ממוצע. כל כליה בנויה משני אזורים בולטים: אזור ההיקף שנקרא **קליפה** (cortex) ואזור פנימי שנקרא **ליבה** (medulla) (איור ג-10). הליבה בנויה פלחים-פלחים דמויי משולש, שנקראים **פירמידות**. ראשה של כל פירמידה מסתיים בשק חלול שנקרא **אגן הכליה** (pelvis). הפירמידות בנויות ממספר גדול של יחידות שנקראות **נפרונים** (nephrons). קצהו האחד של כל נפרון נמצא בקליפה, והקצה האחר באזור הליבה. הנפרון הוא יחידת הפעולה הבסיסית של הכליה. בנפרונים מתרחש סינון הדם והייצור של השתן מן המים העודפים ומן החומרים המיותרים שסולקו מן הדם.

בכליה אחת של אדם, או של יונק גדול אחר, יש כ-1.2 מיליון נפרונים. אורכו של הנפרון הוא כ-5 ס"מ והוא דומה לצינור מפותל. מספרם הרב של הנפרונים וצורתם המפותלת מגדילים את שטח הפנים שבו מתרחש מעבר החומרים בין הדם למערכת ההפרשה. צד אחד של הנפרון, שנמצא באזור הליבה, פתוח, וצדו האחר, שנמצא באזור הקליפה, מסתיים במבנה סגור שצורתו כגביע, ונקרא **קופסית באומן** (Bowman's capsule) (איור ג-11). אל תוך קופסית באומן מגיעים כלי דם שיוצרים מבנה אופייני שנקרא **פקעית** (glomerulus). לקופסית באומן והפקעית שבתוכה קוראים **גופיף מלפיגי** (Malpighian corpuscle). חלקו המפותל של צינור הנפרון נקרא **אבובית הנפרון** (tubule) והוא מחולק לשלושה חלקים: (א) החלק הקרוב לגופיף מלפיגי - **אבובית מקורבת**; (ב) החלק שצורתו כצורת האות U - **לולאת הנלה** (Henle's loop); (ג) החלק המרוחק מגופיף מלפיגי - **אבובית מרוחקת**. האבובית המרוחקת מתחברת ל**צינור המאסף** (collecting duct). גופיף מלפיגי, האבובית המקורבת והאבובית המרוחקת נמצאים בקליפת הכליה; בליבה נמצאות לולאת הנלה, כלי דם שמקיפים אותה והצינור המאסף. הצינורות המאספים מכל הנפרונים מתלכדים באגן הכליה לצינור מוביל שתן אחד, שיוצא מן הכליה אל שלפוחית השתן (איור ג-9).

הדם שעובר סינון בכליות, מגיע לכליות, בקצב של 1.25 ליטר לדקה. הדם מגיע לכליות בשני **עורקי הכליה** שמסתעפים מאבי העורקים (איור ג-9). עורקי הכליה מתפצלים לעורקים. אל כל גופיף מלפיגי נכנס עורק אחד שנקרא **עורק נכנס** (איור ג-11). כל עורק נכנס מתפצל לרשת של נימים שיוצרים את מבנה הפקעית. מן הפקעית יוצא הדם בעורק צר יותר - **עורק יוצא**. העורק היוצא מסתעף לנימים רבים שמתפתלים לאורך כל הנפרון, ומקיפים אותו. הנימים שמסביב לנפרון מתלכדים ל**ווריד יוצא**. הוורידונים היוצאים מכל הנפרונים שבכליה מתלכדים ל**ווריד הכליה**, והוא מתחבר לווריד החלול התחתון שמגיע אל הלב (איור ג-10 בעמ' 24).



איור ג-10: מבנה הכליה



החצים מראים את כיוון זרימת התסנין והדם

איור ג-11: מבנה הנפרון וכלי הדם סביבו

מבנה מובילי השתן ושלפוחית השתן

מכל כליה יוצא צינור - **מוביל שתן** (ureter) - שעוביו בערך כעובי של עיפרון, והוא מוביל את השתן שנוצר בכליות, אל שלפוחית השתן (איור ג-9). מוביל השתן בנוי משריר שמתכווץ באופן בלתי רצוני כשלוש פעמים בדקה. כל גל של התכווצות מעביר כמות קטנה של שתן אל **שלפוחית השתן** (urinary bladder), שנמצאת בתחתית הבטן. שלפוחית השתן מתמלאת בנוזל שתן ומתרחבת בהדרגה מנפח של כ-10 מ"ל עד לנפח של כ-400 מ"ל. מן השלפוחית יוצא צינור ה**שופכה** (urethra) שמוביל את השתן אל מחוץ לגוף. במעבר משלפוחית השתן אל השופכה יש שריר סוגר טבעתי שמווסת את מעבר השתן. ריקון השלפוחית (השתנה) מתרחש כאשר מרפים באופן רצוני את שריר הסוגר.

הכרת מבנה הכליה

כלים וחומרים



מיקרוסקופ

זכוכית מגדלת

בינוקולר

סקלפל

תתקין (פרפרט) מוכן של חתך בכליה

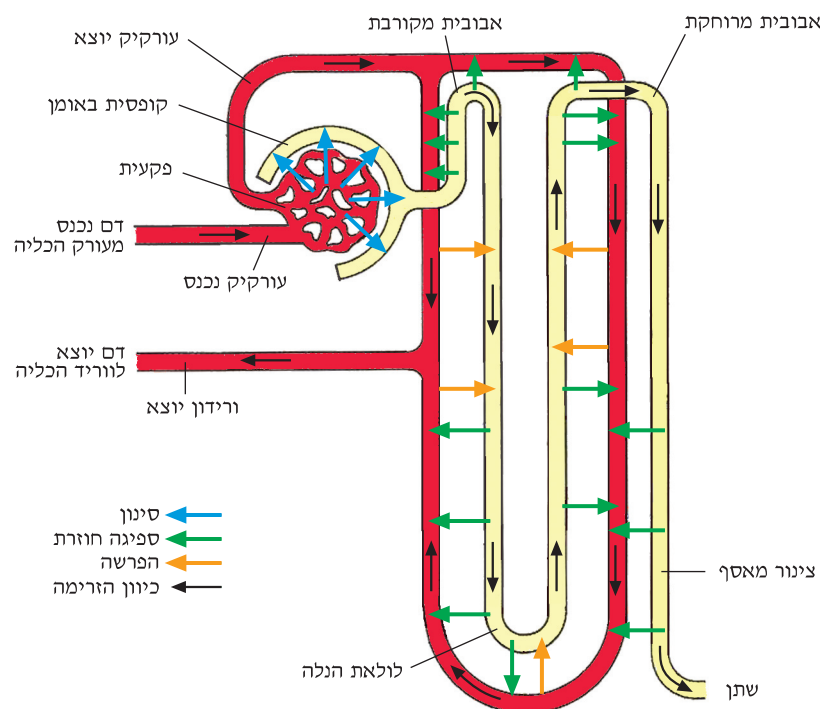
כליה בודדת של כבשה (ניתן להשיג אצל הקצב)

מהלך העבודה

1. התבוננו בכליה וזהו את מעטפת הסיבים שמקיפה את הכליה. מעטפת זו נקראת קופסית הכליה. זהו את רקמת החיבור שמקיפה את קופסית הכליה.
 2. זהו את העורק שנכנס אל הכליה ואת התפצלותו לשלושה עורקים, שמתפצלים גם הם לכלי דם קטנים יותר.
 3. הסירו את קופסית הכליה וזהו את כלי הדם שבתוך הכליה.
 4. חתכו את הכליה לאורכה. היעזרו בזכוכית מגדלת והתבוננו בחתך. נסו להבחין בהסתעפות של כלי הדם שבתוכה.
 5. ציירו את חתך האורך שקיבלתם. סמנו בציור את קליפת הכליה, שהיא החלק החיצוני שצבעו חום-אדמדם, ואת ליבת הכליה, שהיא החלק הפנימי יותר שצבעו רוד-חיוור.
- שימו לב!** חתך האורך שמתקבל תלוי במיקומו של החתך שביצעתם, לכן ייתכן שיתקבלו בכיתה ציורים שונים של חתכי אורך.
6. היעזרו בזכוכית מגדלת וזהו מבנים דמויי פירמידה שראשיהם מופנים כלפי פנים. על גבי הפירמידות אפשר להבחין בפסים דקים המתמשכים מבסיס הפירמידה אל ראשה. פסים אלה הם הצינורות המאספים שדרך מתנקז השתן לאגן הכליה. סמנו בציור את הפירמידות ואת הצינורות המאספים.
 7. העבירו את החתך לבינוקולר והתבוננו בו. שימו לב כי ראשי הפירמידות מצויים בחלל שמוקף בקרום. החלל הזה הוא אגן הכליה. סמנו את אגן הכליה בציור.
 8. היעזרו בזכוכית מגדלת וזהו את הפקעיות שמופיעות כנקודות בקליפת הכליה. סמנו אותן בציור.
 9. קבלו מהמורה תתקין של חתך בכליה והתבוננו בו באמצעות מיקרוסקופ. היעזרו באיורים ג-10 וג-11 כדי לזהות את הנפרון ואת חלקיו. ציירו את מה שראיתם וציינו את שמות חלקי הנפרון ואת ההגדלה שבה השתמשתם.
 10. הוסיפו לציור הנפרון את כלי הדם שמסתעפים סביבו.

פעולת הכליות

כל הדם בגופו של אדם בוגר עובר בכליות מדי 4-5 דקות, תוך כדי הרחקה של חומרים מיותרים, ויסות נפח המים וכן ויסות הריכוז של המומסים בדם. כל הפעילויות האלה נעשות בכול אחד מן הנפרונים שפועל כיחידה עצמאית, ללא תלות בנפרונים האחרים. פעולת הנפרונים מתבצעת בשלושה תהליכים עיקריים (איור ג-12):



איור ג-12: התהליכים שמתרחשים בנפרון

- סיון בפקעית - מים שמכילים יונים ומולקולות קטנות מסתננים מן הדם שבנימי הפקעית אל חלל קופסית באומן. מן הקופסית זורם הנוזל הזה אל פיתולי הנפרון (אבובית);
- ספיגה חוזרת מאבובית הנפרון ומן הצינור המאסף לדם - מרבית המים, המולקולות הקטנות והיונים שהסתננו בפקעית דרושים לגוף, והם נספגים בחזרה אל תוך הדם מן הנפרון;
- הפרשה מן הדם אל אבובית הנפרון - חומרי פסולת וחומרים אחרים שאינם נחוצים לגוף עוברים מכלי הדם אל האבובית ומופרשים בנוזל השתן.

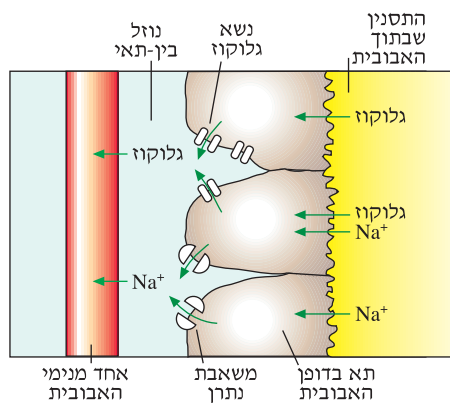
הסינון בפקעית

קצב סינון הדם בפקעית תלוי בלחץ הדם שבנימי הפקעית. בגלל לחץ הדם הגבוה שבפקעית, המים וחומרים מומסים, שנמצאים בפלסמה מסתננים בקצב גבוה, מנימי הפקעית אל תוך קופסית באומן (איור ג-12). התמיסה המימית שמסתננת אל קופסית באומן נקראת **תסנין** (ultrafiltrate).

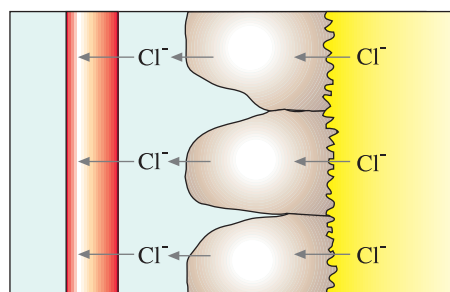
קצב הסינון בפקעית גבוה גם הודות למבנה ה"מסננת". המסננת שדרכה עובר התסנין היא שכבת תאי האנדותרל שנמצאים בדופן הנימים שבפקעית. בין תאי האנדותרל של הפקעית יש רווחים שמאפשרים מעבר של מולקולות קטנות. הודות לרווחים, נימי הפקעית חדירים למומסים פי 10 עד פי 100 יותר מנימים אחרים. גם בין תאי האפיתל בדופן שמקיף את קופסית באומן, יש רווחים רבים שמאפשרים כניסת המולקולות אל הקופסית. עבור הנוזלים לא קיים כל מחסום, והם עוברים בדיפוזיה ללא הפרעה מן הפקעית לקופסית באומן ומשם לאבובית הנפרון. נוזל התסנין כמעט זהה בהרכב מלחיו לנוזל הדם - הפלסמה (טבלה ג-2). תאי דם אדומים, תאי דם לבנים, טסיות ומולקולות חלבון גדולות, אינם יכולים לעבור מנימי הפקעית אל קופסית באומן, והם נשארים בתוך הדם שבנימים.

טבלה ג-2: ריכוז חומרים בפלסמה ובתסנין (גרם ב-100 מ"ל)

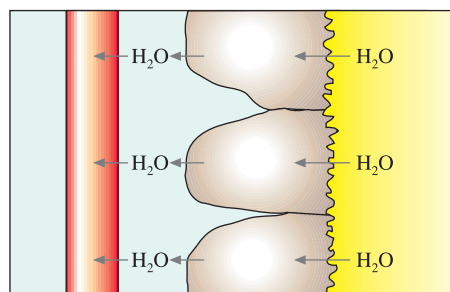
חומר	ריכוז בפלסמה	ריכוז בתסנין
חלבון	8	0
גלוקוז	0.1	0.1
שתנן	0.03	0.03
כלור	0.4	0.4
נתרן	0.3	0.3
סידן	0.01	0.01
חומצות אמיניות	0.04	0.04



א. העברה אקטיבית של גלוקוז ויוני נתרן



ב. מעבר פסיבי של יוני כלור



ג. מעבר פסיבי של מים

הספיגה החוזרת מאבובית הנפרון ומהצינור המאסף אל הדם

כ-180 ליטר של פלסמה ושל מומסים מסתננים מנימי הפקיעת לקופסית באומן מדי יום. אילו כל הנפח הזה היה מופרש החוצה עם השתן, היו כל המים שבפלסמה מופרשים מן הגוף במשך חצי שעה! אובדן כזה של מים וחומרים אחרים נמנע הודות לתהליך של ספיגה חוזרת. תאי דופנות האבובית סופגים, מן התסנין, מים וחומרים הדרושים לגוף ומחזירים אותם לדם. כבר באבובית המקורבת חוזרים ונספגים לדם כ-80% מנפח התסנין.

החומרים המומסים מועברים מתוך נוזל האבובית אל הנוזל הבין-תאי (שם ריכוזם גבוה יותר) באופן אקטיבי תוך כדי השקעת אנרגיה. מן הנוזל הבין-תאי החומרים עוברים חזרה אל הדם. ההעברה האקטיבית מן האבובית מבוצעת על ידי נשאים ומשאבות שנמצאים בתאים שבדופן האבובית (איור ג-13). החומרים שמועברים מן האבובית הם גלוקוז ויונים (כמו נתרן) (איור ג-13, א). בעקבות היונים שעוברים באופן אקטיבי מן התסנין אל הנוזל הבין-תאי, עוברים באופן פסיבי יונים אחרים (יוני כלור) (איור ג-13, ב). מעבר היונים מעלה את הריכוז האוסמוטי בנוזל הבין-תאי ובעקבות כך יוצאות מן האבובית, באופן פסיבי, גם מולקולות מים (איור ג-13, ג). המים עוברים מהנוזל הבין-תאי, דרך דופנות הנימים המלווים את הנפרון, אל מחזור הדם.

ספיגה חוזרת של מים מתרחשת גם בצינור המאסף. ספיגה זו מבוקרת על ידי מערכת הורמונלית שמגיבה לשינויים בנפח נוזלי הגוף ובריכוז המומסים בהם (ראו עמ' 182). היציאה של המים מן הצינור המאסף תלויה בריכוז היונים בנוזל הבין-תאי בליבת הכליה. ככול שבנוזל הבין-תאי יש ריכוז גבוה יותר של יונים, כך יוצאים יותר מים מן הצינור המאסף, והשתן שמופרש מן הגוף מרוכז יותר. הספיגה החוזרת מאבובית הנפרון ומהצינור המאסף מחזירה אל מערכת הדם כ-99% מן המים שהסתננו בפקיעת.

הספיגה החוזרת מן הצינור המאסף גורמת לכך שהריכוז האוסמוטי של השתן המופרש גבוה פי 4 מן הריכוז של פלסמת הדם. היכולת לרכז את השתן מעל לריכוז האוסמוטי של פלסמת הדם קיימת רק אצל עופות ויונקים, הודות למבנה שונה של חלק מן הנפרונים. בנפרונים האלה, לולאות הנלה ארוכות יותר מאשר בנפרונים האחרים ויש להן מבנה מיוחד. הפעילות שמתרחשת בלולאות הנלה הארוכות מגדילה את ריכוז היונים בנוזל הבין-תאי בליבת הכליה, מגבירה את הספיגה החוזרת של המים מן הצינור המאסף ומעלה את ריכוז השתן. ככול שלולאות הנלה ארוכות יותר, כך יכולת ריכוז השתן גדולה יותר והחיסכון במים רב יותר.

איור ג-13: הספיגה החוזרת באבובית הנפרון

העמקה



מערכת הזרימה הנגדית המתגברת כלולת הנלה

הספיגה החוזרת היעילה של מים מן הצינור המאסף מתרחשת הודות לריכוז האוסמוטי הגבוה בליבת הכליה. הריכוז האוסמוטי הגבוה בליבת הכליה נוצר על ידי תהליך של זרימה נגדית של התסנין בחלק מנפרוני הכליה. במערכת זרימה נגדית, נוזל או גז זורמים בכיוונים מנוגדים לאורך צינורות מקבילים וסמוכים זה לזה. הזרימה הנגדית בכליה יוצרת את הריכוז האוסמוטי הגבוה ביותר בגוף והיא נקראת **זרימה נגדית מתגברת** (countercurrent multiplier flow).

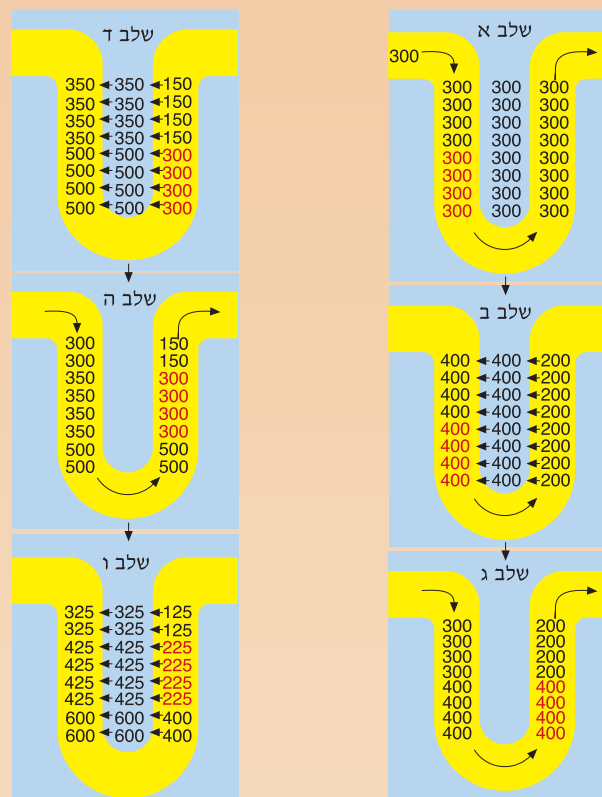
הזרימה הנגדית המתגברת מתרחשת בשתי הזרועות של לולאת הנלה: בזרוע היורדת ובזרוע העולה (איור ג-11). בנפרונים שמשותפים בתהליך ריכוז השתן, הזרוע היורדת של לולאת הנלה חדירה למים ולמומסים. הריכוז של התסנין בזרוע היורדת משתווה לריכוז של הנוזל הבין-תאי שמקיף אותה. הזרוע העולה של הלולאה אינה חדירה למים, אך היא יכולה להעביר אל הנוזל הבין-תאי יוני נתרן באופן אקטיבי. משאבות הנתרן בזרוע העולה יכולות לפעול ולהוציא יוני נתרן עד להפרש של 200 מיליאוסמול בין ריכוז הנתרן בתסנין לבין ריכוזו בנוזל הבין-תאי. מכאן, שאם הריכוז האוסמוטי ההתחלתי בתסנין הוא 300 מיליאוסמול, המשאבות יכולות לפעול עד שהריכוז בתסנין ירד ל-200 מיליאוסמול, והריכוז בנוזל הבין-תאי יגיע ל-400 מיליאוסמול. ריכוז כזה בנוזל הבין-תאי היה מאפשר ספיגה חוזרת מועטה בלבד של מים מן הצינור המאסף. הודות לזרימה הנגדית המתגברת, הריכוז האוסמוטי באזור כיפוף הלולאה מגיע ל-1,200 מיליאוסמול. בריכוז כזה כמות גדולה של מים נספגים חזרה מן הצינור המאסף.

כדי להבין את עקרון הזרימה הנגדית המתגברת, נחלק את פעולת הכליה לשני סוגי תהליכים: תהליכי זרימה ותהליכי הוצאת יונים. חלוקה זו היא מלאכותית ונועדה רק לשם הבהרה. למעשה, שני סוגי התהליכים מתרחשים בכליה בעת ובעונה אחת. בעזרת איור ג-14 נעקוב בשלבים אחר שינויי הריכוזים המתרחשים במקטע מסוים של הנוזל (מסומן באיור בצבע), בעת תנועתו לאורך הלולאה.

שלב א: הלולאה מתמלאת בנוזל שריכוזו 300 מיליאוסמול. בשלב זה ריכוז הנוזל בזרוע היורדת שווה לריכוזו בזרוע העולה ולריכוזו בנוזל הבין-תאי.

שלב ב: יונים יוצאים באופן אקטיבי מן הזרוע העולה של הלולאה אל הנוזל הבין-תאי. כתוצאה מהצטברות יונים בנוזל הבין-תאי, עולה הלחץ האוסמוטי של הנוזל הבין-תאי. הלחץ האוסמוטי בנוזל הבין-תאי גבוה מן הלחץ בזרוע היורדת ולכן יונים עוברים בדיפוזיה אל הזרוע היורדת, בהתאם למפל הריכוזים. משאבות

מיליאוסמול - הלחץ האוסמוטי שנוצר מהמסת מול חלקיקים בליטר תמיסה.



איור ג-14: עקרון הזרימה הנגדית המתגברת בכליה

הנתרן פועלות עד גבול יכולתן, עד שנוצר מפל של 200 מיליאוסמול בין הזרוע העולה (200 מיליאוסמול) לבין הזרוע היורדת (400 מיליאוסמול).

שלב ג: הנוזל שבמקטע (המסומן בצבע) עובר לזרוע העולה.

שלב ד: כמו בשלב ב, יונים יוצאים מן הזרוע העולה אל הנוזל הבין-תאי ומשם עוברים אל הזרוע היורדת. בכול נקודה לאורך הלולאה נשמר הפרש של 200 מיליאוסמול בין הזרוע העולה לזרוע היורדת.

שלב ה: הנוזל שבלולאה מתקדם.

שלב ו: יונים יוצאים מן הזרוע העולה ועוברים אל הזרוע היורדת (כמו בשלבים ב' וד'). בכול נקודה לאורך הלולאה נשמר הפרש הריכוזים של 200 מיליאוסמול.

בתוך שלושה שלבים של זרימה והוצאת יונים, משתנה ריכוז התסנין מ-300 מיליאוסמול בכניסתו ללולאה ל-600 מיליאוסמול באזור הכיפוף שלה. התהליך נמשך וריכוז התסנין באזור הכיפוף הולך וגדל עד ל-1,200 מיליאוסמול. במקביל, גם ריכוז הנוזל הבין-תאי באזור הכיפוף מגיע ל-1,200 מיליאוסמול. בפועל, מכיוון שיש זרימה מתמדת של נוזל בנפרוני הכליה, ריכוז הנוזל הבין-תאי באזור הכיפוף הוא תמיד 1,200 מיליאוסמול וככול שמתרחקים מאזור הכיפוף לכיוון קליפת הכליה הריכוז הולך ויורד. הזרימה הנגדית המתגברת יוצרת, אם כך, ריכוזים אוסמוטיים גבוהים ביותר בנוזל הבין-תאי שבלבת הכליה, ומפל ריכוזים אוסמוטיים בנוזל הבין-תאי לאורך לולאת הנלה. הריכוז הסופי של השתן מתבצע בצינור המאסף. הצינור המאסף עובר דרך הליבה צמוד ללולאת הנלה. התסנין בצינור המאסף זורם מאזור שבו הריכוז של הנוזל הבין-תאי נמוך, יחסית, לאזור שבו הריכוז מרבי. המים יוצאים מן הצינור המאסף בהתאם למפל האוסמוטי בין התסנין שבתוך הצינור לבין הנוזל הבין-תאי. עם יציאת המים, עולה הריכוז האוסמוטי של התסנין בצינור, אבל התסנין זורם ו"פוגש" ריכוז אוסמוטי גבוה יותר, והמים ממשיכים לצאת לאורך הצינור. בסופו של דבר, הריכוז בצינור אינו יכול לעלות על הריכוז שבקצה הליבה. מפל הריכוזים בנוזל הבין-תאי, לאורך לולאת הנלה, הוא אפוא הכוח המניע יציאת מים מתוך הצינור המאסף. הריכוז האוסמוטי הגבוה בנוזל הבין-תאי הוא זה ש"סוחט" כמות גדולה של מים מן הצינור המאסף ביעילות רבה. לכן, ככל שלולאת הנלה ארוכה יותר כושר ריכוז השתן גבוה יותר. מפל הריכוזים בנוזל הבין-תאי, לאורך לולאת הנלה, נשמר גם הודות למבנה של מערכת הדם מסביב ללולאת הנלה. נימי הדם באזור הזה מסודרים גם הם בצורת לולאות שמקבילות ללולאות הנלה (איור ג-11). כך מתקיימת גם בנימי הדם זרימה נגדית, שבמהלכה מתרחשים מעברים של מים ומלחים בין הנוזל הבין-תאי ובין הדם. המעברים האלה משמרים את מפל הריכוזים שנוצר בעקבות הזרימה הנגדית המתגברת.

ההפרשה מן הדם אל אבובית הנפרון

במקביל לספיגה החוזרת, מתבצע גם מעבר של חומרים בכיוון הנגדי: מן הדם אל הנוזל הבין-תאי וממנו אל תוך אבובית הנפרון. חלק מן החומרים, כמו: שתן, יוני מימן ויוני אשלגן, עוברים בניגוד למפל הריכוזים שלהם; ריכוזם בשתן גבוה יותר בהשוואה לריכוזם בפלסמת הדם (טבלה ג-3), וההפרשה שלהם אל אבובית הנפרון נעשית בהעברה אקטיבית תוך כדי השקעת אנרגיה. חומרים אחרים, למשל תרופות (כמו: פנצילין והיסטמין), מופרשים

דיפוזיה מסתייעת - תהליך שבו נשא מסייע בהעברת חומרים דרך קרום התא, בהתאם למפל הריכוזים שלהם ללא השקעת אנרגיה.

מן הדם אל אבובית הנפרון בהתאם למפל הריכוזים שלהם. החומרים האלה מופרשים בעזרת נשאים חלבוניים בתהליך שנקרא דיפוזיה מסתייעת.

תהליך ההפרשה מן הדם אל אבובית הנפרון חיוני (א) לוויסות ה-pH של הדם (הודות ליכולת לווסת באופן אקטיבי את מעבר יוני המימן); (ב) לסילוק חומרי פסולת, כמו שתנן, שעברו ספיגה חוזרת לדם באופן פאסיבי ובתהליך הזה הם מועברים לחלל האבובית באופן אקטיבי; (ג) לסילוק חומרים שלא הסתננו בפקעית.

מנגנוני הספיגה החוזרת וההפרשה אל האבובית מווסתים את נפח נוזלי הגוף והמומסים בהם. מ-180 ליטר תסנין מתקבלת כמות של 1-2 ליטר שתן המופרשים ביום. השתן שמופרש מן הגוף מורכב מ-96% מים, 2% חומרי פסולת חנקניים (בעיקר שתנן), 2% מלחים וכן כמויות מזעריות של פיגמנטים, שמקנים לו את הצבע והריח האופייניים (טבלה ג-3).

טבלה ג-3 : ריכוז חומרים בפלסמה ובשתן (גרם ב-100 מ"ל)

חומר	ריכוז בפלסמה	ריכוז בשתן
מים	91	96
חלבונים	8	0
גלוקוז	0.1	0
שתנן	0.03	2
סידן	0.01	0.015
אשלגן	0.02	0.15
נתרן	0.32	0.32
כלור	0.4	0.6
זרחן	0.003	0.12

ויסות ריכוז השתן

כמויות שונות של מים ומלחים נכנסות לגוף (באכילה ובשתייה) ויוצאות מן הגוף (בשתן, בזיעה, בצואה ובנשימה). מערכת ההפרשה שומרת על ריכוז תקין של מים ומלחים בתוך הגוף על ידי ויסות כמות השתן וריכוזו בתגובה לשינויים בכמות המים בגוף. כך לדוגמה, לאחר שתייה מרובה, כמות השתן עולה והריכוז שלו יורד, ואילו לאחר הזעה מרובה, או כשיש שלשול, כמות השתן יורדת והריכוז שלו עולה.

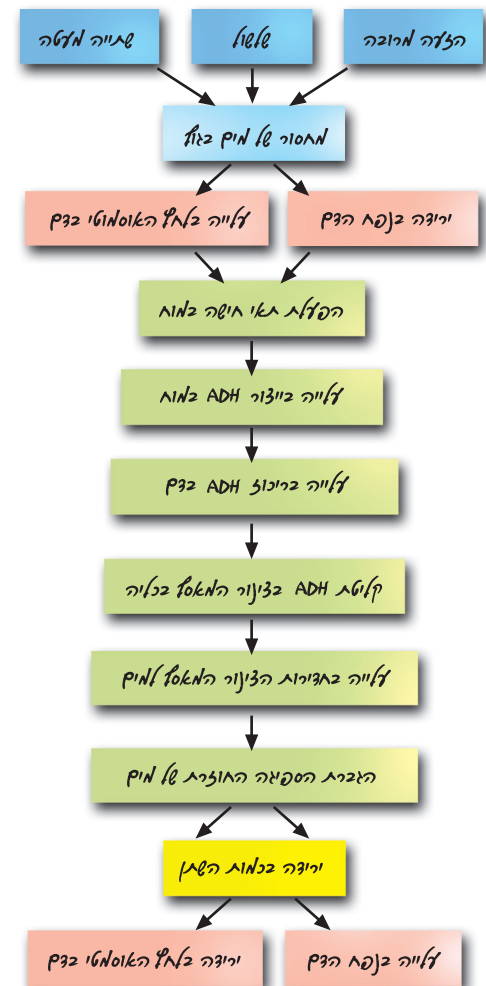
ויסות כמות השתן וריכוזו נעשה על ידי שני הורמונים שפועלים זה בצד זה. הורמון אחד מפקח על נפח המים שמופרש בשתן, והורמון אחר מווסת את כמות יוני הנתרן, הכלור והאשלגן שמופרשים בשתן.

ההורמון שמווסת את כמות המים המופרשת הוא **ADH** (antidiuretic hormone - הורמון שמונע הפרשה של מים בשתן). כאשר יש מחסור של מים בגוף, חלה עלייה בלחץ האוסמוטי של הדם (איור ג-15). השינוי הזה נקלט במוח על ידי תאי חישה שרגישים לשינויים בלחץ האוסמוטי (אוסמוֹרֶפֶטוֹרִים). תאי החישה גורמים להגברה בייצור ההורמון ADH במוח, והוא מגיע עם זרם הדם אל הכליות. בנפרוני הכליה, ההורמון נקלט על ידי התאים שבדופן הצינור המאסף. קליטת ה-ADH בצינור המאסף גורמת לעלייה בחדירות של הצינור למים. הספיגה החוזרת של המים גוברת, חלה ירידה בכמות השתן שמופרש והשתן נעשה מרוכז יותר (וכהה יותר). כתוצאה מכך, נפח הדם גדל וריכוז המומסים בפלסמה יורד. כאשר יש בגוף עודף מים, הלחץ האוסמוטי בדם פוחת והפרשת ה-ADH פוחתת. חדירות הדפנות בצינור המאסף פוחתת ויותר מים מופרשים מן הגוף החוצה עם השתן שהופך להיות מהול יותר (ובהיר יותר). מים עודפים מורחקים מן הגוף עד שהלחץ האוסמוטי של הדם חוזר לרמה נורמלית.

ADH משפיע על תעלות מים בצינור המאסף

ההורמון ADH מגביר את החדירות למים של הצינור המאסף, על ידי הגדלת מספר "תעלות המים" בקרומי התאים. תעלת מים היא חלבון בקרום התא שמאפשר מעבר מהיר של מים בין שני צדי קרום התא. תעלת מים אחת בכלייה יכולה להעביר כ-3 מיליארד מולקולות מים בשנייה. המעבר הוא בדיפוזיה מסתייעת ללא השקעת אנרגיה.

תעלות המים התגלו בשנת 1990 על ידי החוקר האמריקאי פיטר אגרה (Peter Agre). תגלית זו זיכתה אותו בפרס נובל לכימיה בשנת 2003. כיום, משערים החוקרים שרוב מעבר המים דרך קרומי התאים בגוף נעשה באמצעות התעלות. אחד האיברים בגוף העשירים ביותר בתעלות מים הוא הכליה. תעלות מים נמצאו עד כה בחיידקים, בצמחים וביונקים.



איור ג-15: ADH מווסת את כמות המים שמופרשת בשתן

ADH והרטבת לילה



הרטבת לילה היא מצב שבו השתן משתחרר באופן בלתי נשלט, תוך כדי שינה. אחת הסיבות השכיחות להרטבת לילה אצל ילדים היא מחסור יחסי בהורמון ADH. במצב תקין הפרשת ההורמון ADH גבוהה ביותר בלילה, ולכן בלילה מגיע פחות שתן לשלפוחית ויש פחות צורך לרוקנה. אצל ילדים שסובלים מחסור יחסי ב-ADH, כמות השתן שמגיעה בלילה לשלפוחית היא גדולה ויש יותר סיכויים שהשלפוחית תתכווץ והשתן "יברח". במקרים של מחסור ב-ADH ניתן לטפל בעזרת תרופות והשיפור ניכר תוך כמה ימים.

ההורמון שמפקח על מאזן יוני הנתרן והכלור בדם נקרא **אלדוסטרון**. כאשר הגוף מאבד כמות גדולה מדי של נתרן, כשיש שלשול לדוגמה, תאי חישה בלב ובכלי הדם חשים בכך. בתגובה הם מפעילים שרשרת של תהליכים שבסופם מופרש אלדוסטרון בבלוטת **יותרת הכליה** שנמצאת מעל לכליה (איור ג-9). האלדוסטרון המופרש מגביר את קצב הספיגה החוזרת של הנתרן מן האבובית המרוחקת ומן הצינור המאסף. יוני הכלור נודדים בעקבות יוני הנתרן ונספגים גם הם חזרה לדם. כך מקטין ההורמון את כמות הנתרן והכלור המופרשים בשתן ומעלה את ריכוזם בדם. לעומת זאת, כאשר יש בגוף עודף נתרן וכלור, הפרשת האלדוסטרון מעוכבת. כמות הנתרן והכלור שנספגים בחזרה לדם קטנה והכמות העודפת מופרשת בשתן. האלדוסטרון מווסת גם את מאזן יוני האשלגן בגוף. עלייה ברמת האשלגן בדם גורמת להגברת הייצור של האלדוסטרון. עלייה ברמת האלדוסטרון בגוף מגבירה את הפרשת יוני האשלגן בשתן.

ויסות חומציות הדם

הכליות ממלאות תפקיד חשוב גם בוויסות ה-pH של הדם. ויסות זה נעשה על ידי שינוי הקצב שבו מפרישות הכליות יוני מימן. קצב ההפרשה האקטיבי של יוני מימן מן הדם אל הנוזל שבאבובית הנפרון תלוי ב-pH של הדם. כאשר הדם חומצי מדי (כלומר, מכיל יותר יוני מימן), יוני מימן מועברים לנוזל שבנפרון. כתוצאה מכך, יותר יוני מימן יופרשו מן הגוף באמצעות השתן. כאשר הדם בסיסי מדי (כלומר, מכיל פחות יוני מימן), יקרה תהליך הפוך ויוני מימן יעברו בספיגה חוזרת אל הדם ופחות יוני מימן יופרשו מן הגוף.

בדיקת שתן

הרכב השתן משקף, במידה מסוימת, את הרכב נוזלי הגוף ולכן הוא יכול ללמד על מצבו הגופני של האדם. מחלות רבות משפיעות על הרכב השתן, ואפשר לאבחן אותן באמצעות בדיקת שתן.

יש שני סוגים עיקריים של בדיקות שתן: בדיקת שתן כללית ותרבית שתן. **בבדיקת שתן כללית** בודקים אם הריכוז של החומרים שאמורים להיות בשתן הוא תקין ואם מצויים חומרים ותאים שלא אמורים כלל להיות בשתן. בבדיקת שתן כללית נבדקים: חומציות, משקל סגולי, נוכחות גלוקוז, נוכחות חלבון, נוכחות תאי דם אדומים ולבנים, ריכוז תוצרי פירוק של שומנים, של תאי דם אדומים ושל חומרים אחרים. חריגה מהריכוזים הנורמליים של כל אחד מהחומרים האלה יכולה להעיד על מחלה בכליות או במערכות אחרות בגוף. לדוגמה: pH גבוה עשוי לרמוז על בעיות בתפקוד הכליות או על זיהום בדרכי השתן. pH נמוך מאפיין מחלות ריאה, סוכרת, שלשול או הרעבה. משקל סגולי גבוה עשוי להעיד על התייבשות, כשל בפעולת הלב או בעיות בתפקוד הכליות. משקל סגולי נמוך עשוי להעיד על שתייה מרובה מדי, על מחלות כליה או דלקות כליה. נוכחות גלוקוז בשתן מהווה לרוב סימן למחלת הסוכרת. עם זאת, גם בעיות בתפקוד הכליות עלולות לגרום לכך. נוכחות חלבון בשתן עשויה ללמד על מגוון רחב של מחלות כליה, רעלת היריון, יתר לחץ דם או סרטן. נוכחות תאי דם אדומים בשתן מעלה חשש למחלת כליה, דלקת בכליות, נזק לצינורית השתן, גידול סרטני, אבנים בדרכי השתן או דלקת הערמונית. נוכחות תאי דם לבנים בשתן מרמזת על דלקת בדרכי השתן.

כאשר רוצים לוודא מצב של זיהום בדרכי השתן מבצעים **תרבית שתן**. בתרבית שתן מדגירים דגימת שתן על מצע לגידול חיידקים ומיקרואורגניזמים אחרים. במשך כמה ימים עוקבים אחר התפתחות מיקרואורגניזמים במצע, ואת המיקרואורגניזמים שמתגלים ניתן לזהות ולהמליץ על טיפול תרופתי, בהתאם לצורך.

מחלות במערכת ההפרשה

פגיעה בתפקוד מערכת ההפרשה עלולה להיגרם כתוצאה מהיווצרות "אבנים", בגלל מחלת הסוכרת, כתגובה אוטואימונית, או בגלל זיהומים, הרעלות, פציעות וגידולים סרטניים.

אבנים בכליות



אחת התופעות הנפוצות במערכת ההפרשה היא היווצרות "אבנים" בדרכי השתן ובכליות. האבנים הן למעשה התגבשות של מלחים (בעיקר מלחי סידן בשילוב עם חומצה אוקסלית) שנמצאים בשתן ונוטים לשקוע בכליה או בדרכי השתן. שקיעת המלחים עשויה להתרחש בגלל נפח שתן קטן או בגלל זרימה איטית של השתן. עודף סידן בגוף מגביר את הסיכויים להיווצרות אבנים בכליות. ידוע כי ויטמין D מגביר את ספיגת הסידן מן המעי. ויטמין D נוצר בהשפעת קרינה על-סגולה (UV) על עור הגוף. לכן, שיזוף יתר עלול להגביר את הספיגה של הסידן מן המעי ולהגדיל את הסיכוי להיווצרות אבנים בכליות. אחת הדרכים למנוע היווצרות של אבנים בכליות היא להרבות בשתייה. כמויות המים המוגברות שעוברות דרך הכליות, שוטפות את הכליות ומונעות שקיעת מלחים.

אבנים הקטנות מ-5 מ"מ אינן מורגשות, אך כאשר האבן גדולה היא עלולה לחסום את זרימת השתן, לפצוע את צינור השופכה ולגרום כאבים חדים. אם האבנים אינן מופרשות עם השתן יש צורך בטיפול תרופתי כדי להגביר את מסיסות הגבישים. במקרים שהאבנים אינן מתפוררות, מוציאים אותן בניתוח או מרסקים אותן באמצעות גלי הלם (shock waves) וקרני לייזר. גלי הלם סודקים את האבן ומפוררים אותה עד לגודל של גרגרי חול, והגרגרים האלה נשטפים מן הגוף עם השתן.

פגיעה בתפקוד הכליות נגרמת בעיקר כתוצאה ממחלת הסוכרת. בארה"ב נמצא, כי בערך כשליש מאלה שמפתחים מחלת כליות קשה הם חולי סוכרת. הסוכרת פוגעת בעורקיקי הכליות ולכן פוגעת בתהליכי הסינון והספיגה החוזרת. כאשר פגיעה כזו מתמשכת מגיעים למצב של **כשל כלייתי כרוני** או אי-ספיקת כליות. כשל כלייתי כרוני נגרם גם כתוצאה מתגובה אוטואימונית, כלומר: תגובה של מערכת החיסון נגד רקמות או תאים של הגוף עצמו.

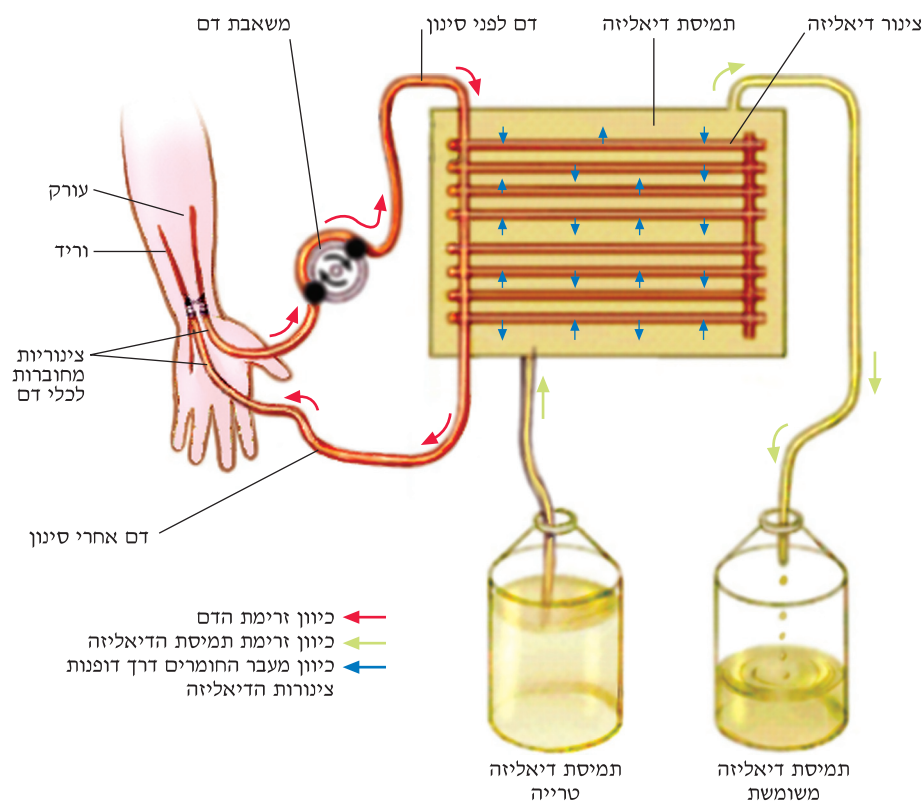
אצל אנשים שסובלים מכשל כלייתי כרוני מופר המאזן של המים ושל המלחים בגוף, וחומרי פסולת חנקניים אינם מופרשים מן הגוף. במצב כזה, ריכוז השתן בדם עלול להגיע לריכוזים רעילים. יתרה מזו, אי-סילוק עודפי החומצות מן הדם גורר ירידה ברמת ה-pH של הדם, עד לערכים מסוכנים. במצבים כאלה, נפגם גם המנגנון של הפרשת האשלגן מן הדם אל נוזל האבובית. עלייה ברמת האשלגן בפלסמה מפחיתה את כושר הגירוי של תאי העצבים, של התאים בשריר הלב ושל תאי שרירי השלד. מצב כזה עלול להסתיים בדום לב ובמוות. אנשים

שסובלים מכשל כלייתי כרוני חשים עייפות, חולשה, ירידה במשקל, בצקות, שינויים בלחץ הדם ולעתים, חום, כאבים ובחילות.

כשל כלייתי כרוני עלול להתפתח **לכשל כלייתי סופי** - אי-ספיקת כליות סופנית. אצל אנשים שסובלים מכשל כלייתי סופי, תפקוד הכליות מגיע ל-5% מן התפקוד הנורמלי. כאשר הפגיעה היא רק בכליה אחת, אין בכך סכנה, כי כליה אחת מסוגלת לייצר שתן בקצב הדרוש לשמירה על הרכב תקין של דם. אנשים רבים מגיעים לאריכות ימים, גם אם יש בגופם רק כליה אחת שמתפקדת. אולם כאשר שתי הכליות אינן מתפקדות יש לטפל באחת משתי הדרכים: דיאליזה בעזרת כליה מלאכותית או השתלת כליה.

כליה מלאכותית

אדם ששתי כליותיו אינן מתפקדות יכול להיעזר במכשיר שמחקה את פעולת הכליות, על מנת לשמור על הרכב דם תקין. המכשיר הזה הוא למעשה כליה מלאכותית, והתהליך שהוא מבצע נקרא **דיאליזה** (איור ג-16). כאשר מבצעים דיאליזה, מחברים את החולה למכשיר ומזרימים את דמו דרך מערכת של צינורות. הצינורות נמצאים בתמיסה (תמיסת דיאליזה) שמכילה גלוקוז וחומרים אחרים, בריכוזים זהים לאלה שמצויים בפלסמה של אדם בריא. הדפנות של הצינורות, שבהם מוזרם הדם של החולה, עשויים מקרום ברנזי. מולקולות קטנות (כמו, שתן), שמהוות חומרי פסולת ומצויות בדם בריכוז גבוה, יחסית, יכולות לעבור בדיפוזיה מדמו של החולה אל תמיסת הדיאליזה, דרך החורים הקטנים בדופן הצינורות. מלחים, שריכוזם בדם נמוך יחסית, עוברים מתמיסת הדיאליזה, אל הדם על פי אותו עיקרון. מולקולות גדולות אינן יכולות לעבור דרך דופן הצינורות. המשאבה של המכשיר מגדילה בהדרגתיות את לחץ הדם כדי להגביר את זרימת החומרים מן הדם, דרך הקרום, לתמיסת הדיאליזה, בדומה לתהליך שמתקיים בכליה בריאה, שבה לחץ הדם בפקעית מאיץ את הסינון בכליה. הדם זורם בצינורות הדיאליזה עד שהריכוזים של היונים ושל המלחים מגיעים לטווח ערכים תקין. נוסף לוויסות המלחים, המכשיר מווסת גם את מאזן המים בדמו של החולה. על הדיאליזה יש לחזור לפחות פעמיים בשבוע והיא נמשכת 3-6 שעות בכול פעם. מכשירי דיאליזה יש רק בבתי חולים ואי-אפשר לבצע דיאליזה בבית, כיוון שיש צורך במעקב רפואי בזמן התהליך. לכן, ביצוע הדיאליזה מקשה מאוד על חייהם של החולים.



איור ג-16: סינון דם במכשיר דיאליזה

ואולם, ניתן לבצע דיאליזה בשיטה אחרת, בבית, ללא צורך להגיע לבית חולים. בשיטה זו מצמידים אל פתח בחלל הבטן של החולה שקית פלסטית, שמכילה את תמיסת הדיאליזה. חלל הבטן מוקף בקרום חדיר למחצה שנקרא צֶפֶק, והוא מאפשר מעבר של חומרים בעלי משקל מולקולרי מסוים בלבד. תמיסת הדיאליזה חודרת אל חלל הבטן ומשם היא עוברת דרך הצפק אל נימי הדם. עודפי מים וחומרי פסולת יוצאים מן הדם, עוברים דרך הצפק ונכנסים אל השקית שנמצאת מחוץ לגוף. התהליך הזה מסתיים לאחר כחצי שעה ובסיומו יש להשליך את השקית. על התהליך יש לחזור כשלוש פעמים ביום. דיאליזה כזאת היא שיטה מאוד נוחה לחולה, אבל יש בה גם סיכון. הסכנה היא שיחד עם תמיסת הדיאליזה עלולים לחזור לחלל הבטן חיידקים שונים ולגרום דלקת.

השתלת כליה

הקושי שבטיפול ממושך בדיאליזה גורם לחולי כליות רבים לפנות לאפשרות של השתלת כליה. את הכליה שמיועדת להשתלה לוקחים מגופו של אדם בריא (בדרך כלל, בן משפחה) או מגופתו של אדם שנפטר, אשר כליותיו תקינות. לאחר סדרת בדיקות שקובעות שהכליה לא תידחה על ידי המערכת החיסונית של החולה, יש סיכוי טוב להצלחת ההשתלה.

ההיסטוריה של השתלות כליה

בשנת 1906 בוצעו בצרפת הניסיונות הראשונים להשתיל כליה בבני אדם. בניסיונות האלה השתילו כליית חזיר וכליית תיש בשתי נשים, שגססו עקב אי-ספיקת כליות סופנית. שתי ההשתלות נכשלו. ההשתלה הראשונה של כליית אדם בגופו של אדם חולה בוצעה ברוסיה ב-1933, וגם היא נכשלה. לראשונה, הצליחה השתלת כליה בבני אדם, בשנת 1954. הכליה נתרמה על ידי תאום זהה של החולה ונקלטה בגופו. בשנת 1959 בוצעה השתלת כליות בין תאומים בלתי זהים וגם היא הצליחה. פיתוח נושא סיווג הרקמות, ופיתוח תרופות מונעות דחייה, קידמו מאוד את טכניקות השתלת הכליות (ראו עמ' 269, 270).



בניתוח השתלת כליה מוכנסת הכליה הבריאה לאזור הבטן התחתונה, והיא מחוברת לכלי הדם (לווריד ולעורק) ולשלפוחית השתן. על מנת להקל על תהליך ההשתלה, לא מוציאים את הכליות החולות מן הגוף, והכליה החדשה אינה מושתלת במקום הכליות החולות, אלא ליד אחת הכליות. שיעור ההצלחות של השתלת כליה הוא גבוה מאוד. המושתלים חיים זמן ארוך יותר מן המטופלים בדיאליזה, ואיכות חייהם גבוהה יותר. חולה, שבגופו הושתלה כליה, צריך ליטול תרופות מונעות דחייה של השתל במשך כל ימי חייו.

כליה אנושית מתפקדת בגופם של עכברים

חולים רבים מחכים במשך זמן רב להשתלת כליה, עד שנמצא התורם המתאים להם. במקום להמתין זמן רב לתרומה של כליה "משומשת", ייתכן שיהיה אפשר לגדל רקמה חדשה של תאי כליה בגופם של מטופלים הזקוקים להשתלת כליה. השתלה כזו תפתור את בעיית המחסור החמור שקיים כיום בכול העולם, בתורמי כליה. מדענים בישראל איתרו בעוברים אנושיים, בני 7-8 שבועות, תאי גזע שמהווים שלב



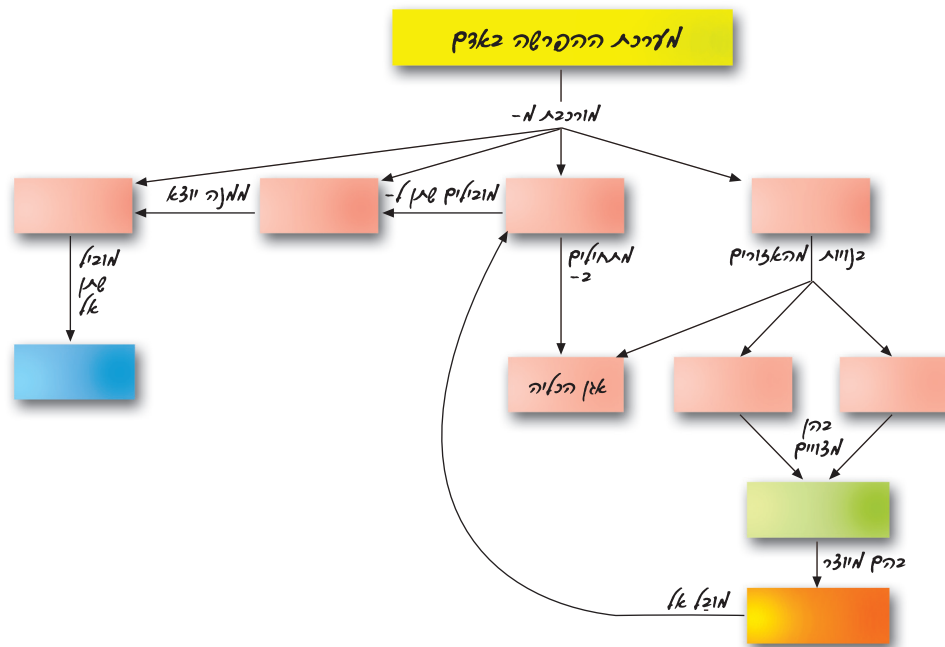
ראשון בהיווצרות כליה - תאים מקדימי כליה. את התאים האלה השתילו מתחת לכליה של עכברים. במשך 8 שבועות, התאים התמיינו והתפתחו לתאי כליה מתפקדים. התאים ייצרו שתן והתפתחו לכליות בגודל של כליית עכבר. כלי הדם של העכברים גדלו לתוך הכליות האלה וסיפקו להן את הדם הדרוש להתפתחותן ולפעולתן. השתלה כזאת הפחיתה במידה ניכרת את הסיכון של דחיית כליה מושתלת. הממצאים האלה רומזים על האפשרות שתאים מקדימי כליה יוכלו להתפתח וליצור כליה מתפקדת גם בגוף האדם.

סיכום

1. אדם קולט ומאבד ללא הפסק מים ומומסים, ומייצר ללא הפסק פסולת מטבולית. למרות התהליכים האלה, הנפח וההרכב של הדם נשארים קבועים למדי. מערכת ההפרשה תורמת לשמירה על יציבות הסביבה הפנימית על ידי פינוי החומרים המזיקים מן הגוף, ועל ידי איזון כמויות המים, היונים והמלחים בדם ובנוזל הבין-תאי.
2. האיברים המרכיבים את מערכת ההפרשה הם: כליות, צינורות מובילי שתן, שלפוחית שתן ושופכה. המערכת מסננת מן הדם את המים ואת המומסים, מחזירה לגוף את הכמויות הדרושות לשמירה על הרכב הדם ומפרישה את היתרה בנוזל השתן.
3. הכליות הן האיברים שמסננים את הדם והן מורכבות מנפרונים שבהם נוצר השתן.
4. השתן נוצר בנפרונים בשלושה תהליכים: (א) סינון מים שמכילים יונים ומולקולות קטנות מן הדם שבנימי הפקעית אל חלל קופסית באומן; (ב) ספיגה חוזרת של מרבית המים, ושל המולקולות הקטנות והיונים הדרושים לגוף, מאבובית הנפרון ומן הצינור המאסף לדם; (ג) הפרשה של חומרי פסולת מן הדם אל אבובית הנפרון.
5. מנגנוני בקרה הורמונליים קובעים את ריכוז השתן. ההורמון ADH מגביר את הספיגה החוזרת של המים מן הצינור המאסף, ומעלה את ריכוז השתן. ההורמון אלדוסטרון מפחית את ריכוז הנתרן והכלור בשתן ומעלה את ריכוז האשלגן.
6. פגיעה בתפקוד הכליות עלולה להיגרם כתוצאה מהצטברות "אבנים", כתגובה אוטואימונית, בגלל זיהומים, הרעלות, פציעות וגידולים סרטניים. מחלות במערכת ההפרשה משבשות את הרכב הדם ויכולות לגרום למוות.
7. ניתן להתמודד עם כשל בתפקוד הכליות באמצעות כליה מלאכותית (דיאליזה) או באמצעות השתלת כליה.

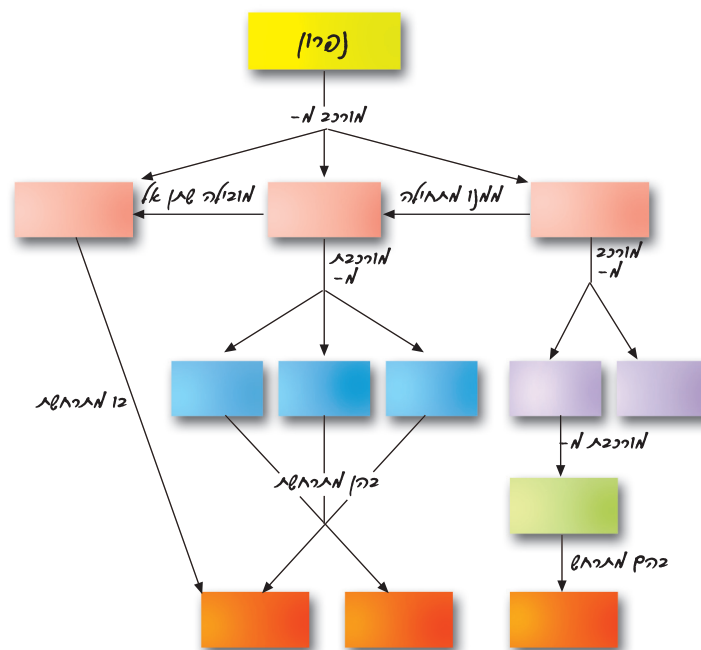


1. העתיקו את מפת המושגים שבאיור ג-17 והשלימו את המושגים החסרים בה, לסיכום מבנה מערכת ההפרשה באדם. היעזרו ברשימת המושגים הזאת: קליפת הכליה; שתן; צינור שופכה; ליבת הכליה; 2 צינורות מובילי שתן; מחוץ לגוף; 2 כליות; שלפוחית שתן; נפרונים.



איור ג-17: מבנה מערכת ההפרשה באדם

2. העתיקו את מפת המושגים שבאיור ג-18 והשלימו את המושגים החסרים בה, לסיכום המבנה והתפקוד של הנפרונים בכליות. היעזרו ברשימת המושגים הזאת: צינור מאסף; קופסית באומן; גופיף מלפגי; ספיגה חוזרת אל הדם; אבובית הנפרון; פקעית; לולאת הנלה; הפרשה מן הדם; כלי דם; אבובית מקורבת; אבובית מרוחקת; סינון מים ומומסים מן הדם.



איור ג-18: המבנה והתפקוד של הנפרונים בכליות

3. שטח הפנים של תאי האבובית המקורבת עשיר בסיסים (בליטות קטנות דמויות אצבע), ובתאים מצויים מיטוכונדריה רבים. הסבירו מהי חשיבותם של הסיסים ושל המיטוכונדריה לפעילות תאים אלה.

4. במקרים של לחץ דם גבוה או כאשר יש בצקות, נותנים לעתים לחולה תרופות משתנות, שגורמות להגדלת ייצור השתן על ידי הכליות. סוגים שונים של תרופות משתנות פועלים על חלקים שונים בנפרון ומשפיעים על תהליכים שונים בפעולת הכליה. הסבירו כיצד פועלות התרופות -

- א. בפקעית
- ב. באבובית המקורבת
- ג. בצינור המאסף.

5. בטבלה ג-4 נרשמו נתונים על ריכוז של 3 חומרים בפלסמה, בתסנין ובשתן.

טבלה ג-4: ריכוז חומרים בפלסמה, בתסנין ובשתן (גרם ב-100 מ"ל)

המרכיב	פלסמה	תסנין	שתן
חלבון	8.00	0	0
שתנן	0.03	0.03	2.00
גלוקוז	0.10	0.10	0

לפי הריכוזים של כל אחד מן החומרים בפלסמה, בתסנין ובשתן -

- אילו חומרים עברו סינון בפקעית ואלו חומרים לא עברו סינון? הסבירו.
- אילו חומרים נספגו חזרה לדם? הסבירו מהי החשיבות של הספיגה החוזרת שלהם.
- אילו חומרים הופרשו אקטיבית מן הדם לאבובית? הסבירו על סמך מה הגעתם לתשובה הזאת.

6. קבוצת אנשים (קבוצה א) שהתה במשך יממה בחדר שהיו בו תנאים מדבריים, וניתנה להם כמות מים מינימלית לשתייה. קבוצה אחרת של אנשים (קבוצה ב) שהתה בחדר שהיו בו תנאי סביבה רגילים, ואנשי הקבוצה שתו 20 כוסות מים ביממה. במשך היממה נאסף השתן מכל אחד מן הנבדקים והריכוז שלו נמדד. התוצאות הממוצעות שהתקבלו מובאות בטבלה ג-5.

טבלה ג-5: הכמות והריכוז הממוצע של שתן שנאסף ביממה משתי קבוצות אנשים

הקבוצה	נפח השתן (ליטר)	ריכוז השתן (מיליאוסמול)
א	0.5	1,200
ב	3.0	250

(מיליאוסמול - יחידה למדידת לחץ אוסמוטי)

- א. הסבירו את התהליכים שהתרחשו בכליות של אנשי קבוצה א.
- ב. הסבירו את התהליכים שהתרחשו בכליות של אנשי קבוצה ב.
- ג. איזה תפקוד של הכליות בא לידי ביטוי בניסוי הזה?
- ד. מהי החשיבות של התפקוד הזה?

7. יכולת ריכוז השתן של הפסמון (סוג של מכרסם) גבוהה יותר מיכולת ריכוז השתן של עכבר הבית.
- א. לאיזו סביבת מחייה מתאים הפסמון?
- ב. מהו, לדעתכם, ההבדל בין מבנה הכליות של הפסמון לבין מבנה הכליות של עכבר הבית?
8. יונקים מאבדים נוזלים גם דרך האוויר הנשף. האוויר הזה מתמלא אדי מים כשהוא עובר על פני השטחים הלחים של הריאות ושל דרכי הנשימה. כיצד תשפיע עלייה באוויר הריאתי על כמות השתן ועל ריכוזו?
9. האלכוהול מעכב הפרשת ADH. הסבירו מדוע אלכוהול יכול לגרום להתייבשות ולכאבי ראש.
10. ציינו באילו מן המצבים תגדל הפרשת ההורמון ADH לזרם הדם ונמקו את תשובתכם: (א) עלייה בנפח הדם; (ב) ירידה בנפח הדם; (ג) הזעה מוגברת; (ד) שתייה מרובה; (ה) פעילות גופנית.
11. הכינו תרשים זרימה שיתאר כיצד ADH מווסת את כמות המים שמופרשת בשתן לאחר שתייה מרובה.
12. אצל חולה שסובל מכשל כלייתי נמצא בשתן חלבון הפלסמה אלבומין.
 - א. איזה תהליך נפגע ואיזה אזור בכליות נפגע?
 - ב. איזו תופעה יכולה להתרחש כתוצאה מאיבוד אלבומין בשתן? הסבירו. (היעזרו בהסבר על סינון חומרים דרך נימי הדם בעמ' 53 ובהסבר על תפקידי מערכת הלימפה בעמ' 90).
13. למערכת הצינורות של מכשיר דיאליזה יש שטח פנים גדול. מה היתרון בכך?
14. מכשיר דיאליזה יכול לשמש גם כמכשיר לניקוי הדם מרעלים מסוימים שחדרו לתוכו.
 - א. הסבירו כיצד.
 - ב. עבור אילו רעלים טיפול כזה אינו מתאים?



היישום **פעולת הכליות** נמצא באתר האינטרנט

http://agribio.snunit.k12.il/main/upload/.ab/id_clayot.html

ביישום יש ניתוח מחקר על פעולת הכליות באדם. התלמידים מתבקשים לעבד נתוני מחקר מדעי בעזרת גיליון אלקטרוני ולהסיק מסקנות תוך התייחסות למרכיבי הניסוי המדעי.

פרק ד

ויסות טמפרטורת הגוף

ויסות טמפרטורת הגוף באדם ובבעלי חיים

טמפרטורת הסביבה הפנימית של הגוף (טמפרטורת הגוף) מושפעת מן הטמפרטורה שבסביבתו החיצונית של האורגניזם, וגם מן החום שמשתחרר בתאי גופו. טמפרטורת הגוף של כל היצורים החיים חייבת להישמר בטווח ערכים צר, משום שפעולות החיים תלויות בפעילות האנזימים, ואלה מתפקדים בטווח צר של טמפרטורות. שינויים קיצוניים בטמפרטורה עלולים לגרום לשינוי במבנה המרחבי של האנזימים ולשבש את פעולתם. שינויים בטמפרטורה יכולים להשפיע גם על קרום התא. בטמפרטורה נמוכה מדי, למשל, צמיגות הקרום משתנה, והוא הופך לחצי מוצק. במצב כזה עלולים להיווצר קרעים בקרום. בטמפרטורות גבוהות, עלולים להיפגע החלבונים שמרכיבים את הקרום והוא ייהרס.

לאמנונים המהונדסים לא קר

יש בעלי חיים שמסוגלים להתקיים גם בטמפרטורות נמוכות מאוד, למשל, דגים שחיים בקוטב. הדגים האלה אינם קופאים, למרות הטמפרטורה הנמוכה, הודות לגליקופרוטאין (סוכר מחובר לחלבון) שמצוי בגופם. עדיין לא ברור כיצד פועל הגליקופרוטאין, אך ייתכן שהוא שומר על המבנה של קרומי התאים בטמפרטורה נמוכה. הגנים, שאחראים לייצורו של הגליקופרוטאין בדגי הקוטב, הוחדרו בשיטות של הנדסה גנטית לדגי אמנון, שהיו רגישים לטמפרטורות נמוכות. הדגים המהונדסים נעשו עמידים לקרה. דגי אמנון משופרים כאלה אפשר לגדל בברכות פתוחות, גם במקומות שבהם הטמפרטורה יורדת בחורף לערכים נמוכים. הגנים מדגי הקוטב הוחדרו גם לעגבניות, וגם הן נעשו עמידות לקרה.



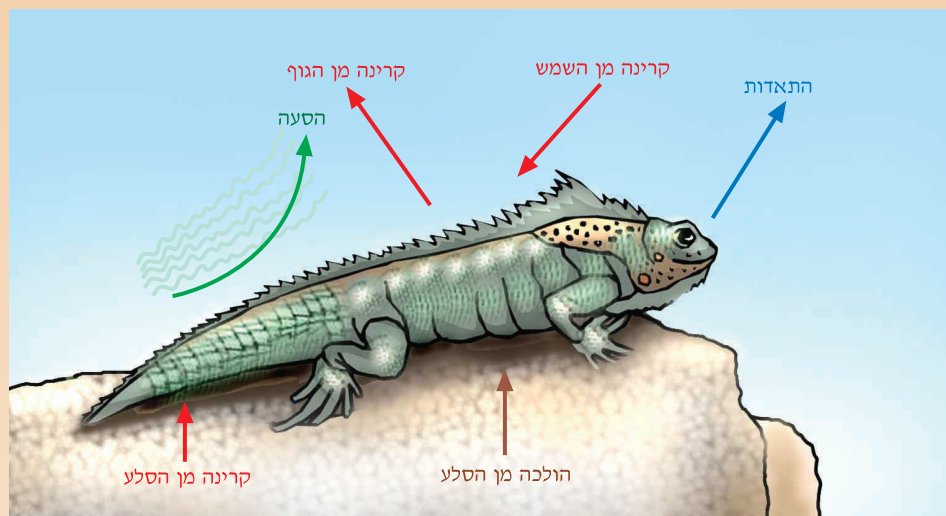
השמירה על טמפרטורת גוף, בטווח שמאפשר פעילויות חיים תקינות, היא אחת מהתופעות המבטאות את הנטייה הטבעית של כל יצור חי לשמור על סביבה פנימית יציבה. שלושה גורמים קובעים את טמפרטורת הגוף: (א) שחרור חום בתהליכי חילוף החומרים (מטבוליזם) המתקיימים בתאים (חום מטבולי); (ב) קליטת חום מן הסביבה; (ג) איבוד חום מן הגוף לסביבה. טמפרטורת הגוף נשארת יציבה כל עוד קיים איזון בין קצב הייצור והקליטה של החום לבין קצב איבוד החום לסביבה. במהלך האבולוציה התפתחו ביצורים חיים מנגנונים ששומרים על האיזון הזה.

הדרכים לחילוף חום בין הגוף לסביבה

העמקה



בין היצור החי לבין סביבתו מתרחשים מעברי חום (איבוד וקליטה) על ידי הפרשי הטמפרטורה שביניהם. הקליטה והאיבוד של החום מתרחשים על ידי חילופי חום במשטחים החיצוניים של הגוף, כמו העור. חילוף חום בין בעל חיים לסביבתו נעשה בארבעה תהליכים פיסיקליים: קרינה, הולכה, הסעה והתאדות (איור ד-1).



איור ד-1: חילופי חום בין הגוף לסביבה

קרינה היא פליטה של קרני אור באורכי גל שונים. הקרינה העיקרית שנפלטת ונקלטת בבעלי חיים היא קרינה תת-אדומה. כאשר הקרינה שנפלטת מגוף אחד נקלטת בגוף

אחר, היא מומרת לאנרגיית חום. הקרינה הישירה מן השמש, וכן זו המוחזרת מן העננים, מן הקרקע ומגופים אחרים, יכולה להגביר במידה משמעותית את כמות החום שקולט הגוף של בעל החיים. כמות החום שעוברת מגוף אחד לאחר תלויה בהפרש הטמפרטורות ביניהם. איבוד חום על ידי קרינה אופייני לבעלי חיים שעורם חשוף. הקרינה נפלטת מחלקים חשופים של הגוף ונבלעת על ידי עצמים שהטמפרטורה שלהם נמוכה יותר.

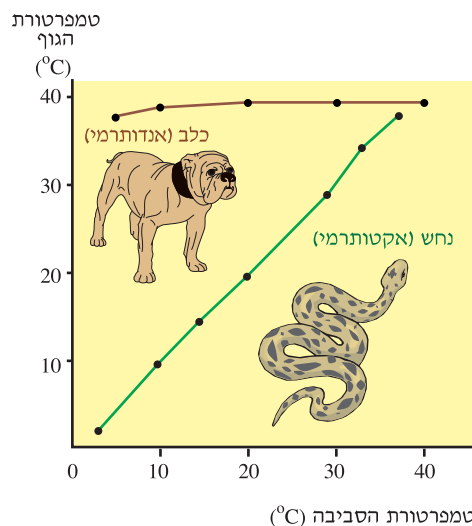
הולכה היא מעבר חום שמתרחש כאשר בעל חיים בא במגע ישיר עם סביבתו: עם מוצק, עם נוזל או עם גז. גם במקרה הזה, כיוון זרימת החום תלוי בהפרשי הטמפרטורה בין שטח הגוף לסביבה. בעלי חיים מאבדים חום כשהם באים במגע עם גופים בעלי טמפרטורה נמוכה יותר, והם קולטים חום בבואם במגע ישיר עם גופים בעלי טמפרטורה גבוהה יותר, כגון: חול חם. מאחר שהאוויר הוא מוליך חום גרוע, רק חלק קטן מן החום של בעלי חיים יבשתיים אובד בהולכה. המים, לעומת זאת, מוליכים חום ביעילות שגדולה פי 50-100 יותר מן האוויר, ולכן בעלי חיים ימיים מאבדים חום רב, יחסית, בהולכה.

הסעה היא העברת חום על ידי תנועת אוויר או מים. מפליטת חום הגוף של בעל החיים, מתחמם מעטה האוויר הדק שאופף אותו. משקלו הסגולי של מעטה האוויר הזה פוחת והוא נעשה קל יותר. האוויר מתרומם ומוחלף באוויר צפוף וקר יותר. לכן, עם הגדלת מהירות הרוח, גדל איבוד החום בהסעה. רוח ים, שמהירותה כ-2.5 מטרים בשנייה, משפיעה על טמפרטורת הגוף של בקר, למשל, כשם שמשפיעה ירידה של 14°C בטמפרטורת הסביבה. ההסעה היא גורם חשוב באיבוד חום אצל בעלי חיים יבשתיים. כל זמן שטמפרטורת הגוף גבוהה מזו של האוויר, קיימת הסעה של חום משטח הגוף אל האוויר שסביבו.

התאדות היא אמצעי לאיבוד חום מן הגוף על ידי הפיכה של נוזל לגז. תהליך הפיכת נוזל לגז דורש אנרגיית חום. מולקולות הנוזל המתאדות קולטות אנרגיית חום מן הגוף, ולפיכך הן מקררות את הגוף שממנו הן מתאדות. קצב ההתאדות תלוי בטמפרטורת האוויר, בלחות האוויר ובקצב תנועתו. אם האוויר הסמוך לגוף כבר רווי במים (לחות יחסית של 100%), לא יתאדו מים מן הגוף. אם האוויר חם ויבש, ההתאדות יכולה להיות הדרך היחידה להיפטר מעודפי חום. מים מתאדים מן הגוף מכל משטח לח, בדרך כלל - מן העור ומדרכי הנשימה.

בעלי חיים יבשתיים מושפעים מכל הדרכים של איבוד חום. בעלי חיים ימיים מושפעים מעט מאוד מקרינה ואינם מושפעים כלל מהתאדות.

מקורות החום של הגוף



איור ד-2: השפעת טמפרטורת הסביבה על טמפרטורת הגוף

טמפרטורת הגוף של בעלי חיים מקבוצות שונות מושפעת באופן שונה ממקורות חום פנימיים וחיצוניים. אצל רוב היצורים החיים (חסרי חוליות, דגים, דו-חיים וזוחלים), קצב חילוף החומרים נמוך יחסית והם מייצרים מעט חום מטבולי. חימום הגוף שלהם לטווח טמפרטורה שמאפשר פעילות תלוי במקורות חום חיצוניים (בדרך כלל, השמש), ולכן היצורים האלה נקראים **אֶקְטוֹתְרִמִּים** (ecto=חיצוני; therme=חום). ליצורים האקטותרמיים אין מנגנונים משוכללים לוויסות טמפרטורת הגוף; הם מתקשים לשמור על החום המטבולי שהם מייצרים, ובמצב של חימום יתר הם אינם יכולים להשתחרר באופן יעיל מעודף חום. כתוצאה מכך, היצורים האקטותרמיים הם בעלי טמפרטורת גוף משתנה והיא מושפעת משינויים בטמפרטורת הסביבה (איור ד-2). לכן הם נקראים גם **פּוִּיקִילוֹתְרִמִּים** (poikilos = משתנה; therme = חום). טמפרטורת הגוף של בעלי חיים אקטותרמיים נשמרת בטווח הרצוי הודות למנגנונים שמווסתים את חילופי החום בין בעל החיים לסביבתו. מאחר שביבשה תנודות הטמפרטורה קיצוניות יותר מאשר אלו שבמים, ויסות טמפרטורת הגוף קשה יותר לבעלי חיים אקטותרמיים יבשתיים (כמו: זוחלים), בהשוואה לבעלי חיים אקטותרמיים ימיים (כמו: דגים).

אצל העופות והיונקים, התהליכים המטבוליים שמתקיימים בתאי הגוף הם בקצב גבוה, ומן התאים משתחרר חום מטבולי רב שמספק די אנרגיה לחימום הגוף עד לטמפרטורה הרצויה. קצב התהליכים המטבוליים אצל בעלי החיים האלה גבוה הודות למחזור הדם הכפול ולתפקודו היעיל של הלב. שני הגורמים האלה מאפשרים אספקת חמצן יעילה לכל חלקי הגוף. המקור העיקרי של החום בעופות וביונקים הוא פנימי, ולכן הם נקראים **אֵנְדוֹתְרִמִּים** (endo=פנימי). אצל רוב האנדותרמיים התפתחו, במהלך האבולוציה, מנגנונים משוכללים לבקרה ולוויסות של טמפרטורת הגוף. המנגנונים האלה מאפשרים שמירה על טמפרטורת גוף קבועה, פחות או יותר, גם כאשר טמפרטורת הסביבה משתנה (איור ד-2), ולכן הם נקראים **הוֹמוֹתְרִמִּים** (homos = שווה). לרוב היונקים יש טמפרטורת גוף פנימית קבועה, בטווח של 36°C – 39°C ואצל רוב העופות בטווח של 40°C – 43°C . יש מינים אחדים של עופות ושל יונקים שהם **הֶטֶרוֹתְרִמִּים** (heteros = שונה). לפעמים טמפרטורת הגוף שלהם נתונה לתנודות, כמו אצל האקטותרמיים, ולפעמים הם מווסתים את טמפרטורת גופם כמו האנדותרמיים.

אנדותרמי או אקטותרמי – מה עדיף?

בעלי חיים אקטותרמיים לא יכולים לווסת את טמפרטורת הגוף, ולכן הם מוגבלים בסביבות המחיה שלהם, והם פעילים רק בשעות או בעונות שמתאימות לפעילות האנזימית שלהם. בעלי חיים אנדותרמיים, לעומתם, יכולים לשמור על טמפרטורת גוף שנחוצה לפעילות האנזימית שלהם, ולכן הם יכולים להיות פעילים ביום ולילה, בקיץ ובחורף, בסביבה חמה מאוד ובסביבה קרה מאוד.

ואולם, אליה וקוץ בה, כדי לשמור על טמפרטורת גוף מתאימה, האנדותרמים חייבים לאכול כמויות גדולות של מזון. בעל חיים אנדותרמי אוכל הרבה יותר בהשוואה לבעל חיים אקטותרמי בעל אותו משקל גוף. אכילה רבה חשובה במיוחד לבעלי חיים אנדותרמיים קטנים שחיים בסביבה קרה. כאשר תנאי הסביבה אינם מאפשרים להם מספיק מזון, חלק מבעלי החיים האנדותרמיים נכנסים למצב של חריפה (ראו עמ' 201, 202).

מנגנונים לוויסות טמפרטורת הגוף

במהלך האבולוציה התפתחו ביצורים מנגנונים מבניים, פיסיולוגיים והתנהגותיים, שמסייעים להם לווסת את טמפרטורת הגוף. המנגנונים לוויסות הטמפרטורה משפיעים על אחת מן הפעולות האלה: (א) ייצור חום בגוף; (ב) קליטת חום מן הסביבה; (ג) איבוד חום מן הגוף.

מנגנונים מבניים

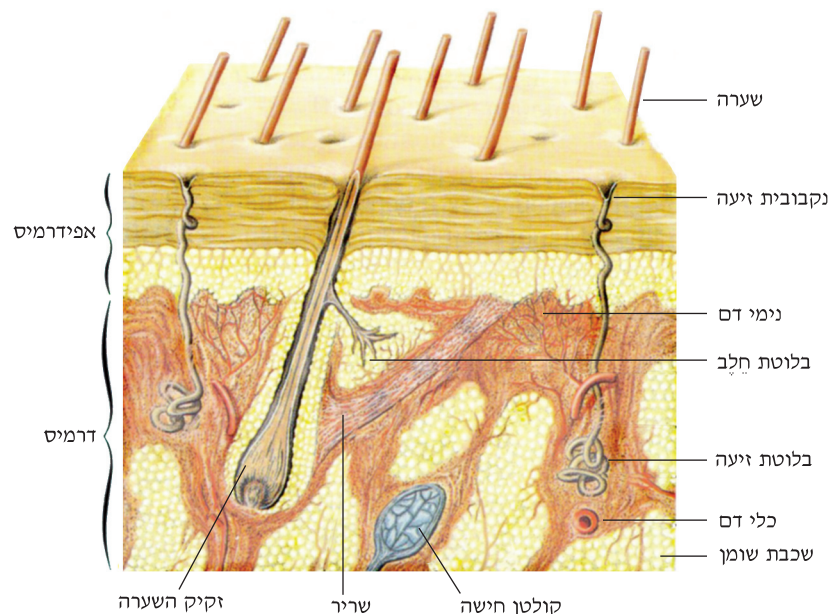
שכבת בידוד

שכבת בידוד היא שכבה שמפחיתה את איבוד החום מן הגוף לסביבה. שכבת בידוד מצויה אצל בעלי חיים אנדותרמיים מעל לעור או מתחת לעור, ואינה מצויה בבעלי חיים אקטותרמיים. שכבות בידוד כאלה הן הנוצות אצל העופות, והפרווה או השיער כמעט אצל כל היונקים. האוויר נלכד בין הנוצות או בין השערות, ומאחר שהוא מוליך חום גרוע, נוצרת שכבת בידוד יעילה על פני העור. כאשר האוויר קר, סומרות השערות אצל היונקים מכוסי הפרווה. השערות סומרות הודות להתכווצות שרירים שקשורים לבסיסי השערות ברקמת העור (איור ד-3). שכבת האוויר שלכודה בין השערות הסומרות גדלה, וכמות החום שנפלטת מן הגוף פוחתת. אצל יונקים מכוסי פרווה, שחיים בסביבה חמה, הפרווה דקה יותר והשערות נמצאות לרוב במצב "שכיבה" (איור ד-4). כתוצאה מכך, שכבת האוויר שמשמשת כבידוד

קטנה יותר, וכמות גדולה יותר של חום נפלטת מן הגוף. יונקים מסוימים, למשל זאבים, מחליפים את פרוות הקיץ הקצרה והדלילה בפרוות חורף ארוכה וצפופה. בפרוות החורף של הזאבים מצוי, בין השערות הארוכות, גם צמר רב.

בעופות וביונקים שמרבים לשהות במים, התפתחו מנגנונים ששומרים על חום גופם על ידי מניעת ההרטבה של הנוצות או השערות. כאשר הנוצות או השערות נרטבות, מתקיים תהליך של התאדות מים, שכרוך באיבוד חום מן הגוף (ראו עמ' 200). לעופות יש בלוטת שומן בבסיס הזנב. לפני שהם נכנסים למים הם טומנים את מקורם עמוק בין הנוצות שבבסיס הזנב, ואחר כך מעבירים אותו במהירות על פני גופם. בדרך זו הם משמנים את נוצותיהם ומונעים את הירטבותן. ליונקים יש בלוטות חלב שנמצאות סמוך לבסיסי השערות (איור ד-3). הבלוטות האלה מפרישות חלב שמשמן את השערה ודוחה ממנה מים.

מתחת לעורם של יונקים ושל עופות מים יש **שכבת שומן** (fat) שמשמשת כשכבת בידוד (איור ד-3). ליונקים שחיים בתנאי קור יש שכבת שומן עבה במיוחד. יעילות הבידוד של שכבת השומן נובעת מן העובדה שקצב הולכת החום בשומן נמוך פי 3 מקצב הולכת החום ברקמות אחרות. אורגניזמים אנדותרמיים, שחיים בתנאי חום, הם בעלי שכבות שומן דקות, ולכן החום מן הגוף יכול להשתחרר בקלות לסביבה.



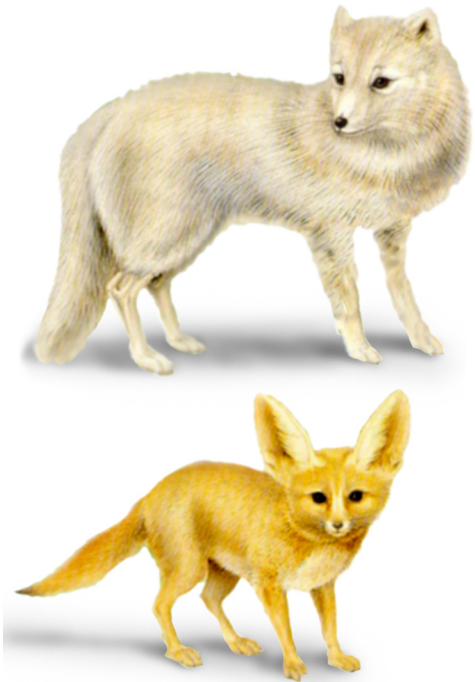
איור ד-3: חתך בעור של יונק

היחס בין שטח פני הגוף לבין הנפח שלו

בין היצור החי לבין סביבתו מתרחשים מעברי חום (איבוד וקליטה) על פי הפרשי הטמפרטורה שביניהם. חילופי החום בין הגוף לסביבה מתרחשים בשטח הפנים של הגוף. לכן, היחס בין שטח פני הגוף לבין הנפח שלו הוא גורם משמעותי בוויסות טמפרטורת הגוף. ככול ששטח הפנים של האורגניזם גדול יותר ביחס לנפח שלו, כך עובר יותר חום בינו ובין הסביבה. אצל בעלי חיים קטנים, שטח הפנים גדול יותר ביחס לנפח (ראו עמ' 11-13), ולכן הם מאבדים חום או קולטים חום במהירות רבה יותר, בהשוואה לבעלי חיים גדולים יותר. בעלי חיים אנדותרמיים, שחיים באזורים קרים, הם, בדרך כלל, גדולים יותר מבני סוגם שחיים באזורים חמים. יתרה מכך, האיברים שבולטים מגופם של אותם בעלי חיים אנדותרמיים (למשל, האוזניים) הם קטנים, וכך קטן שטח הפנים של הגוף ואיבוד החום לסביבה קטן (איור ד-4). תנוחות של התקפלות הגוף והתכרבלות מקטנות אף הן את שטח הפנים של הגוף ומפחיתות את איבוד החום.

הגדלת שטח הפנים של איברים חיצוניים מסייעת ליונקים שחיים בסביבה חמה מאוד לקרר את הגוף. איברים חיצוניים בולטים, כמו אוזניים, מגדילים את השטח שממנו יכול האורגניזם לפלוט חום. באיברים הבולטים יש גם רשת ענפה של כלי דם שמצויים מתחת לעור. הדם, שזורם בכלי הדם האלה, פולט את חומו אל הסביבה, ואל פנים הגוף חוזר דם קריר יותר. זוהי הסיבה שהגפיים והאוזניים של יונקי מדבר הן ארוכות יותר בהשוואה לבני אותו מין שחיים באזורים קרים יותר (איור ד-4).

בבעלי חיים אקטותרמיים מסוימים, שחיים באזורים חמים, שטחי המגע בין הגוף לבין הקרקע קטנים מאוד. כך פוחתת קליטת החום מן הקרקע. לחיפושית החולות, למשל, יש רגליים גבוהות, ורק אזור קטן בהן בא במגע עם החול הלוהט.



איור ד-4: התאמות מבניות לטמפרטורת הסביבה בשועל שלג (עליון) ובשועל מדבר (תחתון)

מנגנונים פיסיולוגיים

התאדות

התאדות היא הדרך העיקרית לצנן את הגוף אצל בעלי חיים אנדותרמיים ואקטותרמיים. מים מתאדים מן הגוף מכל משטח לה, בדרך כלל - מן העור ומדרכי הנשימה. התאדות המים צורכת חום, ומקורו של החום הוא באזור הסמוך למשטח ההתאדות. כתוצאה מההתאדות מתקרר אותו אזור, ודם שזורם משם אל תוך הגוף גורם לצינון הגוף.



איור ד-5: בוצ'י מקרר את גופו בהלחתה

אחת הדרכים לאדות מים מן הגוף היא באמצעות **הזעה**. חלק מן היונקים מצוידים ב**בלוטות זיעה** (sweat glands) (איור ד-3), בהן מצטברים מים שמקורם בנוזל הבין-תאי. המים האלה נפלטם דרך נקבוביות בעור יחד עם מומסים מסוימים. הגוף מאבד חום רק כאשר המים, שיצאו דרך הנקבוביות, מתאדים משטח פני העור אל הסביבה. דם שזורם מן האזור ה"מקרר" אל תוך הגוף מקרר את הגוף כולו.

דרך אחרת לאדות מים מן הגוף היא באמצעות **הלחתה** (panting). ההלחתה קיימת אצל בעלי חיים אנדותרמיים שאין להם בלוטות זיעה, כמו: עופות וכלבים, וגם אצל בעלי חיים אקטותרמיים מסוימים, כמו: לטאות. ההלחתה היא מנגנון לצינון הגוף שמבוסס על התאדות מים ממערכת הנשימה. ביום חם, בעלי החיים פוערים את פיותיהם, ומגבירים את קצב נשימתם. האוויר שנפלט מדרכי הנשימה, מלבד היותו חם יותר מן הסביבה, גם מכיל כמויות גדולה של אדי מים שיצירתם מצננת את הגוף. הכלבים משרבבים את לשונם החוצה בעת ההלחתה ובאופן כזה מגדילים את השטח שדרכו מתאדים המים (איור ד-5). אצל חרדון הצב הגדול, ההלחתה מונעת את עליית טמפרטורת הגוף מעל 43°C , שהיא הטמפרטורה הקריטית עבורו.

יש עוד דרכים לאידוי מים מן הגוף והן קיימות אצל יונקים, בעיקר טורפים, שאין להם מספיק בלוטות זיעה. חתולים מלקקים את פרוותם, וכך גורמים לאידוי מים משטח פני הגוף ולצינונו. פילים והיפופוטמים מתפלשים בבובץ או טובלים במים, במטרה להגדיל את האידוי משטח פני גופם ובכך להגדיל את איבוד החום מן הגוף.

ויסות קצב חילוף החומרים

ביצורים אנדותרמיים, קצב חילוף החומרים (המטבוליזם) גדול פי 10 עד פי 30 מזה שביצורים אקטותרמיים. קצב חילוף החומרים הגבוה של האנדותרמים מאפשר להם להיות פעילים בטווח רחב של טמפרטורות חיצוניות. טמפרטורת הגוף של העופות והיונקים כמעט תמיד גבוהה מטמפרטורת הסביבה, בשל קצב חילוף החומרים הגבוה שלהם. הגברת קצב חילוף החומרים אצל בעלי חיים אנדותרמיים היא אמצעי להעלאת טמפרטורת הגוף במצבים שבהם מספיק חימום מתון. התהליך הזה נתון לוויסות הורמונלי, אולם גם מערכת העצבים מעורבת בפיקוח.

הורדת קצב חילוף החומרים למינימום מאפשרת לבעלי חיים אנדותרמיים מסוימים להתמודד עם טמפרטורת סביבה נמוכה מאוד. בחורף, הפעילות של האורגניזם מינימלית וקצב חילוף החומרים מינימלי, ולמצב הזה קוראים **חריפה** (hibernation). במצב של חריפה, צריכת החום ואיבוד החום פוחתים למינימום. בדרך כלל, בעלי החיים שחורפים שוכנים

באזורי הקוטב. בעת החרیפה טמפרטורת הגוף צונחת מאוד, צריכת החמצן קטנה בצורה משמעותית וקצב הלב יורד מאוד. הדוב השחור, שחי בתנאים קשים של סביבה קרה, חורף שבעה חודשים בשנה. בחודשים האלה הוא אינו צורך כלל מזון או מים, ואינו מפריש שתן או צואה. הוא מנצל את מאגרי השומן שבגופו רק לשם ביצוע תהליכים שהכרחיים לקיומו, ולכן קצב חילוף החומרים בגופו יורד לחצי. למרות זאת, הדוב מצליח לשמור על טמפרטורת גוף קבועה, ולהישאר עירני במידה כזו שהוא יכול תוך זמן קצר, לצאת מהחריפה ולהגן על עצמו במקרה של התקפה. הדובים, הקיפודים, האוגרים וכמה מינים של עטלפים הם מבין היונקים שחורפים. יש גם מינים בודדים של עופות שחורפים. התופעה של חריפה קיימת גם אצל בעלי חיים אקטותרמיים. הנחשים בישראל, למשל, חורפים במשך שישה חודשים ומתעוררים לחיים פעילים רק באביב. דגים מסוימים קוברים את עצמם בקרקעית הים ושוקעים בחריפה. יש גם בעלי חיים שבהם רמת חילוף החומרים יורדת למינימום בקיץ (למשל, סנאי האדמה שחי במרכז אסיה), כדי למנוע התחממות יתר כאשר טמפרטורת הסביבה גבוהה מאוד.

פירוק שומן ברקמת השומן החום

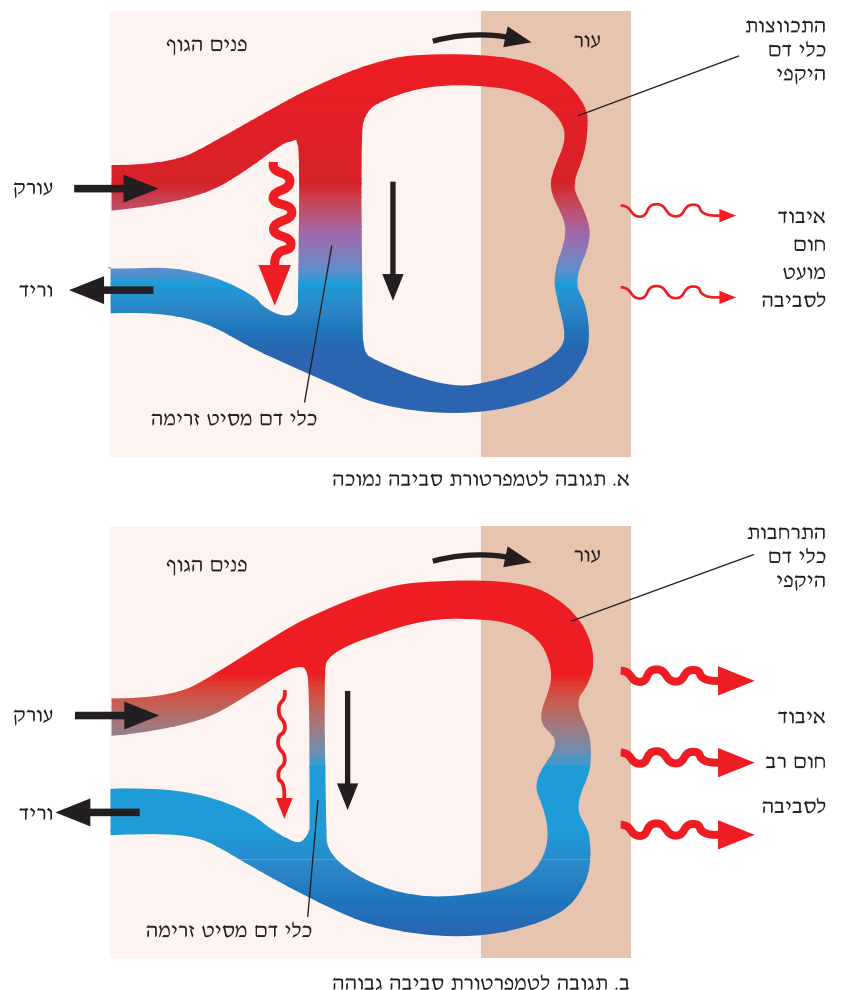
פירוק שומן ברקמת השומן החום הוא אמצעי לייצור חום, והוא קיים רק בקבוצות מסוימות של בעלי חיים אנדותרמיים. ולדות של יונקים מסוימים, ביניהן האדם, הקופים והמכרסמים, נולדים כשהם מצוידים בשכבות של שומן, שנקרא **שומן חום** (brown fat). השומן הזה מרוכז באזורים מסוימים של הגוף. צבעה החום של הרקמה נובע מן הכמות הגדולה של כלי הדם שעוברים דרך הרקמה ומן הריכוז הגבוה של המיטוכונדריה. בתאים של רקמת השומן החום יש ריכוז גדול במיוחד של טיפות שומן, בהשוואה לתאי רקמת שומן רגילה. טמפרטורה נמוכה מעודדת את הפעילות של אנזימים במיטוכונדריה, והם מחמצנים את מאגר השומן בקצב מהיר. תהליך הנשימה התאית, שמתרחש ברקמת השומן החום, שונה מעט מן התהליך שמתרחש בתאי הגוף האחרים. במיטוכונדריה של רקמת השומן החום נוצר בעיקר חום, ורק מעט ATP. החום הרב שנוצר בתהליך הזה נקלט בדם שזורם בכלי הדם הסמוכים, ומועבר לכל הגוף.

ויסות זרימת הדם לכלי דם היקפיים

חלק ניכר מחום הגוף אובד לסביבה דרך כלי דם היקפיים שנמצאים מתחת לעור. ויסות זרימת הדם לכלי הדם האלה הוא מנגנון פיסיולוגי שמסייע לבעלי חיים אנדותרמיים לווסת את איבוד החום לסביבה. בתגובה לטמפרטורת סביבה נמוכה, מערכת העצבים גורמת לכיווץ השרירים בדופנות כלי הדם ההיקפיים שמובילים דם אל האיברים והרקמות שקרובים לשטח הפנים החיצוני של הגוף (איור ד-6, א). כתוצאה מכך, יותר דם מוסט בעזרת כלי דם מיוחדים אל הוורידים. הוורידים מחזירים את הדם לאיברים פנימיים בגוף, וזרימת הדם לכלי הדם ההיקפיים פוחתת במידה ניכרת. באופן כזה, קטן איבוד החום מן העור אל הסביבה.

הרחבת כלי הדם ההיקפיים היא תגובתו הראשונה של הגוף לחימום יתר (איור ד-6, ב). הרחבת כלי הדם ההיקפיים מזרימה יותר דם לעור ולאיברים חיצוניים ופחות לאיברים פנימיים. הפעולה הזאת גורמת להעברה של חום מפנים הגוף אל היקפו ומשם אל הסביבה. ואולם, יעילותו של האמצעי הזה אינה גבוהה, בעיקר כאשר הסביבה יותר חמה מן הגוף, במידה ניכרת. במקרה כזה, אפשר לצנן את הגוף רק באמצעות אידוי מים.

יש גם בעלי חיים אקטותרמיים שיכולים לווסת את טמפרטורת הגוף על ידי כיווץ והרפייה של כלי דם. לטאות גדולות, כמו האיגואנה הימית מגלאפגוס, יכולות להעלות במהירות את טמפרטורת גופן, בבוקר, ולקררו לאט בערב, על ידי בקרה של מידת הכיווץ וההרפייה של כלי הדם ההיקפיים.



א. תגובה לטמפרטורת סביבה נמוכה

ב. תגובה לטמפרטורת סביבה גבוהה

זרם הדם →
העברת חום →

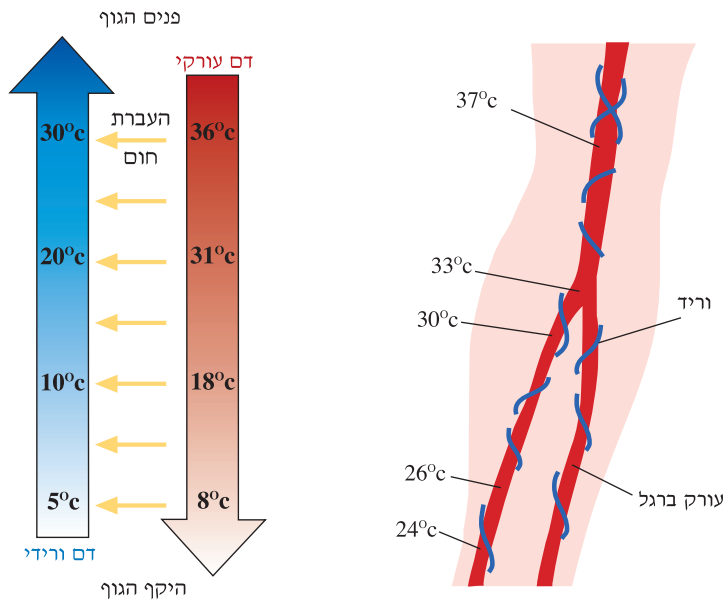
עובי החצים מראה את קצב הזרימה ואת כמות החום שעובר.

איור ד-6: ויסות זרימת הדם לעור בטמפרטורות סביבה שונות

חילוף חום בזרימה נגדית

חילוף חום בזרימה נגדית הוא מנגנון שמאפשר לשמור חום באיברים שאינם מצוידים באמצעי בידוד, למשל, רגלי העופות והיונקים שחיים בסביבה קרה. אל האיברים האלה מגיעה כמות גדולה של דם. אילו כל הדם הזה היה מתקרר וחוזר קר אל פנים הגוף, כמות החום שהגוף היה מאבד הייתה עצומה. ואולם, סידור מיוחד של כלי הדם באיברים החשופים מונע איבוד של חום רב. כלי הדם ערוכים כך שכל עורק מוקף ורידים (איור ד-7, א). כיוון זרימת הדם בעורקים מנוגד לכיוון זרימת הדם בוורידים, לכן החום עובר מן הדם שזורם בעורק, אל הדם שזורם בוורידים שמקיפים אותו. באופן כזה הדם הקר שבוורידים מתחמם בדרכו מן האיברים החשופים לפני שהוא חוזר לפנים הגוף (איור ד-7, ב). (על מנגנון הזרימה הנגדית במערכות אחרות ראו בעמ' 94, 98 ו-178)

גם בבעלי חיים אקטותרמיים מתרחש חילוף חום בזרימה נגדית, והוא מסייע בשמירה על טמפרטורת הגוף. הזרימה הנגדית מאפשרת לפזר את החום בכול הגוף, גם כשטמפרטורת הסביבה נמוכה. אצל דגי טונה וכרישים, למשל, החום המטבולי שמופק מפעילותם של שרירי השחייה מתפזר בגוף במנגנון של זרימה נגדית.



ב. החזרת חום לגוף במנגנון זרימה נגדית

א. סידור כלי הדם ברגל של אדם

איור ד-7: חילוף חום בזרימה נגדית

הפעלת שרירים

הפעלת השרירים משחררת חום מטבולי ומחממת את הגוף של בעלי חיים אנדותרמיים ואקטותרמיים. אצל בעלי חיים אנדותרמיים, שרירי הגוף מתחילים לרעוד בתגובה לטמפרטורה נמוכה, תופעה שידועה בשם **צמרמורת**. הרעד מופעל באופן בלתי רצוני, על ידי מערכת העצבים, והוא מגביר את ייצור החום פי 2 עד פי 5.

רבים מבעלי החיים האקטותרמיים המעופפים יוצרים חום פנימי על ידי הפעלת שרירי התעופה. אצל הפרפרים, למשל, כאשר טמפרטורת הגוף נמוכה, השרירים בכנפים לא יכולים להתכווץ במהירות מספיקה שתוכל לשאת אותם בזמן התעופה. כדי להעלות את טמפרטורת שרירי התעופה שלו, הפרפר מבצע התכווצויות מהירות וקצרות (בדומה לצמרמורת אצל אדם). כאשר הטמפרטורה באוויר היא 20°C , רטט כנפיים של 6 דקות מעלה את טמפרטורת השרירים ל- 35°C .

שינוי צבע הגוף

שינוי צבע הגוף הוא עוד אמצעי פיסיולוגי לויסות טמפרטורת הגוף בבעלי חיים אקטותרמיים מסוימים. למשל, ככול שצבע גופו של חרדון הצב כהה יותר, כך הוא קולט יותר חום. בבוקר צבעו אפור שחרחר, והודות לצבע הכהה הוא קולט חום וטמפרטורת גופו עולה ומאפשרת לו להיות פעיל. כאשר הוא ממשיך להתחמם, תאי הפיגמנט השחור מתכווצים, גופו נעשה אפור צהבהב וקצב התחממותו יורד. יש גם בעלי חיים אנדותרמיים שמשנים את צבעם באופן עונתי, בהתאם לאקלים הסביבה, למשל: האוגר הסיבירי.

מנגנונים התנהגותיים

שינוי מקום או שינוי תנוחה

שינוי מקום או שינוי תנוחה הם התגובות הטיפוסיות של היצורים האקטותרמיים לתנודות גדולות בטמפרטורת הסביבה (איור ד-8). ויסות התנהגותי כזה קיים אצל דגים, דו-חיים וזוחלים.

בעלי חיים אקטותרמיים "בוחרים" את מקום פעילותם ואת רמת פעילותם בהתאם לתנאים החיצוניים. למשל, כדי להתחמם, זוחלים חושפים את גופם לשמש בשעות היום בזווית כזו שקליטת הקרינה תהיה מרבית (איור ד-8, א). מדי פעם הם משנים את תנוחת גופם, כדי שחלק אחר משטח גופם יקלוט את קרינת השמש ויתחמם. הזוחלים רובצים על סלעים



א. הגברת קליטת הקרינה על ידי שינוי זווית התנוחה



ב. צמצום קליטת הקרינה על ידי שינוי זווית התנוחה



ג. קירור הגוף באמצעות הסתתרות בצל

איור ד-8: שינוי מקום או שינוי תנוחה של לטאה לויסות טמפרטורת הגוף

חמימים או על הקרקע וקולטים את החום שלהם. החום מועבר לחלקי הגוף הפנימיים באמצעות המגע שבין חלקי הגוף החמים יותר ובין החלקים הפחות חמים ובאמצעות מערכת ההובלה. כשטמפרטורת הסביבה יורדת, מתחילים האורגניזמים האקטותרמיים לאבד חום, והיכולת שלהם לברוח מטורפים קטנה. לכן, הם מזדחלים למקומות מסתור ששם איבוד החום נמוך יותר והסכנה מטורפים קטנה יותר. בימים חמים, כשטמפרטורת הגוף שלהם עולה לרמה שעלולה להזיק להם, הזוחלים משנים את תנוחת גופם כלפי השמש (איור ד-8, ב). כאשר הטמפרטורה ממשיכה לעלות, רבים מהם מסתתרים מפני קרינת השמש בצל (איור ד-8, ג), במחילות, בחורים או בנקיקי סלעים.

במדבר, המגע עם הקרקע החמה וקליטת החום מקרני השמש מסכנים את הזוחלים במידה רבה. לפיכך הם מנסים להתחמק ממגע עם הקרקע (איור ד-9, א, ג), מטפסים על שיחים או מתחפרים בחול (איור ד-9, ב). את עודפי החום בעלי החיים פולטים לסביבה, על ידי הידוק גופם אל האדמה הקרה, במקומות קרירים.

גם בבעלי חיים אנדותרמיים, שינוי מקום או שינוי תנוחה מסייעים לווסת את טמפרטורת הגוף. יש בעלי חיים אנדותרמיים שבתקופה החמה עוברים לחיות מתחת לפני הקרקע. בשעה לפני הקרקע במדבר עשויים להתחמם עד 70°C , הרי שבמחילה עמוקה של עכבר, הטמפרטורה עשויה להגיע רק עד 32°C . בסביבה חמה, יונקים רבים רובצים במקומות שבהם יש צל ורוח, פורסים את איבריהם, ובעלי אוזניים ארוכות זוקפים אותן, כדי לקרר את הדם שזורם בהם. עופות מצמידים את נוצותיהם לגופם ומרימים את כנפיהם כדי שיוכלו לפלוט חום מאזורי הגוף שאינם מכוסים נוצות (צדי הגוף, מתחת לכנפיים). באזורים קרים, בעלי חיים אנדותרמיים, כמו: הדובים הלבנים ושועלי השלג, חופרים מאורות בעומק מטרם אחדים לבידוד מן הרוחות.

פעילות בשעות הלילה

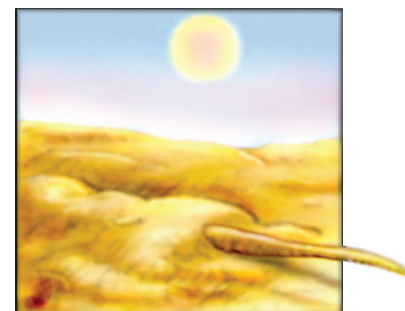
רוב היונקים, העופות, חלק מהזוחלים וכן חסרי חוליות רבים החיים במדבר, נמנעים מפעילות במשך שעות היום. בעלי חיים אלה מעדיפים את שעות הלילה, שהן שעות קרירות יחסית, כדי לצאת ולחפש מזון.

התקהלות

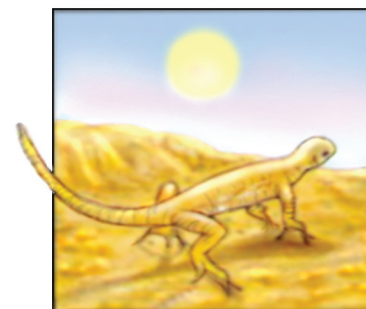
אורגניזמים אקטותרמיים שחיים בלהקות, למשל דבורים, מצטופפים לצורת כדור במהלך החורף, כך שהחום שנפלט מגופם, נשאר בסביבתם הקרובה ומחמם את האורגניזמים האחרים בלהקה. התנהגות דומה נצפתה אצל חיפושיות מדבריות בשעות הלילה. גם בעלי חיים אנדותרמיים מסוימים נוהגים להתקהל כדי לשמור על טמפרטורת הגוף.



א. הקטנת שטח המגע עם החול החם



ב. התחפרות בחול



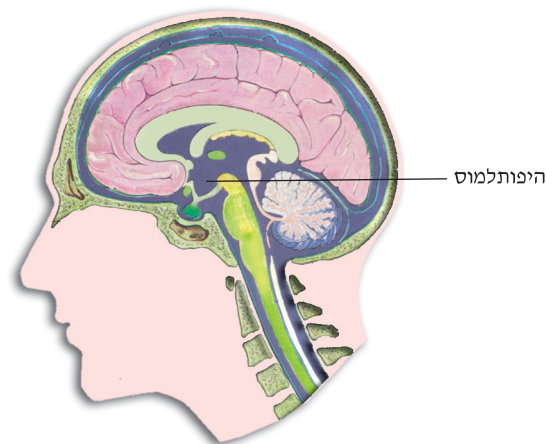
ג. הרחקת הגוף מן החול החם

איור ד-9: לטאה במדבר מתחמקת מחום החול

הפינגווינים הקיסריים, למשל, מתקהלים בלהקות ענקיות, עד 5,000 פרטים, כדי להתחמם יחדיו. הפרטים שמצויים בצד הקבוצה, שפונה אל הרוח, מתקררים מאוד. לכן, כעבור זמן מה הם נעים לעבר מרכז הקבוצה, ופרטים אחרים נשארים במקומם בשולי הלהקה. כך מתחלפים הפינגווינים במקומותיהם, ואף לא אחד מהם נשאר חשוף לאוויר קר זמן רב מדי.

בקרת ויסות הטמפרטורה בהומותרמיים

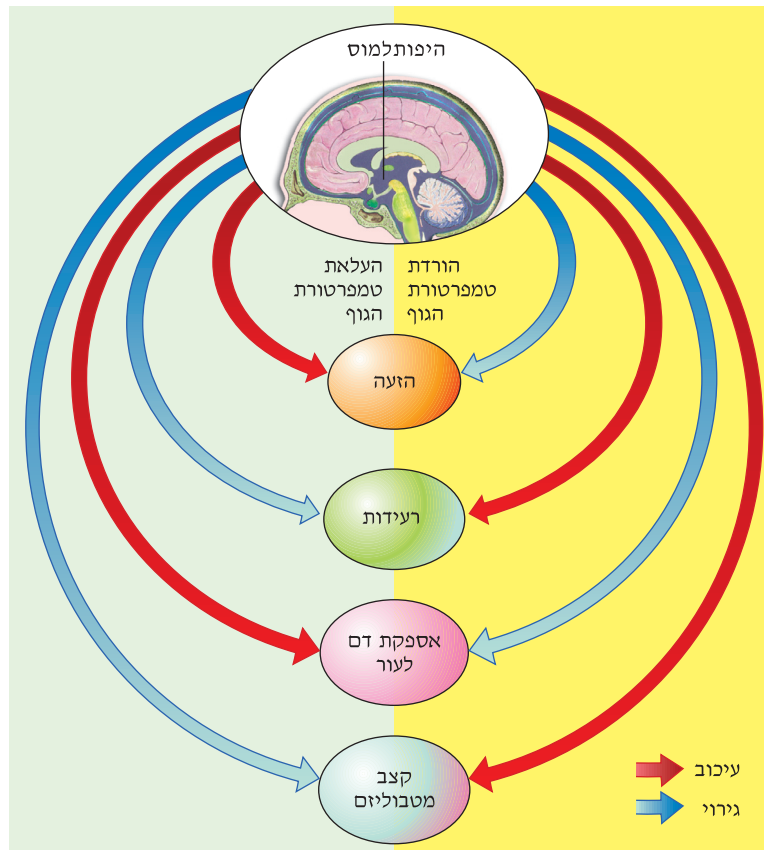
רוב העופות והיונקים הם יצורים אנדותרמיים-הומותרמיים. למרות שינויי הטמפרטורה החיצוניים, ולמרות שינויים בייצור החום הפנימי, טמפרטורת הגוף נשמרת קבועה (באדם, לדוגמה, בסביבות 37°C). שינויים קיצוניים מאוד בטמפרטורת הגוף משמעותם פגיעה בהומיאוסטאזיס, כלומר: ביכולת לשמור על סביבה פנימית יציבה. עליית טמפרטורת הגוף של האדם מעל 42°C נקראת **היפרתרמיה** (hyper = מעל ל-; therme = חום) וירידתה מתחת ל- 33°C נקראת **היפותרמיה** (hypo = מתחת ל-; therme = חום). בשני המצבים הקיצוניים האלה חלה הידרדרות מהירה של מערכות שונות בגוף, שעשויה להסתיים במוות תוך זמן קצר. מרכז בקרה אחראי לתיקון החריגות בטמפרטורת הגוף מן הטווח הרצוי. מרכז הבקרה של טמפרטורת הגוף באדם נמצא בבסיס המוח באזור שנקרא **היפותלמוס** (hypothalamus) (איור ד-10). ההיפותלמוס מהווה מרכז לעיבוד נתונים אודות הסביבה הפנימית והחיצונית והוא מתאם ומפעיל את המערכות בגוף שמוסרות את הטמפרטורה. גם לבעלי חיים הומותרמיים אחרים יש מרכז בקרה שפועל באופן דומה לזה של האדם.



איור ד-10: אזור ההיפותלמוס במוח

קירור הגוף באדם

טמפרטורת הגוף של האדם יכולה לעלות מעל הטמפרטורה המיטבית, עקב עלייה בטמפרטורת הסביבה או עקב הגברת הפעילות המטבולית בתאי הגוף. כתוצאה מכך, הדם מתחמם וכשהוא מגיע להיפותלמוס הוא חם יותר מן הרגיל. בהיפותלמוס, יש תאי חישה שמגיבים לשינוי בטמפרטורת הדם - הטמפרטורה הפנימית של הגוף. ההיפותלמוס מקבל מידע גם מתאי חישה שפזורים בעור, תאים שרגישים לשינויים בטמפרטורת הסביבה החיצונית. המידע שנקלט בתאי החישה עובר, באמצעות גירויים חשמליים בתאי עצב, אל ההיפותלמוס. בתגובה למידע הזה מופעלת מערכת העצבים האוטונומית (ראו עמ' 38) והיא גורמת לקירור הגוף בשלוש דרכים (איור ד-11).



איור ד-11: ויסות טמפרטורת הגוף באדם

א. הגברה של אספקת דם לעור על ידי הרחבת כלי דם היקפיים; עודף החום הפנימי של הגוף מובל בדם, ומשתחרר מן העור אל הסביבה (איור ד-6, ב).

ב. הגברת ההזעה; בלוטות הזיעה בעור מתחילות לפעול ומשתחררת זיעה. ההזעה היא האמצעי היחיד לאיבוד חום כאשר טמפרטורת הסביבה עולה על טמפרטורת הגוף. ואולם, כאשר האוויר החיצוני לח מאוד, תהליך האיבוד קטן או אף לא מתקיים כלל, והזיעה אינה מקררת. במצב כזה הזיעה נשארת על העור וגורמת אי-נוחות.

ג. ירידה בקצב חילוף החומרים; ההיפותלמוס גורם לירידה בייצור של ההורמון שנקרא טירוקסין. הטירוקסין מגביר את ייצור המיטוכונדריה בתאים, וכן את ייצורם של אנזימים רבים שמעורבים בתהליך הנשימה התאית. ירידה בייצור הטירוקסין מקטינה את קצב הנשימה התאית, ובעקבות זאת פוחת ייצור החום, שהוא תוצר לוואי של התהליך.

הפעולות האלה מורידות את טמפרטורת הגוף והיא חוזרת לרמתה הנורמלית. הירידה בטמפרטורת הגוף נקלטת על ידי תאי החישה, המידע מועבר להיפותלמוס וכתגובה נפסקות הפעולות שתוארו לעיל.

"מכת חום"



תאים בודדים או אורגניזמים שלמים סובלים מעקת חום (מכת חום) כשהם נחשפים לטמפרטורה גבוהה ב- $5-10^{\circ}\text{C}$ מהטמפרטורה המיטבית להם. עקת חום היא תגובה משותפת לכל עולם החי והצומח, מחיידקים ועד לאדם. עקת חום גורמת להאטה או להפסקה בייצורם של רבים מחלבונים התא, להרס של קרום התא ולשיבוש המבנה המרחבי של חלבונים ושל חומצות גרעין. על חשיפה לעקת חום, התא מגיב בייצור קבוצה אופיינית של חלבונים, שנקראים חלבוני עקת חום. לחלבונים האלה יש חשיבות בקיום ההומיאוסטאזיס של התא בתנאי עקה. הם מונעים שינויים במבנה התא ומסייעים לתא לחזור לתפקוד נורמלי. חלבוני עקת החום שייכים לקבוצת חלבונים שנקראים שְפֶּרֹנִים (chaperones, מלשון: מלווים-שומרים). השפרונים הם חלבונים יציבים מאוד. הם נצמדים לחלבונים ששרויים בסכנה של איבוד המבנה התקין שלהם, ומחזירים אותם למצבם המתפקד. כיום ברור, שבכול תא קיימים סוגים רבים של שפרונים שפועלים בצורות שונות ומגנים על התא הן במצבי עקה (טמפרטורה גבוהה או נמוכה) והן במצבים רגילים.

תאים בודדים ואף אורגניזמים יכולים לרכוש עמידות בפני עקת חום, על ידי חשיפתם המוקדמת לטמפרטורות גבוהות שאינן קיצוניות. בתנאים כאלה נוצרים בתאים חלבוני עקת חום, וכל עוד הם קיימים בתאים, התאים עמידים לעקה.

טמפרטורת גוף גבוהה – יתרון במצב מחלה



עלייה בטמפרטורת הגוף היא חלק מן התגובה הדלקתית של מערכת החיסון. התגובה הזאת מתפתחת עם חדירה של גורמי מחלה לגוף (ראו עמ' 235). במצב כזה, ההיפותלמוס "מכוון" את ה"תרמוסטט" שלו לטמפרטורה גבוהה יותר, ולא מפעיל מיד מנגנונים להורדת חום. להפך, ההיפותלמוס מפעיל מנגנונים שמגבירים את ייצור החום הפנימי ומפחיתים את איבוד החום, מכיוון שטמפרטורת גוף גבוהה מסייעת לגוף להתגבר על הפולשים. כאשר הגוף מתגבר על האיום שנשקף לו, ההיפותלמוס חוזר ל"כוון" את ה"תרמוסטט" שלו לטמפרטורה הרגילה. כלי הדם מתרחבים, ההזעה גוברת והחום יורד. לכן, תרופות שמורידות את טמפרטורת הגוף עלולות להאריך את תקופת ההחלמה, והן הכרחיות רק במצבים שהחום עולה לרמות מסוכנות.

חימום הגוף באדם

טמפרטורת הגוף יכולה לרדת מתחת לטמפרטורה המיטבית עקב ירידת הטמפרטורה בסביבה או עקב ירידה בפעילות המטבולית. במצב כזה, ההיפותלמוס מקבל מידע מתאי החישה על הירידה בטמפרטורת הגוף. באדם, ההיפותלמוס מגיב על ידי הפעלת התגובות האלה (איור ד-11):

א. הקטנה של אספקת דם לעור על ידי כיווץ כלי הדם ההיקפיים; זרימת הדם מופנית לאיברים פנימיים יותר ומונעת את איבוד החום מן הדם שזורם בשטחו החיצוני של הגוף (איור ד-6, א).

ב. רעידה של שרירים; רעידת שרירים בלתי רצונית (צמרמורת), שמופעלת כתגובה לסביבה קרה, יכולה ליצור חום רב שעולה פי 5 על ייצור החום הרגיל. החום שנוצר בפעילות כזאת מועבר לדם שזורם בשרירים, והדם מפזר את החום בכול הגוף.

ג. הגברת קצב חילוף החומרים; כאשר אדם נחשף לטמפרטורת סביבה קרה, ההיפותלמוס מקבל גירוי של ירידה בטמפרטורת הגוף, והוא מגביר את ההפרשה של ההורמון טירוקסין. עלייה ברמת הטירוקסין מגבירה את קצב חילוף החומרים בתאים ועל ידי כך משתחרר יותר חום.

ד. הגברת קצב הנשימה התאית ברקמת השומן החום; בתהליך הזה המיטוכונדריה המיוחדים של רקמת השומן החום מייצרים בעיקר חום ולא ATP, כמו שמייצרים המיטוכונדריה בתאים האחרים של הגוף. לאדם בוגר כמעט אין רקמת שומן חום, ולכן תהליך זה אינו מהווה גורם משמעותי בהעלאת טמפרטורת גופו. לתינוקות ולוולדות של יונקים אחרים,

יש רקמת שומן חום, ופירוקה מספק להם חום רב. תוספת חום זו חשובה לתינוקות משום שהם מתקשים לווסת את טמפרטורת גופם בדרכים אחרות. בעקבות הפעולות האלה, עולה טמפרטורת הגוף, וכאשר היא חוזרת לרמתה הנורמלית, ההיפותלמוס מפסיק את הפעולות שמעלות את טמפרטורת הגוף.

סיכום

1. השמירה על טמפרטורת גוף, בטווח שמאפשר פעילויות חיים תקינות, היא אחת מתופעות ההומיאוסטזיס. שמירת הטמפרטורה הפנימית של הגוף תלויה באיזון בין כמות החום שמיוצרת במטבוליזם ונקלטת מן הסביבה לבין כמות החום שנפלטת לסביבה.
2. רוב היצורים החיים (חסרי חוליות, דגים, דו-חיים וזוחלים), הם אקטותרמיים. בבעלי חיים אקטותרמיים, טמפרטורת הגוף תלויה יותר במקור חום חיצוני ובחילופי החום עם הסביבה, ופחות בחום שמיוצר במטבוליזם. רוב האקטותרמיים הם פויקילותרמיים - טמפרטורת גופם משתנה בהתאם לטמפרטורה החיצונית.
3. יונקים ועופות הם בעלי חיים אנדותרמיים. בבעלי חיים אנדותרמיים, טמפרטורת הגוף תלויה בעיקר במקור חום פנימי - בקצב חילוף החומרים. רוב האנדותרמיים הם הומותרמיים - טמפרטורת גופם קבועה ואינה תלויה בטמפרטורה החיצונית. מערכת בקרה מווסתת את טמפרטורת הגוף.
4. התאמות מבניות בגופם של בעלי חיים אנדותרמיים ואקטותרמיים מסייעות להם לווסת את טמפרטורת הגוף. התאמות כאלה הן: שכבת בידוד ויחס מתאים בין שטח הפנים של הגוף ובין הנפח שלו.
5. בעלי חיים אנדותרמיים ואקטותרמיים יכולים לווסת את טמפרטורת גופם גם באמצעות מנגנונים פיסיולוגיים, כמו: אידוי מים (בעיקר הזעה והלחחה), הפעלת שרירים (רעידה), זרימה נגדית בין עורקים לוורידים, שינוי קצב חילוף החומרים, פירוק שומן חום, ויסות זרימת הדם לכלי דם היקפיים ושינוי צבע הגוף.
6. בעלי חיים אקטותרמיים ואנדותרמיים מווסתים את טמפרטורת גופם גם באמצעות מנגנונים התנהגותיים, כמו: שינוי מקום או שינוי תנוחה, פעילות מוגבלת לשעות מתאימות והתקהלות.
7. באדם, המנגנונים העיקריים שמקררים את הגוף הם: הגברת זרימת הדם אל כלי דם היקפיים, הגברת ההזעה והורדת קצב חילוף החומרים. המנגנונים העיקריים שמחממים את הגוף הם: הקטנת זרימת הדם לכלי דם היקפיים, רעידה של השרירים והגברת קצב חילוף החומרים בתאי הגוף וברקמת השומן החום.

8. טמפרטורת הגוף באדם מבוקרת בבקרה עצבית והורמונלית. מרכז הבקרה נמצא בהיפותלמוס. ההיפותלמוס מקבל מידע על טמפרטורת הגוף באמצעות תאי חישה שנמצאים בהיפותלמוס עצמו ובאמצעות תאי חישה שמפוזרים בעור.



1. אחת הסיבות האפשריות לכך שהדינוזאורים נכחדו מכדור הארץ היא התחממות קיצונית באקלים. הסבירו את ההשערה הזאת.
2. מגוון המינים ומספר הפרטים של הזוחלים באזורים הטרופיים עולה בהרבה על אלה של היונקים. לעומת זאת, באזורים הסמוכים לקוטב מתקיימים עופות ויונקים ואין אף לטאה אחת. הסבירו מה הסיבה לכך.
3. בטבלה ד-1 יש נתונים על משקל הגוף, קצב פעימות הלב וצריכת החמצן של 7 בעלי חיים (יונקים).

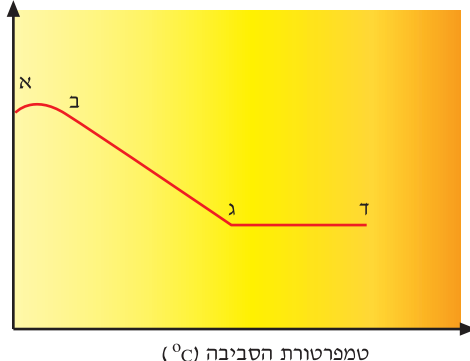
טבלה ד-1 : משקל הגוף, קצב פעימות הלב וצריכת החמצן ביונקים שונים

שם היונק	משקל הגוף (ק"ג)	מספר פעימות הלב (בדקה)	צריכת החמצן (מ"ל/גרם/שעה)
חולדה	0.3	326	0.91
ארנבת	3.1	205	0.51
כלב	15.5	105	0.34
אדם	67	72	0.24
חזיר	250	65	0.17
פרה	600	59	0.14
סוס	700	44	0.13

- א. צריכת החמצן מהווה מדד לקצב חילוף החומרים בבעלי חיים. הסבירו מדוע.
- ב. מה הקשר בין משקל הגוף לקצב חילוף החומרים? הסבירו.
- ג. מה הקשר בין משקל הגוף לקצב פעימות הלב? הסבירו.
- ד. הסבירו מדוע עופות ויונקים קטנים אינם יכולים לחיות באזורים קרים מאוד.

4. ציינו והסבירו כיצד כל אחת מן ההתאמות המבניות שמתוארות באיור ד-4 מסייעת לשועלים לשמור על טמפרטורת גופם. התייחסו בתשובתכם ל-3 התאמות שונות.
5. קראו בספרות או באינטרנט על התאמות שהתפתחו בבעלי חיים, שמאפשרות להם קיום בתנאים קיצוניים של טמפרטורה. תארו את ההתאמות (א) ביונק ימי שחי באזורים קרים (למשל: כלב ים); (ב) בעוף שחי בתנאי מדבר (למשל: בז שחור); (ג) בגמל. מיינו את ההתאמות של כל אורגניזם להתאמות מבניות, פיסיולוגיות והתנהגותיות.
6. ציינו מנגנונים התנהגותיים שמסייעים לאדם (א) למנוע עלייה בטמפרטורת הגוף; (ב) למנוע ירידה בטמפרטורת הגוף.
7. ביפן ובקוריאה, יש נשים שעובדות בשליית צדפות תוך צלילה במים קרים מאוד. בגופן של הנשים האלה יש שכבה עבה של שומן חום. הסבירו מדוע.
8. כאשר עוסקים בפעילות גופנית נמרצת, מרגישים חום, מזיעים יותר מהרגיל ולעתים, הפנים מאדימות. תארו את רצף התהליכים המתרחשים בגוף שגורמים לתופעות האלה.
9. כשחם מאוד, כדאי להרטיב את הפנים ולא לנגב אותם. הסבירו מדוע.
10. ביונקים, ההשפעה העיקרית על ויסות טמפרטורת הגוף מקורה בעור. תארו והסבירו.
11. איור ד-12 מתאר את ההשפעה של עליה בטמפרטורת הסביבה על קצב חילוף החומרים בבעל חיים. התבוננו בעקום וענו על השאלות האלה:
 - א. האם בעקום מתואר קצב חילוף החומרים של בעל חיים אקטותרמי או אנדותרמי? הסבירו.
 - ב. מה הן הסיבות לירידה בקצב חילוף החומרים בין הנקודות ב ו-ג.
 - ג. הסבירו מדוע קצב חילוף החומרים בין נקודות ג ו-ד נשאר קבוע.

קצב חילוף החומרים
(יחידות יחסיות)



איור ד-12: חילוף חומרים של בעל חיים בטמפרטורת סביבה משתנה

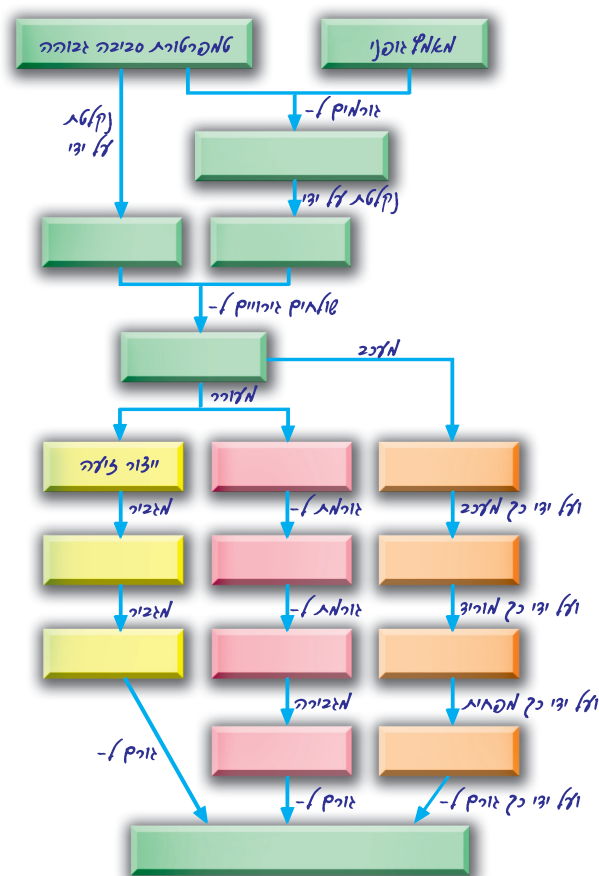
12. בטבלה ד-2 רשומים תהליכים שמוסתיים את טמפרטורת הגוף ביונקים. העתיקו את הטבלה וסמנו + במקומות המתאימים.

טבלה ד-2: תהליכים שמוסתיים את טמפרטורת הגוף ביונקים

תהליכים שמקטנינים את ייצור החום	תהליכים שמגדילים את ייצור החום	תהליכים שמקטנינים את איבוד החום	תהליכים שמגדילים את איבוד החום	תהליכים שמחממים את הגוף	תהליכים שמקררים את הגוף	
						עלייה בקצב חילוף החומרים
						ירידה בקצב חילוף החומרים
						הרחבת כלי הדם
						הצרת כלי הדם
						רעד השרירים
						הזעה
						הלחתה
						סימור השער
						פירוק השומן החום
						זרימה נגדית

13. העתיקו את מפת המושגים שמתארת את ויסות טמפרטורת הגוף באדם בטמפרטורות סביבה גבוהה (איור ד-13), והשלימו בה את המושגים החסרים. היעזרו ברשימת המושגים הזאת:

הגברת זרימת הדם בכלי דם היקפיים; הרפיית שרירים טבעתיים בדופן עורקיקים שבעור; חיישני טמפרטורה בעור; ייצור מיטוכונדריה ואנזימים של נשימה; ירידת טמפרטורת הגוף; היפותלמוס; ייצור טירוקסין; חיישני טמפרטורה בדם; ייצור חום; איבוד חום; עליית טמפרטורת הגוף; הרחבת העורקיקים בעור; אידוי מים; קצב חילוף החומרים. שימו לב! יש מושגים שיופיעו במפת המושגים יותר מפעם אחת.



איור ד-13: ויסות טמפרטורת הגוף באדם בטמפרטורת סביבה גבוהה

14. הכינו מפת מושגים שתתאר את ויסות טמפרטורת הגוף באדם בטמפרטורת סביבה נמוכה.

15. קראו את הקטע על עטלף החרקים והשיבו על השאלות.

מדוע עטלפי החרקים חורפים?

העטלפים הם היונקים המעופפים היחידים. העטלף הוא יונק קטן בעל שטח פנים גדול; לעטלף שמשקלו 7 גרמים, יש כנפיים ששטחם 220 סמ"ר! חילוף החומרים אצל יונקים קטנים הוא מהיר ונמרץ, וחילוף החומרים של העטלף נמרץ פי כמה, מפני שהתעופה צורכת אנרגיה רבה. עטלף שניזון מחרקים (איור ד-14) אוכל במשך הלילה חרקים שמשקלם בין רבע למחצית ממשקל גופו.

לעטלפים יש פרווה דקה וקצרה והיא אינה מבודדת אותם היטב מן הסביבה, כשם שמבודדת הפרווה הצמרית של יונקים אחרים. עם זאת, הפרווה שלהם מקנה להם יתרון משום שמשקלה נמוך, יחסית למשקל של פרוות אחרות. העטלפים גם אינם יכולים לעטות שומן רב כדי לבדוד את גופם, שכן עודף המשקל מכביד על התעופה.

קצב חילוף החומרים אצל העטלפים הקטנים, ובעיקר אצל עטלפי החרקים, משתנה לפי הפעילות וכך נחסכת אנרגיה. טמפרטורת הגוף של עטלף חרקים יכולה להגיע ל- 40°C וקצב הלב יכול להגיע ל-1,300 פעימות לב בדקה. קצב פעימות הלב אצל עטלף במצב מנוחה יורד ל-200 פעימות בדקה, וטמפרטורת הגוף יורדת ל- 15°C – 20°C . בחורף באזורים ממוזגים (גם בישראל), כשהטמפרטורה יורדת מתחת ל- 10°C , החרקים אינם פעילים, ולעטלפי החרקים אין מזון זמין. במצב כזה, העטלפים מתכנסים במערות קרות ולחות ונכנסים למצב של חריפה. המיקום במערה נבחר לפי הטמפרטורה ולפי מאגר השומן שאגר העטלף בסתיו. בחריפה, טמפרטורת גופו של העטלף יורדת עד כמה מעלות מעל האפס. מחזור הדם ההיקפי נסגר, תאי דם אדומים נאגרים בטחול ומספרם בדם מצטמצם. מספר פעימות הלב יורד ל-10 פעימות בדקה. אם בני אדם נכנסים למערה, העטלפים מתעוררים מן הקולות ומן האור, וצורכים במהירות רזרבות שומן, דבר שעלול להביא למותם. עטלף שמתעורר, מתחמם בקצב של מעלה אחת לדקה ויותר, ומזרים דם רב לרקמת השומן החום שמצויה בין השכמות בגב שלו. טמפרטורת גופו של עטלף יכולה לעלות מ- 12°C ל- 36°C בתוך רבע שעה! מכאן ברור, מדוע אסור להפריע לעטלפים החורפים במערה.

א. ציינו והסבירו את הקשיים של העטלף לווסת את טמפרטורת גופו בהשוואה ליונקים אחרים.

ב. מדוע העטלפים צורכים כמות גדולה של מזון? (ציינו שתי סיבות.)

ג. האם עטלף החרקים הוא הומותרמי או הטרוטרמי? הסבירו.

ד. כיצד משפיע קצב חילוף החומרים על טמפרטורת הגוף של עטלף החרקים? הסבירו.

- ה. במה שונה עטלף החרקים מרוב היונקים? איזה יתרון מקנה תכונה זו לעטלף? הסבירו.
- ו. ציינו את המנגנונים שבעזרתם מצליח עטלף החרקים לשרוד בתקופה של מחסור במזון. הסבירו את התרומה של כל מנגנון להישרדות העטלף.
- ז. תארו את התהליכים המתרחשים בגופו של עטלף החרקים שמתעורר מחריפה.
- ח. הסבירו את החשיבות של רקמת השומן החום לעטלף.



איור ד-14: עטלף החרקים (נשפון גדול)

ויסות טמפרטורת הגוף בעופות ובפרות

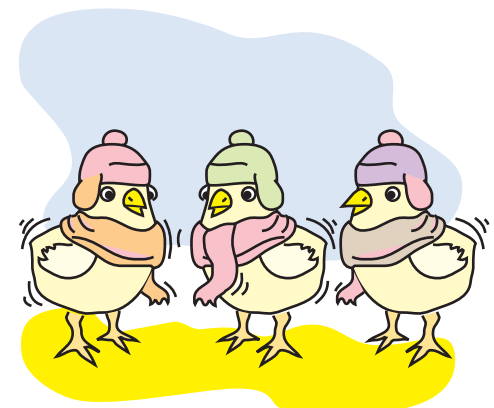
רוב בעלי החיים שהאדם מגדל במשק החקלאי הם בעלי חיים אנדותרמיים. האנרגיה שתאי הגוף שלהם מפיקים מן המזון מנוצלת הן לתהליכי החיים והן ליצירת תוצרים חקלאיים, כמו: חלב, בשר וביצים. הצורך של בעל החיים לשמור על טמפרטורת גוף קבועה גוזל אנרגיה רבה, ובמקרים רבים גורם להקטנת הייצור של התוצרים, שמשמשים את האדם. חקלאי שמגדל במשקו בעלי חיים מעוניין בתפוקה מרבית של תוצרים, ולכן עליו לדאוג שהתנאים הסביבתיים של בעלי החיים יהיו נוחים, ויאפשרו להם להשקיע אנרגיה רבה ככל האפשר ליצירת התוצרים.

השפעת טמפרטורת סביבה נמוכה על העופות

טמפרטורת הגוף של עופות הבית (תרנגולות) היא כ- 41°C . טמפרטורת הסביבה הרצויה לעופות בוגרים היא $22\text{--}27^{\circ}\text{C}$. כאשר טמפרטורת הסביבה יורדת מתחת ל- 7°C יש ירידה בקצב ההטלה ובקצב הגדילה. כל העופות, מלבד אפרוחים צעירים, מוגנים מפני טמפרטורות נמוכות על ידי הנוצות שעוטפות את גופם. הנוצות, יחד עם האוויר שכלוא ביניהן, מהווים שכבת בידוד מצוינת. את הפסדי החום הקטנים, דרך המעטה המבודד הזה, העופות מסוגלים לאזן על ידי הגברת ייצור החום בחילוף החומרים.

השילוב של טמפרטורות נמוכות ורוחות חזקות בחורף משפיע לרעה על כושר הייצור של העופות בעונת החורף. הרוח מפרידה בין הנוצות של העוף, והאוויר החם שכלוא בין הנוצות משתחרר לסביבה ואינו משמש יותר כשכבת בידוד. כתוצאה מכך הגוף מתקרר. יתר על כן, הרוח מגדילה את הסעת החום מן העופות וגורמת איבוד חום מן הגוף (ראו עמ' 196). בתנאים כאלה, צריכת המזון של העופות גדלה, והחום שמופק מן המזון מחמם את הגוף. אולם, במצבים קיצוניים גם החום שמופק מן המזון אינו מספיק, והגוף מתקרר עד כדי סכנת מוות. הארה מלאכותית של הלולים בלילה מפחיתה את ההשפעה השלילית של טמפרטורות נמוכות, מכיוון שהיא מעודדת את העופות לפעילות ולאכילה. האנרגיה שמופקת מן המזון מחממת את גוף העוף וכך גדלה יכולת ההישרדות שלו.

אפרוחים שבוקעים מסוגלים לווסת את טמפרטורת גופם רק בתחום צר מאוד של טמפרטורות סביבה. רק כשהאפרוח בן 5 ימים וכאשר משקל גופו עולה, משתנה היחס בין שטח הפנים לנפח, ומתאפשר ויסות טוב יותר. צמיחת הפלומה והנוצות עוזרת אף היא לוויסות הטמפרטורה. בימים הראשונים, האפרוחים זקוקים לטמפרטורה של $32\text{--}35^{\circ}\text{C}$ בסביבתם, ועל כן המגדלים



מחממים את בית האימון. הטמפרטורה של בית האימון מופחתת באופן הדרגתי, עד ל- 21°C בשבוע החמישי. לאחר שגוף האפרוחים מתכסה לגמרי בנוצות, אין הם זקוקים לחימום.

השפעת טמפרטורת סביבה גבוהה על העופות

בסוף חודש מאי 2003, הטמפרטורה בדרום הודו הגיעה ל- 47°C . כתוצאה מן חום הכבד ששרר במשך יומיים מתו 1.4 מיליון תרנגולות. ייצוא הביצים נפגע וירד מ-20 מיליון ביצים ל-12.5 מיליון בלבד. גם בישראל, כמה ימי שרב חמים מאוד גורמים תמותה של אלפי עופות, בעיקר בלולים שאינם מצוידים במערכות צינון מתאימות.

העופות מתחילים לסבול מחום, כשטמפרטורת הסביבה עולה מעל 28°C . בטמפרטורת סביבה גבוהה, מנגנונים שונים משחררים עודפי חום מן הגוף. זרימת הדם מופנית מאיברים פנימיים אל כלי הדם ההיקפיים. כלי הדם מתרחבים ברקמות ההיקפיות, למשל: בכרבות, בצוואר וברגליים, וחום רב מוקרן אל הסביבה (איור ד-6, ב). העוף גם פורס את כנפיו הרחק מגופו, וכך הוא מגדיל את שטח הפנים וחושף שטחי עור חסרי נוצות או דלים בנוצות, מהם משתחרר חום רב לסביבה. העוף צורך יותר מים ומתקרר באמצעות אידוי מים נשימתי (הלחתה). צריכת המזון, לעומת זאת, יורדת וייצור החום שנגרם על ידי פעילות האכילה והעיכול פוחת. העוף מנסה להקל על עצמו גם על ידי צמצום הפעילות הגופנית. בזמן עקת חום, העוף נח יותר, הוא עומד ללא תנועה, או רובץ ליד כלי המים או ליד הקירות של הלול.

בעומס חום רב, כאשר טמפרטורת הגוף עולה מעל 42°C , עולה במהירות קצב הנשימה של העוף. לעופות אין בלוטות זיעה והם מקררים את גופם על ידי הלחתה. בעת הלחתה, קצב הנשימה גדל, מקצב נורמלי של 20-30 נשימות בדקה לקצב של 200-350 נשימות בדקה. האצת הנשימה מגבירה את האידוי הנשימתי. אידוי מים בהלחתה מאפשר לעוף להיפטר מן החום, אך הוא דורש הפעלה של שרירים וצורך אנרגיה נוספת, מה שגורם לירידה בכמות האנרגיה הזמינה לגדילה. קצב הגדילה יורד בעקת חום גם משום שבתנאים כאלה העופות אוכלים פחות.

עקת חום פוגעת בקצב הגדילה של פטמים (תרנגולות המיועדות לייצור בשר), בשיעור ההטלה, בגודל הביצים, בחוזק קליפתן, ובפוריות התרנגולים. תמותת העופות והפגיעה בכושר הייצור גורמת הפסדים למגדלים. בעזרת ממשק מתאים, שמפחית מעומס החום, יכול החקלאי להגדיל את כושר הייצור של העופות ואת הרווחיות.

השפעת טמפרטורת סביבה גבוהה על הבקר

הפרות החולבות שמגדלים בישראל (גזע הולשטיין), מייצרות כמויות גדולות מאוד של חלב. ייצור החלב כרוך בייצור של חום מטבולי רב, ולכן בקיץ, הפרות סובלות מעומס חום. ייצור החום נמצא ביחס ישר לתנובת החלב, ולכן ההשפעה השלילית של החום גדולה יותר על פרות, ככול שתנובתן גבוהה יותר. נוסף לכך, הפרות החולבות מתקשות לשחרר חום לסביבה, בשל גודלן הרב.

כאשר טמפרטורת הסביבה גבוהה, מופעלים מנגנונים שונים שמסייעים לפרה לשמור על טמפרטורת גוף יציבה. המנגנונים הפיסיולוגיים כוללים: (א) הרחבה של כלי דם היקפיים; (ב) אידוי מים על ידי הלחתה או הזעה; (ג) הורדת ייצור החום המטבולי. התגובות ההתנהגותיות כוללות: (א) ירידה במשך זמן האכילה ובכמות המזון שנאכל; (ב) הארכת משך הזמן שבו מבלות הפרות בעמידה, עקב הלחתה והפניית מלוא שטח הגוף כלפי הרוח; (ג) שתייה מרובה יותר; (ד) חיפוש צל; (ה) מעבר לאכילה בלילה.

ואולם, כאשר עומס החום עולה מעל לטווח ערכים מסוים, המנגנונים האלה אינם יעילים עוד והפרה עלולה להגיע למצב של היפרתרמיה (עליית טמפרטורת הגוף). במצב כזה, התיאבון פוחת, צריכת המזון יורדת, ובעקבות זאת חלה ירידה בייצור החלב. עומס החום פוגע גם בפוריות הבקר, דבר שגורם גם כן לירידה בייצור החלב. נזקי החום הם אחת הבעיות הקשות שעומדות בפני הרפתנים בישראל.



השפעת עומס חום על תנובת החלב

בטמפרטורה גבוהה מ-25°C, הפרות החולבות שמגדלים בישראל מתחילות לסבול מעקת חום. עומס החום מדכא את ייצור החלב, ותנובת החלב של הפרות יורדת, וכן יורד אחוז השומן ואחוז החלבון בחלב. הירידה בייצור החלב מוסברת ברובה בצריכת מזון נמוכה. הדבר נגרם ישירות על ידי דיכוי התיאבון, אך גם בשל קצב מעבר איטי של המזון במערכת העיכול, דבר שמצמצם את הנפח הפנוי למזון חדש. גורמים נוספים לירידה בייצור החלב הם הפחתה בספיגת המזון ממערכת העיכול לגוף, וירידה בניצולת המזון לייצור חלב.

בגלל ההשפעה של עומס החום הקייצי על כושר ההנבה והרבייה של הפרות, נוצרת עונתיות בייצור החלב; ייצור החלב בחורף גבוה מייצור החלב בקיץ. ירידת ייצור החלב בקיץ מתרחשת דווקא כאשר הביקוש לחלב ומוצריו גובר, ויש צורך לנצל את עודפי חלב שמוצרים בחורף. כ-40 מיליון ליטר חלב שמוצרים בעודף בעונת החורף, מיובשים לאבקה ומשוחזרים בקיץ לשם הכללתם במוצרי החלב. עלות העברת ליטר חלב מן החורף אל הקיץ גבוהה במיוחד. יתרה מזאת, מוצרים שמוצרים בקיץ מחלב משוחזר נופלים באיכותם מאלה שמוצרים

מחלב טרי. העונתיות בייצור מייקרת את ייצור החלב בקיץ, פוגמת באיכות המוצרים וחושפת את משק החלב הישראלי לתחרות בתנאים של נחיתות איכותית וכלכלית. האינטרס של משק החלב בישראל הוא לספק חלב טרי במשך כל השנה, בהתאם לביקושי השוק. לכן, כל שיפור שמפחית את עומס החום על הבקר, הוא בעל ערך כלכלי רב.

השפעת עומס חום על הפוריות



באזורים בעלי אקלים חם, הפוריות של הפר (וגם של הפרה) פוחתת בחודשים החמים של השנה. את הירידה בפוריות מייחסים לטמפרטורות הגבוהות ששוררות בקיץ.

הייצור התקין של תאי הזרע בפר, מותנה בטמפרטורה מתאימה של האשכים. טמפרטורה זו נמוכה ב- $4-6^{\circ}\text{C}$ מן הטמפרטורה של הגוף. המנגנון העיקרי שמסייע לשמירת טמפרטורה נמוכה יותר באשכים הוא חילוף חום בזרימת דם נגדית, בין עורק האשכים לווריד האשכים. החום עובר מן העורק שמוביל דם לאשך אל הוורידים שמקיפים אותו, והדם שמגיע לאשך מתקרר ומונע את חימום האשך. זאת ועוד, בטמפרטורות סביבה גבוהה, השרירים של שק האשכים נרפים והאשכים מתרחקים מן הגוף. התהליך הזה משפר את איבוד החום אל הסביבה ומקטין את כמות החום שמגיעה אל שק האשכים.

ואולם, עם עליית טמפרטורת הסביבה, מנגנון חילוף החום מאבד מעילותו, והאשכים עלולים להתחמם מעל הטמפרטורה הקריטית של 36°C . במקרה כזה, נגרם נזק לתאי הזרע, צורתם משתנה ורבים מן התאים מתים. הנזק מתגלה בזרמה, כשבועיים מאוחר יותר, והוא נמשך כ-6 שבועות מתום חימום האשכים. חשיפה ממושכת לטמפרטורות גבוהות מאוד מאריכה את תקופת הנזק, כי במקרה כזה נפגעים שלבים מוקדמים של ייצור תאי הזרע. שהיית פרים בטמפרטורה ממושכת של $30-32^{\circ}\text{C}$ פוגעת בפוריותם. אם הטמפרטורה מגיעה ל- 40°C , גם חשיפה של 12 שעות פוגעת בתאי הזרע.

בימי הקיץ, באזורים חמים, נוהגים לקרר את הפרים כדי לשמור על פוריותם. הקירור מתבצע באמצעות אוורור או קילוח במים קרים, או באמצעות אוורור וקילוח במשולב. למחלות או לחיסונים, שגורמים לעליית הטמפרטורה של הגוף, יש השפעה דומה לזו של טמפרטורה חיצונית גבוהה. מקובל לא להשתמש במשך שבועות אחדים, בזרמה של פרים שעברו מחלה או חיסון.

תפקוד איברי הרבייה וכושר ההתעברות של פרות נפגעים גם הם בטמפרטורה גבוהה. חשיפת פרות לטמפרטורה גבוהה לאחר הזרעתן פוגעת בהתפתחות העובר, עד כדי מותו

של העובר. עליית טמפרטורת הגוף פוגעת גם בשחלות, והפרשת ההורמונים שנחוצים להתפתחות היריון תקין פוחתת. ירידה ברמת ההורמונים בדם גורמת, כנראה, גם לקיצור משך הייחום ולתופעות של היעדר ייחומים בטמפרטורות גבוהות. בחודשי ההיריון האחרונים, טמפרטורה של 38°C יכולה לגרום הפלה.

אמצעים להקלת עומס החום בלול וברפת

מגדלי העופות והבקר יכולים למנוע תמותה של בעלי החיים כאשר יש עומס חום, ולהגדיל את הייצור בקיץ. האמצעים לכך הם, בעיקר, (א) אוורור וקירור המבנה; (ב) קירור ישיר של בעלי החיים; (ג) הזנה מתאימה.

אוורור המבנה: בסביבות חמות ולחות, יש להקפיד על זרימת אוויר מספיקה בלולים וברפתות. בפעולת האוורור, האוויר החם והלח יוצא ואוויר קריר ויבש יותר נכנס מבחוץ. תנועת אוויר קר בסביבת חיות המשק מגבירה את איבוד החום מגופם אל האוויר שבסביבתם.

קירור המבנה: בידוד טוב של הגגות, הגבהת הגגות (איור ד-15) וסידור הגגות מפחיתים את החום בלול וברפת. גגות מולבנים מתחממים פחות מקרני השמש, כי הם מחזירים את רוב הקרינה ורק מיעוטה נבלע בהם. לולים ורפתות רבים מפעילים בעומס חום מערפלים, שמופעלים אוטומטית על פי החום שבמבנה. מתזי המים ממוקמים סמוך למאווררים, והערפל מתפזר במהירות ומקרר את האוויר. יש לולים ורפתות שמוסיפים גם משטח קירור (מזרון לח) ליד מערכת האוורור. התאדות המים מן המזרון הלח באמצעות המאווררים מצננת את המבנה.

קירור ישיר של בעלי החיים: ברפת, מקובל לצנן את הפרות על ידי שילוב של התזה ישירה של מים על הפרות (למשך 30 שניות) והפעלת מאווררים (למשך 4-5 דקות). הרטבת הפרה, ואידוי המים מגופה על ידי אוורור, גורמים איבוד חום מן הגוף בדומה לתהליך ההזעה. הקירור בדרך זו יעיל, בתנאי שהלחות היחסית באוויר נמוכה יותר. שיטה זו פותחה בישראל והיא נפוצה בארצות חמות רבות בעולם (איור ד-16).

גם בלול, בימי שרב, לא די באוורור הלול. בימי שרב, הדרך היחידה למנוע תמותה רבה היא להרטיב את העופות עצמם בעזרת מערכת המטרה מתאימה. תדירות ההפעלה תלויה בחומרת השרב.



איור ד-15: גג מוגבה ברפת



איור ד-16: צינן פרות בעזרת הרטבת הפרות והפעלת מאווררים

תזמון שעות ההאכלה: טמפרטורת הגוף של עופות עולה שעתיים לאחר האכילה. העברת שעת ההאכלה מן הבוקר לשעות אחר הצהריים או אף ללילה מקלה על העופות ועל הפרות. בשעות האלה, טמפרטורת הסביבה נמוכה יותר, ולבעלי החיים קל יותר להיפטר מעודפי החום שהצטברו בגופם כתוצאה מפירוק המזון. תזמון שעות ההאכלה בהתאם לשינויי הטמפרטורה במהלך היממה יכול לשפר את יכולת ההישרדות של בעלי החיים, אולם הוא פוגע בכושר הייצור שלהם.

הגדלת ריכוזיות המנה: עקת חום מפחיתה את כמות המזון שנצרך ולכן, בעיקר בעופות, רצוי להעלות את ריכוז הרכיבים במנת המזון. יש להעלות את תכולת האנרגיה יחד עם מרכיבים אחרים. רצוי ששומן יהיה מקור האנרגיה כי הוא מייצר פחות חום במהלך חילוף החומרים, בהשוואה לפחמימות. החלבון מייצר יותר חום במהלך העיכול שלו, בהשוואה לפחמימות ולשומנים, לפיכך יש להפחית את תכולת החלבון במזון.

טיפוח תכונות גנטיות: תכונות גנטיות שמקנות סבילות רבה יותר לחום, כגון: הפחתת כסות נוצות בעופות, מקטינות את הפגיעה שנגרמת על ידי עומס החום. תכונות כאלה יכולות להיות מאוד משמעותיות מבחינה כלכלית, במיוחד בארצות מתפתחות.

טיפול פטמים חסרי נוצות



צוות מחקר בפקולטה לחקלאות של האוניברסיטה העברית מפתח פטמים חסרי נוצות (איור ד-17). הפיתוח של פטמים חסרי נוצות מתבסס על מוטציה טבעית, שמונעת התפתחות נוצות כבר בשלב העוברי. פטמים הם תרנגולות המיועדות לייצור בשר. כדי לשפר את יעילות ייצור הבשר, טיפחו פטמים שתהליך הגדילה שלהם מהיר. ואולם בשל הגדילה המהירה נוצר חום רב בגופם של העופות. בפטמים הנמצאים בסביבה חמה, הנוצות מגבילות את קצב שחרור עודפי החום לסביבה, וכך הן גורמות לסבל, להאטת הגדילה ואף לתמותה. לעומת זאת, פטמים חסרי נוצות משתחררים בקלות מעודפי החום בגופם, גם כאשר טמפרטורות הסביבה גבוהות, וכתוצאה מכך קצב הגדילה של הפטמים האלה אינו נפגע. באזורים שבהם הטמפרטורות גבוהות, העדר נוצות הוא יתרון. אבל באזורים שבהם הטמפרטורות נמוכות (מתחת ל-20°C), פטמים חסרי נוצות סובלים. לפיכך פטמים חסרי נוצות מתאימים בעיקר לאזורים טרופיים, שבהם שורר אקלים חם באופן קבוע. עם זאת, הפטמים הרבים המאכלסים לול מסחרי יוצרים חום רב שנשמר בתוך הלול אם הוא סגור היטב. לפיכך, גם כאשר הטמפרטורה החיצונית נמוכה, אפשר לשמור בתוך הלול על טמפרטורה גבוהה המתאימה לפטמים חסרי נוצות.



איור ד-17: פטמים עירומים ופטמים רגילים

סיור בלול או ברפת - הכרת אמצעים לוויסות טמפרטורת הגוף בחיות המשק

צאו לסיור בלול או ברפת שבסביבתכם הקרובה. הצטיידו במחברת, בעיפרון, במד חום, במד לחות ובמצלמה.

1. היכנסו לתוך המבנה והסתכלו סביב. איזה סוג עופות או פרות מגדלים במבנה שבו אתם מבקרים?
2. מדדו את הטמפרטורה ואת הלחות בתוך המבנה. האם יש התאמה בין התנאים המיטביים לגידול בעלי החיים לבין התנאים ששוררים במבנה? פרטו.
3. ממה עשוי המבנה שבו אתם מבקרים? מה הם היתרונות ומה הם החסרונות של חומרי המבנה הנ"ל?
4. האם יש חלונות? האם יש מאווררים? מה תפקידם?
5. מה יכול לגרום לעליית הלחות בהיעדר אוורור? מדוע לחות גבוהה מדיי איננה רצויה?
6. בררו אצל הממונה על הלול או הרפת, באילו אמצעים מצננים את המבנה ואת בעלי החיים בימים של עומס חום. רשמו את אמצעי הצינון השונים, תארו ומיינו אותם

- (א) לאמצעים שקשורים במבנה; (ב) לאמצעים שקשורים בהתנהגות בעלי החיים; (ג) לאמצעים שקשורים בהזנת בעלי החיים.
7. צרפו צילומים שמתארים את האמצעים לצינון המבנה ולצינון בעלי החיים.
8. צאו מן המבנה ותארו את סביבתו. האם אתם מבחינים באמצעים נוספים שתורמים לצינון בימי שרב? תארו והסבירו.
9. אם אתם מבקרים במבנה מבוקר, תארו את העקרונות של תפעול הטמפרטורה, הלחות והאור במבנה.

סיכום

1. בעלי החיים שהאדם מגדל במשק החקלאי (יונקים ועופות) הם בעלי חיים אנדותרמיים.
2. עופות צעירים קטנים, ששטח פני הגוף שלהם גדול ביחס לנפח שלהם, וכאלה שעדיין לא פיתחו נוצות, רגישים לקור יותר מעופות בוגרים וגדולים.
3. בטמפרטורות סביבה נמוכות שמשולבות עם רוח, העופות מתקררים וחלה ירידה בקצב ההטלה ובקצב הגדילה. הארת הלולים בלילות קרים מעודדת את העופות לנוע ולאכול, ומסייעת לחימום גופם כתוצאה מעלייה בקצב חילוף החומרים.
4. בטמפרטורת סביבה גבוהה, העופות מווסתים את חום גופם באמצעות (א) הלחתה; (ב) הזרמת דם לרקמות היקפיות; (ג) שינוי תנוחה; (ד) הגברת צריכת המים; (ה) צמצום צריכת המזון; (ו) צמצום הפעילות הגופנית.
5. טמפרטורת סביבה גבוהה פוגעת בקצב הגידול של העופות, בכמות הביצים המוטלות, בגודל הביצים, בחוזק קליפתן ובפוריות התרנגולות. עומס חום קיצוני עלול לגרום תמותה של עופות.
6. בטמפרטורת סביבה גבוהה, הפרות מווסתות את חום גופן באמצעות (א) הלחתה או הזעה; (ב) הזרמת דם לרקמות היקפיות; (ג) שינוי מקום ותנוחה; (ד) הגברת צריכת המים; (ה) צמצום צריכת המזון ומעבר לאכילה בשעות קרירות; (ו) הפחתת ייצור החום.
7. עומס חום פוגע בכושר הייצור של הבקר (חלב או בשר) ופוגע בפוריות של הפר ושל הפרה. בישראל יש עודף של ייצור חלב בחורף ומחסור בקיץ. העונתיות בייצור החלב פוגעת ברווחיות של יצרני החלב, פוגמת באיכות המוצרים של הקיץ וחושפת את משק החלב הישראלי לתחרות בעונת הקיץ.
8. בעונות החמות החקלאים נוקטים שיטות שונות כדי לצנן את העופות והפרות. (א) מקררים באופן ישיר את בעלי החיים על ידי התזה ואוורור; (ב) מקררים את המבנים על ידי אוורור, בידוד, ערפול, סידוד והגבהת גגות; (ג) מקטינים את ייצור החום המטבולי בשעות החום, על ידי שינוי שעות ההאכלה ועל ידי שינוי הרכב המזון.



1. ככל שמתקדם תהליך הטיפול של הפטמים לגדילה מהירה ותפוקת בשר גבוהה, כך צריכים המגדלים להשקיע משאבים רבים יותר בצינון ואוורור הלולים. הסבירו מדוע.
2. דרגו את הפרות שברשימה לפי מידת הקושי שלהן לשמור על טמפרטורת גוף קבועה, בתנאים של עומס חום: עגלה, פרה שאינה בהיריון, פרה הרה חולבת, פרה חולבת. הסבירו את הדירוג.
3. לא תמיד מזון עשיר בקלוריות מגדיל את משקל הגוף של העגלות. הסבירו מתי יעדיף החקלאי להאכיל את העגלות במזון עשיר בקלוריות, ומתי יסתפק במזון דל בקלוריות.
4. כיצד ניתן להקטין באופן מידי את ייצור החום הפנימי בבקר, כאשר יש חשש מהיווצרות תנאי עומס חום קטלניים?
5. בלול לגידול תרנגולי הודו לבשר, גידלו אפרוחים זכרים במשך 4 שבועות בשיטות המקובלות. בשבוע החמישי חולקו העופות ל-3 קבוצות טיפול, כאשר כל קבוצה גדלה בטמפרטורה אחרת: 15°C ; 25°C ; 35°C . אחת לשבוע, במשך 3 שבועות, החוקרים ביצעו את הפעולות האלה: (א) שקלו את העופות; (ב) שקלו את המזון; (ג) מדדו את טמפרטורת הגוף; (ד) מדדו את טמפרטורת העור מתחת לכנף; (ה) לקחו דם מווריד הכנף לבדיקות שונות. תוצאות הניסוי מובאות בטבלה ד-3.

טבלה ד-3: השפעת טמפרטורות סביבה שונות על תרנגולי הודו (בני 5-8 שבועות)

טמפרטורת הסביבה			המדד
35°C	25°C	15°C	
1,737	2,159	2,126	תוספת משקל הגוף ב-3 שבועות (בגרמים)
3,158	3,951	4,667	צריכת המזון ב-3 שבועות (בגרמים)
41.05	40.74	40.73	טמפרטורת הגוף ($^{\circ}\text{C}$)
40.48	39.55	39.31	טמפרטורת העור ($^{\circ}\text{C}$)
27.1	30.0	34.7	המטוקריט* (%)
954	1,732	2,306	T_3^{**} (pg/ml)
29.52	39.85	40.53	לחץ CO_2 בדם (מ"מ כספית)

* המטוקריט - נפח תאי הדם האדומים בדם; מבוטא כאחוז מן הנפח הכולל של הדם.

** T_3 - ההורמון טרי-יודו-טירונין שמזרז את הפעילות המטבולית בגוף.

- היעזרו בתוצאות הניסוי וענו על השאלות האלה:
- הסבירו כיצד בדקו החוקרים את כושר הייצור של תרנגולי ההודו.
 - מהי ההשפעה של טמפרטורת הסביבה על כושר הייצור של תרנגולי ההודו? הסבירו.
 - באיזו טמפרטורה כדאי לגדל תרנגולי הודו? הסבירו.
 - תארו והסבירו את ההשפעה של טמפרטורת הסביבה על צריכת המזון.
 - החוקרים הסיקו שלתרנגולי הודו יש יכולת טובה לוויסות טמפרטורת גופם. על סמך מה הם הסיקו את המסקנה הזאת?
 - על פי תוצאות הניסוי, כיצד נעשה ויסות טמפרטורת הגוף של תרנגולי ההודו? הסבירו.
 - מה ניתן ללמוד מתוצאות המדידה של אחוז ההמטוקריט בדם, וכיצד קשורות התוצאות האלה לוויסות טמפרטורת הגוף בתרנגולי הודו?
 - כיצד ניתן ללמוד שבטמפרטורה הגבוהה פעל מנגנון ההלחתה? הסבירו.
 - חוקרים בדקו בעופות מטילות את קצב זרימת הדם באיברים שונים, בשתי טמפרטורות סביבה שונות. תוצאות הבדיקה מוצגות בטבלה ד-4.

טבלה ד-4: השפעת שתי טמפרטורות סביבה על קצב זרימת הדם באיברים שונים של מטילות

קצב זרימת הדם בטמפ' סביבה של 34°C (מ"ל/דקה/גרם)	קצב זרימת הדם בטמפ' סביבה של 20°C (מ"ל/דקה/גרם)	האיבר
1.4	0.4	קנה הנשימה
0.18	0.1	עור הגב
0.65	0.09	עור הבטן
1.8	2.9	מעיים
1.75	0.35	לשון
0.7	0.2	כרבולת

- עיינו בתוצאות והשיבו על השאלות האלה:
- באילו איברים עלה קצב זרימת הדם בטמפרטורה הגבוהה? הסבירו מדוע.
 - באילו איברים ירד קצב זרימת הדם בטמפרטורה הגבוהה? הסבירו מדוע.
 - אילו מנגנוני קירור פעלו בעופות? הסבירו כיצד אתם מסיקים זאת מן התוצאות.
 - האם העוף מאבד יותר חום מן הגב או מן הבטן? הסבירו מה יכולה להיות הסיבה לכך.
 - לולנים התלבטו היכן למקם את מערכת ההמטרה להרטבת העופות בימי שרב - מעל העופות או מתחת לעופות. מה הייתם ממליצים על סמך תוצאות הבדיקה? הסבירו מדוע.

7. בניסוי שנערך בדקו אם כדאי להמליץ לרפתנים להנהיג "צינון אינטנסיבי" בקיץ. בניסוי השוו את התנובה ואת ההתעברות של הפרות בשני סוגי רפתות באזור החוף: בקבוצה אחת של רפתות (קבוצה א') הפעילו צינון אינטנסיבי בקיץ, ואילו בקבוצה השנייה של הרפתות (קבוצה ב') לא הפעילו את האמצעי הזה. התנובות השנתיות של שתי הקבוצות היו דומות. במטרה לבדוק את תרומת הצינון בקיץ נערכה גם השוואה של ביצועי ההנבה וההתעברות של הפרות בקיץ לביצועי הפרות באותן רפתות בחורף. הצינון האינטנסיבי כלל 8-10 צינונים ביממה, שמשלבים הרטבה ואוורור בחצר ההמתנה ובאזור האבוס, כאשר משך הצינון הכולל נע בין 6 ל-8 שעות ביממה. במשקים שלא ציננו צינון אינטנסיבי הפעילו הרטבה, עם או בלי אוורור, רק בחצר ההמתנה ורק לפני החליבות. השוואת ביצועי ההנבה כללה את התנובות החודשיות הממוצעות. השוואת ביצועי הרבייה כללה השוואה של שיעור ההתעברות לאחר הזרעה ראשונה. תוצאות הניסוי מובאות בטבלה ד-5.

טבלה ד-5: השפעת צינון אינטנסיבי על תנובת החלב והתעברות הפרות

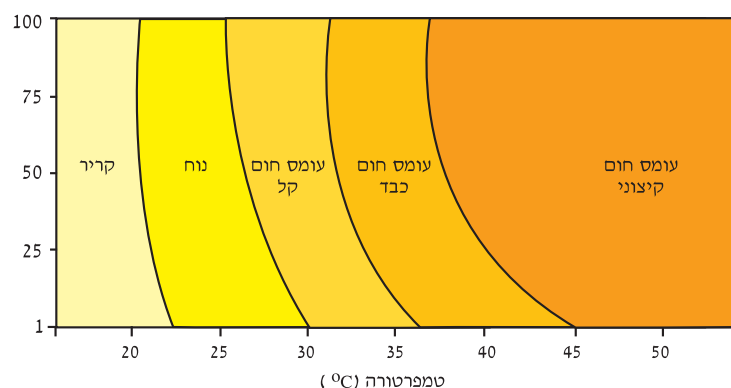
קיץ		חורף		מדד הביצוע
קבוצה ב (ללא צינון אינטנסיבי)	קבוצה א (צינון אינטנסיבי)	קבוצה ב	קבוצה א	
34.6	38.2	38.4	39.8	תנובה יומית (ק"ג)
15	33	36	45	התעברות (%)

עיינו בתוצאות הניסוי והשיבו על השאלות האלה:

- תארו והסבירו כיצד משפיע הקיץ על תנובת החלב.
 - תארו והסבירו כיצד משפיע הצינון האינטנסיבי על תנובת החלב.
 - תארו והסבירו כיצד משפיע הקיץ על ההתעברות.
 - תארו והסבירו כיצד משפיע הצינון האינטנסיבי על ההתעברות.
 - אילו שיקולים על הרפתן לקחת בחשבון כדי להחליט אם כדאי לו להפעיל צינון אינטנסיבי ברפת? הסבירו.
8. איור ד-18 מתאר את ההשפעה של טמפרטורת הסביבה ושל הלחות היחסית על עקת חום בפטמים.
- א. בטמפרטורת סביבה של 39°C , כיצד משפיעה עלייה בלחות היחסית מ-25% ל-75%, על עקת חום בפטמים? הסבירו.

- ב. בלחות יחסית של 50%, כיצד משפיעה עלייה בטמפרטורת הסביבה מ-30°C ל-35°C, על עקת חום בפטמים? הסבירו.
- ג. כיצד יגיבו העופות לשינויים האלה?
- ד. מה תהיה ההשפעה מבחינה חקלאית של השינויים האלה?
- ה. כיצד ניתן להפחית את ההשפעות האלה?

לחות יחסית (באחוזים)



איור ד-18: השפעת טמפרטורת הסביבה והלחות על עקת החום בפטמים



- יישום המחשב השפעת הטמפרטורה על מטילות נמצא באתר http://agribio.snunit.k12.il/main/upload/.ab/id_temp_lul.html ביישום יש נתוני מחקר אודות השפעת החום על העופות במשק החקלאי, ופירוט אמצעים שבעזרתם מווסת החקלאי את טמפרטורת גופם של בעלי החיים במשק. עיבוד הנתונים נעשה בגיליון אלקטרוני.
- יישום המחשב רבייה בחיות משק - השפעת חום על פוריות הפרות נמצא באתר <http://agribio.snunit.k12.il/main/upload/.1999/99refet5b.rtf> ביישום יש נתוני מחקר אודות צינון פרות בתנאי עומס חום, להגברת הפוריות. עיבוד הנתונים נעשה בגיליון אלקטרוני.

פרק ה

הגנה וחיסון באדם ובבעלי חיים

מערכות ההגנה והחיסון

בסביבת בעלי החיים יש מיליוני מיליארדים של חיידקים, נגיפים וחלקיקים מיקרוסקופיים אחרים, שמאיימים ללא הרף על בריאותם של בעלי החיים. למרות הסכנה המתמדת, מתקיימים בעלי החיים ומתרבים, ורוב הזמן הם בריאים. כיצד מתמודדים בעלי החיים בכלל ובני האדם בפרט עם הגורמים המאיימים על בריאותם? כיצד נמנעת חדירתם של רוב הגורמים האלה לגוף? ואם בכל זאת הם מצליחים לחדור, כיצד מתגבר הגוף על הפגיעה? התשובות לשאלות האלה טמונות במערכות ההגנה והחיסון, שמגנות על הגוף מפני גורמים זרים ומסייעות בשמירת ההומיאוסטזיס. במהלך האבולוציה התפתחו אצל בעלי החיים אמצעי הגנה במגוון רחב. כך, אפילו אצל חסרי החוליות הירודים ביותר מוצאים מערכות הגנה, והן כוללות חומרים ותאים שמסוגלים להרוג גורמים זרים שפולשים לגוף. בבעלי חיים ירודים, מערכות ההגנה העיקריות הן בלתי ייחודיות והן פועלות נגד הפולשים הזרים ללא הבחנה ביניהם. המערכות האלה השתכללו במהלך האבולוציה והן מורכבות יותר ככול שגופו של בעל החיים מורכב יותר. עם התייעלותה של מערכת ההובלה בגוף (מחזורי הדם והלימפה) התייעלו גם מערכות ההגנה. תאים וחומרים, שמהווים חלק ממערכות ההגנה, יכולים לנוע במהירות לעבר רקמות נגועות ולחסום גורמי מחלה שעוברים בצינורות ההובלה. לשיא התפתחות הגיעו מערכות ההגנה בחולייתנים. מערכות ההגנה בחולייתנים מבוססות בעיקר על מחסומים פיסיים ועל הפעילות של תאי דם לבנים. תאי הדם הלבנים נוצרים במוח העצם מתאי גזע (איור א-41 בעמ' 75), ולאחר התמיינות הם נישאים בזרם הדם ובלמפה. יש כמה סוגים של תאי דם לבנים, ורבים מהם מצויים בקשרי הלימפה, בטחול, בכבד, בכליות, בריאות ובמוח. חלק ממנגנוני ההגנה של החולייתנים הם בלתי ייחודיים, וחלק אחר פועל כמנגנונים ייחודיים, שיעילים רק נגד הפולש הזר שגרם להפעלתם.

מנגנוני ההגנה בחולייתנים מאורגנים בשלושה "קווי הגנה" שפועלים במשולב. **קו ההגנה הראשון** הוא מחסום פיסי והוא מורכב בעיקר מן העור ומן הריירות. המחסום הזה מצוי באזורי הגוף שבהם יש מגע עם הסביבה החיצונית, והוא מונע כניסת גורמים חיצוניים ללא הבחנה ביניהם.

קו ההגנה השני מורכב ממנגנוני הגנה מולדים שההפעלה שלהם מושרית, והתגובה היא בלתי ייחודית. בקו ההגנה הזה משתתפים תאי דם לבנים שמגיעים לאזור הנפגע בעקבות פלישה של גורם זר. המנגנון העיקרי הוא תגובת הדלקת והיא מתרחשת באזור החדירה בלבד, וברוב המקרים ללא הבחנה בין הפולשים השונים.

קו ההגנה השלישי מורכב ממנגנוני הגנה נרכשים שההפעלה שלהם מושרית, והתגובה היא ייחודית. בקו ההגנה השלישי פועלים תאי דם לבנים מסוגים שונים והם משמידים את הגורם שפלש. לתאים האלה יש יכולת זיהוי של הפולש, ותגובתם ייחודית נגד אותו פולש שגרם להפעלתם. התגובה מתרחשת בדרך כלל בכול הגוף ולא רק באזור שנפגע.

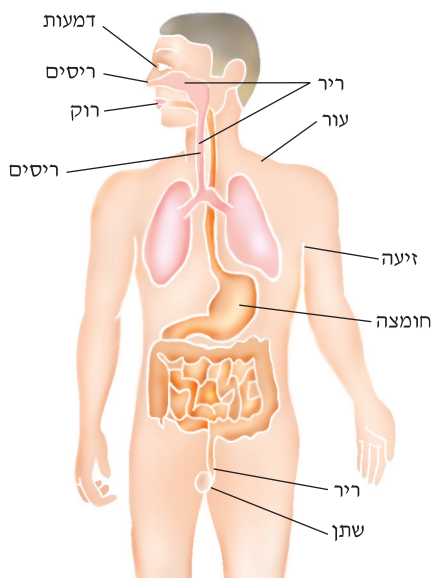
חשוב לציין, כי ההפרדה לקווי הגנה שונים היא מלאכותית ונעשית לשם נוחיות הלימוד. במציאות, ההגנה על הגוף נעשית בכול קווי ההגנה במשולב, ולא בזה אחר זה. סילוקו או נטרולו של גורם זר יכול להסתיים בכול אחד משלבי הגנה ולא דווקא בקו הגנה האחרון. מערכות ההגנה באדם דומות למערכות ההגנה שנמצאות בחולייתנים אחרים ובפרט בעופות וביונקים. בפרקים הבאים נעסוק במערכות ההגנה והחיסון של האדם כדוגמה למערכות בחולייתנים אחרים.

מנגנוני הגנה בלתי ייחודיים

מנגנוני הגנה קיימים – קו ההגנה הראשון

חתך קל בעור, במהלך הכנת אוכל, או קוץ שחדר לרגל, הם מקרים שאיננו מייחסים להם חשיבות. אולם חדירת קוץ לרגל, פוגעת בשלמות העור ויוצרת חור שדרכו יכולים לחדור אל הגוף גורמים זרים שנמצאים בסביבה, כגון: נגיפים או חיידקים, והם יכולים להתפשט בגוף ולגרום מחלה.

העור הוא מנגנון ההגנה המרכזי בקו ההגנה הראשון של גוף האדם. מנגנונים אחרים בקו ההגנה הראשון הם: זיעה, הפרשות, רקמות ריריות, ריסים ופעולות, כגון: התעטשות ושיעול (איור ה-1). אמצעי ההגנה האלה קיימים בגוף תמיד, ללא קשר לנוכחות גורם זר. הם מהווים מחסום בין הסביבה לבין הגוף ומצליחים למנוע חדירה של למעלה מ-99% מן הגורמים



איור ה-1: קו ההגנה הראשון של הגוף

הזרים שמצויים בסביבתו של הגוף. המחסומים בקו ההגנה הראשון אינם מבחינים בין פולש שהוא מסוכן לגוף לבין כזה שאינו מזיק לגוף, כלומר: הם אינם ייחודיים ואינם בררניים. **העור** מהווה מחסום פיסי בפני גורמים זרים שעלולים לחדור אל הגוף. התאים החיצוניים של העור (תאי האפידרמיס) מתחדשים ומתחלפים; הם נשחקים ונושרים ובמקומם נדחפים כלפי חוץ תאים חדשים שנוצרו תחתם. עם נשירת התאים האלה, נושרים גם גורמים, כמו: מיקרואורגניזמים, אבק וכימיקלים, שהתמקמו על העור והיו עלולים לחדור לתוך הגוף. בין תאי העור מפוזרים תאים שמסוגלים לבלוע גורמים שונים שמצויים על פני העור ול"שדר" מידע עליהם למערכת החיסון. התאים האלה מהווים חוליה מקשרת בין הסביבה החיצונית ובין הסביבה הפנימית של הגוף.

הזיעה מכילה חומצת חלב ומעט שתן שמעכבים את התפתחותם של רוב המיקרואורגניזמים ומקשים עליהם לשרוד. לאחרונה התגלה, שזיעת האדם מכילה גם חומר אנטיביוטי שפועל ביעילות נגד חיידקים גורמי מחלה שונים, ביניהם כאלה שגורמים זיהומי עור.

הרקמות הריריות מצויות בצד הפנימי של כל פתחי הגוף: בפה, באף, בקנה הנשימה, וכן בצד התחתון של העפעפיים, ובפתחים ובצינורות של מערכת ההפרשה ושל מערכת המין. הריר שמופרש מרקמות אלה מונע כניסת חומרים זרים לגוף.

הריסים מצויים בחלק מן הריריות שמרפדות את חללי מערכת הנשימה (אף, קנה, סימפונות) (איור ה-2). הריסים הודפים כלפי חוץ אבק, חלקיקי פיח ומיקרואורגניזמים שחודרים בזמן הנשימה. תנועת הריסים מניעה את הריר ואת מה שנדבק אליו לכיוון הלוע. הריר שמגיע ללוע נבלע או נפלט דרך הפה. בחלל האף משמשים הריסים כמסננת. גורמים שונים, כמו: הניקוטין שבסיגריות, מאיטים את תנועת הריסים ועל ידי כך מגבירים את אפשרות הזיהום של דרכי הנשימה.

התעטשות ושיעול הם עוד דרך לסילוק גופים זרים שחודרים לדרכי הנשימה. גופים זרים שחודרים לגוף מגרים את דרכי הנשימה, וגורמים לפעולת ההתעטשות או השיעול.

הפרשות, כמו: שתן, רוק ודמעות, משמשות מחסום ראשוני נוסף בפני גורמי זיהום שונים. גורמי זיהום כאלה נשטפים על ידי הפרשות ומפורקים על ידי אנזימים (לדוגמה, ליזוזים) שמצויים באותן הפרשות. מיקרואורגניזמים שנמצאים במזון מזוהם ומצליחים לעבור את מחסום הפה ולהגיע לקיבה, נפגעים שם על ידי חומצה שמופרשת בקיבה.



איור ה-2: ריסים במערכת הנשימה
(צולם במיקרוסקופ אלקטרוני סורק;
הגדלה 4300 X)

חיידקים בקיבה



למרות החומצות החזקות שמופרשות בקיבה, יש חיידקים שמצליחים להתקיים שם. הם מנטרלים את הסביבה החומצית של הקיבה בעזרת אמוניה שהם מייצרים. החיידקים האלה גם נקשרים לדופן הקיבה, ובעזרת השוטונים שיש להם הם מצליחים להימנע מהיסחפות. החיידקים האלה מצויים בקיבה של חלק גדול מהאוכלוסיה, אך הם פוגעים רק בכ-15% מן האנשים שנושאים אותם. הם מפרקים את שכבת הריר המגנה על דופן הקיבה מפני החומציות של הקיבה וכתוצאה מכך, התאים בדופן הקיבה מתחילים להיפגע ונוצר פצע שאליו חודרים החיידקים ונוזלי הקיבה. פצע כזה נקרא כיב קיבה (אולקוס). ההתפתחות של כיב קיבה מושפעת גם מגורמים אחרים, כגון: שימוש בתרופות, מחסור תזונתי, מתח נפשי, שתיית אלכוהול ועישון. מכיוון שברוב המקרים כיב הקיבה נגרם בגלל חיידקים, מקובל כיום לטפל במחלה באמצעות תרופות אנטיביוטיות.

מנגנוני הגנה קיימים – הרוק והדמעות



חומרים	כלים
בצל	8 צלחות פטרי סטריליות המכילות
תרבית חיידקי E.coli	אגר (2%)
מי ברז	סכין חיתוך
	ספוגית
	דסקיות נייר סינון סטרילי
	מלקטת (פינצטה)
	כוס כימית (25 מ"ל)
	אינקובטור (35°C)

מהלך העבודה

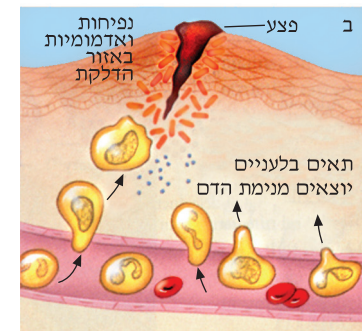
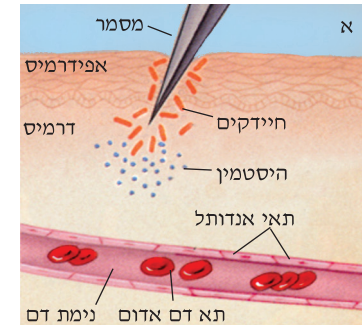
- קחו 8 צלחות פטרי סטריליות המכילות אגר, וסמנו אותן באותיות א עד ח.
- הניחו את צלחות א ו-ב בצד מבלי לפתוח אותן.
- על צלחות ג-ח זרעו חיידקי E.coli, בשיטה הזאת: טבלו ספוגית בתרבית חיידקים ופזרו את החיידקים על פני כל שטח הצלחת.

4. כסו מיד את כל הצלחות, והניחו בצד את צלחות ג ו-ד, מבלי לתת להן כל טיפול נוסף.
5. שטפו היטב את הפה על מנת לסלק מתוכו שאריות מזון. אספו רוק לתוך כוס כימית קטנה. בעזרת מלקטת, הכניסו לתוך הכוס שתי דסקיות נייר סינון סטרילי, והספיגו את דסקיות הנייר ברוק. הכניסו את הדסקיות הספוגות ברוק לתוך צלחות ה ו-ו וכסו את הצלחות.
6. חתכו בצל (במטרה לדמוע) וכשהעיניים דומעות הספיגו שתי דסקיות נייר סינון סטרילי בדמעות. את דסקיות הנייר הכניסו לתוך צלחות ז ו-ח וכסו את הצלחות.
7. את כל הצלחות הכניסו לאינקובטור בטמפרטורה של 35°C , למשך יומיים.
8. לאחר יומיים, הוציאו את הצלחות ורשמו מה שראו. השוו את התוצאות שקיבלתם עם התוצאות של חבריכם.
9. א. לאיזו מטרה שימשו צלחות א ו-ב? הסבירו.
ב. לאיזו מטרה שימשו צלחות ג ו-ד? הסבירו.
10. על סמך התוצאות שקיבלתם, הסבירו כיצד מהווים הרוק והדמעות אמצעי הגנה לגוף.

מנגנוני הגנה מושרים – קו ההגנה השני

על אף יעילותם של מחסומי קו ההגנה הראשון, מצליחים גורמים חיצוניים שונים לחדור לגופנו. פריצת קו ההגנה הראשון של הגוף יכולה להיות בדרכים שונות: בדרכי הנשימה, בדרכי העיכול, בדרכי המין או דרך העור (בעקבות פציעה). כאשר נפרץ קו ההגנה הראשון, מתגייסת לעזרתו המערכת של קו ההגנה השני. מערכת ההגנה בקו השני גם היא מערכת מולדת, אלא שהיא מתחילה לפעול רק לאחר שגורמים זרים, כגון חיידקים, מפעילים אותה. כלומר, התגובה בקו ההגנה השני היא תגובה מושרית. התגובה הזאת היא מקומית ובלתי ייחודית; היא מרחיקה ומנטרלת את כל הגורמים הזרים באתר מסוים בגוף, ללא הבחנה, גם את הגורמים שלא הפעילו אותה. מערכת ההגנה בקו השני, בשונה ממרבית המערכות בגוף, אינה ממקמת במערכת איברים אחת מוגדרת, אלא מצויה בכול הגוף וקשורה קשר הדוק למערכת הדם.

קו ההגנה השני מבוסס בעיקר על תגובת הדלקת, שבה תאי דם לבנים נלחמים בגורמים הזרים שחדרו לגוף (איור ה-3). בקו ההגנה השני פועל גם מנגנון שמבוסס על חומרים שנקראים אינטרפרונים. המנגנון הזה מעכב התפתחות של נגיפים.



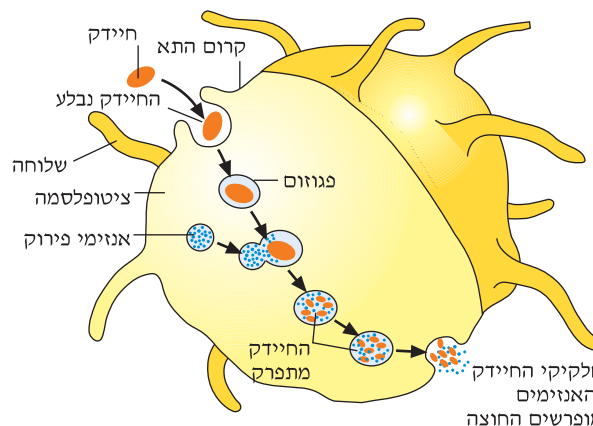
איור ה-3: תהליכים בתגובת הדלקת

תגובת הדלקת

תגובה דלקתית מתפתחת כאשר תאי רקמה נפגעים או מתים עקב זיהום, פציעה, כוויה או פגיעה אחרת. הדלקת משמשת כ"עזרה ראשונה" לגוף, בטרם יתפשט הזיהום בדם. במהלך הדלקת, מתרחשים בגוף כמה תהליכים שמסייעים להחזרת ההומיאוסטזיס שהופר על ידי הגורם לדלקת. סימני הדלקת הם: אדמומיות, חום, נפיחות וכאב.

כאשר רקמה נפגעת, סוגים מסוימים של תאי דם לבנים שנמצאים באזור הפגוע משחררים אל הנוזל הבין-תאי חומר שנקרא **היסטמין** יחד עם חומרים אחרים (איור ה-3, א). החומרים האלה מושכים אל האזור הפגוע תאי דם לבנים שנלחמים בגורם הזר שחדר אל הגוף. ההיסטמין גורם להתרחבות העורקיקים באזור הפגוע. התרחבות העורקיקים מגבירה את זרימת הדם לרקמה, וקצב אספקת תאי הדם הלבנים לאזור מוגבר. ההגברה של זרימת הדם לאזור גורמת לרקמה להתחמם ולהאדים. ההיסטמין גם מעלה את חדירות הדפנות הדקים של הנימים ברקמה הפגועה. הוא גורם לתאי האנדותרל, שמהם בנוי דופן הנים, להתרחק זה מזה ולהגדיל את המרווחים הקטנים שביניהם. הגדלת המרווחים מאפשרת לתאי הדם הלבנים לצאת מזרם הדם אל האזור הפגוע (איור ה-3, ב).

תאי הדם הלבנים משתתפים בתגובת הדלקת הם בעיקר תאים **בלעניים-פגוציטים** (phago = לאכול; kytos = תא). התאים הבלעניים בולעים ומעכלים גורמים זרים (איור ה-3, ג) בתהליך שנקרא **בלענות - פגוציטוזה**. התאים הבלעניים נעים באמצעות שלוחות וכאשר הם נפגשים בגורם זר הם מקיפים אותו בשלוחות שלהם ו"בולעים" אותו. הגורם הזר מתפרק בתוך שלפוחית מיוחדת שמצויה בציטופלסמה של התא הבלען, ונקראת פגוזום. אנזימים שמופרשים אל הפגוזום מפרקים את הגוף שנבלע (איור ה-4).



איור ה-4: תא בלען (פגוציט) בולע חיידק ומפרק אותו

בתגובת הדלקת משתתפים כמה סוגים של תאים בלעניים. הנויטרופילים (neutrophils) הם התאים הבלעניים השכיחים ביותר. הם משוטטים בזרם הדם ונעשים פעילים בתגובה לפלישת גופים זרים ובעיקר לחדירת חיידקים. תוך דקות מן הפגיעה ברקמה, הנויטרופילים יוצאים מצינורות הדם אל בין תאי הרקמה הפגועה והורסים את הפולשים. לאחר כמה שעות, מתחילים לפעול גם המקרופאגים. המקרופאגים (macrophages) הם תאים בלעניים גדולים יותר מהנויטרופילים, והם בעלי כושר בליעה רב יותר ומשך חיים ארוך יותר. הם גם מסייעים לנקות רקמות פגועות ולסלק תאי גוף זקנים. תוך כדי פעולתם, משחררים הנויטרופילים והמקרופאגים חומרים שמושכים עוד תאים בלעניים לאזור הפגוע.



השם: נויטרופיל (Neutrophil)

שם נוסף: תא בלען (פגוציט)

שם האב: תא גזע מילואידי

שם המשפחה: תאי דם לבנים בלעניים

מקום לידה: מוח העצם

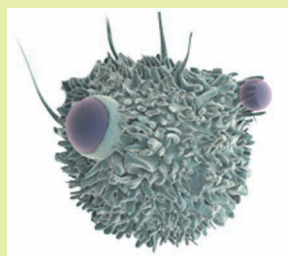
משך חיים: 36 שעות

גודל: 0.012 מ"מ

תכונות מיוחדות: יכול לצאת מזרם הדם

כתובת קבועה: בכול נוזל הדם

כתובת בזמן פעילות: בין תאי רקמה פגועה



השם: מקרופאג' (Macrophage)

שם נוסף: תא בלען (פגוציט)

שם האב: תא גזע מילואידי

שם המשפחה: תאי דם לבנים בלעניים

מקום לידה: מוח העצם

משך חיים: ימים אחדים עד שבועות

גודל: 0.017 מ"מ

כתובת קבועה: באיברים סמוכים לסביבה החיצונית

כתובת בזמן פעילות: בין תאי רקמה פגועה

עיסוקים: בליעת פולשים זרים ותאים מתים,

הצגת אנטיגנים לתאי T

התאים הבלעניים שפועלים בתגובת הדלקת משחררים גם חומרים שנקראים פירוֹגֵנִים (pyro=אש, gene=יצירה). הפירוגנים מגיעים למוח עם זרם הדם ומגרים את מרכז בקרת הטמפרטורה הממוקם בהיפותלמוס (ראו עמ' 207). הגירוי מעורר תגובות פיסיוֹלוגיות, למשל, רעד שרירים, והתגובות האלה מעלות את טמפרטורת הגוף. משערים, כי עליית הטמפרטורה של הגוף עוזרת לגוף להתגבר על מחוללי המחלה בשתי דרכים: (א) בדרך ישירה - על ידי דיכוי התפתחותו של מחולל המחלה; (ב) בדרך עקיפה - על ידי הגברת פעילותם של הגורמים שלוחמים במחולל המחלה, למשל, על ידי הגברת השחרור או הייצור של תאי דם לבנים.

לטאות חולות מחפשות חום



בעלי חיים אקטותרמיים, שחימום גופם תלוי בעיקר בקליטת חום מן הסביבה (ראו עמ' 197), מחפשים סביבה חמה יותר, כאשר גורם מחלה כלשהו תוקף אותם. מחקרים מראים שהטמפרטורה הגבוהה מסייעת לבעלי החיים האלה להתמודד עם גורמי המחלות. לטאות חולות במחלה חיידקית שהוחזקו בסביבה חמה שרדו יותר בהשוואה ללטאות חולות שלא הוחזקו בסביבה חמה.

הגדלת החדירות של דופנות הנימים באזור הדלקת מאפשרת דליפה של חלבוני פלסמה, שבמצב תקין אינם יוצאים מן הדם. בין חלבוני הפלסמה שדולפים אל הנוזל הבין-תאי נמצאים גם גורמי קרישה (ראו עמ' 81). קרישי דם שמתפתחים סביב הדלקת מונעים או מעכבים את התפשטות הפולשים אל רקמות שכנות. גורמים נוגדי קרישה, שיוצאים אף הם מנימי הדם, מפרקים את הקרישים כאשר התגובה הדלקתית דועכת. דליפת החלבונים מנימי הדם אל הנוזל הבין-תאי גורמת להתפתחות של בצקת מקומית (ראו עמ' 53). הרקמה גדושת הנוזלים מתנפחת ויש תחושה של כאב.

לעתים, מופיעה **מוגלה** באזור הפגוע. המוגלה מורכבת מתאי דם לבנים מתים, מחיידקים חיים ומתים ומתאי רקמה הרוסים. לתוך המוגלה נספגים גם נוזלים מן הסביבה, והלחץ שהם מפעילים על קצות העצבים גורם כאב. כל עוד יש למוגלה פתח מוצא מן הגוף, אין בה כל נזק, אלא להפך: יצירתה והוצאתה מן הגוף הם תהליכי הגנה חיוניים, שמונעים חדירה של מזהמים אל עומק הרקמות.

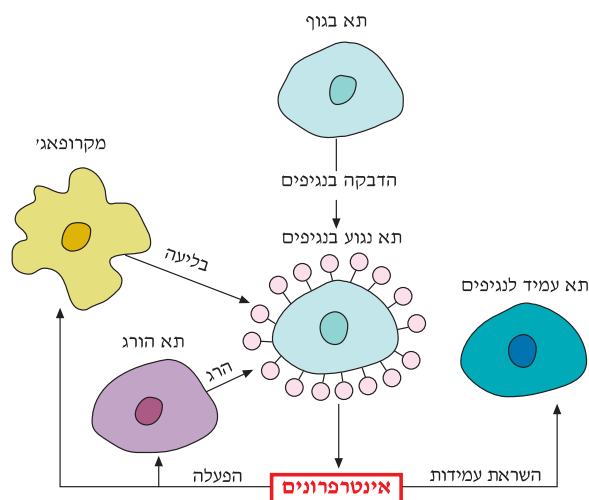
בסיום התהליך הדלקתי מתחילים תהליכי שיקום של הרקמה שנפגעה: נימי דם חדשים מתפתחים באזור הפגוע ומזינים תאים חדשים שמחליפים את התאים שנפגעו.

הפרשת אינטרפרון - מנגנון הגנה בפני נגיפים

התאים הבלעניים אינם יעילים נגד כל סוגי הפולשים. אם הפולש הזר הוא נגיף, הוא חודר מיד לאחר כניסתו לגוף אל תוך אחד מתאי הגוף. במצב כזה הנגיף מוסתר והתא הבלען אינו יכול לזהות אותו כגורם זר. איך, אם כן, "נלחם" הגוף בנגיפים?

בשנת 1957, גילו שבעל חיים שהודבק בנגיף כלשהו, מגלה עמידות למחלות שגורמים נגיפים אחרים, אפילו אם הם אינם מאותה קבוצה. התברר, שכמה שעות לאחר חדירת נגיף לתא של בעל חיים, התא מתחיל להפריש חומרים שפוגעים בהתרבות של הנגיף. החומרים האלה נקראים **אינטרפרונים**, מן המילה *interfere*, שפירושה: להפריע, להתערב. חלק מן האינטרפרונים מונעים תרגום של ה-RNA הנגיפי בתוך התא, ולכן לא נוצרים

בתא החלבונים הדרושים להתפתחות הנגיף. האינטרפרונים האלה מופרשים מתא שנגוע בנגיף וגורמים לתאים השכנים (הבריאים) לייצר אנזים שמעכב יצירה של חלבונים נגיפיים. כתוצאה מכך, התאים השכנים עמידים יותר בפני הנגיף שפלש ובפני נגיפים אחרים (איור ה-5). אינטרפרונים אחרים מגבירים את כושר הבליעה של המקרופאגים ומפעילים תאים אחרים - תאים הורגים - שמשמידים את התא הנגוע.



איור ה-5: פעילות האינטרפרונים

תרופת הפלא לנגיפים!?

מגוון ההשפעות של האינטרפרונים וחוסר הייחודיות של פעולתם גרמו לחוקרים רבים לקוות שהם ירפאו מחלות נגיפיות שונות וגם מחלות סרטן. בתקופה מסוימת, הם אף נקראו "תרופת הפלא לנגיפים", אבל השמחה הייתה מוקדמת. השימוש הרחב באינטרפרונים פחת, מכיוון שהטיפול בהם מלווה לעתים בתופעות לוואי קשות, כמו: נזק לכבד, פגיעה בייצור תאי הדם במוח העצם ופגיעה במערכת העצבים המרכזית. כיום, האינטרפרון משמש בעיקר לריפוי דלקות עיניים שנגרמות על ידי נגיפים, לריפוי סוגים אחדים של דלקת כבד נגיפית, לטיפול במקרים מסוימים של מחלות סרטן ואיידס, לטיפול בחולי טרשת נפוצה ולמחקר. האינטרפרון שבו משתמשים הוא אינטרפרון "אנושי" שמופק בכמות גדולה מחיידקים, בשיטות של הנדסה גנטית.



סיכום

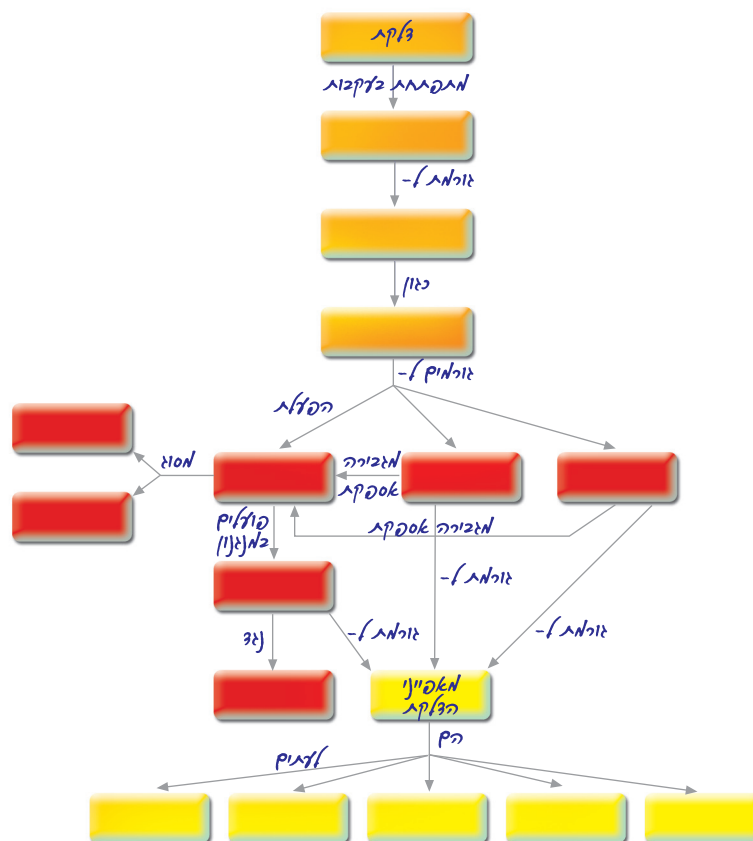
1. לכל האורגניזמים יש מערכות שמגנות על גופם מפני חדירה של גורמים זרים שעלולים לפגוע בבריאותם. בבעלי חיים ירודים, מערכות ההגנה העיקריות הן בלתי ייחודיות. ככול שמערכות ההגנה משוכללות יותר כך גם מערכות ההגנה יעילות יותר, והן הגיעו לשיא התפתחותן בחולייתנים. לחולייתנים, נוסף למנגנוני ההגנה הבלתי ייחודיים, יש גם מנגנונים ייחודיים.
2. קו ההגנה הראשון באדם כולל את העור, את הזיעה, את הרקמות הריריות, את הריסים, וכן את ההתעטשות והשיעול והפרשות שונות. אמצעי ההגנה האלה מהווים מחסום שמפריד בין הסביבה לבין פנים הגוף, והם אינם ייחודיים ואינם בררניים; הם קיימים בגוף כל הזמן, ללא קשר לנוכחות גורם זר.
3. לאחר שגורם זר מצליח לעבור את קו ההגנה הראשון ולחדור אל הגוף, מופעל קו ההגנה השני. מנגנוני ההגנה בקו ההגנה השני הם מנגנונים מולדים, והפעלתם מושרית רק בתגובה לחדירה של גורמים זרים לגוף. התגובה בקו ההגנה השני היא מקומית, מידית ובלתי ייחודית.
4. מנגנון ההגנה העיקרי בקו ההגנה השני הוא הדלקת. בדלקת, מוגברת זרימת הדם לאזור הפגוע ותאי דם לבנים מגיעים לאזור. התאים שפעילים בדלקת הם תאים בלעניים - נוטרופילים ומקרופאגים - שעוטפים את הגורמים הזרים בקרום התא שלהם ומפרקים אותם.
5. כאשר נגיף חודר לגוף, קו ההגנה השני פועל נגדו גם באמצעות הפרשה של אינטרפרונים. האינטרפרונים פוגעים ביכולת הנגיף להתפשט בגוף.



1. הסבירו מדוע כוויות, גם אם הן שטחיות, עלולות לגרום זיהום.
2. כיצד מותאמים אמצעי ההגנה של קו ההגנה הראשון לתפקידם?
3. הקרומים המפרידים בין האיברים במערכות הגוף השונות בנויים משכבת תאים אחת או מכמה שכבות בודדות, שמאפשרות מעבר גזים וחומרים אחרים. מהו, לדעתכם, היתרון והחיסרון של המבנה הזה?
4. האם נכון לומר כי העור מהווה כיסוי סביל בלבד? הסבירו.
5. ציינו את הדומה ואת השונה בין קו ההגנה הראשון לבין קו ההגנה השני.

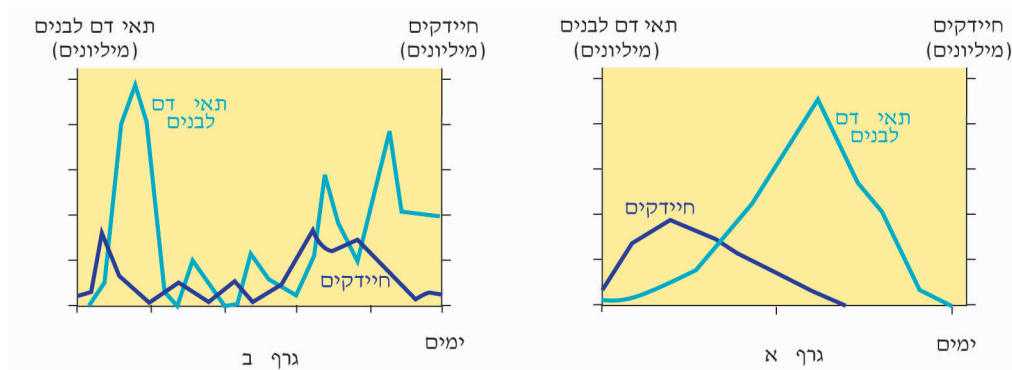
6. העתיקו את מפת המושגים שמתארת את תגובת הדלקת (איור ה-6) והשלימו בה את המושגים החסרים. היעזרו ברשימת המושגים הזאת:

שחרור חומרים; אדמומיות; נפיחות; הגורם הזר; תאים בלעניים; הרחבת כלי דם; היסטמינים; פגיעה ברקמה; הגדלת חדירות כלי דם; נויטרופילים; בלענות; חום; מוגלה; מקרופאגיים; כאב.



איור ה-6: תגובת הדלקת

7. מה הם הסימנים האופייניים לדלקת? ממה נובע כל סימן?
8. האם הסימנים האופייניים לדלקת יהיו אותם הסימנים, גם אם הגורמים לדלקת יהיו שונים זה מזה? הסבירו מדוע.
9. האם יש חשיבות לתחושת הכאב המתלווה לפגיעה ברקמות? הסבירו.
10. התגובה הדלקתית היא אחד ממנגנוני ההומיאוסטזיס. הסבירו.
11. כאשר אדם אינו מרגיש טוב הרופא שולח אותו, בדרך כלל, לערוך בדיקת דם שבה בודקים (בין השאר) את ריכוז תאי הדם הלבנים. הסבירו מדוע.
12. לעתים, מערכת החיסון לא מצליחה לחסל את גורם הזיהום, והדלקת מתרחשת שוב ושוב. דלקת מתמשכת כזאת (למשל: דלקת מפרקים) נחשבת כמחלה בפני עצמה, והיא אינה משמשת כמנגנון הגנה. העקומים באיור ה-7 מתארים את מספר תאי הדם הלבנים ואת כמות החיידקים ברקמה פגועה. אחד מן הגרפים מתאר דלקת מתמשכת והאחר מתאר דלקת שאינה מתמשכת.
- א. איזה גרף מתאר דלקת מתמשכת? הסבירו.
- ב. גרף א' מתאר מהלך של דלקת במשך 48 שעות בלבד. המשיכו את העקומים כפי שייראו לאחר 3 ימים נוספים. הסבירו את העקומים שציירתם.
- ג. העלייה במספר תאי הדם הלבנים התרחשה רק כמה שעות לאחר חדירת החיידקים לרקמה. הסבירו מדוע.



איור ה-7: דלקת מתמשכת ודלקת שאינה מתמשכת

מערכת החיסון הייחודית – קו ההגנה השלישי

מאפייני מערכת החיסון הייחודית

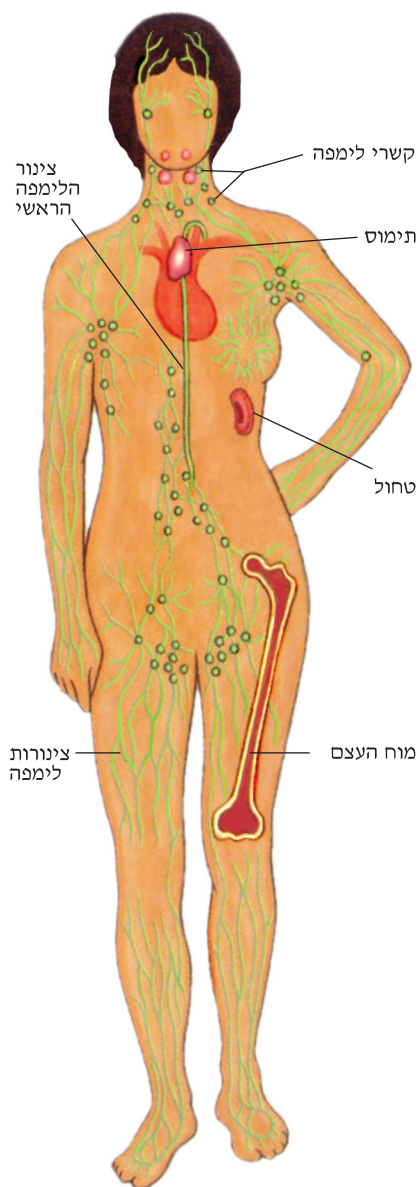
מנגנוני ההגנה הבלתי ייחודיים אינם מסוגלים להתמודד כהלכה עם כל הפולשים, ויש גם פולשים שעמידים בפניהם. כאשר גורם זר חודר לגוף ומצליח לעבור את קו ההגנה הראשון ואת קו ההגנה השני, הוא נתקל במנגנונים של קו ההגנה השלישי.

המערכת שפועלת כקו הגנה שלישי היא **מערכת החיסון הייחודית**. המערכת הזאת היא מערכת נרכשת. תאי הדם הלבנים שפעילים בה, מתמיינים בעקבות חדירה של גורמים זרים לגוף. בדומה לקו ההגנה השני, התגובה במערכת החיסון הייחודית היא תגובה מושרית, אך היא פועלת רק נגד אותם גורמים שהפעילו אותה. דרגת הייחודיות של התגובה החיסונית גבוהה עד כדי כך, שתגובה חיסונית נגד נגיף שפעת מזון אחד לא תגן על האדם מפני נגיף שפעת מזון אחר, גם אם שני הנגיפים גורמים למחלות מאוד דומות.

מערכת החיסון הייחודית, בדומה למערכת ההגנה בקו השני, אינה ממוקמת במערכת איברים אחת מוגדרת, אלא מצויה בכול הגוף (איור ה-8). מערכת זו קשורה קשר הדוק למערכות הדם והלימפה. התאים שממלאים תפקיד מרכזי במערכת החיסון הייחודית הם תאי דם לבנים שנקראים **לימפוציטים** (lymphocytes). הם נקראים כך משום שאצל היונקים הם שכיחים ביותר בקשרי הלימפה. הגדילה וההתפתחות של הלימפוציטים נעשית ברקמה הגילטינית הרכה של מוח העצם, שנמצאת בתוך העצמות הארוכות. חלק מן הלימפוציטים ממשיכים להתפתח בבלוטת לימפה שנקראת תימוס (הרת). באמצעות מערכת הדם מגיעים הלימפוציטים לכל חלקי הגוף.

המפגש הראשוני בין הגורמים הזרים לבין תאי מערכת החיסון הייחודית מתקיים בקשרי הלימפה או באזורים הלימפטיים הקרובים למקום החדירה. לדוגמה, בחדירה דרך מערכת הנשימה, מתקיים המפגש ב"בלוטות השקדים" שבאזור הלוע, ואילו בחדירה דרך כלי הדם, מתקיים המפגש בדרך כלל בטחול. באזור המפגש מתרחשת ההתמודדות בין הפולש למערכת החיסון. עדות לאירוע שמתרחש באזור הלימפטי היא התנפחותו ותחושת הכאב הכרוכה בהתנפחות הזאת.

תכונה אחרת של מערכת החיסון היא היכולת להבחין בין עצמי (self) לבין זר (non-self). כאשר מערכת החיסון מופעלת, היא הורסת ומשמדה את האורגניזמים הזרים שפלשו לגוף, וכן מולקולות שמופרשות על ידי אותם אורגניזמים, למשל רעלנים. לעומת זאת, במצב תקין, היא אינה פועלת נגד מרכיבי הגוף עצמו; בתהליך ההתפתחות של הלימפוציטים במוח העצם ובתימוס מסולקים כל הלימפוציטים שיכולים להגיב נגד מרכיבים עצמיים.



איור ה-8: איברי מערכת החיסון הייחודית

למערכת החיסון הייחודית יש עוד תכונה חשובה - זיכרון. הזיכרון מאפשר למערכת לזכור גורמים זרים, שהמערכת "נפגשה" אתם בעבר. הזיכרון של מערכת החיסון הייחודית נשמר באמצעות לימפוציטים שנקראים **תאי זיכרון**. תאי הזיכרון נוצרים במהלך ההתמודדות של המערכת עם גורם זר שפלש, ונשארים במחזור הדם לאחר שהגורמים הזרים סולקו מן הגוף. במקרה של פלישה חוזרת פועלים תאי הזיכרון באופן מידי וגורמים לכך שהתגובה החיסונית תהיה מהירה יותר, חזקה יותר ולמשך זמן ארוך יותר.

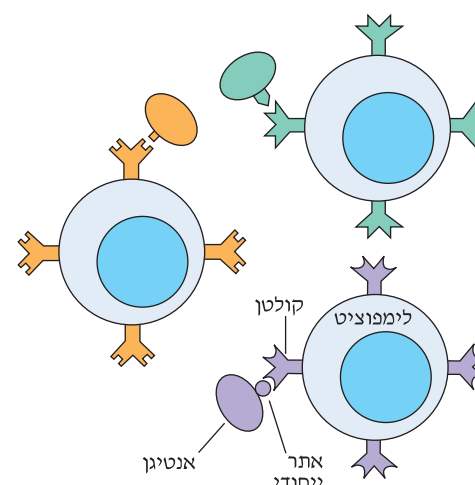
למערכת החיסון יש יכולת תגובה רב-גונית; היא מגיבה למגוון עצום של חומרים, גם כאלה שמקורם בטבע וגם נגד חומרים מלאכותיים. מערכת החיסון אינה מזהה את אופי החומר אלא רק את העובדה שהוא זר לגוף. על כן היא מגיבה לחומרים שמזיקים לגוף, אבל גם לחומרים שאינם מזיקים לו. יתר על כן, למערכת החיסון יש יכולת להבחין בין תאים בריאים לתאים סרטניים באותו הגוף.

התגובה החיסונית הייחודית

גורם זר שחודר לגוף ומעורר את מערכת החיסון הייחודית לפעול נגדו נקרא **אנטיגן** (anti=נגד, genus=יצירה). חיידקים, נגיפים, אבקת צמחים וארס נחשים הם דוגמאות של אנטיגנים. מולקולות גדולות, המכילות חלבון שאליו צמודים מרכיבים שומניים או חלבוניים, או מולקולות של רב-סוכרים גם הן יכולות לפעול כאנטיגנים. למעשה, תגובת החיסון אינה מתבצעת נגד מולקולת האנטיגן כולה, אלא רק נגד אתרים ייחודיים שמצויים על פני האנטיגן.

אנטיגן שחודר לגוף יכול להפעיל את מערכת החיסון הייחודית בשני מסלולי תגובה שישתיימו בהרס האנטיגן: בתגובה חיסונית תאית ובתגובה חיסונית הומורלית.

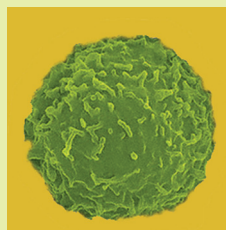
בשתי התגובות, לימפוציטים מזהים את האנטיגן ונקשרים אליו בעזרת קולטנים שמצויים על פני קרום התא שלהם. הקולטנים הם חלבונים שהמבנה התלת-ממדי שלהם מתאים במדויק למבנה של האתרים הייחודיים על פני האנטיגן, כמו שמפתח מסוים מתאים למנעול מסוים (איור ה-9). הלימפוציטים מגיבים באופן ייחודי לסוג האנטיגן, והתגובה הייחודית שלהם היא שיוצרת בגופנו את תופעת החיסון הייחודית. למעשה, בגוף מצויים מיליוני לימפוציטים, אך כאשר אנטיגן כלשהו חודר לגוף, הוא מזוהה רק על ידי הלימפוציטים בעלי הקולטנים המתאימים לזיהוי.



איור ה-9: התאמה ייחודית בין לימפוציטים לאנטיגנים

תגובת החיסון התאית

כאשר אנטיגן חודר לתוך תאים בגוף הוא מפעיל לימפוציטים שנקראים **לימפוציטים T** (או תאי T). הלימפוציטים האלה מתבגרים בתימוס ומכאן מקור שמם (T=Thymus). תאי T מזהים בעיקר גורמים תאיים ופועלים נגדם; הם פועלים נגד תאים שחדר אליהם אנטיגן, נגד תאים שהשתנו, כמו תאי סרטן, ונגד תאים זרים שמקורם בהשתלות. לכן, תגובת החיסון באמצעות תאי T נקראת **תגובת חיסון תאית** (cellular immunity). יש כמה סוגים של תאי T וכולם משתתפים בתגובת החיסון התאית.



שם: לימפוציטים T (T-cells)

משפחה: תאי דם לבנים לימפוציטים

שם האב: תא גזע לימפואידי

מקום לידה: מוח העצם

מקום התבגרות: בלוטת התימוס

משך חיים: למיפוציט T "רגיל" - ימים

אחדים; לימפוציט T זיכרון - שנים

גודל: 0.010-0.008 מ"מ

כתובת קבועה: בדם ובאיברים לימפתיים

תכונה מיוחדת: מזהים אנטיגנים בעזרת קולטנים ייחודיים

פעילות: תגובת חיסון ייחודית תאית

בני המשפחה ומשלח ידם

T-הורגים: הורסים תאים זרים, תאי סרטן או תאים שמכילים גורמים זרים

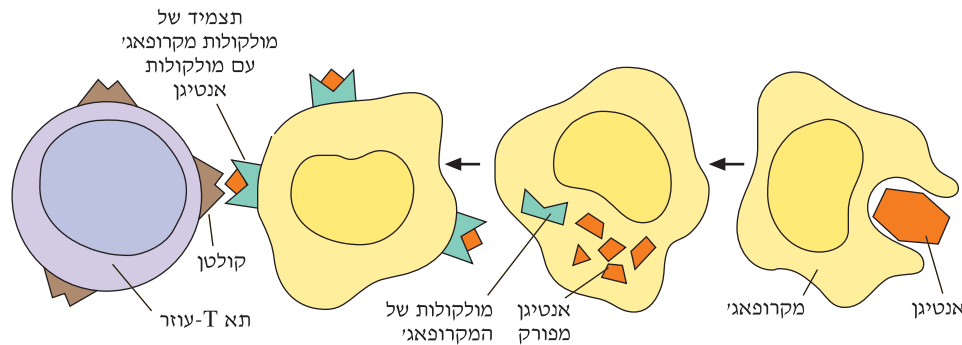
T-עוזרים: מכוונים את הפעילות של לימפוציטים אחרים

T-מדכאים: מפסיקים את התגובה החיסונית

תאי T מתעוררים לפעולה בשני מצבים: (א) כאשר חלקים ממולקולות האנטיגן מוצגים על פני קרום התא של מקרופאגיים; (ב) כאשר חלקים ממולקולות האנטיגן מוצגים על פני קרום התא של תאי הגוף המותקפים.

הפעלת התגובה התאית על ידי מקרופאג'ים

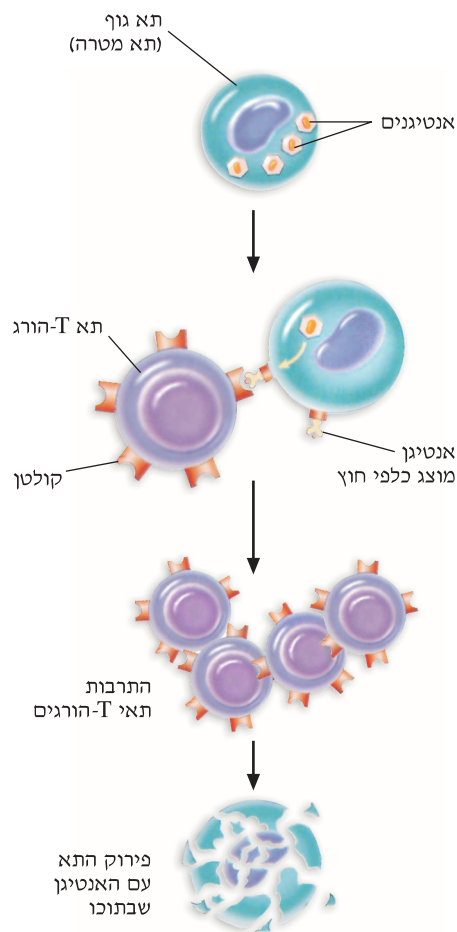
כאשר מקרופאג'ים נפגשים במחזור הדם באנטיגן, הם בולעים ומעכלים אותו (איור ה-10). חלק ממולקולות האנטיגן מתפרקות ונקשרות בתוך המקרופאג' למולקולות של המקרופאג' ונוצר תצמיד של מולקולות מקרופאג' עם מולקולות אנטיגן. התצמיד נודד לצד החיצוני של קרום התא ומוצג כלפי חוץ. בשלב הזה, המקרופאג' מתפקד כ"תא מציג אנטיגן" והתצמיד מזוהה על ידי תאי T שנקראים **תאי T-עוזרים** (T-helper cells). תאי T-עוזרים בעלי קולטנים מתאימים נקשרים לתצמיד, ובעקבות הקשירה מתחילים המקרופאג'ים ותאי ה-T לשחרר חומרים שונים. החומרים האלה מפעילים תאים שונים של מערכת החיסון ואלה פועלים לחיסול האנטיגנים (ראו בהמשך, עמ' 250).



איור ה-10: הפעלת התגובה התאית על ידי מקרופאג'

הפעלת התגובה התאית על ידי תאי הגוף המותקפים

אנטיגנים שמצליחים "לחמוק" מן המקרופאג'ים, חודרים לתאים בגוף. חלקים ממולקולות האנטיגן מוצגים על הצד החיצוני של התאים האלה (תאי מטרה) (איור ה-11). **תאי T-הורגים** (T-killer cells) מזהים באמצעות קולטנים ייחודיים את מולקולות האנטיגן המוצגות על פני תאי המטרה. באמצעות הקולטנים האלה תאי T-הורגים נקשרים למולקולות האנטיגן, וכתוצאה מכך הם גדלים ומתחלקים, ונוצרים תאי T-הורגים רבים. תאים הורגים שנקשרים לתא המטרה משמידים את התא יחד עם האנטיגן שבתוכו; מולקולות חלבון מנקבות חורים בקרום של התא ודרך החורים חודרים יונים. בעקבות היונים חודרים לתא מים והם גורמים לפיצוץ ולהרס התא. תאי T-הורגים מפרישים גם חומרים שגורמים לתא המטרה "להתאבד". ה-DNA של תא המטרה נחתך לקטעים, הציטופלסמה שלו דולפת והאברונים התוך-תאיים שלו חדלים לתפקד. לאחר שתא T-הורג קטל את התא, הוא ניתק ממנו וממשיך מיד אל תאי מטרה אחרים המציגים אנטיגן על קרום התא שלהם.

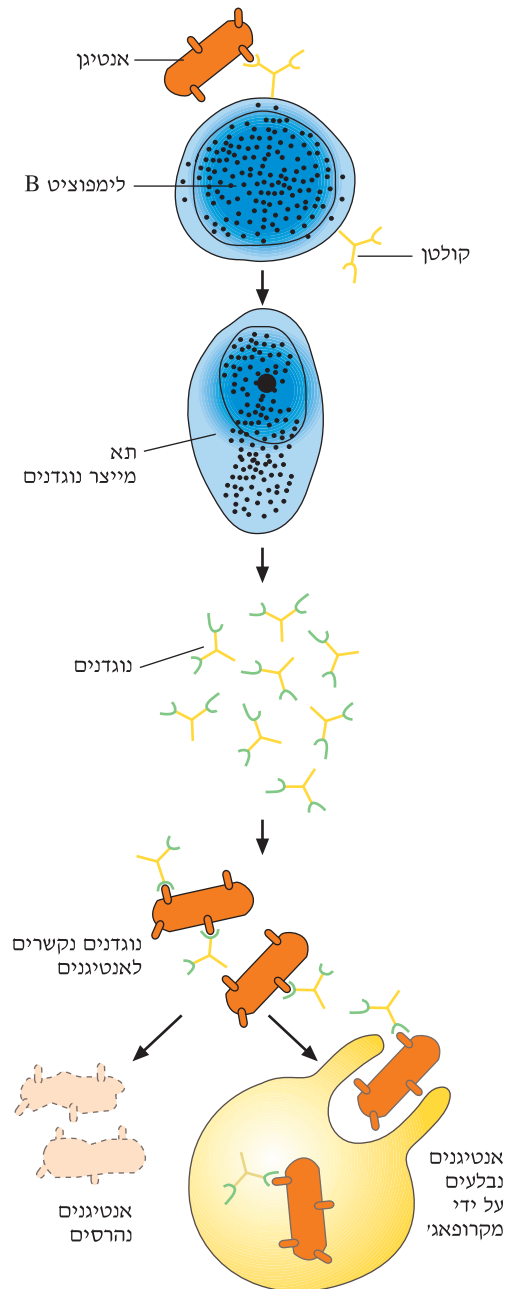


איור ה-11: הפעלת התגובה התאית על ידי תא גוף מותקף

לימפוציטים מסוג אחר שמשותפים בתגובה התאית נקראים **תאי הרג טבעיים** (NK - natural killer cells). תאי ההרג הטבעיים פוגעים בתאים "חולים" - תאים שמצבם אינו תקין, למשל: תאים שהותקפו על ידי נגיפים, ובעיקר תאים סרטניים. אופן הפעולה של תאי ההרג הטבעיים דומה לאופן הפעולה של תאי T-הורגים.

תגובת החיסון ההומורלית

אנטיגן שחדר לנוזלי הגוף (ולא לתאים בגוף) מפעיל לימפוציטים שנקראים **לימפוציטים B** (או תאי B). לימפוציטים B נקראים כך מכיוון שנתגלו לראשונה בעופות, באיבר בשם בורסה (bursa) שהוא ייחודי לעופות. ביונקים, תאי B מתמיינים ומבשילים במוח העצם. יש טיפוסים רבים של תאי B, ולכל אחד מהם יש קולטנים מטיפוס אחד בלבד, שנקשרים רק לאנטיגן מסוג מסוים (איור ה-12). בעקבות הקשירה, תא B גדל ומתחלק, ונוצרים תאים שיכולים להפריש **נוגדנים** (anti; antibodies; נגד, bodies=גופים). הנוגדנים משתחררים לזרם הדם או לנוזל הלימפה ונישאים לחלקי הגוף השונים. הם נקשרים לאנטיגנים וגורמים ישירות לניטרולם או ל"סימון" שלהם. אנטיגנים מסומנים חשופים להתקפה על ידי תאי T-הורגים ומקרופאגים. תגובת חיסון שבה מעורבים תאי B ונוגדנים נקראת **תגובת חיסון הומורלית** (humor; humoral immunity=נוזל הגוף, immunity=חיסון). התגובה הזאת יעילה בעיקר נגד אנטיגנים שמשוטטים בנוזלי הגוף, למשל: נגד גיפים שטרם חדרו לתאים, ונגד חיידקים ורעלים. תאי B מופעלים גם על ידי מקרופאגים שבלעו אנטיגן (ראו עמ' 250).



איור ה-12: תגובת החיסון ההומורלית



שם: לימפוציט B (B cell)

משפחה: תאי דם לבנים לימפוציטים

שם האב: תא גזע לימפואידי

מקום לידה: מוח העצם

משך חיים: לימפוציט B "רגיל" - ימים אחדים; לימפוציט B זיכרון - שנים

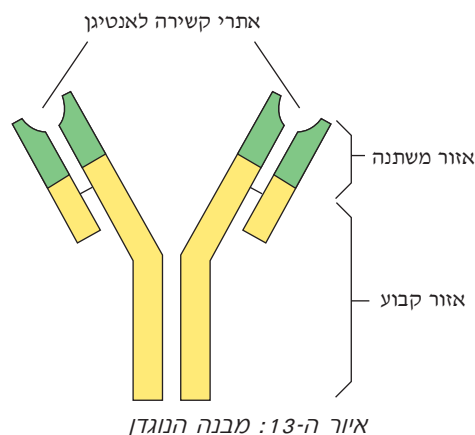
גודל: 0.010-0.008 מ"מ

כתובת קבועה: בדם ובאיברים לימפתיים

תכונות מיוחדות: מזהה אנטיגן בעזרת קולטנים ייחודיים; ממנו

נוצרים תאים שמייצרים נוגדנים ייחודיים לאנטיגן שאליו נחשף

עיסוק: תקיפת אנטיגנים בעזרת נוגדנים



חיסול האנטיגן באמצעות הנוגדנים

הנוגדנים הם מולקולות חלבוניות שפועלות לסילוק האנטיגן. תא B אחד יכול לייצר כ-2,000 מולקולות נוגדן בכול שנייה. כל תא B מייצר רק סוג אחד של נוגדנים והם פועלים רק נגד האנטיגן שגרם ליצירתם. בגופנו יש כ- 10^{12} נוגדנים שונים. למעשה, גופנו יכול לייצר נוגדן מתאים כמעט נגד כל אנטיגן שחודר לתוכו.

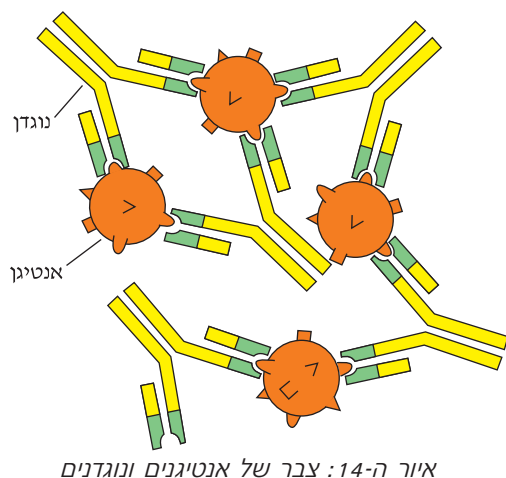
לכל הנוגדנים יש צורה דומה - צורת האות Y - והיא מורכבת משני חלקים סימטריים, זהים לחלוטין (איור ה-13). יש חמש קבוצות עיקריות של נוגדנים והן נבדלות זו מזו בפעילות שלהן. לכל הנוגדנים שמשתייכים לאותה קבוצה יש אותו מבנה באזור ה"רגל" של ה-Y. האזור הזה נקרא **האזור הקבוע** והוא שונה מקבוצה לקבוצה. הנוגדנים שמשתייכים לאותה קבוצה נבדלים זה מזה בקצות ה"זרועות" של ה-Y. הקצוות האלה נקראים **האזור המשתנה**. באזור המשתנה נמצאים אתרי הקשירה לאנטיגן, והאתרים האלה שונים מנוגדן לנוגדן. בגלל הסימטריה של מולקולת הנוגדן, כל נוגדן יכול לקשור שתי מולקולות אנטיגן זהות.

כאשר נוגדן נפגש באנטיגן שמתאים לאתרי הקשירה שלו, הוא נקשר אליו. כאשר מולקולת נוגדן נקשרת לשתי מולקולות של אנטיגן, ולכל אנטיגן נקשרות לפחות שתי מולקולות של נוגדן, נוצר **צבר** של אנטיגנים ונוגדנים (איור ה-14). יצירת הצבר נקראת **הצמחה**, והיא "מסמנת" את האנטיגנים וחושפת אותם להתקפה על ידי תאי T-הורגים או על ידי מקרופאגים. תאי T-הורגים פוגעים בקרום התא של האנטיגנים וממיתים אותם, ואילו המקרופאגים בולעים את הצבר ומפרקים אותו (איור ה-12). יצירת הצבר מסייעת לתהליך הבלענות של המקרופאגים, כיוון שטיפול בצבר קל יותר מאשר טיפול באנטיגן בודד.

הנוגדנים משתתפים במערך ההגנה של הגוף לא רק על ידי סילוק האנטיגן, אלא גם בדרכים אחרות. כשהאנטיגן הוא נגיף, זרועות הנוגדנים נקשרות לנגיף, וכך הנגיף לא יכול להיקשר אל תאי הגוף ולחדור לתוכם. כאשר האנטיגן הוא מולקולה של רעל (ארס נחשים, או רעלן שמורפש על ידי חיידק), הנוגדן נקשר אל הרעל ומנטרל את הפעילות הביולוגית שלו.

הפעולה המשולבת של מערכת החיסון הייחודית

בתגובה החיסונית פועלות במשולב התגובה התאית והתגובה ההומורלית, באמצעות תאי T, תאי B ומקרופאגים. לא בכול חדירה של אנטיגן מופעלות שתי דרכי התגובה באותה מידה. אופי התגובה תלוי במידה רבה בסוג האנטיגן: אם האנטיגן הוא חיידק כלשהו, מופעלת נגדו בעיקר תגובה ההומורלית. כאשר האנטיגן הוא נגיף או תא זר, מתפתחת תגובה תאית במלוא העוצמה, והתגובה ההומורלית שולית למדי.



המהלך הכללי של התפתחות התגובה החיסונית הייחודית מתואר באיור ה-15. להבנת התהליכים עקבו אחר המספרים באיור.

כאשר אנטיגן חודר לגוף ונכנס לתוך תא, הוא מפעיל את תגובת החיסון התאית (1). ההפעלה מתרחשת באמצעות מולקולות של האנטיגן שמוצגות על פני התא שהותקף (2). תא T-הורג מזהה את האנטיגן המוצג על פני התא המותקף ונקשר אליו באמצעות קולטן ייחודי. בעקבות הקשירה, תא T-הורג גדל ומתחלק, ונוצרים הרבה תאי T-הורגים (3) ותאי זיכרון שנקראים תאי T-זיכרון (4). תאי T-הורגים שנצמדים לתאים שהותקפו משמידים אותם יחד עם האנטיגנים שבתוכם (5).

אנטיגן שחודר לגוף, אך אינו חודר לתא, מפעיל את תגובת החיסון ההומורלית. הוא מזוהה על ידי תאי B בעלי קולטנים מתאימים. תאי ה-B המתאימים נקשרים לאנטיגן (6), מתחלקים ומתמיינים לתאי B יוצרי נוגדנים (7) ולתאי זיכרון שנקראים תאי B-זיכרון (8). הנוגדנים נקשרים לאנטיגן ויוצרים צברים של אנטיגנים ונוגדנים (17). הצברים מותקפים על ידי תאי T-הורגים (18) ועל ידי מקרופאגיים (20).

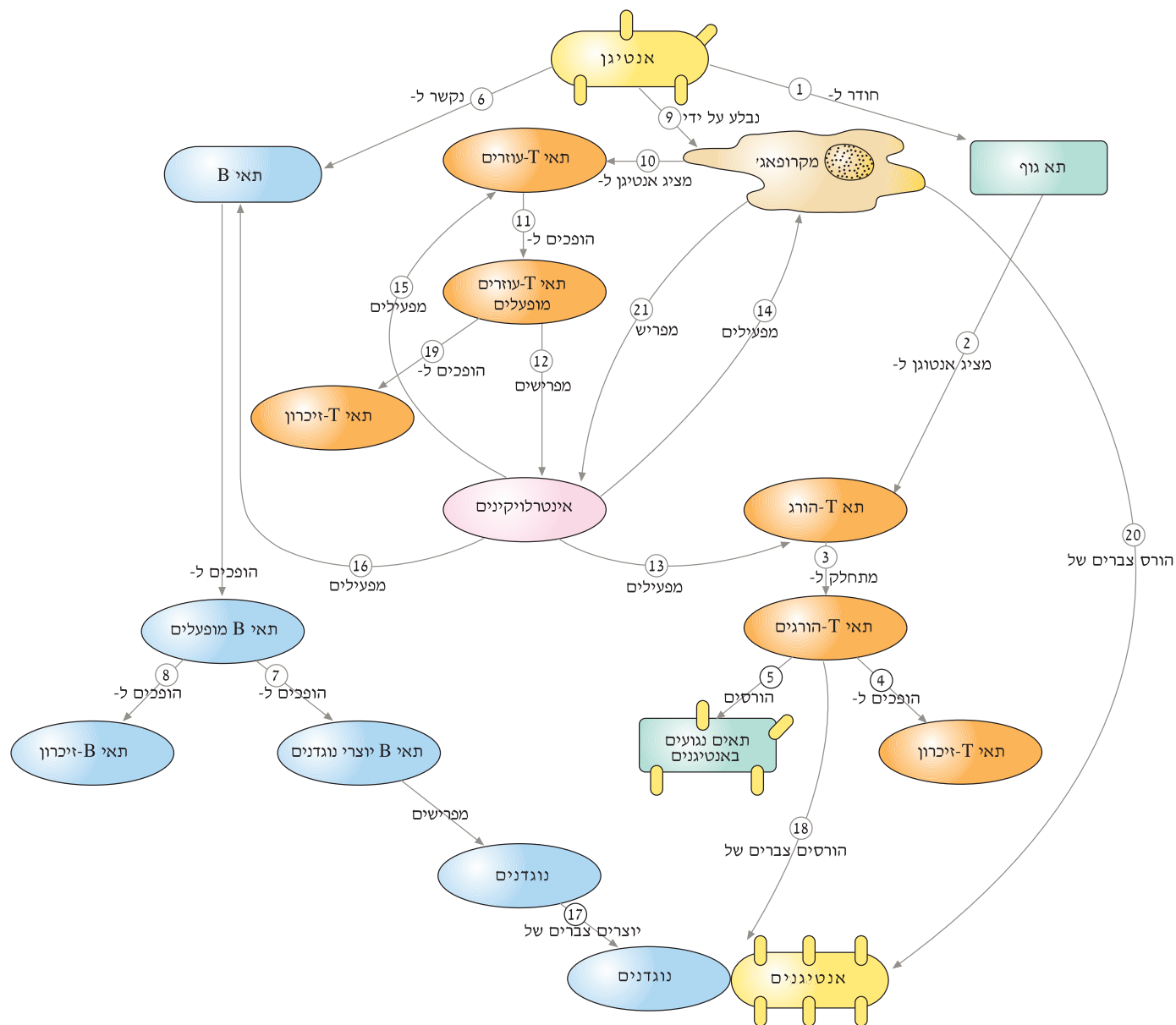
אנטיגן שחודר לגוף ונבלע על ידי מקרופאג' מפעיל את התגובה התאית ואת התגובה ההומורלית (9). חלק ממולקולות האנטיגן מתפרקות, נקשרות למולקולות של המקרופאג' והתצמיד שנוצר נודד לקרום התא. בשלב הזה, המקרופאג' מתפקד כ"תא מציג אנטיגן" (10). אל התצמיד נקשרים תאי T-עוזרים, שיש להם אתרי קישור ייחודיים לאותו תצמיד (11). חלק מתאי T-עוזרים מתמיינים לתאי T-זיכרון (19). תאי T-עוזרים אחרים מכוונים את הפעילות של קבוצות אחרות של לימפוציטים; הם קובעים אילו תאים וכמה מהם ישתתפו בתגובה החיסונית. תאי T-עוזרים והמקרופאגיים משחררים חומרים מתווכים שנקראים **אינטרלוקינים** (interleukins) (12, 21). האינטרלוקינים הם חלבונים שבאמצעותם מתקשרים תאי מערכת החיסון בהפעלת המנגנונים המסייעים בהרס האנטיגן. האינטרלוקינים משפיעים על הגדילה, ההתמיינות וההפעלה של ארבעת סוגי התאים האלה:

1. תאי T-הורגים (13), שתוקפים את האנטיגן בתגובה התאית (5) ובתגובה ההומורלית (18).

2. מקרופאגיים (14) שבולעים את האנטיגן (9) או הורסים אותו בתגובה ההומורלית (20).

3. תאי T-עוזרים (15) נוספים, שמגבירים את התגובה (11)

4. תאי B (16), שמתחילים לייצר נוגדנים (7); הנוגדנים נקשרים לאנטיגן (17) ופועלים לחיסולו (בתגובה ההומורלית).



איור ה-15: הפעילות המשולבת של מערכת החיסון הייחודית

הפעילות של מערכת החיסון נגד האנטיגן נמשכת כל עוד האנטיגן נמצא בגוף. כאשר כל האנטיגן שהיה בגוף מחוסל, קצב הפעילות של מערכת החיסון יורד. ויסות הפעילות נעשה באמצעות לימפוציטים שנקראים **תאי T-מדכאים**. הלימפוציטים האלה מפסיקים או מצמצמים את יצירת התאים האחרים שפועלים בתגובה החיסונית.

הזיכרון החיסוני

חשיפה ראשונה של הגוף לאנטיגן מעודדת יצירת נוגדנים בתגובה שנקראת **תגובת חיסון ראשונית** (איור ה-18 בעמ' 261). העלייה ברמת הנוגדנים בדם, בתגובה הראשונית, ניכרת רק כמה ימים לאחר חדירת האנטיגן. לאחר שהפולש חוסל ומערכת החיסון "סיימה את תפקידה", נעלמים מרבית הנוגדנים מן הדם. כמות מסוימת של נוגדנים (ייחודים לאותו אנטיגן שפלש) נשארת בזרם הדם, וכן לימפוציטים ייחודיים שמשמשים כתאי זיכרון (תאי T-זיכרון ותאי B-זיכרון). כאשר אותו אנטיגן פולש שוב לגוף, מופעלת **תגובת החיסון השניונית**; הנוגדנים שנשארו בדם נקשרים מיד אל האנטיגן ומנטרלים אותו, ותאי הזיכרון מפעילים את מערכת החיסון. תגובת החיסון השניונית תמיד מהירה וחזקה יותר מתגובת החיסון הראשונית; הנוגדנים נוצרים בכמות גדולה יותר (פי 100 ויותר) ובזמן קצר יותר (תוך 3-5 ימים במקום תוך 10 ימים), והאדם כלל לא מרגיש חולה. למשל, כאשר נגיף של חזרת חודר לגוף בפעם הראשונה, הגוף מגיב בתגובה ראשונית איטית, ובינתיים מתפתחים סימני המחלה: חום, נפיחות של בלוטות רוק וכאב. לאחר כשבוע או יותר מתגברת מערכת החיסון על הנגיף, והמחלה חולפת. אם בעתיד הנגיף יחזור, מערכת החיסון תגיב נגדו בתגובה שניונית, שהיא מהירה וחזקה בהרבה. הנגיף ינוטרל ויסולק עוד בטרם הספיק לעורר מחלה, והאדם אפילו לא ידע שהנגיף היה בסביבתו. הזיכרון החיסוני נגד נגיף החזרת נשמר לכל החיים, אך אין הדבר כך לגבי כל האנטיגנים; יש אנטיגנים שהזיכרון החיסוני נגדם נשמר למשך זמן קצר בלבד.

עקיצה בישוב מונעת צלקת בפנים

זמן רב לפני שמנגנוני החיסון היו מובנים, כבר ידעו הורים שאם ילדיהם נעקצו פעם אחת על ידי זבוב החול, וחלו ב"שושנת יריחו", הם לא יחלו במחלה זו פעם נוספת. לכן, נהגו הורים לחשוף את הישבנים ואת כפות הרגליים של הילדים לעקיצות זבוב החול, בעודם תינוקות. במקום של העקיצה התפתח פצע מוגלתי שהשאיר צלקת, וההורים היו בטוחים שבמקרה שילדיהם יעקצו בעתיד באזור הפנים לא יתפתחו שם צלקות. ההורים, שהדביקו במכוון את ילדיהם בשושנת יריחו, הפעילו אצלם את תגובת החיסון הראשונית.



סיכום

1. מערכת החיסון הייחודית פועלת כקו ההגנה השלישי של הגוף והיא מבוססת על כמה סוגים של תאי דם לבנים.
2. המרכיבים של מערכת החיסון הייחודית מצויים בכול הגוף, והם פעילים נגד מגוון רחב של גורמים זרים (אנטיגנים); הם "יודעים להבחין" בין תאי הגוף עצמו לבין אנטיגנים, והם מגיבים רק לאנטיגנים שעוררו את יצירתם ולא לאנטיגנים אחרים. יש להם יכולת "לזכור" אנטיגנים שחדרו לגוף, וכאשר אנטיגנים כאלה חודרים שנית לגוף הם תוקפים אותם בצורה מהירה יותר וחזקה יותר.
3. הפעילות של מערכת החיסון הייחודית מורכבת משתי תגובות: (א) תגובת חיסון תאית, שבה פעילים לימפוציטים T. הלימפוציטים האלה פעילים נגד אנטיגנים שחדרו לתוך תאי הגוף וכן נגד תאים סרטניים ותאים מושתלים; (ב) תגובת חיסון הומורלית, שבה פעילים לימפוציטים B. הלימפוציטים האלה מייצרים נוגדנים, והם פעילים נגד אנטיגנים שנמצאים בנוזלי הגוף.
4. בין כל מרכיבי מערכת החיסון יש תקשורת, והיא מתבצעת באמצעות מתווכים כימיים.
5. סילוק האנטיגן מתבצע בכמה דרכים: על ידי בליעה ופירוק, על ידי המתת האנטיגן ללא בליעתו, על ידי קשירה ונטרול הפעילות, וכן על ידי קשירה ומניעת החדירה לתאי הגוף.
6. כאשר הגוף נחשף לאנטיגן בפעם הראשונה מתרחשת תגובת חיסון ראשונית. לאחר התגובה הזאת נוצר בגוף זיכרון חיסוני. כאשר הגוף נחשף לאותו אנטיגן בפעם השנייה, הזיכרון החיסוני של הגוף מפעיל תגובת חיסון שניונית. התגובה הזאת חזקה יותר ומהירה יותר מן התגובה הראשונית.



1. מערכת החיסון מזהה אנטיגנים ומגיבה להם באופן ייחודי, אפילו אם האנטיגנים אינם גורמי מחלות. כיצד ניתן לנצל את העובדה הזאת בתחום המחקר של מערכות ההגנה בגוף?
2. האם פיזור איברי החיסון בגוף מהווה יתרון? הסבירו.

3. לפניכם שתי רשימות: ברשימה אחת מפורטים סוגי התאים שמשתתפים בתגובת החיסון הייחודית. ברשימה האחרת מפורטות פעילויות שונות של תאי החיסון. מצאו איזו פעילות מתאימה לכל אחד מסוגי התאים.

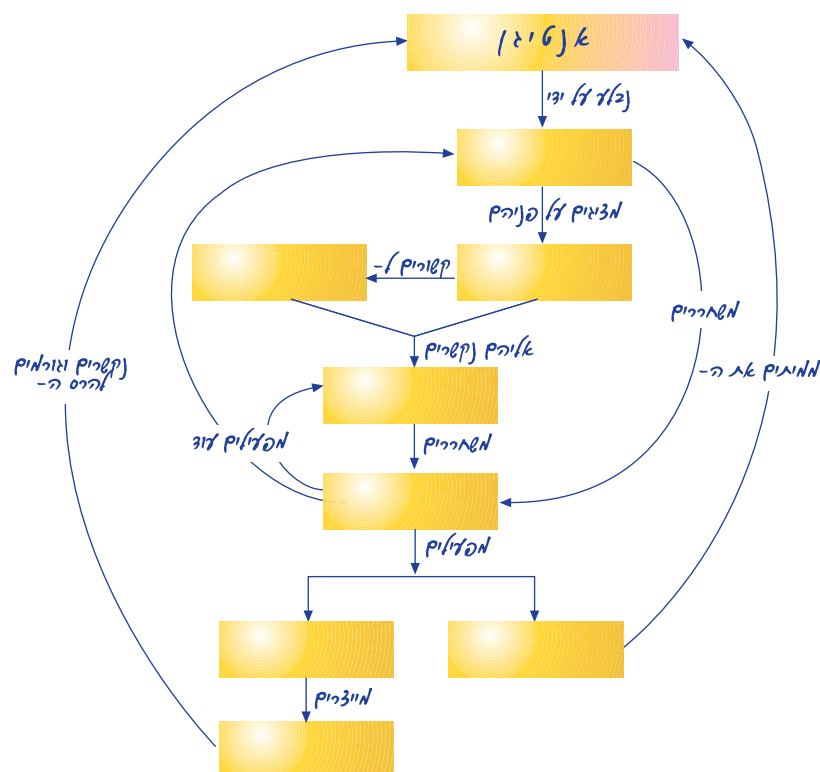
סוג התאים	פעילות התאים
1. תאי T-מדכאים	א. אחראיים להפעלת המערכת החיסונית במקרה של פלישה חוזרת של אותו אנטיגן.
2. תאי T-זיכרון	ב. אחראיים ליצירת הנוגדנים.
3. תאי T-הורגים	ג. אחראיים להפסקת התגובה החיסונית לאחר סילוק האנטיגן.
4. תאי T-עוזרים	ד. אחראיים לבליעת האנטיגן.
5. תאי B	ה. אחראיים לוויסות הפעילות של תאי החיסון האחרים.
6. מקרופאגים	ו. אחראיים לפגיעה בתאים שמאחסנים אנטיגנים.

4. העתיקו את טבלה ה-1 ורשמו בה את המאפיינים העיקריים של לימפוציטים T ושל לימפוציטים B.

טבלה ה-1: המאפיינים העיקריים של לימפוציטים T ושל לימפוציטים B

לימפוציטים T	לימפוציטים B
אתר הייצור	
אתר ההבשלה המרכזי	
תגובת החיסון (ההומורלית / התאית)	
האנטיגנים המותקפים	
אופן הפעולה	

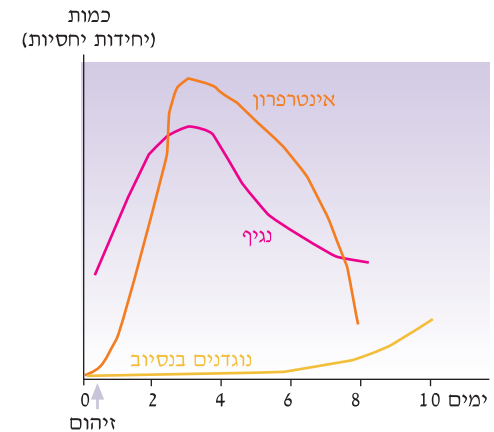
5. לפניכם מפת מושגים שמתארת את אחת מדרכי הפעולה של מערכת החיסון הייחודית (איור ה-16). השתמשו ברשימת המושגים הזאת, כדי להשלים את המושגים שחסרים במפה: תאי T-עוזרים; נוגדנים; אינטרלוקינים; מולקולות של המקרופאג; שרידים של האנטיגן; תאי T-הורגים; מקרופאגים; תאי B.



איור 16: אחת מדרכי הפעולה של מערכת החיסון הייחודית

6. הכינו מפת מושגים שתתאר את התגובה התאית ואת התגובה ההומורלית שאינן מופעלות באמצעות מקרופאגיים. ניתן להיעזר ברשימת המושגים הזאת: תאי B-זיכרון; אנטיגן; מולקולות של האנטיגן; תאי T-הורגים; נוגדנים; תא גוף; תאי-T זיכרון; תאי B.
7. השוו (בטבלה) בין שלושת קווי ההגנה של הגוף תוך התייחסות להיבטים האלה: מקום פעולתם; אופן הפעלת התגובה; ייחודיות התגובה; סוגי התאים שפעילים; אופן הפעולה; מהירות התגובה והזיכרון.
8. מהו היתרון בעובדה שהנוגדנים נוצרים בכמויות גדולות רק בתגובה לחדירת האנטיגן שנגדו הם פועלים?
9. עם תחילת ההיריון, מופרש מהשליה הורמון (HCG - Human Chorionic Gonadotropin). ההורמון הזה מצוי בשתן ובדם של האישה ההרה. במעבדות המבצעות בדיקות לאבחון היריון מזהים את נוכחות ההורמון בעזרת נוגדנים.

- א. איזו תכונה של הנוגדן מנוצלת בבדיקה הזאת?
- ב. מהי התגובה שתתקבל במקרה שהאישה הרה? הסבירו.
10. הגרף באיור ה-17 מתאר את השינויים ברמת הנוגדנים וברמת האינטרפרון בגוף, לאחר שנגיפים חדרו אליו. התבוננו בגרף וענו על השאלות האלה:
- א. מהו הקשר בין נוכחות נגיף בגוף לבין כמות האינטרפרון המופרשת? הסבירו
- ב. השוו בין העלייה ברמת האינטרפרון לבין העלייה ברמת הנוגדנים.
- ג. מהו היתרון של הופעת כל אחד מאמצעי ההגנה בפרק זמן אחר, במהלך ההתמודדות עם הנגיף?
- ד. מהו היתרון בקיום שתי מערכות תגובה נגד נגיפים?
- ה. מה, לדעתכם, יקרה לאדם שסובל מליקוי בהפרשת אינטרפרון, כאשר נגיף יחדור לגופו?
11. בניסוי שנערך עם עופות מאוד צעירים, כרתו להם איבר שנקרא בורסה. לאחר הכריתה נמצא שהעופות האלה יכלו להגיב בתגובת החיסון התאית, אך הם לא יכלו להגיב בתגובת החיסון ההומורלית. לעומת זאת, עופות כרותי תימוס לא יכלו להגיב בתגובת החיסון התאית, וגם תגובת החיסון ההומורלית שלהם נפגעה.
- א. הציגו את ממצאי הניסוי בטבלה.
- ב. הסבירו את תוצאות הניסוי.
- ג. אילו מן העופות של הניסוי יכלו לדחות שתלים ואילו מהם יכלו לייצר נוגדנים?
- ד. מה יקרה אם לעופות כרותי הבורסה ולעופות כרותי התימוס יזריקו לימפוציטים T ולימפוציטים B, גם יחד?
- ה. איזו תגובה חיסונית תתקבל, אם לעופות כרותי הבורסה יזריקו לימפוציטים מסוג B בלבד ולאחר מכן - אנטיגן?
- ו. איזו תגובה חיסונית תתקבל, אם לעופות כרותי התימוס יזריקו לימפוציטים מסוג B בלבד ולאחר מכן - אנטיגן?
- ז. איזו תגובה חיסונית תתקבל, אם לעופות כרותי התימוס יזריקו לימפוציטים מסוג T בלבד ולאחר מכן - אנטיגן?



איור ה-17: רמת אינטרפרון ונוגדנים בדם בהשפעת נגיפים



יישומי מחשב, שעוסקים במערכת החיסון, נמצאים ביחידת הלימוד **מערכת החיסון, מיקרואורגניזמים כגורמי מחלות - מחלת הפה והטלפיים** שבאתר

http://agribio.snunit.k12.il/main/upload/.ab/id_pot.html

היישום **החיסון כנגד מחלת הפה והטלפיים** נמצא באתר

http://agribio.snunit.k12.il/mouth/upload/voyage/immun_map.html

ביישום לומדים על מערכת החיסון באמצעות חקר של בעיה אותנטית - מחלת הפה והטלפיים; היישום כולל הכנת הצעת מחקר לפיתוח תרכיב חיסוני חלופי נגד המחלה. בגיליון אלקטרוני התלמיד מתבקש לעבד נתונים ממחקרים שונים, שעוסקים בחיסון נגד מחלת הפה והטלפיים. המחקרים עוסקים בשלושה תחומים: (א) השוואה בין סוגי חיסונים שונים במעבדה ובחיה השלמה; (ב) התגובה התאית של החיסון; (ג) קביעת משטר חיסונים רצוי. עיבוד נתוני המחקרים נעשה בעזרת גיליון אלקטרוני, והוא כולל סרטוט גרפים וניתוח קווי מגמה, נוסחאות מערכת ונוסחאות תא, סינון והתייחסות למהימנות המחקר ולמרכיבי הניסוי המדעי. היישום כולל גם אנימציות וקישורים לאתרי אינטרנט.

היישום **מערכת החיסון - טטנוס** נמצא באתר

http://agribio.snunit.k12.il/main/upload/.ab/id_tetanuss.html

היישום הוא הזמנה לחקר מקרה של מחלת הטטנוס, במטרה ללמוד על מערכת החיסון באדם; החקר כולל מעבדה מעשית, קריאה מודרכת של מאמר מדעי, תכנון ניסוי תוך התייחסות למרכיבי הניסוי המדעי, משימת יישום לביסוס הידע, עיבוד וניתוח של נתוני מחקר בעזרת גיליון אלקטרוני. בפעילות יש אנימציות, סימולציות, והפניה לאתרי אינטרנט.

היישום **רדיקלים חמצניים** נמצא באתר

http://agribio.snunit.k12.il/main/upload/.ab/id_radicals.html

היישום עוסק בתפקיד הרדיקלים החמצניים בתהליך הדלקת; עיבוד הנתונים נעשה בעזרת גיליון אלקטרוני, ובין היתר נעשה שימוש בעקום כיול למציאת ערך לא ידוע.

היישום **מערכת החיסון בעופות** נמצא באתר

<http://agribio.snunit.k12.il/main/upload/.bagrut1998/efrob.doc>

היישום עוסק בפיתוח תרכיב חיסוני לאפרוחים נגד הידבקות ב-E. coli; עיבוד הנתונים נעשה בעזרת גיליון אלקטרוני והוא כולל סרטוט גרפים וניתוח קווי מגמה, תוך התייחסות למהימנות המחקר ולמרכיבי הניסוי המדעי.

היישום **מערכת החיסון בפרות** נמצא באתר

<http://agribio.snunit.k12.il/main/upload/.bagrut1998/cowsb.rtf>

היישום עוסק בפיתוח תרכיב חיסוני לפרות נגד הידבקות ב-E. coli; עיבוד הנתונים נעשה בעזרת גיליון אלקטרוני והוא כולל סרטוט גרפים וניתוח קווי מגמה, תוך התייחסות למהימנות המחקר ולמרכיבי הניסוי המדעי.

מערכת החיסון – יישומים ברפואה ובתעשייה

הידע הרב שנרכש ממחקרים על מערכת החיסון בחולייתנים, מיושם בתחומים שונים ובעיקר ברפואת האדם וברפואת בעלי חיים. הודות לגילוי מנגנוני החיסון הייחודי מצליחים היום לפתח תכשירים שבעזרתם ניתן לחסן אנשים ובעלי חיים נגד מגוון רחב של מחלות. המידע הרב שהצטבר מסייע גם לשתול בהצלחה איברים ורקמות מתורמים זרים, מבלי שהאיברים הזרים יידחו. המידע אודות הנוגדנים וקשירתם הייחודית לאנטיגנים מיושם ברפואה, בתעשייה ובשמירה על איכות הסביבה.

החיסון המלאכותי

חסינות היא תכונה שמונעת התפתחות של גורמים זרים שחודרים לגוף, והיא מתקיימת כתוצאה מפעילותם של מנגנוני ההגנה הייחודיים. החסינות מתפתחת במהלך החיים, בעקבות חשיפה לאנטיגן; היא מתפתחת באופן טבעי או כתוצאה מפעילות רפואית מכוונת, שנקראת **חיסון מלאכותי**.

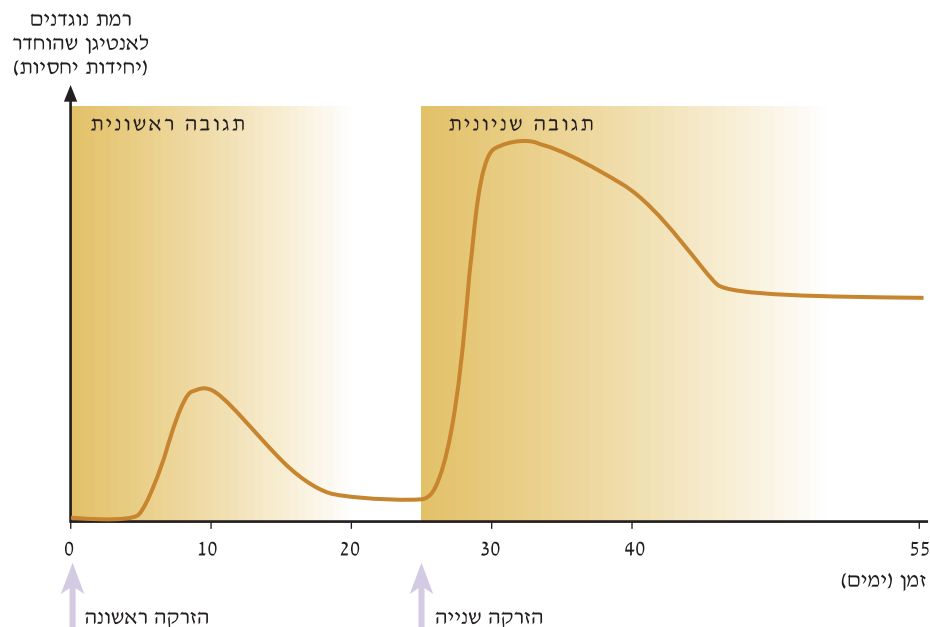
החיסון המלאכותי הראשון ניתן נגד מחלת האבעבועות השחורות. מחלת האבעבועות השחורות הייתה מגפה קשה שגרמה למותם של המוני אנשים בעולם עד המאה ה-18. במחצית השנייה של המאה ה-18 הבחין רופא כפרי באנגליה, אדוארד ג'נר (Eduard Jenner; 1749-1823), שיש פרות שחולות במחלת אבעבועות של בקר, והנערות שחולבות את הפרות האלה, נדבקות במחלת הבקר. מחלת אבעבועות של בקר היא מחלה קלה מאוד אצל בני האדם, ואותן הנערות שנדבקו בה לא חלו במחלת האבעבועות השחורות שתוקפת בני אדם, שהיא מחלה קשה בהרבה. ג'נר שיער שההדבקה באבעבועות הבקר הגנה, בדרך כלשהי, על הנערות החולבות מפני אבעבועות שחורות. כדי לבדוק את השערתו, לקח ג'נר את הנוזל מאבעבועות של פרה, והחדיר אותו לסריטה בזרועו של ילד. על ידיו של הילד הופיעו אבעבועות, אך הן לא השפיעו על בריאותו הכללית. לאחר מכן, החדיר ג'נר לסריטה בזרועו של הילד טיפות מוגלה שנלקחו מאבעבועה של אדם חולה באבעבועות שחורות, והילד לא חלה. על סמך הניסוי הזה שכנע ג'נר אנשים רבים, והם נתנו לו לחסנם מפני אבעבועות שחורות. כל מי שהזריקו לו את הנוזל מאבעבועות הבקר, לא חלה כלל באבעבועות שחורות. ג'נר טען, כי מי שחולה באבעבועות הבקר מתחסן מפני אבעבועות שחורות, ובכך הניח את היסוד לחיסון המלאכותי. אנשים רבים ביקשו מג'נר לחסן אותם, אך רופאים רבים תקפו את עבודתו וטענו שכמוהו כרופאי האליל. הם קראו בלגלוג לשיטתו vaccination שפירושו "הפיכה לפרה".

מאחר שניסוייו של ג'נר לא בוצעו באורח מבוקר, הוא לא הצליח להפוך את שיטתו לטיפול רפואי מבוסס. רק כעבור כמאה שנים, לאחר מחקרים ותגליות של חוקרים נוספים, התקבלה שיטת החיסון של ג'נר כדרך מקובלת לחיסון נגד אבעבועות שחורות ונגד מחלות אחרות. והמונח vaccination נעשה מילה מכובדת, שמשמעותה, מאז ועד היום, "חיסון מלאכותי".

חיסון פעיל

הבנת המנגנון שבו פועלת שיטת החיסון של ג'נר התאפשרה הודות לתגליותיו של לואי פסטר (Louis Pasteur; 1822-1895). פסטר חקר את מחלת הכולירה בתרנגולות. הוא הזריק לתרנגולות בריאות תרבית "ישנה" של חיידקי כולירה, שנשכחה בטעות במעבדה, וגילה שהתרנגולות לא חלו. לעומת זאת, כשהזריק לתרנגולות תרבית טרייה התרנגולות מתו. אבל, כאשר הזריק תרבית טרייה לתרנגולות שכבר קיבלו את התרבית הישנה, גם הן לא מתו. פסטר הבין שהחיידקים החלשים (מן התרבית הישנה) אינם גורמים להתבטאות חזקה של המחלה, ואפילו פועלים לחיסון של התרנגולות. על פי העיקרון הזה, שהוא הבסיס לשיטת **החיסון הפעיל**, נוהגים לחסן עד היום בעלי חיים ובני אדם. בשיטה החיסון הפעיל מחדירים לגוף **תרכיב חיסון** שהוא תערובת של חומרים שמכילה פתוגן (גורם מחלה) מוחלש או מומת, כלומר: מחדירים לגוף אנטיגן מוחלש, שאינו גורם לאדם לחלות. נוכחות האנטיגן מעוררת בגוף תגובת חיסון ראשונית, כלומר: נוכחות האנטיגן מעוררת את מערכת החיסון לפעול וליצור נוגדנים נגד האנטיגן שהוחדר. הנוגדנים משמידים את גורם המחלה המוחלש, ולאחר מכן חלק מן הנוגדנים נשארים בדם של האדם המחוסן, יחד עם תאי זיכרון מסוג T ומסוג B. אם בעתיד יחדור אותו גורם מחלה לגוף, תפעל נגדו תגובת חיסון שניונית, והיא תהיה מהירה יותר וחזקה יותר, ובגוף לא יופיעו סימני המחלה. בדרך כלל, נותנים לתינוקות ולילדים את אותו תרכיב חיסון פעמיים או יותר, בזריקות שנקראות **זריקות דחף**, וכך מוגברת תגובת החיסון השניונית של הגוף (איור ה-18).

החיסון הפעיל משמש עד היום לחיסון אוכלוסיות של בני אדם ושל בעלי חיים. המחלות שמקובל לחסן נגדן הן, בראש וראשונה, מחלות שהיו עד לפני כמה עשורים האויבות הגדולות ביותר של האדם. היום כמעט שאין מוכרות, מכיוון שלא חולים בהן עוד. במדינות מערביות, כל ילד מקבל חיסונים פעילים שונים מרגע לידתו ועד לסיום לימודיו בבית הספר היסודי. בארץ, נותנים לילדים חיסונים נגד אדמת, חזרת, חצבת, דיפתריה (אסכרה), טטנוס (צפדת), שעלת, דלקת כבד נגיפית (צהבת) מסוג B ומסוג A, נגד שיתוק ילדים (פוליו), וכן חיסון נגד החיידק שגורם דלקת קרום המוח.



איור ה-18: תגובת חיסון ראשונית ותגובה שניונית להזרקות של אנטיגן

תרכיבי חיסון – הדור החדש

מבין מיליוני הפתוגנים המומתים או מוחלשים, שמוזרקים לגוף בחיסון פעיל, די בפתוגן פעיל אחד כדי לגרום להתפרצות המחלה שנגדה רוצים לחסן. יש גם מחלות שקשה לפתח נגדן תרכיב חיסון, משום שקשה לגדל



במעבדה כמויות מסחריות של הפתוגן שמחולל את המחלה.

למעשה, כדי לעורר את התגובה החיסונית בגוף אין צורך בהחדרה של כל הפתוגן, אלא מספיק שיוחדר חלבון יחיד של הפתוגן שיזוהה על ידי מערכת החיסון כאנטיגן. חלבונים אנטיגניים כאלה ניתן לייצר בכמויות מסחריות ובעלויות יחסית נמוכות, מבלי שיהיה צורך לגדל את הפתוגן עצמו במעבדה. הדרך לעשות זאת היא באמצעות טכנולוגיה של הנדסה גנטית, שמאפשרת להחדיר DNA מיצור אחד ליצור אחר. בטכנולוגיה הזאת, מבודדים מגורם המחלה גן שאחראי לייצור של חלבון אנטיגני, שיכול לעורר בגוף המחוסן את התגובה החיסונית. את הגן הזה מחדירים למיקרואורגניזמים, למשל: לשמרים. את השמרים המהונדסים מגדלים במעבדה בתנאים מבוקרים, בכלים גדולים,

ומקבלים כמות גדולה של תאים שבתוכם החלבון האנטיגני. את החלבון הזה קל להפיק בכמויות מסחריות. תרכיב מסוג כזה נגד צהבת B כבר נמצא בשימוש שגרתי, ותרכיבים נוספים נמצאים בשלבי ניסוי מתקדמים.

תרכיבי חיסון שמבוססים על חלבון אנטיגני, שמיוצר באורגניזמים מהונדסים, ניתן לייצר גם בצמחים. בשנת 1990 פותח לראשונה תרכיב **חיסון צמחי**, כאשר הצליחו לבטא גן של חיידק סטרפטוקוקוס בצמחי טבק. חיידקי סטרפטוקוקוס גורמים דלקות באיברים וברקמות שונות, כמו: בגרון, בעור, בריאות, בלב, באוזניים ובקרום המוח. בצמחי הטבק המהונדסים נוצרו חלבונים סטרפטוקוקיים, והעכברים שאכלו את צמחי הטבק המהונדסים פיתחו תגובה חיסונית נגד החיידק. מאז, הצליחו לייצר גם חיסונים אחרים, למשל: חיסון נגד צהבת B בצמחי בננה, חיסון נגד כלבת בעגבנייה, חיסון נגד כולירה בצמחי טבק ובתפוח אדמה, וחיסון נגד מחלת הפה והטלפיים בצמח תודרנית (ארבידופסיס).

הרעיון של החיסון הצמחי הוא לספק לאנשים תרכיב חיסון כחלק מן המזון היומיומי. מסתבר, שאפשר לאכול את תרכיבי החיסון האלה, משום שבחלק מן המקרים החלבון האנטיגני אינו מתפרק במערכת העיכול או שהפירוק שלו אינו פוגע ביעילותו. תרכיבי חיסון צמחיים הם אכילים והם יהיו זולים מאוד, כי קל לגדל צמחים בכמויות גדולות. התרכיבים יהיו גם יותר זמינים לאוכלוסיית העולם השלישי, משום שבארצות האלה חסר ציוד שדרוש לייצור תרכיבי חיסון, לאחסונם ולהובלתם.

תרכיב חיסון חדשני אחר שפותח בשנים האחרונות הוא תרכיב **חיסון גנטי**. לעומת תרכיב החיסון שמכיל את החלבון האנטיגני שמעורר את תגובת החיסון, תרכיב חיסון גנטי מכיל את הגן שאחראי לייצור החלבון המחסן. במקום להפיק במעבדה את החלבון, שנגדו מעוניינים לחסן, ולהחדיר את החלבון לגוף, מחדירים לגוף ישירות את ה-DNA שאחראי לייצור אותו חלבון. ה-DNA הזה כולל רק את הגנים שמעוררים את המערכת החיסונית, אך אינו כולל את הגנים שמאפשרים לגורם המחלה להתרבות בגוף ולגרום להתפתחות המחלה. את ה-DNA הזה מחדירים אל רקמת השריר, לעור או לאף בדרכים שונות, כגון: בתרסיסים, במשחות, במדבקות או באכילה. ה-DNA חודר לתאים (באמצעות נשא, למשל: נגיף שאינו גורם למחלה) ובתוך התאים הוא עושה את דרכו לגרעין. כאשר ה-DNA נמצא בגרעין, הגנים באים לידי ביטוי ונוצרים החלבונים האנטיגניים. האנטיגנים האלה מפעילים את מערכת החיסון ותוך כמה ימים מופיעים נוגדנים בדם.

בתרכיבים הגנטיים אפשר למצוא את כל היתרונות הנדרשים מתרכיב יעיל: (א) אין סכנה שהם יגרמו מחלה; (ב) קל לייצר אותם בכמויות גדולות; (ג) תרכיב גנטי שומר

על פעילותו לאורך זמן, גם בטמפרטורות גבוהות מ- 400°C (כלומר, אין צורך לשמור אותו בקירור); (ד) תרכיב גנטי שנמצא זמן ממושך בתא מבטיח שתאי מערכת חיסון יהיו במצב מעורר, ולכן אין צורך לתת זריקות דחף רבות, כדי להשיג חיסון מתמשך; (ה) אפשר להנדס תרכיבים גנטיים שיש בהם גנים לאנטיגנים של כמה פתוגנים, או גנים של אותו פתוגן אבל מזנים שונים (למשל, זנים שונים של נגיף השפעת). תרכיב כזה מרחיב את תחום ההגנה הנרכשת.

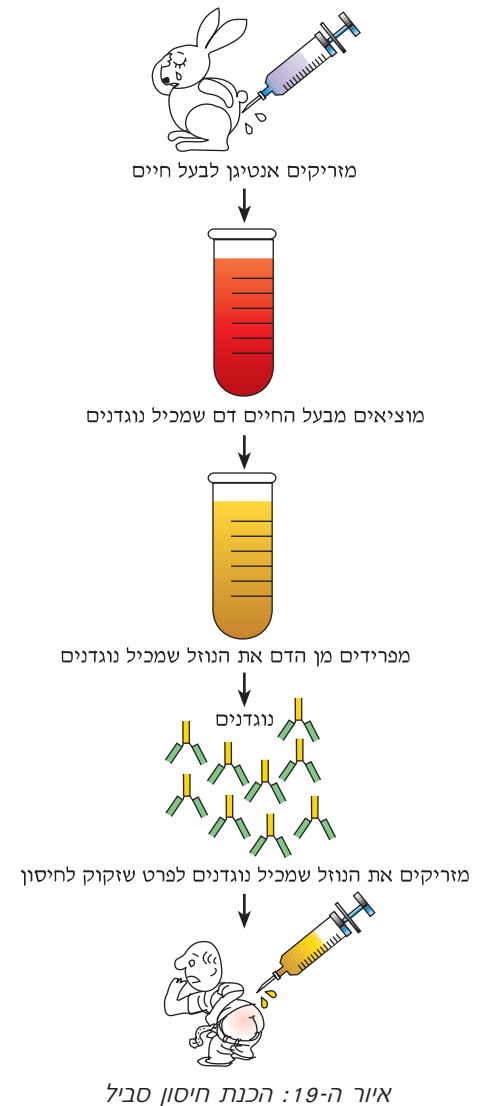
תרכיבי חיסון גנטיים נגד כמה מחלות כבר נמצאים בשלבי פיתוח מתקדמים, למשל: נגד איידס ונגד מלריה. עם זאת, עדיין נותרו שאלות פתוחות הקשורות לבטיחות השימוש בהחדרת חומר גנטי זר לגוף.



חיסון סביל

כאשר יש סכנה שקצב יצירת הנוגדנים יהיה איטי יותר מקצב התפשטות הזיהום בגוף, מסייעים למערכת החיסון ל"התגבר" על גורמי המחלה על ידי הזרקת נוגדנים מוכנים. חיידיקי הטטנוס הם דוגמה של גורם מחלה, שמאיים על הגוף מיד עם פלישתו לגוף. חיידיקי הטטנוס עלולים לחדור לגוף במקרה של פציעה (למשל, פציעה ממסמר חלוד). לאחר חדירתם, הם מתרבים ומפרישים רעלן שפוגע במערכת העצבים באופן בלתי הפיך. הרעלן עלול אף לגרום למוות. מערכת החיסון של הגוף אמנם מייצרת נוגדנים נגד חיידיקי הטטנוס, אלא שחיידיקי הטטנוס מתרבה במהירות ויש חשש שהפגיעה במערכת העצבים תהיה קטלנית. לכן, לא מסתכנים, אלא ממחרים לסייע למערכת החיסון על ידי הזרקת נוגדנים שהוכנו מראש נגד חיידיקי הטטנוס. הנוגדנים האלה נוצרו בגופו של בעל חיים אחר, כתגובה להזרקה של חיידיקי הטטנוס לגופו. החדרת נוגדנים שנוצרו בבעל חיים אחד לבעל חיים אחר, או לאדם, נקראת **חיסון סביל**. את תרכיב החיסון הסביל מכינים בשני שלבים (איור ה-19): בשלב הראשון, מזריקים אנטיגן לבעל חיים, למשל לארנבת, והוא מייצר נוגדנים נגד אותו אנטיגן. בשלב השני, מוציאים מבעל החיים דם שמכיל נוגדנים, מפרידים מן הדם את הנוזל שמכיל נוגדנים

יתרוננו של החיסון הסביל הוא בפעולתו המידית, אך יש לו גם מגבלות: הנוגדנים שהוכנו בגוף של חיה כלשהי מזוהים כאנטיגנים בגופו של המחוסן, ולכן הם מושמדים תוך זמן קצר (בדרך כלל, לאחר שהספיקו לנטרל את האנטיגן). זאת הסיבה שהחיסון הסביל יעיל רק למשך זמן קצר והוא אינו מקנה זיכרון חיסוני.



חיסון סביל מולד

כל תינוק מחוסן בחיסון סביל עוד בטרם נולד. עוד בהיותו ברחם אמו, עוברים אל העובר נוגדני האם, דרך קרום השליה. כחודש לאחר הולדת התינוק, פוחתת כמות הנוגדנים האלה ויורדת למחצית. אם התינוק יונק, הוא ממשיך לקבל חיסון סביל באמצעות חלב אמו שמכיל נוגדנים. חלב האם עשיר בנוגדנים, בייחוד בימים הראשונים לאחר הלידה. אמנם חלק מן הנוגדנים האלה מתפרק במערכת העיכול של התינוק, אך מתברר שהחלק שנשאר מקנה בכול זאת הגנה ליילוד בתקופה הראשונה לחייו.



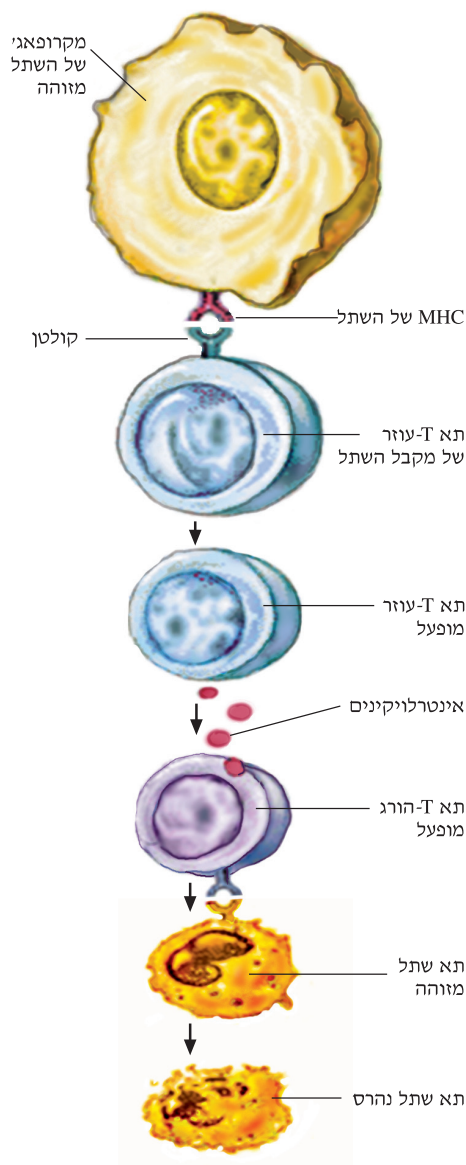
השתלת רקמות

אחת התכונות של מערכת החיסון היא היכולת להבחין בין עצמי לבין זר. כושר ההבחנה הזה חיוני לקיומו של היצור החי, אולם ברפואה המודרנית נוצרו מצבים שבהם כושר ההבחנה הזה נעשה גורם מפריע. מצבים כאלה נוצרים כאשר משתילים איבר או רקמה בגוף של אדם שזקוק לכך. כאשר במקום איבר פגוע שותלים איבר או חלק של איבר מאדם בריא, מערכת החיסון של החולה מגיבה כלפי השתל הזר ודוחה אותו, אלא אם נוקטים אמצעים למנוע את הדחייה.

דחיית רקמה זרה

הזיהוי של הרקמה המושתלת כאיבר זר נעשה על סמך מולקולות חלבוניות שנמצאות על גבי תאי השתל, ונקראות מולקולות תואם הרקמות - MHC* (major histocompatibility complex). מולקולות ה-MHC של פרט מסוים מהוות אנטיגן לפרט אחר, ומכאן שמם הנוסף: אנטיגנים של תואם רקמות. קרומי כל התאים בגוף נושאים כ-20 קבוצות שונות של אנטיגנים כאלה, ובכול קבוצה יש מספר גדול של אנטיגנים שונים. בגופו של כל אדם יש נציגים מכל קבוצת אנטיגנים, לכן לכל אדם יש צירוף של MHC המיוחד רק לו ושונה מן הצירוף שקיים אצל אדם אחר. הצירוף הייחודי של ה-MHC בקרומי התאים מהווה "תעודת זיהוי" של הגוף. כאשר משתילים איבר או רקמה זרה, מחדירים לגוף תאים שנושאים MHC זרים למערכת החיסון של מקבל השתל. מערכת החיסון של מקבל השתל מפתחת תגובת חיסון תאית נגד האנטיגנים האלה. תגובת החיסון התאית מתעוררת בעיקר על ידי MHC שמצויים על גבי מקרופאגיים ולימפוציטים B של השתל (איור ה-20). המקרופאגיים והלימפוציטים B של השתל מתפקדים במצב הזה כ"תאים מציגי אנטיגן", והם מפעילים תאי T-עוזרים של מקבל השתל. תאי T-עוזרים מפרישים חומרים (אינטרלוקינים) שמזעיקים את תאי מערכת החיסון וגורמים להם להתרבות. תאי T-הורגים תוקפים את תאי האיבר המושתל והורגים אותם. זמן קצר לאחר ההשתלה, תאי האיבר מתים, ומתפתח מצב של נמק (מוות) והתפוררות של הרקמות.

כדי למנוע דחייה של השתל, משתדלים הרופאים למצוא תורם בעל מולקולות MHC, רבות ככול האפשר, שזהות לאלה של המקבל. הסבירות שתהיה זהות בין שני אנשים, שאין ביניהם קשר משפחתי, היא אפסית (1:400,000,000). בין קרובי משפחה אפשר למצוא מספר גדול יחסית של מולקולות MHC זהות, ומספר מולקולות ה-MHC הזהות גדול יותר ככול שהקרבה



איור ה-20: התגובה החיסונית נגד תאי האיבר המושתל

* הכינוי MHC מתאר למעשה את האזור ב-DNA שבו ממוקמים הגנים שאחראיים ליצירת חלבוני תואם הרקמות. כיום, הכינוי MHC משמש גם כשם של חלבוני תואם הרקמות.

המשפחתית גדולה יותר. המקרים היחידים שבהם קיימת זהות מלאה היא אצל תאומים זהים. בארץ ובארצות מפותחות אחרות, קיים מאגר מידע שבו נשמר מידע על כל החולים שמועמדים להשתלה. מאגר זה מכיל את הפירוט של ה-MHC שלהם. כאשר מתקבלת הודעה על תורם נעזרים במאגר המידע כדי למצוא את החולה המתאים ביותר. מאחר שאי-אפשר להשיג התאמה מלאה, ולגופו של החולה מוחדרות מולקולות MHC זרות, למעשה לא ניתן למנוע באופן מוחלט התפתחות תגובת דחייה. לכן, במשך כל חייו החולה מקבל טיפול תרופתי שנועד לדכא את כושר התגובה של מערכת החיסון. עם זאת, אין דרך לדכא את מערכת החיסון באופן מוחלט; אפשר אמנם להרוס אותה, אך בכך מסכנים יתר על המידה את חיי האדם. משום כך, לאחר תקופה של כמה שנים צפויה דחייה של האיבר המושל, והאדם שבגופו בוצעה ההשתלה עלול להזדקק להשתלה נוספת. שיטות ההשתלה והטיפול משתכללות עם השנים, ואנשים רבים זוכים להארכת תוחלת החיים ולשיפור באיכות חייהם. מאחר שמרבית האיברים המושתלים נדחים בשלב כלשהו, מחפשים היום חומרים שיעכבו באופן ייחודי רק את הלימפוציטים המשתתפים בתגובה נגד ה-MHC של האיבר המושתל. המשימה הזאת קשה ביותר, משום שקשה לאתר אותם מכלל אוכלוסיית הלימפוציטים, וקשה למצוא חומר שיפגע רק בהם מבלי לפגוע בלימפוציטים האחרים.

תרופות מונעות דחייה



בשנת 1970, במעבדה בשווייץ, נמצא ברגב אדמה זן פטרייה שמפריש חומר שנקרא ציקלוספורין. מנהל המעבדה, הבחין שאחת הנגזרות של החומר הזה - ציקלוספורין A - מדכאה התרבות של לימפוציטים בתרבית, והבין שהחומר הזה יכול לשמש כתרופה מונעת דחייה. ב-1982 התחילו להשתמש בחומר הזה כתרופה העיקרית לטיפול בחולים מושתלי איברים.

סוג נוסף של תרופות נוגדות דחייה הם הנוגדנים הפועלים נגד תאים ייחודיים שמשתתפים בפעילות הדחייה. בעבר, טווח הפעילות של הנוגדנים כלל את כל התאים הלימפוציטים, ואולם היום הם מכוונים נגד תאים ספציפיים. התרופות הללו הן בעלות פעילות ייחודית נגד דחייה שאינה פוגעת בתאים שאחראים על תפקודים אחרים במערכת החיסון. כיום, עוסקים בפיתוח נוגדנים שמיועדים לפעול על המולקולות שאחראיות על הפעלת תאי T. כבר היום נמצאים בשימוש נוגדנים שפועלים באמצעות חסימה של קולטן לאחד מסוגי האינטרלוקינים. הנוגדנים האלה מונעים הפעלה של תאי T, במיוחד את אלה שמתעוררים לפעילות עם החשיפה לשתל זר. על ידי כך מקטינים את תופעת הדחייה.

עירוי דם - השתלת רקמת דם

עירוי דם הוא מקרה פשוט של השתלת רקמה. הדם בגופם של בני האדם אינו זהה, והצלחת העירוי תלויה בכך שלתורם הדם ולאדם שמקבל אותו יהיה אותו סוג דם. את סוג הדם קובעים האנטיגנים של תואם הרקמות (MHC) שנמצאים על הקרומים של תאי הדם האדומים. האנטיגנים האלה מופיעים על פני תאי הדם בשלב העוברי ואינם משתנים במשך כל החיים. נוכחותו או העדרו של כל אחד מן האנטיגנים האלה קובע את סוג הדם. על תאי הדם האדומים יש כמה אנטיגנים, והעיקריים שבהם הם אנטיגן A ואנטיגן B.

ארבעת סוגי הדם המוכרים של האדם הם אלה:

סוג דם A - האנטיגן A נמצא על קרומי התאים

סוג דם B - האנטיגן B נמצא על קרומי התאים

סוג דם AB - שני האנטיגנים נמצאים על קרומי התאים

סוג דם O - אף אחד מן האנטיגנים האלה אינו נמצא על קרומי התאים.

הפלסמה מכילה נוגדנים נגד האנטיגנים שאינם נמצאים על קרום התא. הנוגדנים האלה פועלים נגד תאי דם זרים, כמו נגד כל תא זר, והורסים אותם. ולכן, אם המטופל מקבל עירוי דם שמכיל דם מסוג שונה מזה שזורם בעורקיו, הדבר עלול לסכן את חייו; הנוגדנים שבדמו ייקשרו לתאי הדם האדומים של הדם ה"זר" ויגרמו להם להיצמד זה לזה וליצור צבר, כלומר: תהיה הצמיתה. הצבר הזה עלול לחסום את כלי הדם ולמנוע את זרימת הפלסמה דרכו. כתוצאה מכך, מופעל לחץ רב על צבר תאי הדם האדומים והלחץ הזה גורם להתפוצצותם. תהליך פיצוץ תאי הדם האדומים נקרא המוליזה, והוא עלול להסתיים במוות. כדי למנוע מצב כזה, יש לוודא שהדם של המקבל לא יכיל נוגדנים נגד תאי הדם של התורם (טבלה ה-2). חשוב להדגיש, שהנוגדנים של מקבל העירוי הם אלה שמצמיחים את תאי הדם האדומים של התורם ולא להפך; במנת דם אחת יש כמות קטנה של נוגדנים, בהשוואה לכמות הדם בגוף של המקבל, ופעולתם אינה יכולה להזיק למקבל העירוי.

טבלה ה-2: תרומות דם אפשריות לפי האנטיגנים והנוגדנים בסוגי הדם השונים

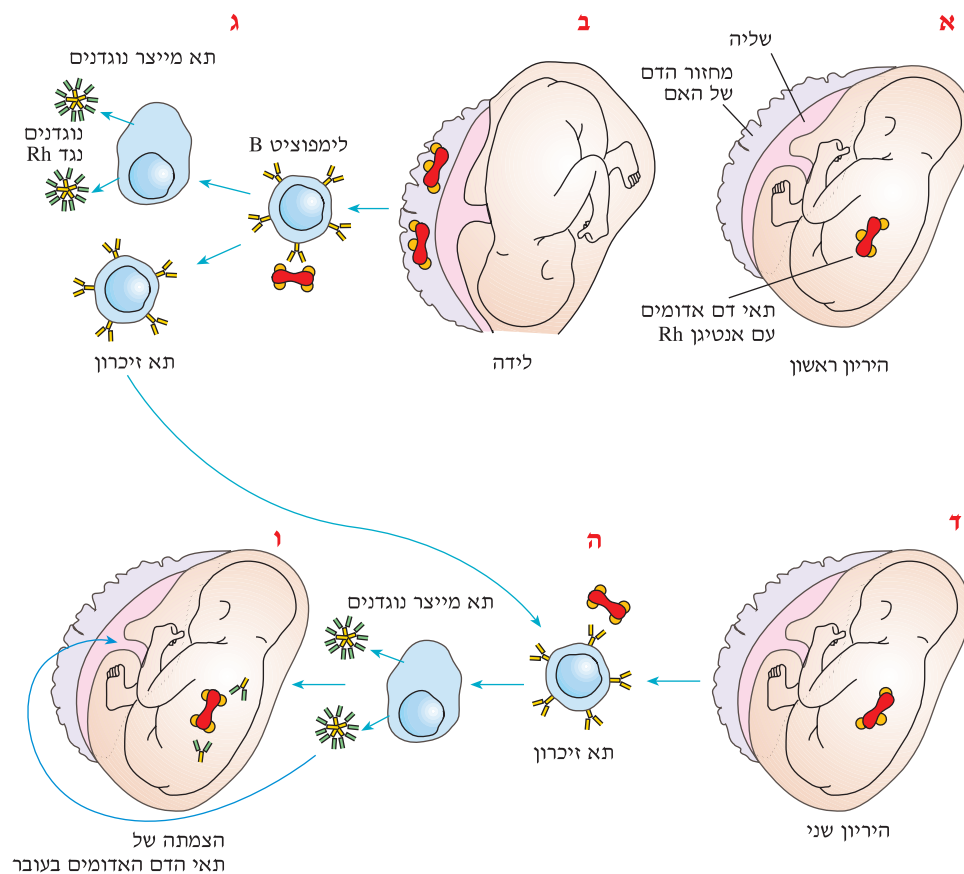
סוג הדם	אנטיגנים על התאים	נוגדנים בפלסמה	יכול לקבל מתורם בעל סוג דם	יכול לתרום לבעל סוג דם
A	A	אנטי B	O,A	AB,A
B	B	אנטי A	O,B	AB,B
AB	B,A	אין	O,AB,B,A	AB
O	אין	אנטי A, אנטי B	O	O,AB,B,A

בדם של 85% מבני האדם, על קרום תאי הדם האדומים, מצוי גם אנטיגן אחר והוא ידוע בשם Rh, על שם קוף הרזוס (Rhesus) שבדמו האנטיגן נתגלה לראשונה, בשנת 1940. דמו של אדם שנושא את האנטיגן הזה נקרא **Rh חיובי** ($Rh+$) ואם סוג הדם שלו הוא למשל B, סוג הדם שלו יסומן $B+$. אם דמו של אדם חסר את האנטיגן הזה, הוא נקרא **Rh שלילי** ($Rh-$), ואם הדם שלו הוא מסוג A הוא יסומן A-.

בדם של בעלי $Rh+$ וגם בדם של בעלי $Rh-$ אין מלכתחילה נוגדנים נגד אנטיגן Rh (אנטי Rh). אך כאשר אדם בעל סוג דם $Rh-$ מקבל עירוי דם מאדם בעל סוג דם $Rh+$, הוא מפתח נוגדנים נגד האנטיגן Rh, כמו נגד כל גורם זר. בפעם הראשונה שיתרחש מצב כזה, בתגובת החיסון הראשונית לא תהיה בעיה; משך הזמן שעובר עד להיווצרות הנוגדנים במפגש הראשון הוא ארוך, יחסית, וגם כמות הנוגדנים שנוצרים היא נמוכה, יחסית. לכן, עד להיווצרות הנוגדנים ועד שהם מתחילים בפעולתם, תאי הדם האדומים כבר ייהרסו באופן טבעי. בפעם השנייה שאדם בעל $Rh-$ יקבל עירוי דם מאדם בעל $Rh+$, תהיה תגובת חיסון שניונית. בתגובת החיסון השניונית כבר יהיו נוגדנים נגד האנטיגן Rh והם יתקפו את תאי הדם שנושאים את האנטיגן Rh ויגרמו להצמחה ולהמוליזה. כל מגע נוסף יעלה את כמות הנוגדנים בפלסמה נגד האנטיגן Rh, ותהליך כזה עלול להסתיים במוות.

חוסר התאמת הדם מבחינת גורם ה-Rh יכול להיות מסוכן, במקרים מסוימים, לעובר שמתפתח (איור ה-21). בשעת הלידה, יש מעבר של תאי דם אדומים מדמו של העובר אל דמה של האם. כאשר אישה בעלת סוג דם $Rh-$ נושאת עובר בעל סוג דם $Rh+$ (תכונה שירש מן האב), ייווצרו בגופה נוגדנים נגד האנטיגנים Rh שעברו אליה מן העובר. הנוגדנים האלה אינם מסוכנים לתינוק שיוולד, אך אם בעתיד תהרה האישה שוב, והעובר יהיה בעל סוג דם $Rh+$, הנוגדנים שנוצרו בגופה יעברו את השליה ויגרמו להצמחת תאי הדם האדומים של העובר ולהמוליזה, דבר שעלול לגרום למותו של התינוק.

בעבר, הצילו תינוק כזה על ידי החלפת דמו בדם חופשי מנוגדנים, מיד לאחר הלידה. כיום, ניתן למנוע את החלפת הדם הודות לבדיקות שנעשות לכל אישה בתחילת ההיריון הראשון. אם האישה בעלת סוג דם $Rh-$ והתינוק בעל סוג דם $Rh+$, מיד לאחר הלידה היא מקבלת זריקה שמכילה נוגדנים נגד Rh. הנוגדנים האלה נצמדים לאנטיגנים Rh, שעוברים אליה מן התינוק במהלך הלידה, והורסים אותם. הרס האנטיגנים מתרחש לפני שגוף האם מספיק לייצר נוגדנים נגד האנטיגנים האלה. הנוגדנים שהוחדרו בזריקה מושמדים מיד לאחר שהרסו את האנטיגנים. חיסון כזה תקבל האם לאחר כל לידה של תינוק שהוא $Rh+$.



איור ה-21: התפתחות נוגדנים נגד אנטיגן Rh באישה הרה שהיא Rh- ונושאת עובר שהוא Rh+ בהיריון ראשון ובהיריון שני

שאלות אתיות בתחום השתלת רקמות ואיברים

היכולת ליטול איבר מאדם אחד ולהעבירו לאדם אחר שנוקק לו, מאפשרת להקל את סבלם של חולים רבים ואף להציל את חייהם. ואולם, היכולת הזאת מעוררת שאלות אתיות (מוסריות) קשות ומורכבות. השאלות האתיות שקשורות להשתלת איברים מתייחסות לתורם עצמו (חי או מת), למשפחתו, למקבל התרומה ולצוות הרפואי שמטפל בהשתלה. השאלות האתיות בתחום הזה עוסקות בכמה נושאים.

תרומה מתורם חי - האם מותר לשכנע תורם מתאים לתרום רקמה מגופו לניזקק, ואם כן, האם מותר גם לכפות עליו תרומה כזאת?

תרומה מתורם מת - כיצד יש להתייחס לגופת המת; האם הגופה היא רכוש הנפטר, רכוש המשפחה, או רכוש החברה? האם מותר לעשות בה כל דבר לטובת החיים? האם יש להתיר לקיחת איברים להשתלה רק ממתים שבחייהם הצהירו במפורש שזהו רצונם? האם מותר לקחת איברים להשתלה מכל המתים, פרט לאלה שהצהירו בחייהם במפורש שאינם רוצים זאת? מה מעמד המשפחה ביחס להחלטות ללקיחת איברים להשתלה?

בעל הסמכות להתיר תרומה - מי הם בני המשפחה שרשאים להסכים או להתנגד לתרומת איברים? מתי עמדתם מתקבלת או אינה מתקבלת? החוק בישראל קובע שבהסכמת המשפחה מותר לקחת איברים מאדם מת, כאשר אין הסכמה מפורשת של האדם, אך גם לא קיימת התנגדות שלו בכתב. התנגדות של אחד מבני המשפחה הקרובים (בני זוג, ילדים או הורים) מספיקה, גם אם בני המשפחה האחרים מסכימים. החוק בישראל קובע שאין לקחת איברים מאדם שלא השאיר אחריו בני משפחה, אלא אם הסכים לכך בחייו. החוק נועד למנוע מצב לא רצוי של לקיחת איברים דווקא מאנשים עירייים, שאין בן משפחה שדואג לזכויותיהם.

כיצד בוחרים למי לתרום איבר? - בישראל, כל הממתינים להשתלת איבר, נמצאים במאגר מידע אחד. רשימת הממתינים כוללת מידע מפורט על כל ממתין: גיל, דחיפות רפואית, סיווג רקמות, משך המתנה ונתונים רפואיים אחרים. על בסיס הנתונים האלה מחליטים מי הוא החולה שמתאים ביותר לקבלת התרומה. ההחלטה מתבצעת באמצעות מחשב, ואינה מושפעת משיקולים זרים; היא מבוססת על שוויוניות מלאה בין כל המועמדים.

מועד קביעת המוות - מתי אפשר לקחת איברים מתורם מת? על סמך מה נקבע המוות? התורמים הפוטנציאליים הם אנשים שמוחם פסק לפעול, ולבם וריאותיהם מופעלים באמצעים מלאכותיים. מדובר בעיקר בחולים שסיבת מותם היא אירוע מוחי, או חולים שנפגעו פגיעת ראש, בעיקר בתאונות דרכים או באירועי טראומה אחרים. כבר שנים רבות הרפואה מגדירה את הפסקת פעילות המוח כמוות לכל דבר, גם כאשר הלב ומחזור הדם ממשיכים לתפקד בעזרת מכשור רפואי. חלק מפוסקי ההלכה בישראל, וגם הרבנות הראשית לישראל מסכימים עם ההגדרה הזאת וסבורים שאין מניעה הלכתית לקבל תרומת איברים מתורמים במצב כזה. אבל יש פוסקים חשובים אחרים שעדיין אינם מכירים בכך.

לקיחת האיברים מתבצעת לאחר שנקבע מות המוח ולפני הופעת דום לב. תקופה זו נמשכת 48-72 שעות, אם נעזרים באמצעים לשמירת מחזור הדם ופעילות הלב. כיום, מקובל להפריד בין הצוות אשר מטפל בתורם הפוטנציאלי וקובע את מותו, לבין צוות ההשתלה. כל אחד מהצוותים צריך לדאוג באופן מלא ובלעדי "חולה שלו", ואין לערב שיקולים בלתי רלוונטיים בעת הטיפול בכול חולה. דבר זה הוכר בעולם, והתקבל כנורמה מחייבת.

מסחר באיברים - האם רצוי לאפשר מסחר באיברים תמורת כסף או תמורת טובות הנאה אחרות? רוב אנשי האתיקה והעוסקים בהשתלה מתנגדים למסחר איברים, שכן קיימת סכנה של יצירת רפואה בלתי שוויונית, כך שעשירים יזכו באיברים להשתלה, ועניים לא רק שלא יזכו בכך, אלא יהפכו למקור ללקיחת איברים תמורת פיתוי כספי.



הנוגדנים בשירות הרפואה, התעשייה ואיכות הסביבה

הנוגדנים נקשרים למגוון רחב של אנטיגנים, ואת התכונה הזאת אפשר לנצל בתחומים שונים.

ברפואה, מנצלים את נוכחות הנוגדנים בגוף כדי לזהות גורמי מחלות או מרכיבים שונים בדם. למשל, אם יש בדם נוגדנים נגד נגיף האיידס, נראה שהנגיף חדר לגוף. כדי לבדוק אם יש נוגדנים כאלה בדם, מוסיפים לדם שנלקח מן הנבדק מולקולות (אנטיגן) שהם חלק ממעטפת של חיידקים או נגיפים שחשודים כגורמי המחלה. אם קיימים בדם נוגדנים ייחודיים לאנטיגן הזה, הם ייקשרו אל האנטיגן ויהיה אפשר להבחין בתהליך ההצמחה על ידי היווצרות עכירות או משקע. אפשר גם לסמן בחומר רדיואקטיבי את מולקולות האנטיגן שמוסיפים, וכך להבחין בתהליך ההצמחה יותר בקלות.

בבדיקת הצמחה אפשר להשתמש גם כדי לזהות אם יש לגוף חיסון מסוים. למשל, אצל נשים הרות נהוג לבדוק אם הן מחוסנות נגד נגיף האדמת, כדי להבטיח שאין סכנה שהאם תידבק במחלה בתקופת ההיריון, דבר שיכול לפגוע בהתפתחות העובר. בהצמחה משתמשים גם לקביעת סוגי דם ולזיהוי חומרים אחרים בגוף, כמו: הורמונים או סמים בשתן של ספורטאים. במקרה כזה, מוסיפים לדוגמת הדם או לדוגמת השתן נוגדנים ייחודיים לחומר שמחפשים, ועוקבים אחר תגובת ההצמחה.

אפשר להשתמש בנוגדנים גם לריפוי. יש תרופות נגד סרטן שמצמידים להן נוגדנים ייחודיים לתאים הממאירים. הנוגדנים האלה "מובילים" את התרופה אל התאים הממאירים, וכך מבטיחים שהתרופה תפעל רק על התאים הממאירים ולא תפגע בתאי גוף תקינים. ייתכן שנוגדנים יוכלו לסייע גם במניעה של התמכרות לניקוטין או לסמים, כגון: קוקאין. נוגדנים ייחודיים לחומרים האלה, שמיוצרים במעבדה, נקשרים אל המולקולות הפעילות, והתרכובות שנוצרות לא יכולות להגיע למוח. כך מתבטלת ההנאה הקשורה בעישון ותהליך ההתמכרות נמנע. ניתן אף לגרום לגוף לייצר בעצמו נוגדנים כאלה, למשל על ידי הזרקת נגזרת של מולקולת ניקוטין מחוברת לרעלן חיידקי.

הנוגדנים משמשים בתעשייה הביוטכנולוגית לעיכוב אנזימים שמקלקלים את המזון, למניעת זיהום מזון על ידי מיקרואורגניזמים ולהשמדת חיידקים ופטריות במשחות שיניים.

הנוגדנים מסייעים גם בשמירה על איכות הסביבה. משתמשים בהם לטיהור מים מזהמים אורגניים וממיקרואורגניזמים, ולטיהור קרקע מחומרי הדברה. הנוגדנים נצמדים לחומרים המזהמים ואז או שהם מנטרלים את הפעילות של המזהמים או שתהליך ההצמחה מאפשר לסלק בקלות את המזהמים מן המקום. יש גם חיישנים ביולוגיים שמכילים נוגדנים או מקטעי נוגדנים, ובאמצעותם אפשר לעקוב אחר מזהמים כימיים בסביבה ולגלות זיהומים חיידקיים.

סיכום

1. המאפיינים של מערכת החיסון הייחודית מנוצלים ליישומים שונים בתחום הרפואה, כמו: חיסון מלאכותי, השתלת רקמות, ייצור תרופות ואבחון מחלות. האפשרות לייצר נוגדנים במעבדה תרם רבות בתחום התעשייה ואיכות הסביבה.
2. יש שתי שיטות לחיסון מלאכותי: (א) חיסון פעיל שבו מחדירים לגוף אנטיגן מוחלש או מומת; בחיסון כזה הגוף מייצר בעצמו נוגדנים נגד האנטיגן ונעשה מחוסן מפניו; (ב) חיסון סביל שבו מחדירים לגוף נוגדנים מוכנים נגד אנטיגן מסוים, והנוגדנים מסייעים לגוף להתמודד עם אנטיגן שחדר.
3. הזיהוי של רקמה מושתלת כאיבר זר מתבצע על סמך אנטיגנים של תואם הרקמות (MHC) שנמצאים על גבי תאים בשתל. כדי שהשתלה תצליח, צריך להיות דמיון מרבי בין ה-MHC של התורם ל-MHC של המקבל. לבני משפחה יש עדיפות כתורמים, כיוון שיש דמיון ב-MHC שלהם.
4. בעירוי דם (השתלת רקמת דם) יש להקפיד על התאמה בסוג הדם, כלומר: על התאמה באנטיגנים של תואם הרקמות (MHC) שנמצאים על פני תאי הדם האדומים. כאשר אדם מקבל עירוי דם שמכיל דם מסוג שונה מזה שזורם בעורקיו, הנוגדנים שבדמו גורמים להצמתה ולהמוליזה של תאי הדם האדומים, ותהליך כזה עלול להסתיים במוות.
5. אצל 85% מבני האדם יש על קרום תאי הדם האדומים גם אנטיגן בשם Rh. חוסר התאמת הדם מבחינת גורם Rh מסוכן בעירווי דם, ומסוכן לעובר שהוא Rh+ ואמו Rh-.
6. שאלות אתיות רבות מתעוררות בנושא השתלה ותרומה של איברים, לדוגמה: האם אפשר לכפות תרומה? ממי ומתי צריך לקבל הסכמה של תרומה ממת? האם לאפשר מסחור של איברים? איך לקבוע את זמן המוות לצורך לקיחת האיברים מן המת? כיצד מחליטים למי ייתן האיבר מן התורם?
7. הקשירה הייחודית של נוגדנים לאנטיגנים מיושמת למטרות שונות, למשל: לזיהוי מחלות, לזיהוי סוג דם, לזיהוי חומרים שונים בדם, להובלת תרופות לתאים המתאימים בגוף, לנטרול מזהמים במזון ובסביבה.



1. הסבירו את המונחים "חיסון פעיל" ו"חיסון סביל", ואת ההבדלים בין שני סוגי החיסונים. מה הם ההיתרונות ומה הם החסרונות של כל אחד מהם?
2. במקרה של הכשה על ידי נחש או על ידי עקרב, באיזה סוג של חיסון יש להשתמש? נמקו. מדוע חשוב, במקרה כזה, להביא לבית החולים את בעל החיים המכיש?
3. עגל ותינוק יונקים מאמם חלב שמכיל נוגדנים. אפרוח מתפתח בביצה שמכילה נוגדנים. התופעות האלה מוגדרות כחיסון סביל טבעי. הסבירו.
4. עיינו בפנקס החיסונים שלכם, וענו על השאלות האלה:
 - א. נגד אילו מחלות חוסנתם?
 - ב. כמה פעמים קיבלתם כל חיסון? הסבירו מדוע.
 - ג. האם היו אלה חיסונים פעילים או חיסונים סבילים? הסבירו.
5. עיינו בטבלת החיסונים שניתנים לתינוקות ולילדים בארץ. הטבלה מופיעה באתר משרד הבריאות <http://www.health.gov.il/>

ענו על השאלות האלה:

 - א. אילו חיסונים ניתנים היום לתינוקות ולילדים?
 - ב. האם החיסונים הם פעילים או סבילים? הסבירו.
 - ג. בדקו את פנקס החיסונים שלכם וציינו חיסונים חדשים שניתנים היום לילדים.
 - ד. האם יש חיסונים שהוצאו מתכנית החיסון?
6. הסבירו מדוע אדם שחלה בילדותו באבעבועות רוח לא יחלה שנית במחלה הזאת.
7. כיצד ניתן להסביר את העובדה, שלמרות הזיכרון החיסוני יש אנשים שחולים בשפעת כמה פעמים בשנה?
8. בניסוי, חילקו אוכלוסיה של עכברים לארבע קבוצות, ולכל קבוצה הזריקו שתי זריקות של חומרים שונים. תכנית ההזרקות מתוארת בטבלה ה-3.

טבלה ה-3: תכנית ההזרקות

קבוצת העכברים	זריקה ראשונה	זריקה שנייה
קבוצה א'	ארס נחשים	ארס נחשים
קבוצה ב'	ארס נחשים	מי מלח
קבוצה ג'	מי מלח	ארס נחשים
קבוצה ד'	ארס נחשים	נגיף שפעת

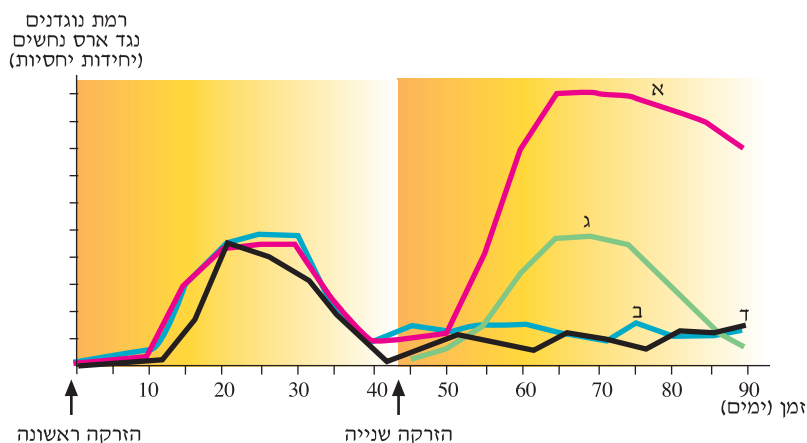
לאחר כל הזרקה, נבדקה כמות הנוגדנים נגד ארס נחשים שנוצרו בגופם של העכברים. תוצאות הבדיקות מתוארות בגרף באיור ה-22. התבוננו בגרף ובטבלה ה-3 וענו על השאלות:

א. הסבירו את תגובת קבוצה א' להזרקה השנייה. איזו תכונה של מערכת החיסון באה לידי ביטוי בתגובה הזאת?

ב. הסבירו את ההבדל בין תגובת קבוצה ב' לתגובת קבוצה ג'.

ג. לאחר הזרקת נגיף השפעת לקבוצה ד', אין עלייה ברמת הנוגדנים. הסבירו מדוע.

ד. ציינו אילו מן ההזרקות גרמו תגובה ראשונית ואילו גרמו תגובה שניונית?



איור ה-22: כמות הנוגדנים שנוצרו בגופם של עכברים נגד ארס נחשים

9. הציעו דרך לבדוק במעבדה אם אדם מחוסן בפני מחלה מסוימת.

10. קראו על "הדור החדש" של תרכיבי חיסון בעמ' 261-263.

א. האם חיסון גנטי הוא חיסון פעיל או חיסון סביל? הסבירו.

ב. האם חיסון צמחי הוא חיסון פעיל או חיסון סביל? הסבירו.

ג. יש גם צמחים מהונדסים שמייצרים נוגדנים נגד גורמי מחלות. את הנוגדנים האלה אפשר להפיק ולהשתמש בהם לחיסון. האם חיסון כזה הוא חיסון פעיל או חיסון סביל? הסבירו.

11. מיד לאחר לידתו, התגלה בדמו של תינוק, שנולד לאם בעלת סוג דם Rh-, הרס של תאי דם אדומים.

א. האם האנטיגן Rh נמצא בקרומי תאי הדם האדומים: (א) של האם; (ב) של התינוק; (ג) של האב? הסבירו.

- ב. הסבירו מדוע התרחש הרס תאי הדם האדומים של התינוק.
- ג. תארו את תהליך ההרס של תאי הדם האדומים.
- ד. האם התינוק יכול להיות הילד הראשון במשפחה? הסבירו.
- ה. אם התינוק הוא הילד השלישי במשפחה, והוא הראשון שהתרחש אצלו הרס תאי הדם האדומים, מהו סוג הדם (מבחינת האנטיגן Rh) של הילד הראשון ושל הילד השני במשפחה? הסבירו.
- ו. איך ניתן להציל את התינוק?
12. מיד לאחר לידה של תינוק בעל Rh+ לאשה בעלת Rh-, מקבלת האם זריקת חיסון.
- א. מהי מטרת החיסון?
- ב. האם החיסון הוא פעיל או סביל? הסבירו.
- ג. מדוע מושמדים הנוגדנים שהוחדרו בחיסון?
- ד. מהי החשיבות שהנוגדנים האלה מושמדים?
13. העתיקו את טבלה ה-4 וסמנו בה + במקומות שבהם תרומת הדם אפשרית.

טבלה ה-4: תרומות דם אפשריות לפי סוגי הדם

התורמים המקבלים	AB+	AB-	A+	A-	B+	B-	O+	O-
AB+								
AB-								
A+								
A-								
B+								
B-								
O+								
O-								

- א. איזה סוג דם אפשר לתרום לכל אדם (תורם אוניברסלי)? הסבירו.
- ב. איזה סוג דם מאפשר לקבל תרומת דם מכל אדם (מקבל אוניברסלי)? הסבירו.
- ג. לאיזה סוג דם הכי קשה למצוא תרומת דם מתאימה? הסבירו.

14. בטבלה ה-5 מתוארים אפיונים של 5 קבוצות אנטיגנים של תואם הרקמות (MHC), של אדם תורם איבר, וכן נתונים של ארבעה אנשים חולים שממתינים לתרומת האיבר. כל אות ומספר מציינים אנטיגן אחד שמצוי על קרומי התאים (סה"כ 10 אנטיגנים).

טבלה ה-5: אנטיגנים של תואם הרקמות של תורם ושל 4 חולים

התורם	חולה 1	חולה 2	חולה 3	חולה 4
A2; A15	A1; A15	A7; A20	A2; A15	A9; A12
B1; B2	B4; B17	B1; B6	B2; B9	B15; B19
Cw2; Cw8	Cw1; Cw6	Cw2; Cw5	Cw1; Cw7	Cw3; Cw8
D1; D3	D2; D8	D1; D7	D1; D3	D2; D5
E4; E12	E3; E11	E13; E20	E12; E15	E12; E16

א. איזה חולה מתאים ביותר להשתלת האיבר מבחינת סוג האנטיגנים של תואם הרקמות? הסבירו.

ב. באיזה חולה סיכויי ההצלחה של השתלת האיבר הם הקטנים ביותר? הסבירו.

ג. הקרבה האנטיגנית היא השיקול העיקרי, אך לא היחיד, בבחירת החולה המתאים ביותר להשתלה. אילו שיקולים נוספים חשוב להביא בחשבון?

15. תארו והסבירו כיצד בודקים אם ספורטאי השתמש בסמים ממריצים לפני התחרות.

16. תארו והסבירו כיצד אפשר לקבוע סוג דם.

17. במה שונה יצירת הנוגדנים נגד האנטיגנים שעל תאי הדם האדומים מיצירת נוגדנים אחרים בגוף?

עבודת סיכום - התכונות המאפיינות את מערכת החיסון הייחודית

למערכת החיסון הייחודית יש ארבע תכונות עיקריות: (1) אבחנה בין "עצמי" ל"זר"; (2) ייחודיות; (3) זיכרון; (4) רב-גוניות.

כל אחד מארבעת הניסויים המתוארים להלן, עוסק באחת מן התכונות הנ"ל. קראו את תיאור הניסויים, וענו על השאלות המופיעות בסוף כל ניסוי.

ניסוי 1

לקחו ארבע קבוצות של עכברים. לכל קבוצה הזריקו אנטיגן מסוג אחר (האנטיגן היה מוחלש, כדי שלא להזיק לעכברים). ההזרקה הייתה על פי הפירוט הזה:

לקבוצה א' - חיידק E.coli

לקבוצה ב' - נגיף שפעת

לקבוצה ג' - ארס נחשים

לקבוצה ד' - מי מלח.

כעבור עשרים יום נלקח דם מן העכברים בקבוצות השונות.

בדם של כל קבוצה, נבדקה נוכחות נוגדנים נגד האנטיגן שהוזרק לעכברי אותה קבוצה,

וכן נבדקה נוכחות נוגדנים נגד האנטיגנים האחרים בניסוי, אשר נגדם הקבוצה לא חוסנה.

תוצאות הניסוי מסוכמות בטבלה ה-6.

טבלה ה-6: נוכחות הנוגדנים נגד האנטיגנים השונים בדם

של קבוצות העכברים השונות

קבוצת העכברים	האנטיגן שהוזרק	נוגדנים נגד חיידק E.coli	נוגדנים נגד נגיף שפעת	נוגדנים נגד ארס נחשים
א	E.coli חיידק	+	-	-
ב	נגיף שפעת	-	+	-
ג	ארס נחשים	-	-	+
ד	מי מלח	-	-	-

+ תגובה חיובית; - תגובה שלילית

1. מהי תגובה חיובית בניסוי ומהי תגובה שלילית וכיצד לדעתכם הן נקבעו?

2. מהי קבוצת הבקרה בניסוי הזה? הסבירו.

3. תארו את תוצאות הניסוי והסבירו אותן.

4. איזו תכונה של מערכת החיסון מודגמת בניסוי הזה?

ניסוי 2

כחודש לאחר הניסוי הקודם הזריקו לאותם עכברים נגיף שפעת, שלא הוחלש.

שבוע לאחר ההזרקה נבדקו העכברים, וסימני מחלה נמצאו אצל העכברים מקבוצה א',

מקבוצה ג' ומקבוצה ד'. לעומת זאת, העכברים מקבוצה ב' נשארו בריאים ולא הראו כל

סימני מחלה.

1. כיצד תסבירו שקבוצות א' ו-ג', שחוסנו בניסוי הראשון, הגיבו כמו קבוצת הבקרה שלא

חוסנה כלל?

2. איזו תכונה של מערכת החיסון מודגמת בניסוי הזה?

3. האם תכונה זו של מערכת החיסון באה, לעתים, לידי ביטוי גם אצלכם? פרטו ותנו דוגמה.

ניסוי 3

לקבוצת עכברים אחרת הזריקו תערובת שהכילה חיידקי E.coli, נגיפי שפעת וארס נחשים (האנטיגנים הוחלשו במטרה שלא להמית את העכברים). לאחר עשרים יום, לקחו דם מן העכברים ומצאו בו נוגדנים פעילים נגד כל האנטיגנים בכמויות שוות. רמת הנוגדנים שנמצאה נגד כל אנטיגן הייתה זהה לרמת הנוגדנים הייחודיים שנמצאה בניסוי 1.

1. איזו תכונה של מערכת החיסון מודגמת בניסוי הזה?
2. כיצד אפשר לגלות אם חלק מהעכברים נפגעו בעבר על ידי אחד מן האנטיגנים הנ"ל? מה יהיו ממצאי הבדיקה?

ניסוי 4

לשני עכברים לבנים ביצעו השתלות של פיסות עור. על גבו של עכבר אחד הושתלו שתי פיסות עור: שתל אחד נלקח מעכבר בעל פרווה שחורה, והשתל האחר נלקח מהגחון של העכבר עצמו. כעבור עשרה ימים היה אפשר להבחין כי השתל העצמי נקלט יפה, ואילו השתל הזר (פרווה שחורה) עבר תהליך של ניוון ונמק, ולמעשה נדחה. על גבו של העכבר השני הושתלה פיסת עור מעכבר לבן אחר. פיסת העור הזאת נקלטה.

1. אילו תאים ומולקולות, הקשורים למערכת החיסון, השתתפו בתהליך הדחייה?
2. איזו תכונה של מערכת החיסון מודגמת בניסוי הזה?
3. מה ניתן ללמוד מקליטת השתל של העכבר הלבן על גבו של העכבר הלבן האחר?

לעתים מתרחשים שיבושים בפעולתה של מערכת החיסון, וההגנה מפני גורמים זרים נפגעת. נוסף לכך, שיבושים בפעולה של מערכת החיסון יכולים, כשלעצמם, לגרום התפתחות של מחלות, גם ללא מעורבות של גורמים זרים. את השיבושים במערכת החיסון אפשר למיין לשתי קבוצות עיקריות: (א) ליקויים בתפקוד מערכת החיסון; (ב) הטעיה של מערכת החיסון (איור ה-23).



תרופות, סמים, קרינה, חיידקים ונגיפים, זקנה, מחלות תורשתיות, מצבים נפשיים, כל אלה יכולים לגרום לליקוי בתפקוד של מערכת החיסון. הליקוי יכול להיות: (א) פגיעה במנגנון ההכרה; (ב) תגובת יתר של המערכת; (ג) כשל חיסוני.

פגיעה במנגנון ההכרה - מחלות אוטואימוניות

אחת התכונות המאפיינות את מערכת החיסון היא ההבחנה בין "עצמי" ובין "זר". הודות ליכולת ההבחנה הזאת, מערכת החיסון של אדם בריא אינה פועלת נגד מרכיבים עצמיים של הגוף. כאשר התכונה הזאת נפגעת, מתפתחת מחלה שנקראת **מחלה אוטואימונית** (auto=עצמי, immune=חיסון), כלומר: חיסון נגד עצמי. מחלה אוטואימונית היא מחלה שבה יש הפרעה בבקרה החיסונית, וההפרעה הזאת גורמת למערכת החיסון להגיב נגד תאים ורקמות עצמיים. כתוצאה מכך, נוצרים לימפוציטים ונוגדנים שפועלים נגד מרכיבים עצמיים, ומתפתחות דלקות ברקמות שונות מבלי שנוכח כל גורם זר, כמו: חיידק או נגיף.

נוכחות נוגדנים עצמיים ולימפוציטים T שפועלים נגד הגוף אין פירושה בהכרח מחלה. מצב כזה מתרחש גם בגוף בריא והוא אפילו חיוני לפעולת האורגניזם. למשל, כאשר תאים מזדקנים ומתפרקים, הנוגדנים העצמיים מסלקים את שאריות התאים מן הדם. מחלה אוטואימונית מתפתחת כאשר הנוגדנים העצמיים והלימפוציטים פועלים ללא בקרה.

הסיבה לפגיעה בבקרה עדיין לא ידועה. אחת הסיבות האפשריות לתגובה אוטואימונית היא דמיון רב בין אנטיגן "אמיתי" לבין מולקולה עצמית (השייכת לגוף), עד כדי כך שהנוגדנים המתאימים לאנטיגן יתקפו גם תאים שמצויה בהם אותה מולקולה עצמית. לדוגמה, חיידקי הסטרפטוקוקוס שגורמים את קדחת השיגרון מייצרים אנטיגן דומה מאוד למולקולות שמצויות בתאי שריר הלב. נוגדנים נגד קדחת השיגרון עלולים אפוא לתקוף את הלב.

מחלות אוטואימוניות יכולות לפגוע ברקמות ובמערכות שונות בגוף. לדוגמה, בַּאֲבָת אדמֶנְתִּית (Systemic lupus erythematosus) מתפתחת דלקת בעור, במפרקים, בריאות, בכליות, במוח ובכלי הדם; בטרשת נפוצה (Multiple sclerosis) מתפתחת דלקת במעטפת החלבונית של תאי העצב (המיאלין) והיא גורמת הפרעות בהעברת המסרים העצביים; בסוכרת נעורים (Diabetes mellitus type 1) מתפתחת דלקת בתאי הבלב שמייצרים אינסולין, ולכן יש מחסור באינסולין וחלים שיבושים ברמת הגלוקוז בדם; בדלקת מפרקים שגרנית (Rheumatoid arthritis) מתפתחת דלקת במפרקים ולעתים גם בעיניים, בפה ובעצבים.

במחלות אוטואימוניות אפשר לטפל בתסמינים של המחלה בדרכים שונות. למשל, במקרה של סוכרת נעורים, ניתן לטפל במחלה על ידי הזרקת אינסולין והקפדה על תזונה מאוזנת. אפשר גם להשתמש בתרופות אנטי דלקתיות ובתרופות שמדכאות את הפעילות של מערכת החיסון, ואולם לתרופות כאלה יש, כמובן, תופעות לוואי רבות. יש תרופות אחרות שמונעות את התגובה המשובשת של מערכת החיסון. תרופה אחת כזאת, למשל, מבוססת על נוגדנים שמנטרלים את הפעולה של חומרים מתווכים בתגובת הדלקת. התרופה הזאת נמצאה יעילה רק בחלק מן החולים והיא יקרה מאוד. כיום נמצא בפיתוח חיסון גנטי שמבוסס על הפעולה

של אותם נוגדנים (על החיסון הגנטי, ראו עמ' 262). נבדקת גם אפשרות אחרת לטיפול במחלות אוטואימוניות, והיא באמצעות דיכוי מערכת החיסון והשתלת מוח עצם.

הורמוני המין הנקביים מעודדים מחלות אוטואימוניות



נשים נוטות להיפגע ממחלות אוטואימוניות, הרבה יותר מאשר גברים. נמצא, כי נשים חולות פי 3 יותר מגברים בדלקת מפרקים שגרנית, ופי 9 יותר מגברים במחלת הזאבת. אחד ההסברים לממצא הזה הוא שאצל נשים, הורמוני המין עלולים לעודד התפתחות מחלות אוטואימוניות או להחמיר מחלה אוטואימונית קיימת. לעומת זאת נמצא, שהורמוני המין הזכריים מדכאים מחלות אוטואימוניות.

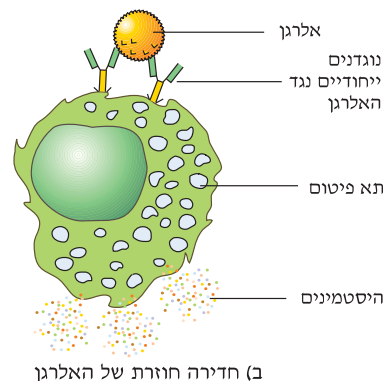
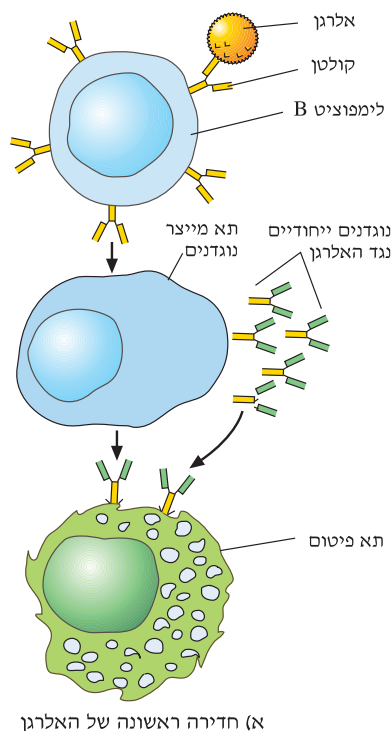
ההשפעה של הורמוני המין הנקביים על מחלות אוטואימוניות קשורה כנראה להשפעה של הורמוני המין על הבקרה החיסונית. בגופה של אישה בריאה, רמה גבוהה של ההורמון הנקבי אסטרוגן מלווה ברמת חסינות גבוהה. כאשר רמת ההורמון יורדת (למשל לאחר ביוץ או בעת היריון), יורדת גם רמת החסינות והאישה רגישה יותר לזיהומים. בימים כאלה, נשים שחולות במחלה אוטואימונית מרגישות, לעתים קרובות, הקלה במחלה. ההשפעה של הורמוני המין על הבקרה החיסונית קשורה כנראה לתפקידה הביולוגי של האישה כנושאת עובר, שהוא למעשה "גוף זר" בתוך גופה.

תגובת יתר של מערכת החיסון - אלרגיה

כ-20% מכלל האנשים בעולם המערבי סובלים מאלרגיה, רובם מאלרגיה בדרכי הנשימה. **אלרגיה** היא **תגובת יתר** של מערכת החיסון, כלומר: מצב שבו מערכת החיסון מגיבה בעוצמה רבה לאנטיגן מסוים, שבמצב רגיל מעורר רק תגובה חלשה.

האנטיגן שהגוף רגיש לו ומעורר את התגובה האלרגית נקרא **אלרגן**. בסביבת חייו של האדם יש חומרים אלרגנים רבים. האלרגנים יכולים לחדור לגוף בנשימה, דרך מערכת העיכול או דרך העור. האלרגנים העיקריים המוכרים הם: אבקת פרחים, נבגי פטריות, אבק הבית ובעיקר הפרשות קרדית הבית (חרק מיקרוסקופי שמצוי באבק הבית), עשן סיגריות, מזונות שונים, תרופות, תכשירי קוסמטיקה, חומרי ניקוי וחומרים שמהם עשויים תכשיטים.

כאשר חומר אלרגני חודר לגוף הוא מעורר יצירה של נוגדנים מסוימים, והם מתפזרים עם זרם הדם בכול הגוף. בדם, חלק מהנוגדנים נקשרים לתאי דם לבנים שנקראים **בזופילים**



איור ה-24: הפעלת תאי פיטום על ידי אלרגנים

(basophils). הנוגדנים שנשארים חופשיים יוצאים מן הדם לרקמות הגוף ושם הם נקשרים לתאים שנקראים **תאי פִּיטוּם** (mast cells). תאי הפיטום מרוכזים בעיקר במקומות שדרכם יכולים לחזור לגוף גורמים זרים, כמו: מערכת הנשימה, מערכת העיכול והרקמות הריריות בחלל הפה והאף. כאשר חומר אלרגני חודר בפעם שנייה לגוף, המולקולות שלו נקשרות לנוגדנים שקשורים לתאי הפיטום ולנוגדנים שקשורים לתאים הבזופילים. הקשירה של החומר האלרגני לנוגדנים הקשורים משחררת חומרים, למשל: היסטמינים, שאגורים בתאי הפיטום ובתאים הבזופילים (איור ה-24).

החומרים שמשתחררים מן התאים גורמים נזק לרקמות בכמה דרכים: (א) השרירים מתכווצים (למשל, שרירי הנשימה); (ב) כלי דם מתרחבים (בעיקר כלי דם קטנים); (ג) כושר החדירות של דופנות כלי הדם גדל.

כל הפעולות האלה גורמות לתופעות אלרגיות, כמו: קוצר נשימה (אסתמה) בגלל התכווצות שרירי הנשימה, אדמומיות ופריחה בעור בגלל התרחבות כלי הדם, נזלת, התעטשויות ובצקת בגלל דליפת נוזלים מכלי הדם והצטברות נוזלים בין התאים.

ככול שגדלה כמות הנוגדנים שקשורים לתאים הבזופילים ולתאי הפיטום כך גדל הסיכוי לקבל התקף אלרגי מהר יותר וחזק יותר בעקבות פלישה נוספת של אותו אלרגן. אצל אנשים אלרגיים, יש כמות גבוהה, יחסית, של נוגדנים שנוצרים ונקשרים בתגובה לחדירת אלרגן, ולכן הם סובלים מתופעות אלרגיות יותר מאנשים אחרים.

הדרך הטובה ביותר לטפל באלרגיה היא להימנע מחשיפה לאלרגנים. כאשר אין הדבר אפשרי, ניתן לחסן נגד האלרגיה. החיסון נגד אלרגיה מבוצע על ידי הזרקות חוזרות של האלרגן במינונים הולכים וגדלים עד שהגוף מפתח חסינות. החיסון יעיל במיוחד נגד ארס דבורים וצרעות וגם נגד אלרגנים נשאפים, כמו קרדית אבק הבית. לאחרונה גם הוכח שחיסונים כאלה, שניתנים לילדים אלרגים, עשויים לרפא אותם ולמנוע התפתחות מאוחרת של אסתמה. בתסמיני האלרגיה ניתן לטפל גם באמצעות תרופות. התרופות העיקריות שבשימוש (אנטי-היסטמינים) הן תרופות שבולמות את השפעת ההיסטמין. תרופות אחרות בשימוש הן תרופות שמדכאות את התהליך הדלקתי.

כשל חיסוני תורשתי

מחסור מוחלט או חלקי של תאים שמשתתפים בפעולת החיסון אינו מאפשר תגובה של מערכת החיסון. מצבים שבהם מערכת החיסון כמעט אינה מגיבה לאנטיגנים נקראים **כשל חיסוני**. כשל חיסוני יכול להיות תורשתי או נרכש במשך החיים.

כשל חיסוני תורשתי משמעו, שאדם נולד עם פגם תורשתי כלשהו, שבגללו מערכת החיסון שלו אינה מתפתחת ואינה מתפקדת. תינוקות שנולדים עם גן פגום שמונע התפתחות תקינה של מערכת החיסון חולים במחלה שנקראת כשל חיסוני משולב חמור (SCID - Severe Combined Immunodeficiency). בגופם של תינוקות כאלה לא מתפתחת התגובה ההומורלית ולא התגובה התאית, ולכן הם רגישים מאוד לזיהומים. ללא הגנה מתאימה, עלולים תינוקות כאלה למות מזיהום, גם הקל ביותר. כ-25% ממקרי הכשל החיסוני התורשתי נגרמים כתוצאה ממוטציה בגן המקודד ליצירת אנזים שמשותף ביצירת לימפוציטים מסוג T. ללא האנזים הזה, נהרסים לימפוציטים T מיד עם היווצרותם במוח העצם, והגוף נשאר ללא יכולת להתגונן נגד זיהומים.

בעבר, תינוקות שחלו בכשל חיסוני תורשתי גדלו בתוך בועת פלסטיק סטרילית, שמנעה מהם מגע עם סביבתם, ולכן הם נקראו "ילדי הבועה". דיוויד וֶטֶר, שנולד בשנת 1971, היה ילד בועה כזה. דיוויד חי במשך 12 שנים בתוך בועה סטרילית, שבודדה אותו מן הסביבה החיצונית. האוויר שדיוויד נשם עבר חיטוי לפני שהגיע אליו; הוריו לא יכלו לגעת בו, וכל בגדיו, מזונו וצעצועיו חוטאו והועברו אליו דרך שרוול פלסטיק מיוחד. בפעם הראשונה בחייו, יצא דיוויד מן הבועה בהיותו בן 6 שנים, וגם אז בודדו אותו מן הסביבה באמצעות תלבושת חלל מיוחדת. מאוחר יותר, הושלל בגופו מוח עצם שנלקח מאחותו, והוא יצא מן הבועה גם ללא תלבושת המגן. אולם החלמתו לא הייתה מלאה: לבו נחלש, בגופו הופיעו דימומים פנימיים שלא פסקו, והוא סבל מקשיי נשימה. בפברואר 1984 נפטר דיוויד והוא בן 13 שנים.

כיום, מקובל לטפל במחלת הכשל החיסוני התורשתי באחת מן הדרכים האלה: (א) משתילים מוח עצם, שמכיל תאי גזע תקינים של לימפוציטים T; (ב) נותנים עירוי של תאי דם תקינים; (ג) מזריקים את האנזים שחסר בגופם של החולים. כדי שהשתלת מוח עצם תצליח, צריך למצוא תורם מתאים, ואילו שני הטיפולים האחרים הם בעלי השפעה קצרת טווח, ולכן יש לחזור עליהם מדי פעם. בשנים האחרונות פותחה בהצלחה, שיטת ריפוי באמצעות החלפת גנים - ריפוי גני. בשיטה הזאת מעבירים גנים תקינים לאדם החולה, במטרה ל"תקן" את הליקוי הגנטי שאתו הוא נולד.

"ילדת הבועה" ניצלה בזכות החלפת גנים פגומים



סלסביל, ילדה בת שנתיים וחצי ממזרח ירושלים, נולדה עם כשל חיסוני חמור משולב. לילדה לא נמצא תורם מוח עצם מתאים, לכן הרופאים בבית החולים הדסה פנו בשנת 2002 לשיטת הריפוי הגני. בתוך צלוחית מעבדה הדביקו תאי גזע בנגיף שנושא את הגן הבריא, והגן השתלב ב-DNA של תאי הגזע. לפני השתלת התאים המהונדסים בגוף, נתנו לילדה החולה תרופה שמדכאת את תאי מוח העצם הפגועים. תאי הגזע המהונדסים הושתלו בגוף הילדה ויצרו את המגוון של תאי מערכת החיסון. לאחר סיום הטיפול חזרה סלסביל לביתה, והיא חיה כיום כמו כל ילדה רגילה.

ההצלחה בריפוי הגני של המחלה הזאת באה לאחר 12 שנים של ניסיונות ריפוי בשיטה הזאת. התאים המהונדסים ובהם הגן הבריא לא הצליחו להחליף את התאים החולים, והגנים הבריאים הפסיקו לפעול בגופו של החולה. פריצת הדרך הייתה כשניתן טיפול תרופתי לדיכוי חלקי של תאי מוח העצם. טיפול כזה מאפשר לתאים המהונדסים להתרבות ולהחליף את התאים הפגועים.

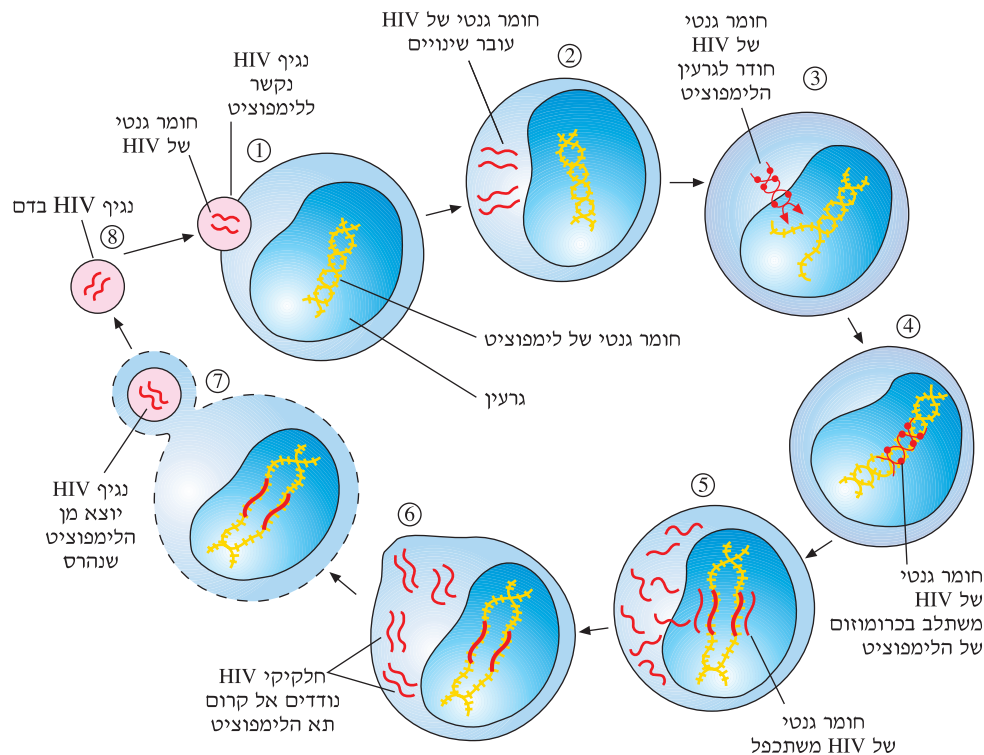
ריפוי גני של ילדי בועה בוצע בהצלחה גם במקומות אחרים בעולם. בצרפת, למשל, מתוך עשרה ילדי בועה שטופלו בשיטה הזאת, תשעה הראו שיפור משמעותי בתפקוד מערכת החיסון, עד כדי יכולת לחיות רגיל מחוץ לבועה. ואולם, לאחרונה דווח שחלק ניכר מילדי הבועה שעברו בהצלחה ריפוי גני חלו בסרטן דם. בסוג הזה של הסרטן נפגעים אותם תאים של מערכת החיסון שהיו פגועים אצל ילדי הבועה לפני הטיפול. בעקבות הדיווחים האלה הופסקו הטיפולים בריפוי גני בכמה מקומות בעולם.

כשל חיסוני נרכש - מחלת האיידס

אחת המחלות הקשות ביותר שגורמת לקריסתה של מערכת החיסון היא מחלת האיידס (AIDS - Acquired Immune Deficiency Syndrome) ובעברית – תסמונת הכשל החיסוני הנרכש. מדי שנה נדבקים במחלה הזאת כ-5 מיליון איש בעולם וכ-3 מיליון איש מתים ממנה. בישראל יש כיום (2005) יותר מ-4,000 נשאי איידס, מתוכם לפחות כ-800 חולים. היום, איידס היא המחלה הנחקרת ביותר בעולם, ולמרות מיליארדי הדולרים שהושקעו עד כה במחקר, עדיין לא חלה פריצת הדרך שתביא לריפוי מוחלט של המחלה.

הרס לימפוציטים על ידי נגיף האיידס

מחלת האיידס באדם נגרמת על ידי נגיף שנקרא HIV (Human Immunodeficiency Virus) ופירושו: הנגיף שגורם לכשל חיסוני באדם. הנגיף גורם לכשל חיסוני על ידי הרס של לימפוציטים T-עוזרים. להבנת תהליך הריסת הלימפוציטים על ידי נגיף ה-HIV עקבו אחר המספרים באיור ה-25. בגוף האדם יש לימפוציטים T-עוזרים (תאי T-עוזרים) שנושאים קולטנים לנגיף האיידס. כאשר נגיף האיידס חודר אל מערכת הדם (8) הוא נקשר ללימפוציט T-עוזר מתאים (1). לאחר ההתקשרות, חודר הנגיף אל תוך הלימפוציט והחומר הגנטי שלו עובר שינוי (2), ומשתלב בחומר הגנטי של הלימפוציט. החומר הגנטי החדש של הנגיף עושה את דרכו לתוך הגרעין של הלימפוציט (3), משתלב בכרומוזום שלו (4) ומשתכפל כחלק ממנו (5). כך יכול הנגיף להתרבות בתוך הגוף שאליו חדר.



איור ה-25: נגיף HIV תוקף לימפוציט

הלימפוציטים משמשים לנגיף מסתור מפני תאים אחרים של מערכת החיסון. ה-DNA הנגיפי יכול להישאר בתאים במצב רדום, בלי שהגנים יבואו לידי ביטוי ובלי שייגרם נזק לתאים שנושאים אותו. מצב כזה של הדבקה סמויה יכול להימשך שנים, והאדם שבגופו נמצא נגיף האיידס מוגדר כ**נשא איידס**. הוא עצמו אינו חולה אך הוא יכול להדביק אנשים אחרים בנגיף.

לאחר זמן, ובגלל גירויים שונים, מתחילים נגיפי האיידס להתרבות בתוך התא. נגיף בודד יכול ליצור כ-2,000 נגיפי איידס בתוך לימפוציט T-עוזר אחד. חלקיקי הנגיף, שעדיין אין להם מעטפת חיצונית, נודדים אל קרום התא (6) ויוצאים מן התא כשהם עטופים בחלקים מקרום התא (7). הם נודדים במערכת הדם (8) ו"מתקיפים" לימפוציטים T-עוזרים נוספים. התא שבתוכו התרבו הנגיפים וממנו הם יצאו נהרס. נגיף האיידס חודר גם לתוך מקרופאגיים ונישא על ידם ממחזור הדם לרקמות השונות. כך מגיע הנגיף לאזורים במוח ולתאים במערכת העצבים המרכזית.

ההרס של לימפוציטים T-עוזרים מוריד משמעותית את מספרם, ויוצר כשל בכול הפעילויות של מערכת החיסון. היחס בין לימפוציטים T-מדכאים לבין לימפוציטים T-עוזרים משתנה. כתוצאה מכך, כל פעולה של מערכת החיסון, אפילו ברמה נמוכה, מדוכאת על ידי התאים המדכאים שלא נפגעו. בשלב הזה, האדם שבגופו נמצא הנגיף מוגדר כ**חולה איידס**.

תגובת מערכת החיסון לנגיף האיידס

לאחר חדירת נגיף האיידס לגוף, מתחילה מערכת החיסון לייצר נוגדנים ותאים מסוגים שונים שיילחמו נגד הנגיף. תאי T-עוזרים נוצרים בקצב מואץ, אך, אל התאים האלה חודרים נגיפי האיידס. לאחר שהנגיף מתבסס בתוך תאי T-עוזרים, נוצר מצב של שיווי משקל בין הנגיף לבין מערכת החיסון, ומתקיימת מעין הפוגה שיכולה להימשך 2-10 שנים. החולה אינו סובל מסימני המחלה אולם, ה"מלחמה" בין מערכת החיסון לבין הנגיף נמשכת: הנגיף ממשיך להשתכפל, ובכול יום הנגיפים המשוכפלים משמידים תאי T-עוזרים רבים. במקביל, מצליחה מערכת החיסון לייצר תאי T-עוזרים במספר דומה למספר התאים המושמדים. כל זמן שמספר תאי T-עוזרים במ"ל של דם עולה על 500, נשמר שיווי המשקל ולא מתעוררות בעיות רפואיות. השלב הזה הוא שלב מאוד מסוכן מבחינת התפשטות המחלה באוכלוסיה, מכיוון שנשאי הנגיף אינם מראים סימני מחלה, כלומר, אין יודעים שהם נושאים את הנגיף, אולם הם עלולים להדביק אנשים אחרים.

כאשר מספר תאי T-עוזרים יורד מתחת ל-500 למ"ל דם, מתחילים להופיע סימני המחלה הראשונים; מתפתחים זיהומים קלים (פטרות, הרפס), או גידולים סרטניים כמו לימפומה

(סרטון בלוטות הלימפה), ויש חולים שסובלים מאיבוד משקל, משלשול, מעייפות, מחום ומהפרעה בזיכרון.

כאשר מספר תאי T-עוזרים יורד מתחת ל-200 למ"ל דם, מערכת החיסון אינה יכולה לתפקד ומחלת האיידס מגיעה לשיאה. בהעדר כל מנגנון הגנה, מתפשטים בגוף גורמי זיהום שונים, ובסופו של דבר הם גורמים למותו של החולה. רוב חולי האיידס נפטרים ממחלות כמו סרטן או דלקת ריאות, אך הם עלולים גם למות משפעת. רוב החולים נפטרים תוך 4 שנים מהופעת סימני המחלה הראשונים.

דרכי העברת הנגיף

נגיף האיידס אינו יכול להתקיים באוויר; הוא נמצא רק בנוזלי הגוף. גם העברתו מאדם לאדם נעשית רק באמצעות נוזלי הגוף: דם, נוזל זרע, הפרשות דרכי המין וחלב אם. כלומר, רק כאשר הנוזלים האלה של אדם שנושא את הנגיף באים במגע עם נוזלי הגוף של אדם בריא עלולה להתרחש הדבקה.

יש כמה דרכי הדבקה: (א) מגע מיני; (ב) שימוש במחטים לא מחוטאות לאחר שהיו בשימוש של נשאי הנגיף; (ג) קבלת עירוי דם מזוהם בנגיף; (ד) העברת הנגיף לוולד מאם שנושאת את הנגיף; העברה כזאת יכולה להתרחש בזמן ההיריון, בשעת הלידה או בזמן ההנקה. הנגיף אינו יכול לעבור בלחיצת יד, בחיבוק, בשיעול, בשימוש בכלי אוכל או בשירותים משותפים וכן לא בעקיצת יתוש.

עובדות ומספרים על מחלת האיידס



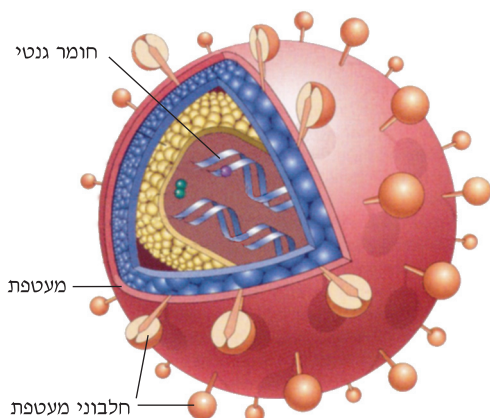
1. בשנת 2005 היו בעולם כ-40 מיליון נשאים או חולים באיידס, מתוכם כ-2.5 מיליון ילדים.
2. מדי יום נדבקים בנגיף האיידס כ-14 אלף בני אדם.
3. עד היום נפטרו ממחלת האיידס כ-20 מיליון בני אדם ברחבי העולם.
4. 68% מהנשאים והחולים באיידס בעולם גרים באפריקה.
5. בבוטסואנה שבאפריקה, 39% מן האוכלוסיה חולים במחלה או שהם נשאים של הנגיף.
6. 48% מן הנשאים והחולים בעולם הם נשים.
7. בישראל, שיעור הנדבקים הגדול ביותר הוא בגילאי 25-30, ורובם נדבקו כתוצאה מיחסי מין הטרוסקסואליים.

הטיפול באיידס

עד היום לא הצליחו לפתח חיסון נגד נגיף ה-HIV, והטיפול בחולי האיידס עדיין קשה ומורכב. הקושי העצום במלחמה באיידס נובע מן העובדה שבחלבוני מעטפת הנגיף (שהם האנטיגנים) (איור ה-26) מתרחשות מוטציות בקצב מהיר מאוד. הקצב המהיר של המוטציות לא מאפשר למערכת החיסון לפתח חסינות נגד האנטיגנים. המוטציות גם מאפשרות לנגיף לפתח עמידות נגד תרופות קיימות.

ואולם למרות הקשיים, ניתן להאריך את תוחלת החיים של נשאי האיידס באמצעות צירוף של תרופות שזכה לכינוי "קוקטיל". בשנים הראשונות לגילוי המחלה, נחשבה הידבקות באיידס לגור דין מוות, ואולם כיום, בעזרת ה"קוקטיל" מצליחים הנשאים לחיות חיים ארוכים ומלאים. הקוקטיל מכיל תרופות שמעכבות את האנזימים החיוניים להתפתחות הנגיף בשלבים שונים של מחזור חייו (איור ה-25). אחת מתרופות הקוקטיל מעכבת את פעילות האנזים שמשתתף בתהליך השינוי של החומר הגנטי הנגיפי שמשתלב בחומר הגנטי של התא המאכסן. תרופות אחרות בקוקטיל מונעות את חדירת הנגיף לתוך התא, מעכבות את התרבות הנגיף לאחר שכבר חדר אל תוך התא, או מעכבות את תהליך ההבשלה של הנגיף לאחר ששוכפל. לכן, חשוב מאוד לגלות מוקדם את הנגיף ולהתחיל בטיפול מוקדם ככול האפשר. טיפול כזה מאפשר להאריך את חייהם של נשאי האיידס, משפר את איכות חייהם ודוחה את התפרצות המחלה.

כיום, המאבק באיידס מתרכז בשני מישורים מרכזיים: (א) מאבק הסברתי למניעת התפשטות המחלה ולחינוך מיני נכון (מין מוגן); (ב) מאמץ בלתי פוסק למציאת תרופות וחיסונים למחלה.



איור ה-26: נגיף האיידס

יש אנשים בעלי הגנה טבעית נגד איידס

ל-2% מאוכלוסיית העולם יש הגנה טבעית נגד נגיף האיידס. נוסף להם, לכ-15% מהאוכלוסייה בעולם יש יכולת הגנה חלקית, כלומר: הם נדבקים בנגיף, אך קצב התפתחות המחלה אצלם איטי מאוד ובמשך שנים רבות הם נשארים נשאים ולא מראים סימנים של כשל חיסוני. בסוף שנת 2002 התפרסמו תוצאות של מחקר שמראות כי מולקולות קטנות שנקראות דפנסינים (מהמילה defence - הגנה) מונעות התפתחות של המחלה. בדרך כלל, המולקולות האלה מופרשות מתאי T-הורגים והן פועלות כחומרים אנטיביוטיים, ששורבים את הדופן של תאי חיידקים. התברר, שאצל אנשים בעלי הגנה טבעית נגד איידס, שנדבקו בנגיף, תאי T-הורגים ממשיכים לייצר את הדפנסינים, והם מעכבים את ההתרבות של הנגיף. לעומתם, אצל



רוב האנשים שנושאים את הנגיף, ואין להם הגנה טבעית, יש פגיעה ביצירת הדפנסינים והנגיף מתרבה ללא כל הפרעה. הממצאים האלה עשויים לשמש בסיס לפיתוח טיפולים נגד הנגיף.

סוגיות אתיות וחברתיות הקשורות במחלת האיידס

בתחילת שנות ה-80 של המאה ה-20, כשהגיעו הדיווחים הראשונים על מחלת האיידס, זוהתה המחלה עם הומוסקסואלים (בעיקר גברים) ועם מכורים לסמים. מחלת האיידס הולידה אמונות תפלות לרוב, הן משום שזוהתה עם קבוצות שוליים, הן בשל היותה קטלנית והן משום שדרכי הפצתה לא היו ברורות לחלוטין. מאבק פוליטי, הסברה נרחבת וכן העובדה כי אנשים ידועי שם נדבקו במחלה, הביאו לידי שינוי היחס כלפיה. בשנים האחרונות הולך ועולה מספר הנשים שחולות באיידס והתדמית הקודמת של המחלה, כמחלה שתוקפת קבוצות שוליים, התנפצה. כיום ברור, כי המחלה מסוכנת לכל אדם. זרמים שמרניים רבים בעולם, ובכלל זה מוסדות הכנסייה, עדיין מתייחסים אל מחלת האיידס כאל עונש שנגזר על "החוטאים" שפוגעים באמות המוסר ובנורמות ההתנהגות הדתיות.

העובדה שאפשר לשאת את נגיף האיידס מבלי שהדבר יבוא לידי ביטוי, ועם זאת להפיץ את המחלה דרך קיום יחסי מין בלתי מוגנים, עובדה זאת מעוררת כמה שאלות אתיות מורכבות. השאלות קשורות בעיקר בקונפליקט שבין זכותו של נשא האיידס לסודיות רפואית לבין חובתם המוסרית של כל מי שמודעים לנשאות למנוע הפצה של המחלה. הקונפליקט הזה מעלה שאלות, כגון: האם במקרה שנשא איידס אינו מדווח לבן (או לבת) זוגו על הנשאות, וממשיך לקיים עמו יחסי מין בלתי מוגנים, צריך הרופא שמודע לנשאות לדווח על כך לבן (או לבת) הזוג? מרבית הרופאים מנסים לשכנע את הנשא לספר לשותפים למין על דבר הנשאות או לפחות לקיים יחסי מין בטוחים, עד כמה שניתן. במקרה של בן (או בת) זוג קבוע, רשאי הרופא לפנות לרופא המחוזי וזה רשאי לספר לבן (או לבת) הזוג על הנשאות.

הזכות לסודיות רפואית מעוררת שאלות אתיות גם בנושאים של העסקה ופיטורין. לפי החוק, אסור לרופא המטפל, או למוסד הרפואי, להעביר כל מידע רפואי למעסיק. למעסיק מצדו, אסור לפטר חולה, כל עוד המחלה אינה מפריעה לתפקודו של העובד.

שאלה אתית אחרת שמעוררת מחלת האיידס נוגעת לזכותו של אדם להחליט אם לערוך בדיקת נשאות או לא. ברוב מדינות העולם המערבי קיים חוק שעל פיו יש להחתים את האדם לפני שלוקחים ממנו בדיקת דם לאיידס. בארץ, החוק אינו ברור אך משתמע ממנו שיש להודיע לאדם על עריכת הבדיקה ולבקש את הסכמתו. לגבי בדיקות נשאות לצורך קבלת ביטוח חיים הדברים אינם ברורים.

הטעיה של מערכת החיסון

מחלת הסרטן

כאשר גורמים זרים משנים או מסתירים את אתרי הזיהוי שלהם, מערכת החיסון אינה מזהה אותם כגורמים זרים ואינה פועלת נגדם. גם תאים סרטניים, מתחמקים ממערכת החיסון בדרכים כאלה.

בכול התאים של היצורים הרב-תאיים, יש מנגנוני בקרה שמופקדים על הכפלת ה-DNA ועל חלוקת התא. המנגנונים האלה מבטיחים שהתאים יתחלקו רק בהתאם לצורכי הגוף. שיבוש במנגנון הבקרה הזה עלול לגרום חלוקת תאים בלתי מבוקרת והתרבות מתמשכת של התאים, ללא קשר לצורכי הגוף. תאים שחל בהם שיבוש במנגנון הבקרה של החלוקה והם מתרבים בצורה בלתי מרוסנת נקראים **תאים ממאירים** (סרטניים). מתא ממאיר אחד, שמתרבה ללא הפסק, מתפתחת מושבה של תאים. המושבה חיה "על חשבון" הרקמות הבריאות שמסביבה: היא תופסת נפח במקום הרקמה הבריאה, מנצלת חומרי מזון שמגיעים לסביבה, ויוצרת מחסור בחומרים האלה לתאים של הרקמה הבריאה.

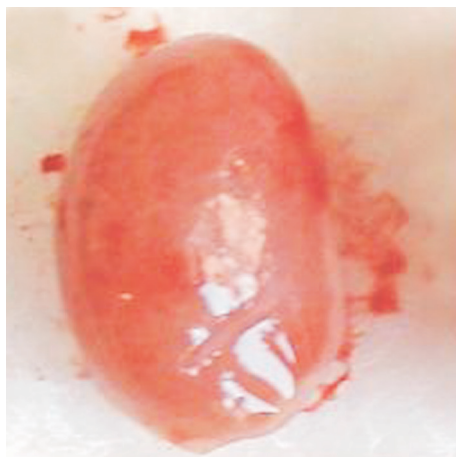
התאים במערכת החיסון מאתרים מדי יום תאים סרטניים ומשמידים אותם. הזיהוי אפשרי כיוון שכבר בשלב הראשון של התפתחות התא הסרטני, חלים על פני קרום התא שלו שינויים שמבדילים אותו משאר תאי הרקמה. אם מערכת החיסון אינה מזהה את התאים הסרטניים ואינה מחסלת אותם בראשית התפתחותם, בשלב שמספרם נמוך, ממשיכים התאים האלה להתרבות, עד שנוצר גוש גדול של תאים סרטניים - **גידול** (איור ה-27). במצב כזה, מערכת החיסון אינה מצליחה להתמודד עם הגידול, גם בגלל גודלו וגם משום שתאי הגידול מתחלקים בקצב מהיר יותר מיכולת התגובה של מערכת החיסון.

כאשר מופיעים בגוף גידולים בעלי כושר צמיחה בלתי מרוסן ובעלי יכולת התפשטות בגוף מגדירים את המצב כ**מחלת סרטן**.

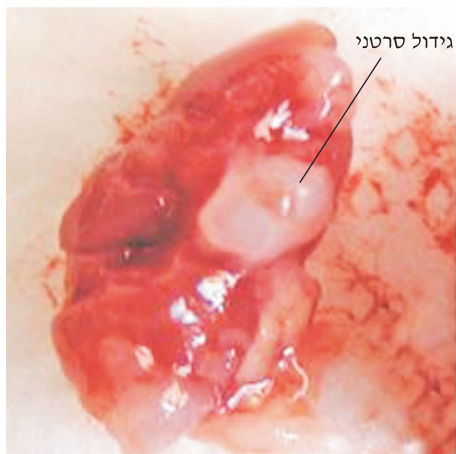
הטעית מערכת החיסון על ידי תאים סרטניים

באופן תקין, תאים סרטניים בגוף מזוהים כ"זרים" על ידי תאי T-הורגים ומקרופאגיים. כיצד, בכול זאת, מתפתח גידול סרטני ש"חומק" ממערכת החיסון? יש כמה השערות לכך:

1. התאים הסרטניים מפרישים חומרים שמדכאים את התגובה החיסונית.
2. התאים הסרטניים משירים מקרום התא שלהם את האנטיגנים שמזוהים כזרים על ידי מערכת החיסון.
3. נוגדנים נקשרים אל האנטיגנים שמצויים על קרום התא הסרטני, אך התא משיר מעליו את התצמידים אנטיגן-נוגדן או בולע אותם ומפרק אותם בתוך התא.



א. כליה בריאה



ב. כליה עם גידול סרטני

איור ה-27: גידול סרטני בכליה של עכבר

4. לעתים קרובות, תאי סרטן מייצרים סוכרים בכמות גדולה מזו שמיוצרת על ידי תאים בריאים. הסוכרים נצמדים לקרום התא וכך הם יכולים להסתיר את האנטיגנים שעל פני התא מפני מערכת החיסון. תופעה זו נקראת מיסוד. באופן דומה, יש גידולים שמפעילים גורמי קרישה לשם מיסוד. כתוצאה מכך נוצר סביבם קריש פיברין, שמונע מהלימפוציטים לזהות אותם.

הטיפול במחלת הסרטן

אחד הטיפולים השכיחים במחלת הסרטן הוא ניתוח להסרת הגידול, וכן טיפול בחומרים כימיים שפוגעים בתאים הסרטניים (כימותרפיה) וטיפול מקומי בקרינה שפוגעת בתאים הסרטניים. אבל יש גם גישה אחרת - אימונותרפיה - לטיפול במחלה. הגישה הזאת מכוונת להפעלת מערכת החיסון של החולה, כדי שהיא תגיב נגד הגידול הסרטני ותגרום להצטמקותו ולסילוקו. בגישה הזאת מנסים, למשל, להפעיל לימפוציטים על ידי הזרקת של חומרים כימיים מתווכים של המערכת החיסונית. אחד החומרים שבשימוש הוא אינטרפרון (ראו עמ' 239).

טיפול בסרטן בעזרת ... שום

חוקרים במכון ויצמן למדע פיתחו שיטה לטיפול בסרטן בעזרת מרכיבים שמצויים בשום. בשיטה הזאת, מחברים אנזים שמקורו בשום לנוגדנים ייחודיים, שפועלים נגד האנטיגנים הסרטניים. את הנוגדן והאנזים מחדירים לגוף החולה, ולאחר שהם מתחברים לתאים הסרטניים מזריקים לגוף חומר אחר שגם הוא לקוח מן השום. כשהחומר הזה בא במגע עם האנזים שקשור לתא הסרטני הוא הופך לחומר קטלני שפוגע בתאים הסרטניים. החוקרים הצליחו בדרך זו לבלום את ההתפשטות של סרטן הקיבה בעכברים.



סיכום

1. פעולת מערכת החיסון עלולה להשתבש, וכתוצאה מכך נפגע מנגנון ההגנה של הגוף. השיבושים יכולים לנבוע מליקויים בתפקוד מערכת החיסון או מהטעיה של מערכת החיסון. השיבושים יכולים להיגרם על ידי גורמים פנימיים, למשל גורמים תורשתיים, או על ידי גורמים חיצוניים, כגון: נגיפים.
2. מחלה אוטואימונית היא מחלה שנגרמת כתוצאה מליקויים במנגנון ההכרה של מערכת החיסון. ליקויים כאלה פוגעים ביכולת של מערכת החיסון להבחין בין "עצמי" ל"זר" ולכן

- היא תוקפת את תאי הגוף. מחלות אוטואימוניות יכולות לפגוע באיברים וברקמות שונים בגוף, למשל: במפרקים, בבלב, בעור ובתאי העצב.
3. אלרגיה היא תגובת יתר של מערכת החיסון, שבה נוצרת בגוף כמות גדולה מאוד של נוגדנים ייחודיים, כתגובה לחדירת אלרגן. כתוצאה מכך, משתחררים בגוף חומרים שגורמים לתופעות האלרגיות, בעיקר: התעטשויות, נזלת, פריחה בעור והפרעות בנשימה.
 4. החומרים האלרגנים יכולים לחדור לגוף דרך מערכת הנשימה, דרך מערכת העיכול או דרך העור. הדרך הטובה ביותר לטפל באלרגיה היא להימנע מחשיפה לאלרגנים.
 5. יש ילדים שנולדים עם גן פגום שמונע התפתחות תקינה של מערכת החיסון. ילדים כאלה חולים בכשל חיסוני מולד חמור, והם עלולים למות גם מזיהום קל. במחלה הזאת ניתן לטפל על ידי השתלת מוח עצם, על ידי עירוי של תאי דם תקינים, על ידי הזרקה של האנזים החסר או באמצעות ריפוי גני.
 6. מחלת האיידס נגרמת על ידי נגיף HIV שחודר ללימפוציטים T-עוזרים, הורס אותם, וגורם לכשל חיסוני נרכש. בגלל הכשל החיסוני, חולי האיידס שנחשפים לזיהומים אינם מסוגלים להתגבר עליהם, והזיהומים גורמים למותם.
 7. ניתן להאריך את חייהם של חולי האיידס ואף לשפר את איכותם באמצעות קוקטיל תרופות שפוגעות בנגיף בשלבים שונים של מחזור חייו. נגיף האיידס עובר מאדם לאדם רק דרך נוזלי הגוף: דם, זרע, הפרשות דרכי המין וחלב אם.
 8. מחלת הסרטן היא מחלה שבה נפגעת הבקרה על חלוקת התא וכתוצאה מכך התאים מתרבים באופן בלתי מבוקר ופוגעים בתפקוד התקין של מערכות שונות בגוף. התאים הסרטניים מצליחים לחמוק ממערכת החיסון בשיטות של הטעיית המערכת.



1. בחרו מחלה אוטואימונית כלשהי, קראו עליה (באינטרנט או בכול מקור אחר) וענו על השאלות האלה:
 - א. תארו את הסימפטומים של המחלה.
 - ב. מדוע נחשבת המחלה הזאת למחלה אוטואימונית?
 - ג. מהו הגורם להתפרצות המחלה?
 - ד. האם נמצא גורם תורשתי למחלה הזאת?
 - ה. מהו הטיפול במחלה?

2. הציעו דרכים לטיפול במחלות אלרגיות או למניעתן, על ידי שיבוש שלבים בתהליך התפתחות האלרגיה.
3. העתיקו את הקטע שלפניכם והשלימו אותו בעזרת המלים האלה: נוגדנים; תאי פיטום; התכווצות; הרחבת; הגברת; נזלת; אלרגנים; אסתמה; אדמומיות; היסטמינים. שימו לב! יש מלים שתצטרכו להשתמש בהן יותר מפעם אחת. שאיפת אבקנים מכניסה לאף _____ שמקורם באבקה, והם גורמים ליצירה ולהפרשה של _____. ה _____ מתחברים לקולטנים שמצויים על גבי _____ שנמצאים באף. כאשר ה _____ חודרים שוב לאף הם מתחברים ל _____ וגורמים להפרשה של _____ וחומרים נוספים מתא הפיטום. החומרים האלה עלולים לגרום ל _____ של שרירים, ל _____ כללי דם ול _____ כושר החדירות של דופנות כלי הדם. כתוצאה מכך, עלולות להתפתח תופעות כמו: _____, _____, ו _____3 בעור.
4. התגובה האלרגית היא תגובת חיסון שניונית. הסבירו את המשפט הזה.
5. רשמו **נכון** או **לא נכון** ליד המשפטים האלה והסבירו.
 - א. התגובה האלרגית היא תגובת חיסון הומורלית.
 - ב. האלרגן הוא אנטיגן שגורם לתגובה אלרגית.
 - ג. הנוגדנים הייחודים נמצאים בנוזל הדם בצורה חופשית.
 - ד. האלרגיה היא תופעה מולדת שאינה מחייבת מפגש עם האלרגן.
 - ה. יש סיכוי להידבק באלרגיה מחבר או מבן משפחה שסובל מאלרגיה.
6. מדוע, לדעתכם, מחלת האיידס נפוצה מאוד במדינות מתפתחות?
7. הציעו דרכים לעצור את התפשטות מחלת האיידס.
8. הסבירו מדוע גם בשלב ההפוגה של מחלת האיידס קשרי הלימפה מוגדלים.
9. האם מחלת האיידס יכולה לעבור בתורשה? הסבירו את תשובתכם.
10. הציעו דרכים למניעת פעולתו של נגיף האיידס על ידי שיבוש שלבים שונים במחזור החיים שלו.
11. לקבוצת עכברים הזריקו חומר מסרטן, וכעבור חודשים אחדים התפתח אצלם גידול סרטני. באמצעות ניתוח, סילקו את הגידול הסרטני, ואת תאי הגידול שסולקו הזריקו לעכבר אחר, שנותח והחלים מגידול סרטני זהה. התאים הסרטניים, שהוזרקו לעכבר שהחלים, נדחו.
 - א. איזו תגובת חיסון מתוארת בניסוי?
 - ב. מדוע נדחו התאים הסרטניים מגופו של העכבר שהחלים?
 - ג. מהי המסקנה מן הניסוי הזה?
 - ד. אילו שתי בקורות יש לבצע בניסוי, כדי לאשר את המסקנה?

12. החיידק מנינגוקוקוס (meningococcus) מסוג B גורם דלקת חמורה במוח. ייתכן שהחיידק הזה מצליח לחדור למוח משום שעל קרום התא שלו יש מולקולות MHC זהות למולקולות ה-MHC שנמצאות על פני קרומי התאים במוח.
- א. באיזו תכונה של מערכת החיסון פוגעים חיידקי מנינגוקוקוס מסוג B?
- ב. במקרה של פלישה חוזרת של חיידקים מנינגוקוקוס מסוג B, האם תתפתח תגובת חיסון שניונית? הסבירו.
- ג. השוו בין דרכי הפעולה של חיידקי מנינגוקוקוס לבין דרכי הפעולה של תאים סרטניים.

פרק ו

הובלה בצמח

מערכת ההובלה בצמח

אצות הם צמחים שצומחים בסביבות מימיות או לחות מאוד, ומסוגלים לקלוט מים וגזים באמצעות כל חלקי גופם; כל תא שלהם נמצא במגע ישיר עם הסביבה החיצונית, או שהוא מצוי במרחק קטן ממנה. לצמחים האלה אין מערכת הובלה, והובלת החומרים בהם נעשית בדיפוזיה.

ואולם, התנועה בדיפוזיה היא איטית, והיא יכולה להבטיח אספקת חומרים רק למרחק קצר ביותר. לכן, בצמחים בעלי מבנה רב-תאי מורכב (צמחי היבשה), אין בכוחה של הדיפוזיה להוביל חומרים בין חלקי הצמח השונים. יתרה מזאת, הצמחים קולטים את המים והמינרלים באמצעות השורשים שלהם, ואילו יצירת הסוכרים נעשית בעלים. באמצעות הדיפוזיה לא ניתן להעביר את החומרים מן האזורים האלה לשאר חלקי הצמח בקצב הדרוש. לכן בצמחים האלה התפתחה מערכת הובלה משוכללת, והיא מעבירה חומרים ביעילות בין חלקי הצמח. מערכת ההובלה מורכבת משני סוגי רקמות: **רקמת עצה** שמובילה מים ויסודות מינרליים מן הקרקע אל החלקים העל-אדמתיים של הצמח, ו**רקמת שיפה** שמובילה בעיקר סוכרים מן העלים לשאר חלקי הצמח. נוסף להובלת החומרים, משמשות הרקמות של מערכת ההובלה לתמיכת הצמח ולאגירת חומרים.

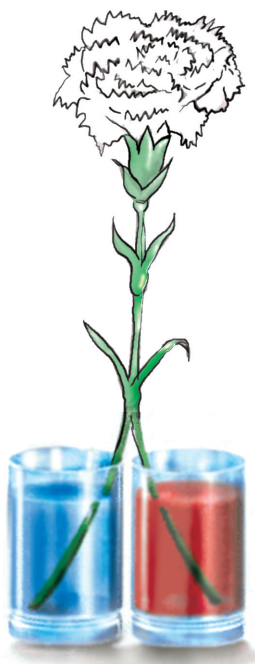
עליית מים במערכת ההובלה של הצמח



כלים	חומרים
סכין	צמח בעל גבעול זקוף ופרח לבן (ציפורן או סייפן)
מחט מתקן	צמח בעל גבעול זקוף ופרח לבן (ציפורן או סייפן)
2 גומיות	לאחר הצמאה של כמה שעות
4 כוסות כימיות	תמיסת פוקסין בריכוז 0.25% או צבע מאכל אדום
	דיו כחולה מהולה

מהלך העבודה

- קחו 4 כוסות כימיות. לשתי כוסות מזגו תמיסת פוקסין או תמיסת צבע מאכל אדום, ולשתי הכוסות האחרות מזגו מים והוסיפו טיפות אחדות של דיו כחולה.
- רשמו "מוצמא" על כוס אחת שבתוכה תמיסה כחולה וגם על כוס אחת שבתוכה תמיסה אדומה.
- קחו גבעול של צמח שהוצמא וגבעול של צמח שלא הוצמא וחתכו שוב את בסיס הגבעול.
- בעזרת מחט מתקן, עשו בבסיס של כל גבעול חתך באורך של 5 ס"מ. את החתך יש לעשות מקצה הגבעול כלפי מעלה.
- לכל אחת מן הכוסות שעליהן רשום "מוצמא", הכניסו קטע של גבעול מפוצל, מן הצמח שהוצמא. לכל אחת מן הכוסות האחרות הכניסו קטע מן הגבעול שלא הוצמא (איור ו-1).
- עקבו אחר השינויים בפרחים במשך כשעה וענו על השאלות האלה:
 - אילו שינויים חלו בפרחים?
 - כיצד תסבירו את השינויים?
 - מה ניתן ללמוד מן השינויים האלה על מערכת הובלת המים בצמח?
 - כיצד ניתן לבדוק אם המים עלו גם לאיברים אחרים של הצמח?
 - השוו בין קצב עליית המים בצמח המוצמא לקצב העלייה בצמח שלא הוצמא. מה ניתן ללמוד מכך על הובלת המים בצמח?



איור ו-1: גבעול מפוצל של ציפורן בשתי תמיסות צבע

מבנה השורש ותפקידיו

צמחי יבשה (צמחים בעלי זרעים) בנויים מחלק תת-קרקעי – השורש, ומחלק על-קרקעי – הגבעול והעלים. השורש צומח כלפי מטה, חודר אל תוך הקרקע וקולט ממנה מים ויסודות מינרליים מומסים. בדרך כלל, השורש משמש גם כעוגן לחלקי הצמח שמעל לקרקע, ומבטיח שהצמחים יעמדו בפני כוחות, כמו: זרמי מים, רוחות או כוחות המופעלים על ידי בעלי חיים, למשל, בעת רעייה. צמחים רבים, למשל: גזר וסלק, גם אוגרים חומרי מזון בשורשים, ומשחררים אותם כשהצמח זקוק להם.

עיקר הקליטה של המים ושל היסודות המינרליים המומסים בהם מתרחש בחלקים הצעירים של השורשים הצדדיים, סמוך לקצותיהם (איור ו-2). האזור הבוגר של השורש מכוסה בקליפת שעם, שהיא כמעט בלתי חדירה למים. בקצות השורשים אין כיסוי של שעם ושם מרוכזות **יונקות השורש** (root hairs), שהן בליטות ארוכות יחסית (0.1-1.5 מ"מ), דמויות שערות שצומחות בין גרגירי הקרקע. מספר היונקות שצומחות משורש אחד הוא עצום, ובשורשי שיפון למשל, יש כ-2,500 יונקות ב-1 סמ"ר. היונקות הרבות מגדילות את שטח המגע שבין השורש לקרקע, ובהתאם לכך גם את כושר הקליטה של המים ושל היסודות המינרליים. דרך היונקות נעשים גם חילופי הגזים בין השורש לבין סביבתו.

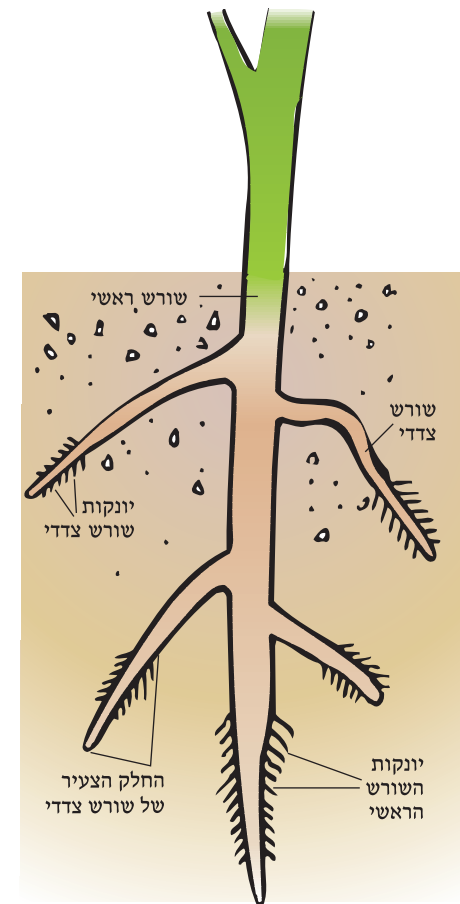
לשטח הפנים של מערכת השורשים יש חשיבות רבה בקביעת יעילות קליטת החומרים מן הקרקע. ככול ששטח הפנים גדול יותר, כך גדל כושר הקליטה של הצמח. הסתעפות השורשים לסעיפים ארוכים ודקים מגדילה את שטח הפנים שלהם ומקנה לצמח יכולת רבה לקלוט מים ויסודות מינרליים.

המבנה הפנימי של השורש

אם נתבונן בחתך רוחב שנעשה באזור היונקות של שורש (איור ו-3) נראה בו שלושה אזורים עיקריים: אפידרמיס, קליפה וגליל מרכזי.

האפידרמיס (epi=על גבי, derma=עור) הוא רקמה של תאים צפופים שהם השכבה החיצונית ביותר של השורש. מתאי האפידרמיס באזור היונקות מתפתחות יונקות השורש.

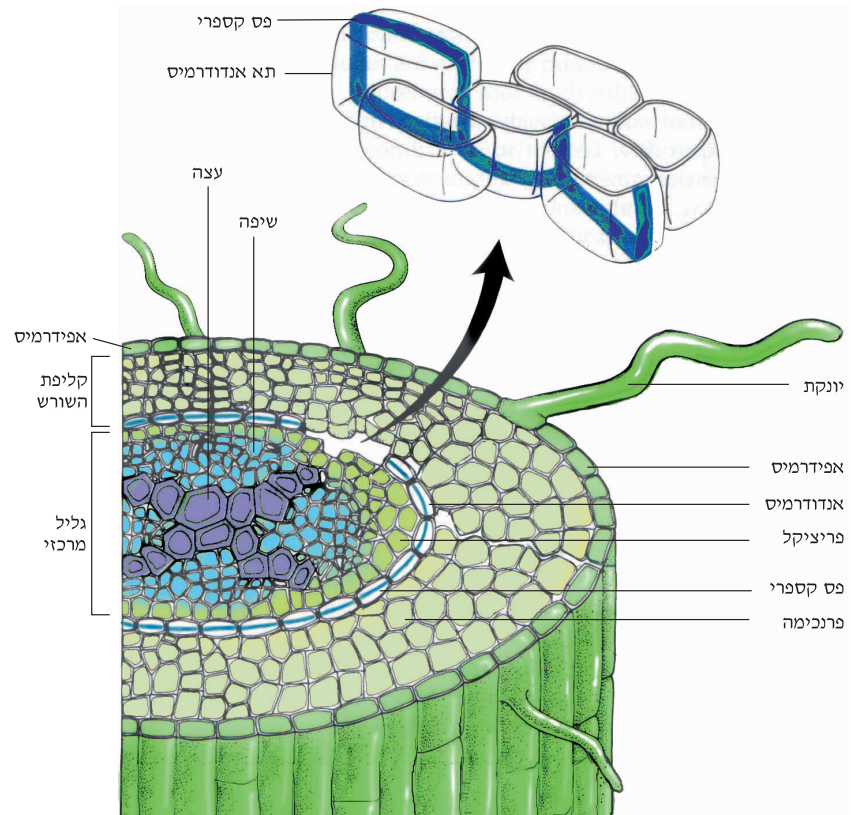
קליפת השורש (cortex) היא רקמה שנמצאת בין האפידרמיס לרקמת ההובלה שבמרכז השורש. השכבה הפנימית ביותר של קליפת השורש היא שכבה חד-תאית שנקראת **אנדודרמיס** (endo=פנימי; derma=עור). הדופן של תאי האנדודרמיס מכיל שכבה שעשויה מחומר דמוי שעווה (סוג'רין). השכבה הזאת מסודרת כרצועה מסביב לתא והיא נקראת **פס קספר** (Casparian strip). פסי קספרי מונעים מעבר בלתי מבוקר של מים ושל יסודות



איור ו-2: מבנה כללי של השורש

מינרליים פנימה, אל עבר הגליל המרכזי, והחוצה, מתוך השורש. שאר קליפת השורש מורכב בעיקר משכבות רבות של תאים גדולים, דקי דופן שצורתם אינה אחידה ויש ביניהם הרבה חללים בין-תאיים מלאים באוויר. התאים האלה נקראים תאי **פְּרִינְכִימָה** ובמקרים רבים הם משמשים לאגירת פחמימות.

הגליל המרכזי (central cylinder) נמצא במרכז השורש ובו נמצאת מערכת צינורות ההובלה: צינורות עצה וצינורות שיפה. השכבה החיצונית של הגליל המרכזי נקראת **פְּרִינְכִימָה** (peri=היקפי; cycle=מעגל), וממנה מתחילה יצירת הסעיפים הצדדיים של השורש.



איור ו-3: חתך רוחב בשורש באזור היונקות

מבנה הגבעול ותפקידיו

הגבעול בצמחי יבשה הוא האיבר שנושא את העלים ואת הפרחים, ובדרך כלל זהו החלק העל-קרקעי של הצמח. הגבעול והעלים שעליו נקראים **נָצֵר** (shoot). לגבעול יש שלושה תפקידים: הובלת מים ותוצרי פוטוסינתזה, נשיאת עלים ותמיכה. **הובלת מים ותוצרי פוטוסינתזה** - הגבעול מעביר מים ויסודות מינרליים מן השורשים אל העלים, ותוצרי פוטוסינתזה מן העלים אל האיברים שצורכים או אוגרים את התוצרים האלה. תוך כדי עליית המים בצינורות העצה של הגבעול, עוזבים המים את הצינורות, ובתנועה רוחבית הם נעים אל שאר חלקי הגבעול. **נשיאת העלים** - סידור העלים על גבי הגבעול אינו אקראי; הוא נועד למנוע הצללה הדדית ולאפשר חשיפה מרבית של העלים לקרינת השמש. **תמיכה** - הגבעול מקנה לצמח יציבות מכנית, עמידה מול כוח הכובד ונגד כוחות מכופפים, כמו רוחות. הגבעול מסוגל למלא את התפקיד הזה הודות לתאים בעלי דפנות עבים שנמצאים ברקמותיו. הדפנות העבים והקשים שומרים על הצורה ועל הנפח של התאים ושל הגבעול כולו. התאים שעוזרים לייצב את הגבעול הם בעיקר תאי עצה ותאי סיבים (ראו עמ' 306, 307). ככול שכמות העצה בגבעול גדולה יותר כך הוא יציב יותר, אך גמישותו קטנה יותר.

המבנה הפנימי של הגבעול

גבעול עשבוני

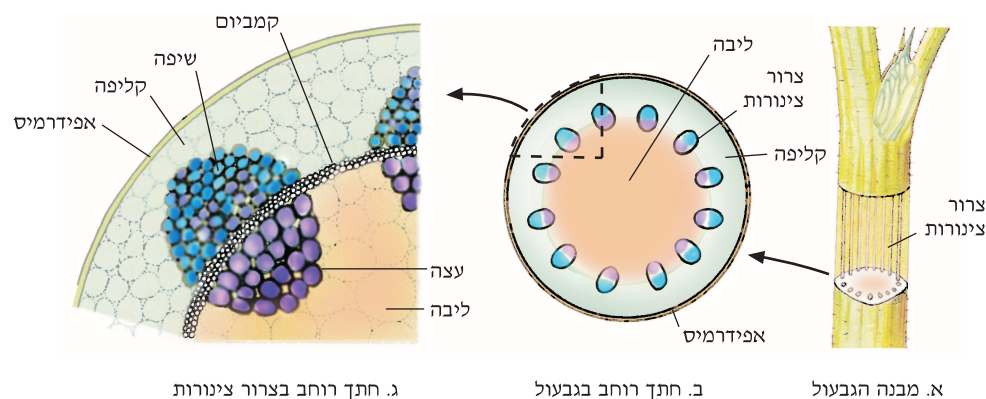
בתחילת התפתחותו של כל צמח, הגבעול הוא רך וגמיש מכיוון שיש בו מעט רקמות תמיכה. גבעול כזה נקרא **גבעול עשבוני** והוא אינו מסוגל לשאת משקל רב של ענפים ועלים, במיוחד במזג אוויר סוער. בגבעול עשבוני של צמח דו-פסיגי (צמחי זרע, שבעובר שלהם יש שני פסיגים) יש ארבעה אזורים עיקריים: (א) אפידרמיס, (ב) קליפה, (ג) רקמת הובלה (צנורות צינורות), (ד) ליבה (איור ו-4).

האפידרמיס הוא שכבת התאים החיצונית של הגבעול. בגבעול, האפידרמיס מפריש שכבה אטומה למים, שמצטברת על פניו ומקטינה את ההתאדות. השכבה הזאת נקראת **קוטיקולה** (cuticula=עור דק) (ראו איור ז-3 בעמ' 364). באפידרמיס של גבעולים ירוקים יש פתחים שנקראים **פיוניות** (stomata), ודרכם מתבצעים חילופי הגזים בין רקמות הגבעול לבין האוויר החיצוני.

הקליפה היא רקמה שנמצאת בין האפידרמיס לרקמת ההובלה. הקליפה מורכבת מתאי פרנכימה, ולעתים קרובות גם מתאי קולנכימה ומתאי סקלרנכימה, שמשמשים לתמיכת הצמח (ראו עמ' 306, 307). בקליפה מתקיימת לפעמים פוטוסינתזה.

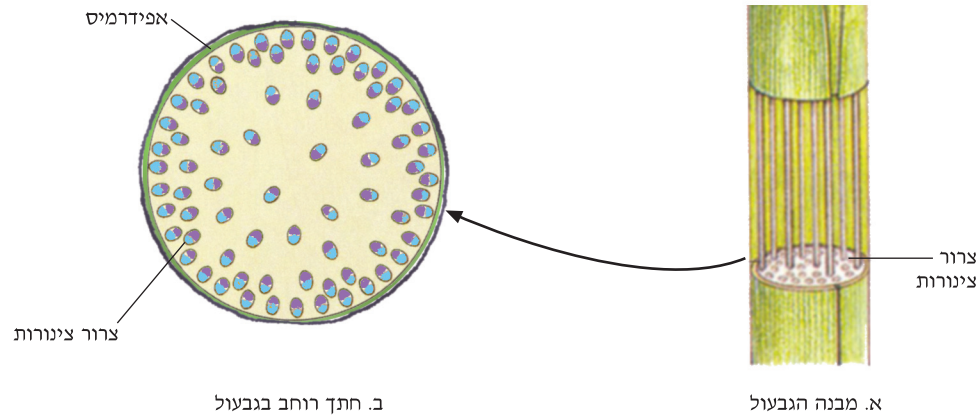
רקמת ההובלה בגבעול ערוכה, בדרך כלל, בצורה של גליל מרכזי, רצוף או מפוצל. כאשר הגליל מפוצל, כל קבוצה של רקמת הובלה נקראת **צור צינורות** (bundle). צורות כאלה עוברים לאורך הגבעול, ומסתעפים לענפים הצדדיים ולעלים. בצמחים דו-פסיגיים, הצורות מסודרים בדרך כלל זה לצד זה כטבעת, בצד הפנימי של הקליפה (איור ו-4, א, ב). בכול צור צינורות יש שני סוגים של צינורות הובלה: צינורות עצה וצינורות שיפה. בתוך צורות ההובלה של צמחים דו-פסיגיים יש רקמת **קמביום** (=cambio=להחליף) שמפרידה בין רקמת העצה לבין רקמת השיפה (איור ו-4 ג). הקמביום היא שכבה דקה של תאים ששומרים על תכונות עובריות ומסוגלים להמשיך ולהתחלק. רקמה עוברית כזאת נקראת **מְרִיסְטֵמָה** (=meristos=מחולק). כאשר תאי הקמביום מתחלקים הם יוצרים רקמת שיפה כלפי חוץ, ורקמת עצה כלפי פנים (ראו איור ו-12 בעמ' 309). פעולת הקמביום מאפשרת התעבות של גבעולים דו-פסיגיים והפיכתם לגבעולים מעוצים.

הליבה של הגבעול נמצאת במרכז הגבעול והיא מורכבת מתאי פרנכימה גדולים בעלי דפנות דקים. כאשר מערכת ההובלה בנויה מצורות צינורות, תאי הפרנכימה ממלאים את הרווחים שבין צורות הצינורות ויוצרים את קרני הליבה (איור ו-12). תאי הליבה בגבעול אוגרים את תוצרי הפוטוסינתזה.



איור ו-4: הרקמות בגבעול עשבוני דו-פסיגי

בצמחים חד-פסיגיים, למשל: בצמחים ממשפחת הדגניים וממשפחת הדקליים, אין קמביום, וצורות ההובלה שלהם מפוזרים לרוחב כל הגבעול (איור ו-5).



ב. חתך רוחב בגבעול

א. מבנה הגבעול

איור ו-5: הרקמות בגבעול חד-פסיגי

גבעול מעוצה

צמח שגדל להיות עץ או שיח מסתעף במשך השנים; הגבעול שלו מתעבה לגבעול מעוצה. כשהגבעול מתעבה, האפידרמיס והקליפה נקרעים. בהעדר רקמת אפידרמיס, מתפתחת רקמת חיפוי משנית שנקראת **פרידרם** (peri=סביב; derma=עור), והיא מחליפה את רקמת האפידרמיס. בפרידרם נוצרת רקמת שעם שהופכת את התאים לבלתי חדירים למים ולגזים. בפרידרם יש אזורים שבהם יש סידור רופף של תאים וביניהם יש חללים מרובים. אזורים כאלה נקראים **עדשתיות** (lenticels) ודרכם נעשים חילופי הגזים עם הסביבה החיצונית. ככול שנוספות רקמות לגבעול, כך הוא מתעבה, נעשה קשיח וצבעו משתנה. גבעול מעוצה שהתעבה במידה רבה נקרא **גזע** (stem). רוב הנפח של הגזע מורכב מתאים מתים של רקמות תמיכה והובלה, והתאים האלה מעניקים לצמח יציבות רבה.

בחתך רוחב של גזעי עצים רבים אפשר לראות **טבעות התעבות** (growth rings). באזורים שבהם יש חילופי עונות מובהקים, הקמביום אינו פעיל כל השנה בקצב אחיד. הקמביום של עץ האורן, למשל, נמצא בתרדמה במשך החורף, ומתעורר לפעילות באביב. בתחילת האביב הפעילות מזוהת והקמביום יוצר תאי עצה רחבים ודקי-דופן. אולם במשך הזמן, עם הירידה בקצב הפעילות של הקמביום, נוצרים תאים צרים ועבי-דופן, וצבעם כהה יותר. כתוצאה מן הפעילות הזאת, העצה שנוצרת בעונת גידול אחת מורכבת מאזור בהיר, שנקרא עצה מוקדמת, ומאזור כהה, שנקרא עצה מאוחרת. המעבר בין העצה המוקדמת לעצה המאוחרת של אותה

עונה הוא הדרגתי, ואילו בין העצה המאוחרת לבין העצה המוקדמת של השנה הבאה יש הבדל חד בצבע ובמבנה. ולכן המעבר נראה כקו ברור, וזה יוצר מראה של טבעות.



איור ו-6: טבעות שנתיות בעצה של גזע

טבעות שנתיות



יש מינים רבים של עצים, שטבעת ההתעבות שלהם נוצרת אחת לשנה, כמו באורן. טבעות כאלה נקראות טבעות שנתיות (איור ו-6). בעצים שבהם נוצרות טבעות שנתיות, אפשר לקבוע את גיל העץ באמצעות ספירת הטבעות בבסיס הגזע. בדיקת הטבעות השנתיות בעצה יכולה ללמדנו, נוסף על גיל העץ, גם על תנאי האקלים ששררו בעת היווצרות הטבעות. יש קשר בין התנאים החיצוניים לבין רוחב הטבעת השנתית. ב"שנים טובות", שבהן אספקת המים טובה והטמפרטורות נוחות, נוצרות טבעות רחבות, ובשנים שבהן תנאי הגידול טובים פחות, הטבעות צרות יותר.

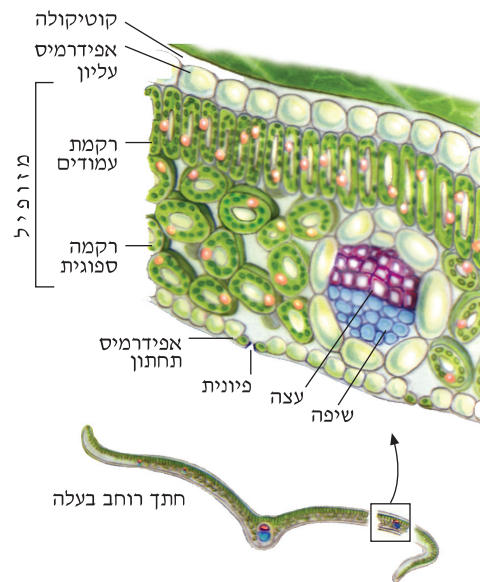
לא בכול העצים נוצרות טבעות שנתיות. יש עצים, כמו: אשל הפרקים או שיטת הסוכך, אשר פעילות הקמביום שלהם נמשכת כל השנה במידה כמעט שווה. אצל עצים כאלה, אין מבחינים בטבעות שנתיות. פעילות קמביום מתמדת אופיינית לעצים שמוצאם מאזורים טרופיים. האזור הטרופי מתאפיין בתנאי אקלים אחידים, ללא מחזוריות עונתית, ומשום כך גם אין הבדלים עונתיים בפעילות הקמביום בעצים טרופיים. יש עצים שבהם נוצרות טבעות, אך הן אינן שנתיות, כלומר: בשנה אחת עשויות להיווצר כמה טבעות. בברוש, למשל, נוצרות בדרך כלל שתי טבעות בשנה.

מבנה העלה ותפקידיו

העלה הוא האיבר בצמח שבו נעשה תהליך הפוטוסינתזה, ודרכו מתאדים המים בתהליך הדיות. לעלה יש שני חלקים: **פטוטרת** (petiole) ו**וטף** (blade). הפטוטרת היא החלק הצר והגלילי בבסיס העלה, שנושא את הטרף – החלק העליון והרחב (איור ו-8, א). צורתם החיצונית של העלים, סידורם על פני הגבעול והמבנה הפנימי שלהם מותאמים לקליטה מיטבית של האור, שדרוש לתהליך הפוטוסינתזה, ולחילופי הגזים שמתרחשים בעלים. צורתו השטוחה של העלה מגדילה את שטח הפנים שלו ביחס לנפחו. צורה כזאת מאפשרת חדירה של קרני השמש אל רוב תאי העלה וחילוף גזים יעיל בין תאי העלה לבין הסביבה החיצונית.

המבנה הפנימי של העלה

העלה מורכב מ-3 רקמות: אפידרמיס, מזופיל ומערכת הובלה (איור ו-7).



איור ו-7: המבנה הפנימי של העלה

האפידרמיס הוא שכבת התאים החיצונית שעוטפת את העלה משני צדדיו. האפידרמיס של העלה מכוסה שכבה של קוטיקולה ויש בו פיוניות שדרך מתרחש חילוף הגזים עם האוויר בסביבת הצמח. בצמחים מסוימים, יש פיוניות משני צדי העלה, ובאחרים - רק בצד אחד.

המזופיל (mesos = אמצע; phyllon = עלה) הוא רקמה שנמצאת בין שתי השכבות של האפידרמיס; בין השכבה בצד העליון של העלה לשכבה בצד התחתון. המזופיל מורכב מרקמת פרנכימה שבה מתבצע תהליך הפוטוסינתזה. יש שני סוגים של רקמת מזופיל: **רקמת עמודים**, שתאיה מאורכים ומסודרים בצפיפות זה ליד זה, ו**רקמה ספוגית**, שתאיה מפוזרים וביניהם יש חללים גדולים. החללים הבין-תאיים האלה קשורים ביניהם ויוצרים מערכת רצופה אחת שנפתחת החוצה בפיוניות. דרך המערכת הזאת מתבצעים חילופי הגזים בין העלה לסביבה החיצונית.

מערכת ההובלה נמצאת במרכז העלה, והיא מורכבת מצינורות הובלה שהם צינורות עצה וצינורות שיפה. מערכת ההובלה מקשרת בין העלה לשאר חלקי הצמח. צינורות העצה נמשכים מן הגבעול אל הפטוטרת וממנה אל הטרף של העלה. ברוב העלים אפשר להבחין בצינורות העצה גם במבט מן החוץ. צינורות העצה יחד עם הרקמה שעוטפת אותם נקראים "עורקים" (בגלל הדמיון שלהם לעורקים בגוף האדם). מערכת העורקים אצל רוב הצמחים הדו-פסיגיים בנויה כרשת (איור ו-8, א), ואילו אצל חד-פסיגיים העורקים ערוכים במקביל לציר האורך של הטרף (איור ו-8, ב).



איור ו-8: העורקים בעלה של דו-פסיגיים ושל חד-פסיגיים

רקמת העצה

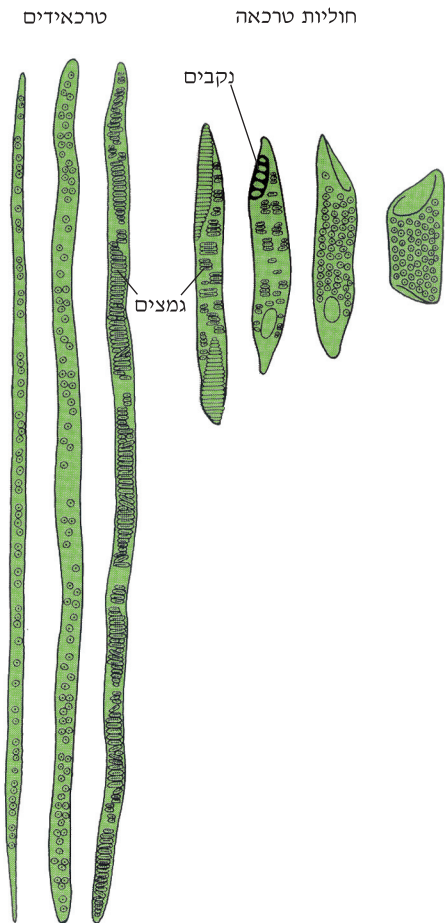
רקמת העצה (xylem; עץ) מובילה מים ויסודות מינרליים מן השורשים, דרך הגבעול, אל כל חלקי הצמח. נוסף להובלת חומרים, משמשת רקמת העצה לתמיכה ולאגירת חומרים. רקמת העצה מורכבת מארבעה טיפוסים תאים עיקריים: (א) אלמנטים טרכאריים; (ב) תאי פרנכימה; (ג) תאי קולנכימה; (ד) תאי סקלרנכימה. רוב התאים ברקמת העצה הם תאים מתים וחלולים שהפכו לצינורות הובלה.

האלמנטים הטרכאריים הם התאים העיקריים שמרכיבים את רקמת העצה, ובהם מובלים המים והמומסים (איור 9-ו). בדפנות האורך של האלמנטים הטרכאריים שוקעים חומרים, למשל ליגנין, והם יוצרים דופן משני חזק וקשיח. באזורים מסוימים בדפנות, לא נוצר דופן משני על פני הדופן הראשוני. האזורים הדקים האלה נקראים **גמצים** (pits). הגמצים מופיעים, בדרך כלל, בזוגות בדפנות האורך של שני תאים סמוכים, ויוצרים פתחים בין התאים (איור 12-ו). כאשר האלמנטים הטרכאריים מגיעים לצורתם הסופית, לאחר תום היווצרות הדופן המשני, הם מתים; תוכנם החי נהרס ונשארים רק דפנותיהם העבים. האלמנטים הטרכאריים המתים מותאמים להובלה מהירה ויעילה של מים ומומסים; הם מונחים זה על גבי זה בטור, ויוצרים צינור ארוך וחלול. המים והמומסים נעים בחלל הצינור ובפתחי הגמצים במהירות וביתר קלות, בהשוואה למעבר שלהם דרך הדפנות והציטופלסמה של תאים חיים.

יש שני טיפוסים של אלמנטים טרכאריים: טרכאידים וחוליות טרכאה (איור 9-ו). **הטרכאידים** (tracheids) הם תאים ארוכים מאוד, מחודדים בקצותיהם. בשטחי המגע בין שני טרכאידים סמוכים יש גמצים שדרכם המים עוברים מטרכאיד לטרכאיד. **חוליות הטרכאה** (vessel members) הן תאים קצרים ורחבים יותר מן הטרכאידים. גם בדפנות האורך של חוליות הטרכאה יש גמצים, ונוסף לגמצים, יש נקבים בדפנות הרוחב של חוליות הטרכאה. הנקבים האלה מאפשרים תנועה יעילה יותר של מים. חוליות טרכאה אחדות, שניצבות זו על גבי זו, יוצרות יחד צינור ארוך שנקרא **טרכאה** (trachea). בצמחים מסוימים, הטרכאות יכולות להגיע לאורך של מטרים אחדים. בצמח מילה (Fraxinus), למשל, הטרכאות הן באורך של כ-3 מ'.

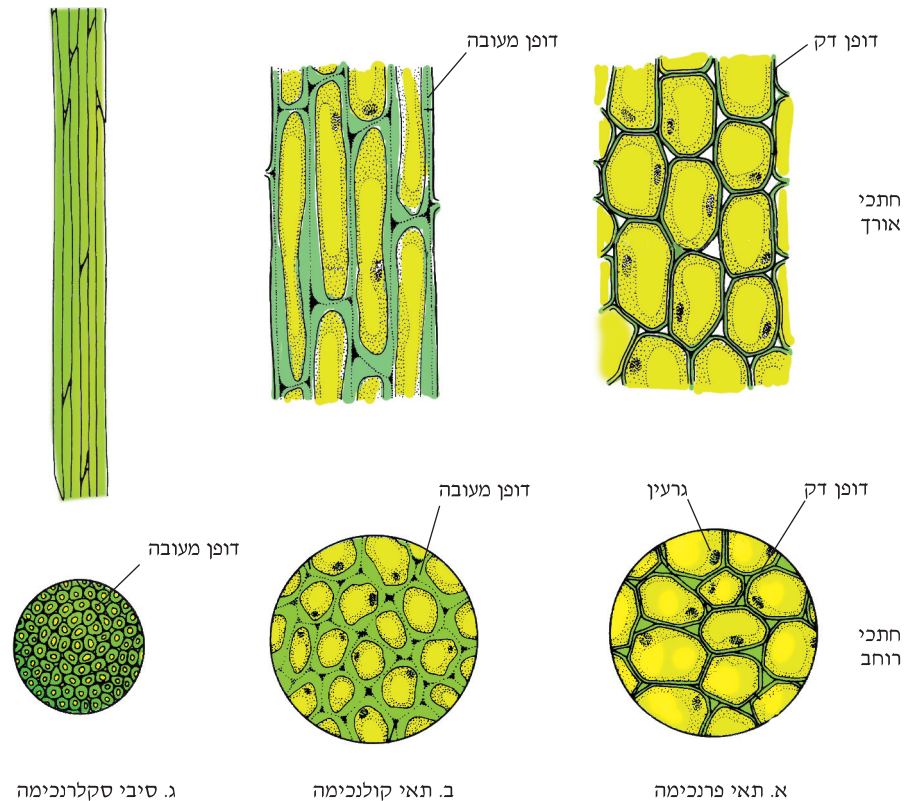
תאי הפרנכימה בעצה (איור 10-ו, א) משמשים בעיקר לאגירה ולהעברה רוחבית של מים ומומסים.

תאי הקולנכימה (kolla=בק; enchyma=רקמה) (איור 10-ו, ב) הם תאים מאורכים, בדרך כלל, בעלי דפנות ראשוניים מעובים שמקנים תמיכה וגמישות. בדפנות התאים יש פקטין, רב-סוכר דמוי דבק, שמלכד את סיבי התאית ומקנה לתאים את גמישותם.



איור 9-ו: אלמנטים טרכאריים

תאי הסקלרנכימה (skleros=קשה; enchyma=רקמה) הם תאים בעלי דפנות משניים מעובים שמקנים תמיכה לצמח. תאי הסקלרנכימה מהווים מרכיב חשוב של היישלד הצמחי, ורובם מתים בבגרותם. סוג אחד של תאי סקלרנכימה הם תאים מאורכים מאוד בעלי דופן עבה, והם נקראים סיבים (fibers) (איור ו-10, ג). הסיבים מופיעים בחלקים שונים של הצמח, והם ערוכים בדרך כלל בקבוצות (איור ו-12).



איור ו-10: רקמות תמיכה ואגירה בצמח

רקמת השיפה

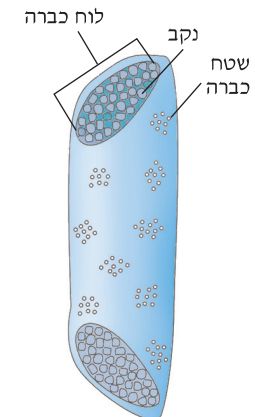
רקמת השיפה (phloem) מובילה בעיקר חומרי מזון שנוצרים בתהליך הפוטוסינתזה, מן העלים אל כל חלקי הצמח. רקמת השיפה מורכבת מארבעה טיפוסים תאים: (א) אלמנטים של כברה; (ב) תאי לוואי; (ג) תאי פרנכימה; (ד) תאי סקלרנכימה. כל התאים ברקמת השיפה הם תאים חיים בעלי ציטופלסמה.

האלמנטים של הפְּבֶּרָה (sieve elements) הם התאים העיקריים ברקמת השיפה; דרכם מובלים תוצרי הפוטוסינתזה (איור ו-11, איור ו-12). בדופנות האלמנטים של הכברה יש שטחים מנוקבים כמו פְּבֶּרָה (מסננת) שנקראים **שטחי כברה** (sieve areas) (איור ו-11, א). דרך הנקבים האלה עוברים "חוט"י פלסמה שמחברים את הפרוטופלסטים של שני אלמנטים שכנים של כברה. אלמנטים של כברה שבהם הנקבים מפוזרים בכול הדפנות באופן אחיד פחות או יותר נקראים **תאי כברה**. אלמנטים של כברה שבהם יש גם נקבים גדולים יחסית, והם בדופנות הרוחב, נקראים **חוליות צינורות כברה**. לדופנות הרוחב שלהם קוראים **לוחות כברה** (sieve plates). חוליות צינורות כברה שניצבות זו על גבי זו יוצרות יחד **צינור כברה** (sieve tube) (איור ו-11, ב). בשלבי ההתמיינות המאוחרים של אלמנט הכברה, רוב המרכיבים התוך-תאיים מאבדים את ארגונם או נעלמים. תוכן התאים אינו נהרס, כמו בתאי העצה, אבל במהלך התפתחות הצינור נעלמים הגרעין, הריבוזומים וגופיפי גולג'י, ומתבטלת ההפרדה בין הציטופלסמה לבין החלולית. באלמנט כברה בוגר ופעיל, סמוך לדפנות נשאר רק מעט מן הציטופלסמה, מעט מיטוכונדריה ומעט פלסטידות.

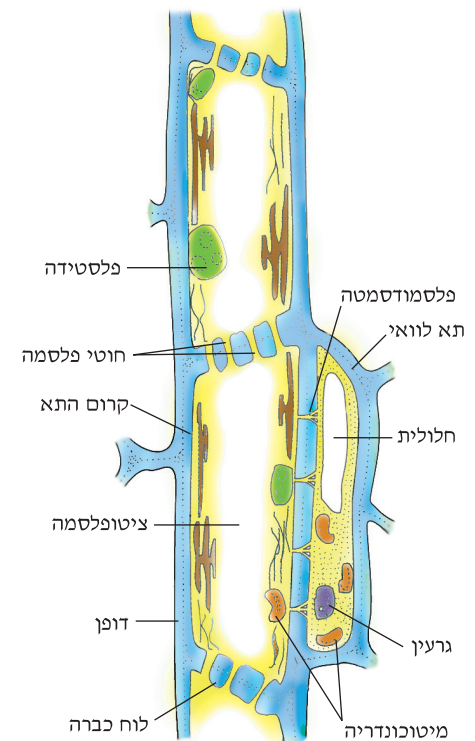
תאי הלוואי (companion cells) מצויים ברוב הצמחים בעלי הפרחים, והם מלווים את האלמנטים של הכברה. לתאים האלה יש ציטופלסמה סמיכה וחלוליות קטנות (איור ו-11, ב). תאי הלוואי קשורים לאלמנטים של הכברה על ידי פלסמודסמה רבים (ביחיד - פלסמודסמה). פלסמודסמה (plasmodesmata) הם חוטי פלסמה דקיקים שחוצים את דופנות התאים, מקשרים בין הציטופלסמה של תאים סמוכים ומאפשרים מעבר חומרים מתא לתא. גרעין תא הלוואי מפקח, כנראה, על הפעילות הציטופלסמטית של אלמנט הכברה חסר הגרעין. כאשר אלמנט כברה מת ומפסיק את פעילותו, מת גם תא הלוואי הקשור אליו.

תאי הפרנכימה משמשים בשיפה, כמו בעצה, לאגירת חומרים.

תאי הסקלרנכימה (בעיקר סיבים) משמשים לתמיכת הגבעול.

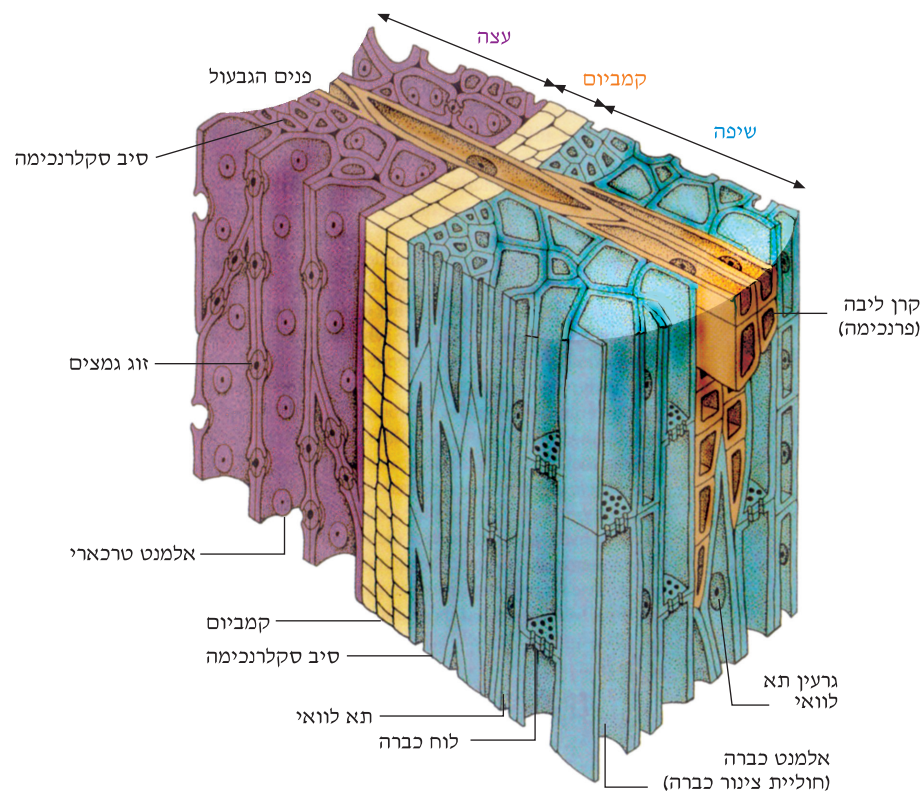


א. חוליית צינור כברה



ב. חתך אורך בצינור כברה

איור ו-11: אלמנטים של כברה (חוליות צינור כברה)



איור ו-12: עצה, שיפה וקמביום בגבעול דו-פסיגי מעוצה

הסתכלות בחתכי רוחב של שורש ושל גבעול



כלים וחומרים

מיקרוסקופ

תכשיר של חתך רוחב בשורש

תכשיר של חתך רוחב בגבעול חד-פסיגי

תכשיר של חתך רוחב בגבעול דו-פסיגי צעיר

מהלך העבודה

1. התבוננו בתכשיר של חתך רוחב בשורש, בהגדלה הבינונית של המיקרוסקופ. ציירו את חתך הרוחב וציינו את שמות האזורים השונים. היעזרו לשם כך באיור ו-3.
2. התבוננו בקליפה ובגליל המרכזי, בהגדלה הגדולה של המיקרוסקופ. זהו את החלקים השונים וציירו אותם.
3. התבוננו באחד התכשירים של חתך רוחב בגבעול, בהגדלה הבינונית של המיקרוסקופ. היעזרו באיורים ו-4, ו-5 וציינו אם התכשיר הוא של צמח חד-פסיגי או דו-פסיגי. הסבירו.
4. ציירו את חתך הרוחב שהתבוננתם בו וציינו את שמות האזורים השונים.
5. התרכזו בקבוצת תאים אחת, שמאורגנת בעיגול (צרור צינורות). ציירו את המרכיבים העיקריים של צרור הצינורות.
6. נסו לאמוד מהו הקוטר של אחד הצינורות הרחבים שבצרור. הסבירו כיצד הערכתם זאת.
7. חזרו על סעיפים 3-6 עם התכשיר האחר של חתך רוחב בגבעול.

סיכום

1. לרוב הצמחים ביבשה יש מערכת הובלה שמורכבת מרקמת עצה ומרקמת שיפה. העצה משמשת להובלת מים ויסודות מינרליים מן הקרקע אל חלקי הצמח העל-קרקעיים. השיפה משמשת, בעיקר, להובלת סוכרים מן העלים לשאר חלקי הצמח, שם הם נצרכים או נאגרים.
2. המים והיסודות המינרליים שמובלים בעצה נקלטים מן הקרקע על ידי השורשים. שטח פנים גדול של השורשים מאפשר קליטה יעילה של מים ויסודות מינרליים. עיקר הקליטה נעשה דרך יונקות השורש, בחלקים הצעירים של השורשים הצדדיים. יש שורשים שמשמשים גם לאגירת חומרים ולעיגון הצמח.
3. הסוכרים שמובלים בשיפה נוצרים בעלים בתהליך הפוטוסינתזה. צורתם החיצונית של העלים, סידורם והמבנה הפנימי שלהם מותאמים לקליטה מיטבית של האור, שדרוש לתהליך הפוטוסינתזה, ולחילופי הגזים שמתרחשים בעלים.
4. הובלת המים, היסודות המינרליים והסוכרים בעצה ובשיפה נעשית דרך הגבעול. הגבעול גם מקנה לצמח יציבות, הודות לריבוי תאי העצה ותאי הסיבים שיש בו.
5. רקמות ההובלה מאורגנות בשורש, בגבעול ובעלים בצורות צינורות. בכול צרור צינורות יש צינורות עצה כלפי פנים וצינורות שיפה כלפי חוץ. צינורות העצה בנויים מאלמנטים

- טרכאריים – תאים מתים בעלי דופן מעובה. צינורות השיפה בנויים מאלמנטים של כברה – תאים חיים.
6. ברקמת העצה וברקמת השיפה, נוסף לצינורות ההובלה, יש תאי פרנכימה שמשמשים לאגירה ותאי סקלרנכימה שמשמשים לתמיכה.
7. רקמת הקמביום יוצרת מדי שנה תאי עצה ותאי שיפה חדשים, ועל ידי כך מעבה את הגבעול. הפעילות של רקמת הקמביום מושפעת מתנאי הסביבה, ובהתאם לתנאים האלה נוצרות טבעות התעבות בגזעי צמחים רבים.

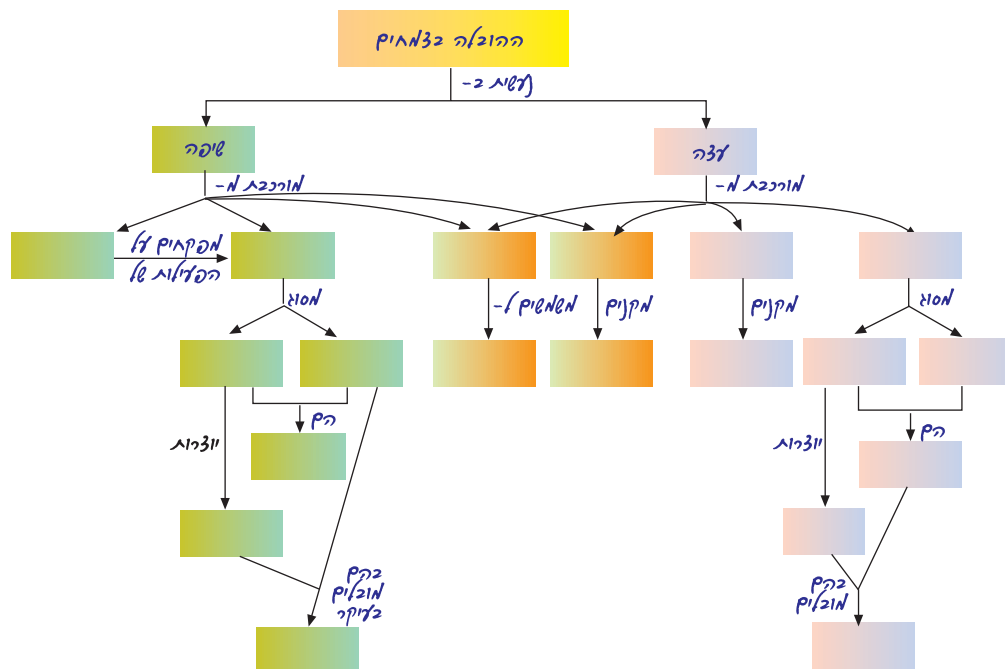


1. באיזו קרקע תתפתח מערכת שורשים מסועפת יותר - בקרקע דלה בחנקן או בקרקע עשירה בחנקן? הסבירו.
2. כאשר מעבירים צמח בוגר לסביבה חדשה, ממליצים השתלנים להעביר את הצמח עם גוש קרקע שבתוכה הוא גדל. צמח מבוגר שנעקר ללא גוש קרקע ונשתל מחדש, עלול למות. הסבירו מדוע.
3. העתיקו את טבלה ו-1 ורשמו בה את המיקום, התפקיד והמבנה של תאים שונים בצמח.

טבלה ו-1: המיקום, התפקיד והמבנה של תאים שונים בצמח

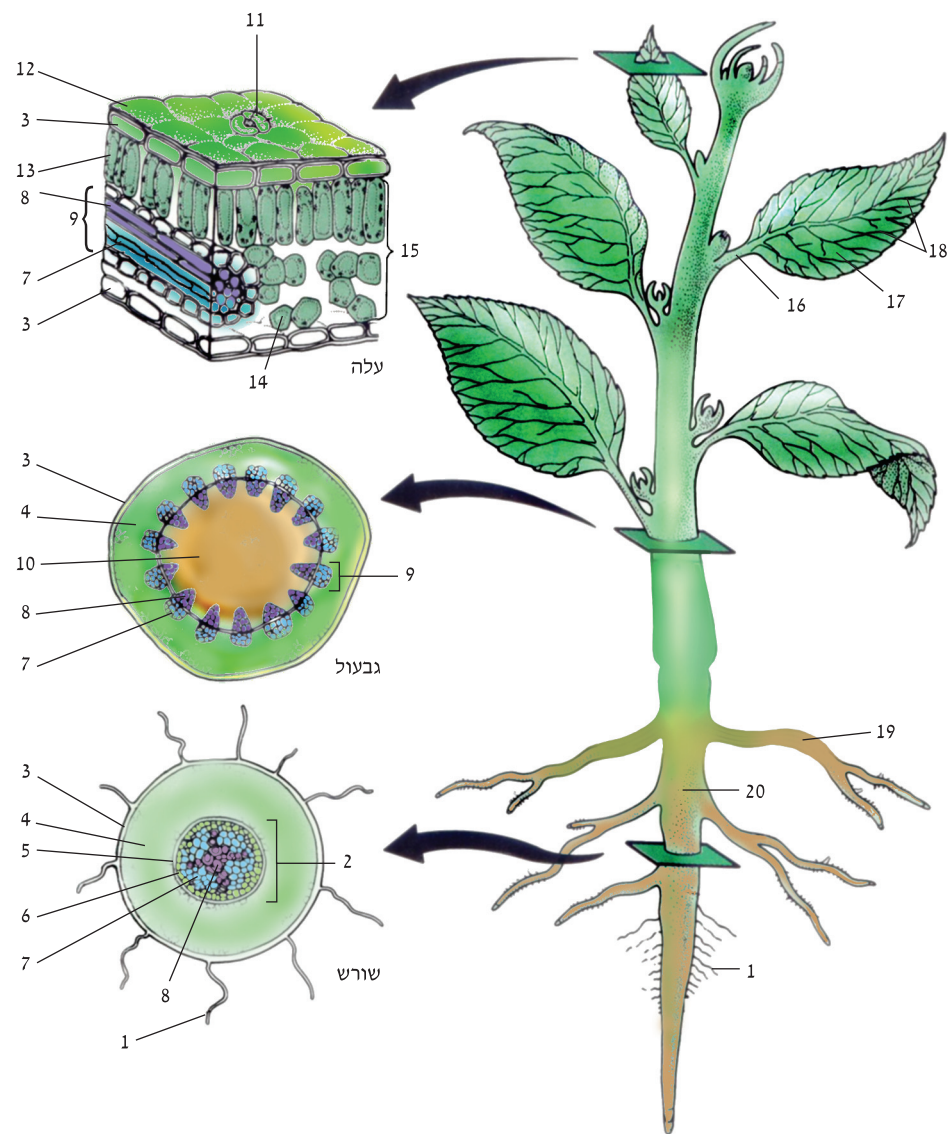
התא	המיקום בצמח	התפקיד	המבנה (או תכונות אופייניות)
מזופיל			
יונקת			
אנדודרמיס			
פרנכימה			
אפידרמיס			
קמביום			
סקלרנכימה			
קולנכימה			
אלמנט טרכארי			
אלמנט כברה			
תא לוואי			

4. העתיקו את מפת המושגים שמתארת את מבנה רקמות ההובלה בצמח (איור ו-13) והשלימו בה את המושגים החסרים. היעזרו ברשימת המושגים הזאת: מים ויסודות מינרליים; תמיכה; תאים חיים; תאי קולנכימה; צינורות טרכיאה; אגירה; אלמנטים של כברה; טרכאידים; תאי לוואי; סוכרים; תמיכה וגמישות; תאים מתים; תאי פרנכימה; צינורות כברה; אלמנטים טרכאריים; תאי כברה; חוליות טרכיאה; חוליות צינורות כברה; תאי סקלרנכימה.



איור ו-13: מבנה רקמות ההובלה בצמח

5. איור ו-14 מתאר מבנה של צמח וחתכי רוחב בשלושה אזורים שונים בצמח. א. העתיקו את כל המספרים שמופיעים באיור, ורשמו ליד כל מספר את המושג המתאים. היעזרו ברשימת המושגים הזאת: שורש ראשי, שורש צדדי, יונקת, עורקים, פטוטר, טרף, גליל מרכזי, קליפה, עצה, שיפה, אפידרמיס, אנדודרמיס, פריציקל, ליבה, צרור צינורות, רקמת עמודים, רקמה ספוגית, פיונית, מזופיל, קוטיקולה. ב. האם הצמח שבאיור הוא חד-פסיגי או דו-פסיגי? הביאו שתי ראיות לתשובתכם.



איור ו-14: מבנה הצמח

6. הסבירו מהו הקשר בין פעילות רקמת הקמביום ובין היווצרות טבעות שנתיות.
7. בגזעים של שני עצי אורן עשו חתכי רוחב ומצאו אותו מספר טבעות בשני החתכים. עם זאת, קוטר הגזע של צמח א' היה קטן מקוטר הגזע של צמח ב'. הסבירו מה ניתן להסיק מכך.
8. התבוננו בחתך שנעשה בגזע של עץ (איור ו-15), וענו על השאלות:
- א. בן כמה העץ? הסבירו כיצד חישבתם את גילו של העץ.
 - ב. כמה עונות גשומות היו במשך חיי העץ? הסבירו כיצד אתם למדים זאת.
 - ג. באילו שנים בחיי העץ היו העונות הגשומות?
 - ד. כמה עונות יבשות היו במשך חיי העץ? הסבירו מניין אתם למדים זאת.
 - ה. באילו שנים בחיי העץ היו העונות היבשות?



איור ו-15: טבעות שנתיות בעצה של גזע

9. סקלרנכימה מפותחת במיוחד מצויה, לעתים קרובות, בצמחים שגדלים בתנאי יובש. איזה יתרון מקנה התופעה הזאת לצמחים?

הובלת חומרים בצמח

קליטת המים בשורש

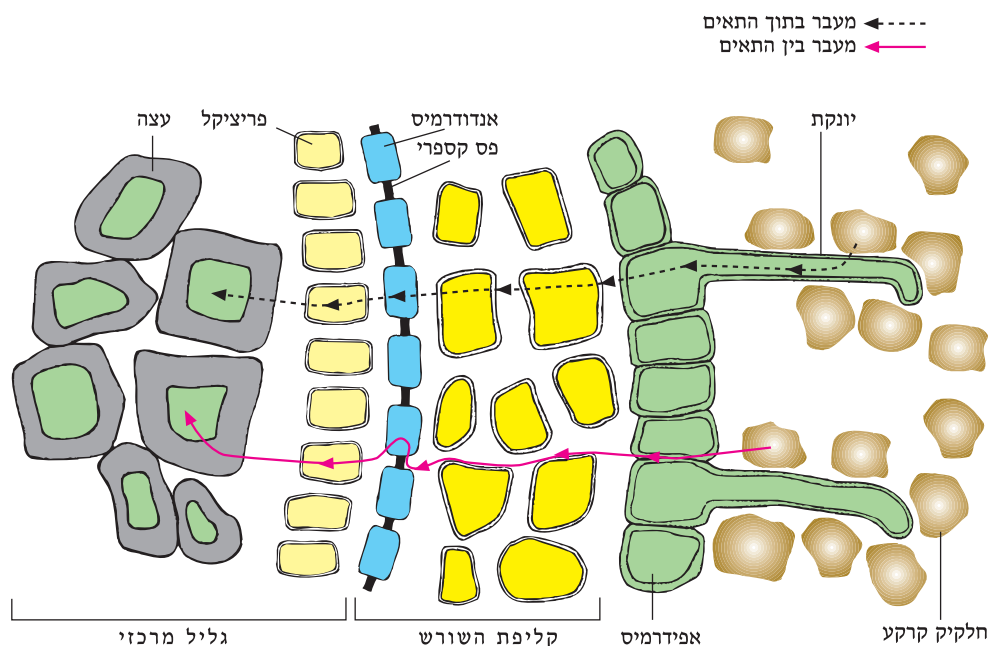
עיקר קליטת המים והיסודות המינרליים המומסים במים, מתבצע באזור היונקות של השורש. הם חודרים ונעים בשני מסלולים עיקריים: בתוך התאים ובין התאים.

תנועה בתוך התאים - המים והיסודות המינרליים שחודרים אל תוך השורש דרך הקרומים של תאי היונקות (איור ו-16), נעים בתוך התאים, לכיוון מרכז השורש, עד שהם מגיעים אל צינורות העצה. התנועה מתא לתא במסלול הזה נעשית באמצעות פלסמודסמה שמחברים בין התאים. במעבר דרך הקרומים של תאי היונקות מתרחשת קליטה בררנית של היסודות המינרליים שמומסים במים.

תנועה בין התאים - המים והיסודות המינרליים יכולים לחדור אל תוך השורש גם דרך הדפנות של תאי רקמת האפידרמיס ומשם הם נעים בין התאים. התנועה בין התאים נעשית בדפנות של תאי קליפת השורש עד לשכבת האנדודרמיס (איור ו-16). בדופן תאי האנדודרמיס נחשמים המים על ידי פסי קספרי, ושם אין הם יכולים לנוע דרך דופנות התאים, למרכז השורש. כדי לעבור את המחסום הזה, המים חייבים לעבור דרך קרומי התאים, ושם מתרחשת קליטה בררנית של היסודות המינרליים שמומסים במים.

בתהליך הקליטה הבררנית מתרחשת גם הובלה אקטיבית של יסודות מינרליים לתוך התאים, בניגוד למפל הריכוזים. המשך התנועה אל מרכז השורש, לכיוון צינורות העצה, מתבצע רק בתוך התאים, דרך הפלסמודסמה ודרך קרומי התאים.

המים והיסודות המינרליים חודרים לתאי העצה שבגליל המרכזי של השורש, ובאמצעות צינורות העצה של השורש ושל הגבעול, שמהווים רצף אחד, הם עולים לחלקי הצמח העל-קרקעיים.



איור ו-16: מסלולי התנועה של המים והיסודות המינרליים בתוך השורש

הובלת מים ויסודות מינרליים בעצה

המים והיסודות המינרליים מגיעים לכל חלקי הצמח, לרבות הצמרת, גם בעצים הגבוהים ביותר שגובהם 100 מטר ואף יותר (עץ הסוקויה, לדוגמה). מהו המנגנון של הצמחים שבאמצעותו יכולים המים לעלות לגובה בניגוד לכוח הכובד?

תיאוריית הדיות-קוהזיה-אדהזיה

עליית המים והיסודות המינרליים בצמח מוסברת באמצעות תאוריית הדיות-קוהזיה-אדהזיה. לפי התיאוריה הזאת פועלים בצמח בו-זמנית שלושה כוחות: דיות, אֶדְהֶזְיָה וקוֹהֶזְיָה.

דיות

מים שעולים משורשי הצמח באמצעות צינורות העצה מגיעים עד לרקמת המזופיל שבעלה. ברקמת המזופיל, הם מתאדים מדופנות התאים לתוך חללי האוויר שבין התאים, ומשם הם מגיעים בצורת אדים אל הפיוניות. רוב אדי המים יוצאים מן העלה דרך פתחי הפיוניות ורק כמות קטנה, יחסית, עוברת במישרין דרך האפידרמיס והקוטיקולה של העלה. התהליך שבו אדי מים יוצאים בדיפוזיה מנוף הצמח (החלק העל-אדמתי של הצמח) אל האטמוספירה נקרא **דיות** (trans, transpiration=מעבר ל-; spirare=לנשום) כאשר מים מתאדים בתהליך הדיות, חלה תגובת שרשרת שמושכת מים אל העלים מיונקות השורש. המים עולים הודות למפל ב**פוטנציאל המים** (water potential). המים נעים בהתאם למפל פוטנציאל המים מאזור שיש בו פוטנציאל מים גבוה לאזור בעל פוטנציאל מים נמוך.

מפל של פוטנציאל המים יכול להיווצר בשתי דרכים:

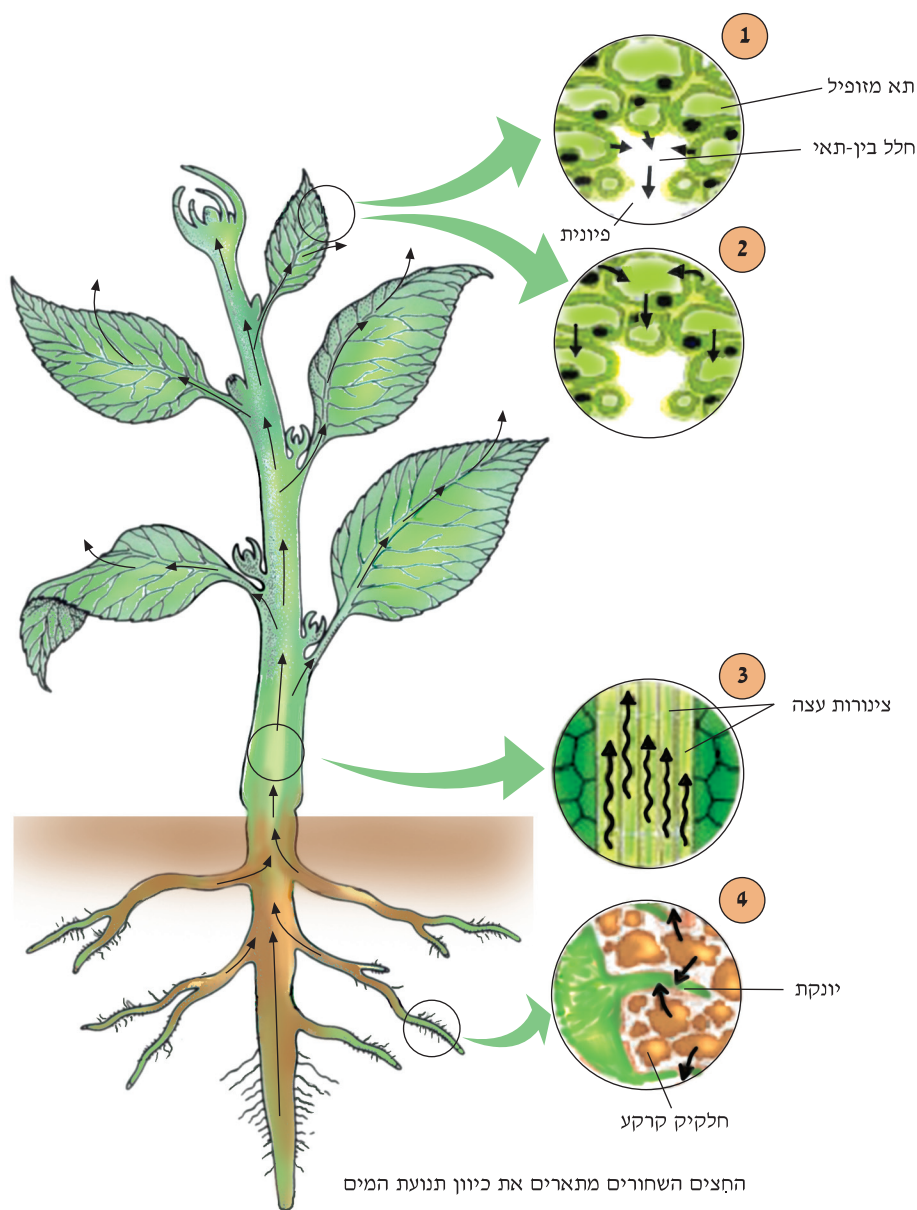
א. שינוי ריכוז התמיסה — ככול שתמיסה מרוכזת יותר, פוטנציאל המים שלה נמוך יותר. מים מזוקקים הם בעלי הפוטנציאל הגבוה ביותר ואילו תמיסה רווייה היא בעלת הפוטנציאל הנמוך ביותר.

ב. שינוי מצב הצבירה של המים מנוזל לגז — פוטנציאל המים גבוה כאשר המים במצב נוזלי, והוא נעשה נמוך יותר כאשר המים הופכים לגז.

בצמח, המים נעים מן השורש אל העלים בגלל מפל פוטנציאל המים שקיים בין הקרקע לאוויר. במים שבקרקע סביב השורשים, פוטנציאל המים הוא הגבוה ביותר, ואילו בחללי האוויר בין תאי



* פוטנציאל המים הוא המדד שמבטא את השפעת המומסים בתא על קליטת המים. פוטנציאל המים קובע אם מים יכנסו לתוך תא בעל דופן או יצאו ממנו.



איור ו-17: עליית המים בצמח

רקמת המזופיל שבעלה, פוטנציאל המים הוא הנמוך ביותר. בהתאם למפל הזה המים נעים מיונקות השורש, דרך הצמח ועד לעלים (איור ו-17). המים נעים כלפי מעלה בהתאם למפל פוטנציאל המים באופן כזה:

1. בתהליך הדיות, מולקולות מים עוברות מדופנות תאי רקמת המזופיל שבעלה אל האוויר שנמצא בחללים בין תאי המזופיל, ודרך פתחי הפיוניות הן יוצאות מן העלה (איור ו-17; 1). הפיכת המים לאדים מורידה את פוטנציאל המים בחללי האוויר. המים יוצאים מתאי המזופיל אל חללי האוויר הבין-תאיים בהתאם למפל פוטנציאל המים.

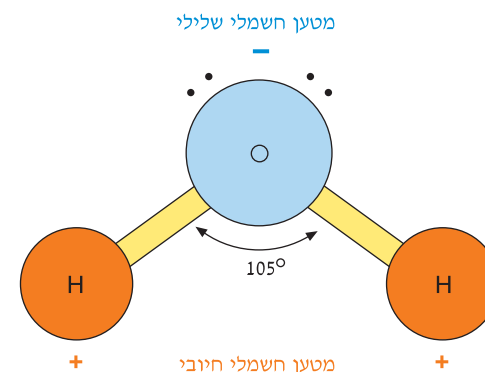
2. יציאת מים מתאי המזופיל מעלה את ריכוז התמיסה בתאים ומורידה את פוטנציאל המים. מולקולות מים נודדות מתאים סמוכים, שבהם פוטנציאל המים גבוה יותר (איור ו-17; 2). כך עוברים המים בין התאים, בהתאם לפוטנציאל המים, עד שבסופו של דבר המים יוצאים מצינורות העצה שבעלה.

3. יציאת המים מצינורות העצה שבעלה מורידה את פוטנציאל המים בצינורות האלה. הירידה בפוטנציאל המים "מושכת" מים כלפי מעלה מצינורות העצה שבגבעול, שם פוטנציאל המים גבוה יותר (איור ו-17; 3).

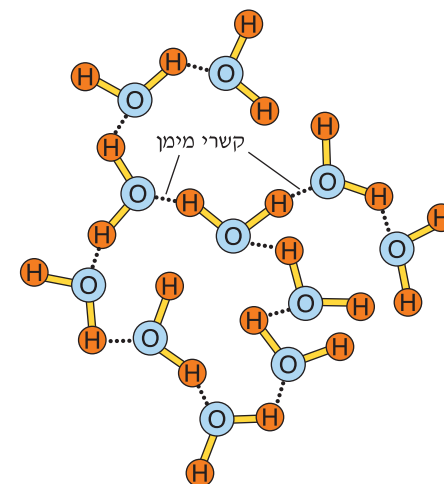
4. המים ממשיכים לנוע כלפי מעלה לאורך צינורות העצה שבצמח, מאזורים בעלי פוטנציאל מים גבוה לאזורים בעלי פוטנציאל מים נמוך יותר – מצינורות העצה בשורש אל צינורות העצה שבגבעול, מן הקרקע דרך היונקות לצינורות העצה שבשורש (איור ו-17; 4).

קוהזיה

כדי למשוך את המים כלפי מעלה, לא מספיק תהליך הדיות, דרוש גם כוח שיחזיק את עמוד המים רצוף. הכוח הזה נקרא **קוהזיה** והוא כוח משיכה שפועל בין המולקולות בכול נוזל. במים, בגלל המבנה הקוטבי של המולקולה (איור ו-18), כוחות הקוהזיה חזקים במיוחד. לכל מולקולת מים יש קשרים כימיים רופפים עם מולקולות המים השכנות (איור ו-19). הקשרים האלה נקראים קשרי מימן והם יוצרים כוחות קוהזיה גדולים בין מולקולות המים לבין עצמן. כוחות הקוהזיה האלה חיוניים ליצירת עמוד מים רצוף בצינורות ההובלה, עמוד שנמשך לאורך כל הצמח, מן העלה דרך הגבעול (או הגזע) ועד לשורשים.



איור ו-18: מבנה מולקולת המים



איור ו-19: מולקולות מים קשורות זו לזו בקשרי מימן

המבנה הקוטבי של מולקולת המים



מולקולת המים מורכבת מאטום חמצן (O) שקשור לשני אטומי מימן (H). לכל אטום מימן יש אלקטרון אחד שמשתתף בקשר עם החמצן. שני הקשרים שבין החמצן לכל אחד מאטומי המימן יוצרים ביניהם זווית של 105° (איור ו-18). לאטום החמצן, יש זיקה גבוהה לאלקטרונים, והוא מושך את אלקטרוני הקשר בכוח משיכה חזק מאוד, חזק יותר מכוח המשיכה שמפעיל עליהם האטום המימן. לכן, האלקטרונים של הקשר סמוכים יותר לחמצן מאשר למימן. כתוצאה מכך, מטען חשמלי שלילי מתרכז סביב החמצן, ואילו סביב אטומי המימן מתרכז מטען חשמלי חיובי. המטען השלילי שווה בערכו לסכום המטענים החיוביים, כך שמולקולת המים כולה אינה טעונה במטען חשמלי. ההפרדה של המטענים וזווית הקשר שבין האטומים מקנות קוטביות (פולריות) למולקולת המים. כתוצאה מהקוטביות, יש משיכה חשמלית בין מולקולות מים סמוכות, והיא באה לידי ביטוי בכך שאטום מימן של מולקולת מים אחת נמשך אל אטום חמצן של מולקולת מים סמוכה. המשיכה בין מולקולות מים נקראת בשם קשרי מימן (איור ו-19). קשרי המימן שבין מולקולות המים אחראיים לתכונות רבות של המים.

אדהזיה

עמוד המים בצינורות ההובלה שומר על רציפותו גם הודות לכוחות אֶדְהֶזִיָה. כוחות האדהזיה נובעים אף הם מן המבנה הקוטבי של מולקולות המים, והם הכוחות שיוצרים משיכה בין מולקולות המים לבין מולקולות של חומרים מוצקים שונים. בצמח, כוחות אדהזיה פועלים בין מולקולות המים למולקולות התאית שבדפנות של צינורות העצה. מולקולות התאית

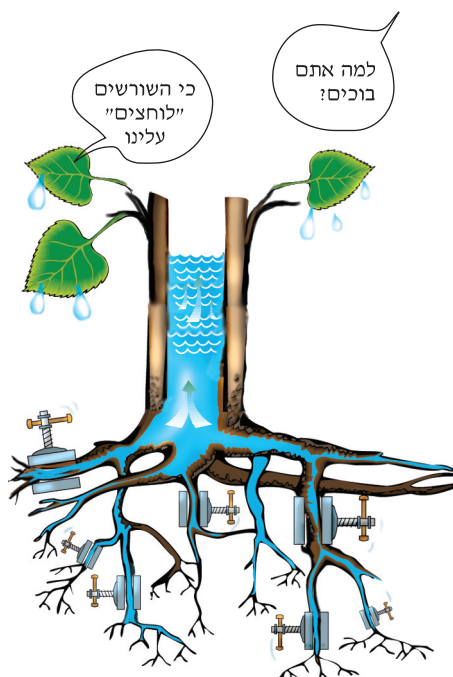
מכילות אטומי חמצן רבים, שיוצרים קוטב שלילי במולקולות. אטומי המימן במולקולות המים נמשכים אל אטומי החמצן בתאית ויוצרים ביניהם קשרי מימן. קשירת המים לדפנות של צינורות העצה תורמת לאחזקת עמוד המים הרציף.

לחץ השורש

כאשר חודר אוויר לצינורות העצה, רצף עמוד המים ניתק בגלל בועות האוויר בצינורות. לצמחים יש שני מנגנונים להתגבר על הבעיה הזאת. מנגנון אחד הוא פעילות של רקמת הקמביום, שיוצרת בהתמדה אלמנטים חדשים של עצה במקום אלמנטים שנחסמו על ידי בועות אוויר. המנגנון האחר, שמסוגל כנראה לדחוף את האוויר מן הצינורות כלפי חוץ, הוא לחץ השורש.

לחץ השורש הוא לחץ מים בצינורות העצה, שכיוונו מלמטה למעלה, ומקורו בשורשים. כאשר מים ויסודות מינרליים נקלטים בשורש, הם נעים לרוחב רקמות השורש עד לצינורות העצה במרכז השורש. היונים חודרים לצינורות העצה במעבר אקטיבי תוך השקעת אנרגיה, ואילו המים עוברים באופן פסיבי בהתאם לפוטנציאל המים. המים שנכנסים יוצרים לחץ בצינורות העצה של השורש. הלחץ שנוצר, דוחף את המים מצינורות העצה, אל מחוץ לצמח, דרך רקמות חלשות בעלה או דרך חתכים בגבעול. את התופעה אפשר לראות אם קוטמים גבעול של צמח סמוך לשורש; מן הקצה הקטום יטפטפו מים ולעתים, הם ימשיכו לטפטף ימים רבים. תופעה דומה מוצאים לעתים גם בצמחים שלמים, כאשר יש תנאים טובים לקליטת מים בשורשים, אולם לחות האוויר גבוהה, ומעט מאוד מים אובדים בדיות. בהשפעת הלחץ שמפעילים השורשים, המים בצמח נדחפים החוצה מקצות העורקיקים בעלים, והם מופרשים בצורת טיפות בקצות העלים. הפרשה זו מן העלים נקראת **דמיעה** (guttation).

היו חוקרים שחשבו, שלחץ השורש הוא הכוח שמניע את המים בצמח כלפי מעלה. אולם, יש עצים, כמו עצי המחט, שלא מתפתח אצלם לחץ שורש. בעצים שבהם מתפתח לחץ שורש, הוא יכול להעלות את המים לגובה של 2-3 מ' בלבד. רוב החוקרים חושבים, שלחץ השורש יש תפקיד עזר בתהליך העלאת המים. לחץ השורש יכול להיות מעורב בהעלאת המים בצמחים צעירים וקטנים, ורק בעונות שיש שפע של מים בקרקע. נוסף לכך, לחץ השורש מסוגל כנראה לדחוק אוויר מתוך צינורות שבהם נותקו עמודי המים.



עליית מים בפטוטרת של עלה סלרי



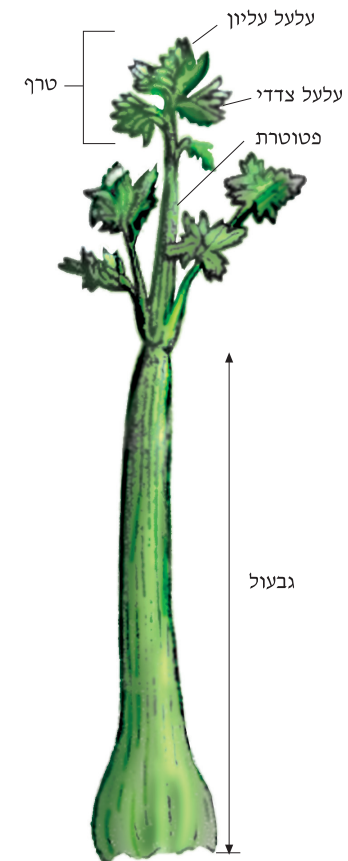
חלק א: בדיקת המהירות של עליית המים בפטוטרת של עלה סלרי

כלים וחומרים

כוס כימית (500 מ"ל)	ממחטות נייר אחדות
סכין חד או סכין גילוח	6 עלים של סלרי, דומים ככול האפשר (אורך
סרגל	הפטוטרת לפחות 10 ס"מ) (איור ו-20)
זכוכית מגדלת (הגדלה לפחות פי 2)	100 מ"ל תמיסת כחול מתילן (1%)

מהלך העבודה

1. לכוס כימית הכניסו מים צבועים בכחול מתילן, עד לגובה של כ-2 ס"מ.
2. בעזרת סכין חד חתכו כ-1 ס"מ מן הקצה התחתון של כל אחד מששת עלי הסלרי.
3. הכניסו מיד את העלים לכוס שבתוכה המים הצבועים. רשמו את השעה.
4. לאחר 5 דקות, מרגע הכנסת העלים, הוציאו שני עלים, וספגו את עודף המים מקצה הפטוטרת בממחטת נייר.
5. כדי לעקוב אחר עליית הצבע בפטוטרת העלים חתכו חתיכה של 1 ס"מ מקצה הפטוטרת של כל עלה. זהו בקצה התחתון של הפטוטרת צרורות צינורות צבועים בכחול. אם אתם מתקשים לקבוע אם חתך כלשהו צבוע, היעזרו בזכוכית המגדלת.
6. המשיכו לחתוך חתכים בפטוטרת, במרחק 1 ס"מ בין חתך לחתך, עד שלא תזהו שום צרור צבוע.
7. רשמו לאיזה מרחק מבסיס הפטוטרת של כל עלה הגיע הצבע.
8. 10 דקות לאחר שהוכנסו העלים למים הצבועים, הוציאו עוד שני עלים. חזרו על הפעולות בסעיפים 5, 6 ו-7.
9. 20 דקות לאחר שהוכנסו העלים למים הצבועים, הוציאו את שני העלים הנוותרים וחזרו על הפעולות בסעיפים 5, 6 ו-7.
10. חשבו מהו המרחק הממוצע של עליית הצבע מבסיס הפטוטרת בעלים ששהו 5 דקות במים הצבועים, בעלים ששהו 10 דקות, ובעלים ששהו 20 דקות.
11. רשמו את התוצאות בטבלה וענו על השאלות האלה:
 - א. מה הייתה מהירות תנועת המים בעלים שבדקתם? הסבירו.
 - ב. האם המים נעו במהירות אחידה בצרורות השונים? הסבירו.



איור ו-20: עלה של סלרי

- ג. מהו הכוח שהניע את המים כלפי מעלה?
 12. ציירו חתך רוחב בפטוטרת של עלה סלרי לפי החתכים שבידכם. סמנו בציור שלושה מבנים או רקמות הניתנים להבחנה בעין. מהו התהליך שמתרחש בכול אחד מהם?

חלק ב: השפעת גודל הטרף על מהירות עליית המים

כלים וחומרים

וזלין (כ-1 מ"ל)	כוס כימית (500 מ"ל) שבתוכה יש מים
קיסם למריחה	שאר הכלים והחומרים כמו בחלק א

מהלך העבודה

- קחו שני עלי סלרי ובעזרת סכין חד חתכו את הטרף של העלעלים הצדדיים, כך שיישאר רק העלעל שבקצה העליון של הפטוטרת (איור ו-20). על מקומות החתך מרחו וזלין והחזירו את העלים לכלי שבתוכו יש מים.
- קחו שני עלים אחרים וחתכו את הטרף של כל העלעלים. על כל מקומות החתך מרחו וזלין והחזירו את העלים לכלי שבתוכו יש מים.
- את שני העלים הנותרים השאירו שלמים בכלי שבתוכו יש מים.
- לכוס כימית הכניסו מים צבועים בכחול מתילן, עד לגובה של כ-2 ס"מ.
- בעזרת סכין חד חתכו כ-1 ס"מ מן הקצה התחתון של כל אחד משש הפטוטרות של עלי הסלרי, והכניסו מיד את העלים לכוס שיש בה מים צבועים.
- רשמו את השעה.
- 10 דקות לאחר הכנסת העלים למים הצבועים הוציאו אותם, ספגו את עודפי הצבע ובדקו את גובה עליית המים בפטוטרות לפי סעיפים 5, 6 בחלק א של העבודה.
- רשמו את הגובה המרבי שאליו הגיע הנוזל בכול אחד מן העלים, וחשבו מהו המרחק הממוצע של עליית הצבע מבסיס הפטוטרת בעלים השלמים, בעלים בעלי עלעל אחד ובעלים ללא עלעלים.
- רשמו את התוצאות בטבלה וענו על השאלות האלה:
 - תארו את תוצאות הניסוי.
 - מה ניתן להסיק מתוצאות הניסוי?
 - מדוע התבקשתם למרוח וזלין על מקומות החיתוך?
 - הסבירו מדוע חשוב לבדוק יותר מעלה אחד בכול טיפול.
 - אילו היו העלים נשארים במים הצבועים ימים אחדים, האם חלקים נוספים בעלה היו נצבעים? הסבירו.

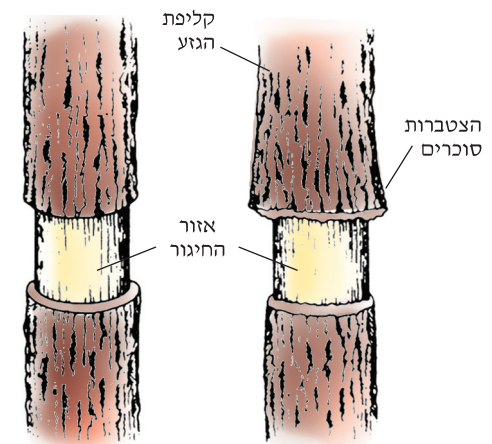
הובלת תוצרי הפוטוסינתזה בשיפה

בצינורות השיפה מובלים חומרים, כשהם מומסים במים, בנוזל שנקרא **מוהל השיפה** (phloem sap). רוב החומרים המומסים במוהל השיפה הם סוכרים (תוצרי הפוטוסינתזה), והם נעים בשיפה מן האזור שבו הם מיוצרים או מאוחסנים, שנקרא **מקור** (source), אל האזור שבו הם נצרכים - **המבלע** (sink). המקורות העיקריים לסוכרים הם העלים הבוגרים, אבל גם רקמות אגירה יכולות לשמש מקורות חשובים, בשלב שבו הן "משחררות" את הסוכרים המאוחסנים. המבלעים הם רקמות שצריכות ל"יבא" סוכרים בגלל שהן לא מבצעות פוטוסינתזה, או שאינן מבצעות פוטוסינתזה די הצורך, כמו: שורשים, פירות, פרחים, גבעולים, קדקודי צמיחה ועלים צעירים. גם רקמות אגירה יכולות לשמש מבלעים, בשלב שבו הן "קולטות" את הסוכרים המאוחסנים.

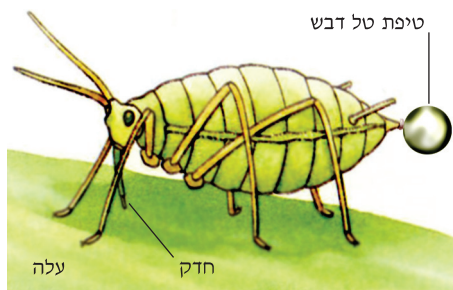
מחקרים אודות הובלת הסוכרים



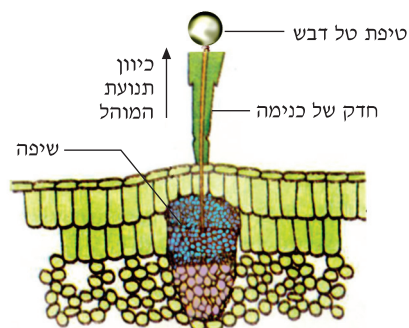
המידע הראשון על הובלת סוכרים מן העלים לרקמות הצורכות, בא מניסויי חיגור שנעשו עוד ב-1686 על ידי החוקר האיטלקי מלפיגי (Malpighi). **חיגור** (girdling) הוא הסרת רצועה של המעטה החיצוני של הגזע, של הגבעול או של הפטוטרת, עד לשכבת הקמביום. מכיוון שצינורות השיפה מצויים ברצועה שהוסרה, נקטע רצף השיפה האנכי. כאשר החיגור הוא בגזע נפסקת אספקת הסוכרים אל מתחת לאזור החיגור, רקמת הקליפה שמתחת לאזור החיגור מתנוונת, ואילו הרקמה שמעליו תופחת מעט ונשארת בריאה (איור ו-21). חיזוק לכך שהקליפה אכן משמשת להובלה התקבל ב-1837, כאשר החוקר הגרמני הרטיג (Hartig) גילה את צינורות הכברה. עיקר המחקר להבנת ההובלה של הסוכרים נעשה במאה ה-20. לעלים סיפקו CO_2 שהפחמן שלו סומן בסימון רדיואקטיבי (^{14}C), וכך יכלו לעקוב אחר התנועה של הסוכרים שנוצרו בצמח בתהליך הפוטוסינתזה. תנועת הסוכרים נבדקה בשיטת האוטורדיוגרפיה, שיטה שעוקבת אחרי חומר שמסומן רדיואקטיבית. בשיטה הזאת לוקחים חתכים דקים מן הצמח שהוחדרו לו חומרים רדיואקטיביים ומניחים אותם בחושך על גבי נייר צילום רגיז לקרינת X. הקרינה, שמקורה באטומים הרדיואקטיביים, פועלת על נייר הצילום, כך שלאחר פיתוחו נותר עליו סימון ברור של מיקום הרדיואקטיביות. השוואת החתך של הרקמה עם התצלום מאפשרת לזהות את התאים או את הרקמות שבהם הצטברו החומרים המסומנים. בדרך הזאת מצאו, כי אכן הרקמה שמובילה את הסוכרים היא השיפה, והתאים הם תאי הכברה.



איור ו-21: חיגור קליפה בצמח



א. כנימה מפרישה טיפת "טל דבש"



ב. איסוף המוהל המופרש מחדק כנימה שתקוע ברקמת השיפה

איור ו-22: הפקת מוהל שיפה באמצעות כנימות "טל דבש"

דרך אחרת לקבלת מידע חשוב על הובלת סוכרים, היא הפקת מוהל שיפה באמצעות כנימות ש"מוצצות" את מוהל השיפה. הכנימות האלה חוזרות ותוקעות את החדק שלהן ברקמה הצמחית, עד שהוא פוגע באלמנט כברה. המוהל באלמנט הכברה נדחס דרך החדק אל תוך הכנימה. מרבית החומרים במוהל שמגיעים אל הכנימה לא מתעכלים והם מופרשים על ידי מפי הטבעת, כטל דבש (איור ו-22, א). אפשר לקבל את המוהל גם על ידי ניתוק הכנימה מן החדק שלה ואיסוף המוהל המופרש מן החדק שנשאר תקוע ביחידות כברה (איור ו-22, ב). לאחר מכן, בודקים את הרכב המוהל שנאסף ומשווים את המוהל שנאסף מאזורים שונים של הצמח.

בניסויים שונים שבדקו את ההובלה בשיפה, התקבלו הממצאים האלה:

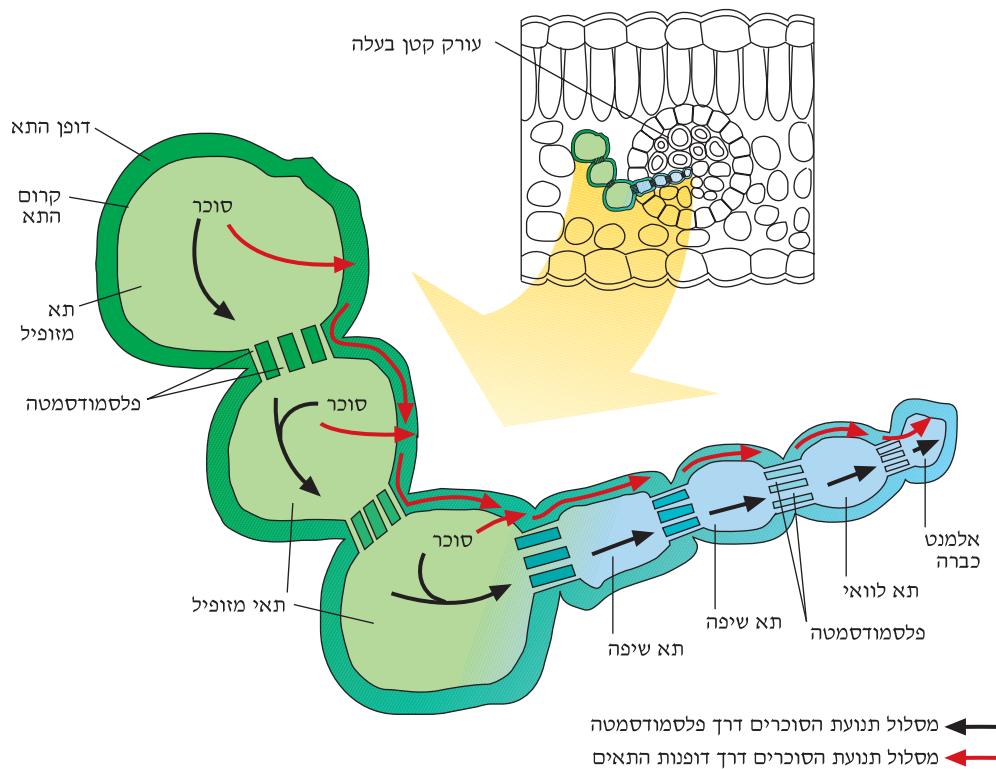
- הסוכרים נעים ממקורות למבלעים גם כלפי מטה וגם כלפי מעלה. כל מקור מספק סוכרים למבלע הקרוב אליו ביותר.
- הסוכרים נעים בשיפה בחוליות כברה שמתחברות לצינורות כברה. התנועה היא דרך הציטופלסמה של התאים. הציטופלסמה של חוליות הכברה דלילה יותר מהציטופלסמה של רוב תאי הצמח.
- לתנועת הסוכרים בשיפה דרושה אנרגיה. האנרגיה דרושה להעברה אקטיבית של הסוכרים דרך הקרומים של האלמנטים של הכברה.
- בצמחים רבים, המומס העיקרי המובל בשיפה הוא הסוכר סוכרוז. נוסף לסוכרים, מובלים בשיפה גם חלבונים, יסודות מינרליים שונים, תרכובות חנקן, מווסתי צמיחה (הורמונים צמחיים) וחומצות גרעין.
- מהירות ההובלה בשיפה היא 0.1-6 מ' לשעה (ברוב המקרים - 0.2-2 מ' לשעה). התנועה בשיפה מהירה יותר מן התנועה בדיפוזיה רגילה.

תיאוריית הזרימה בלחץ (זרימת מסה)

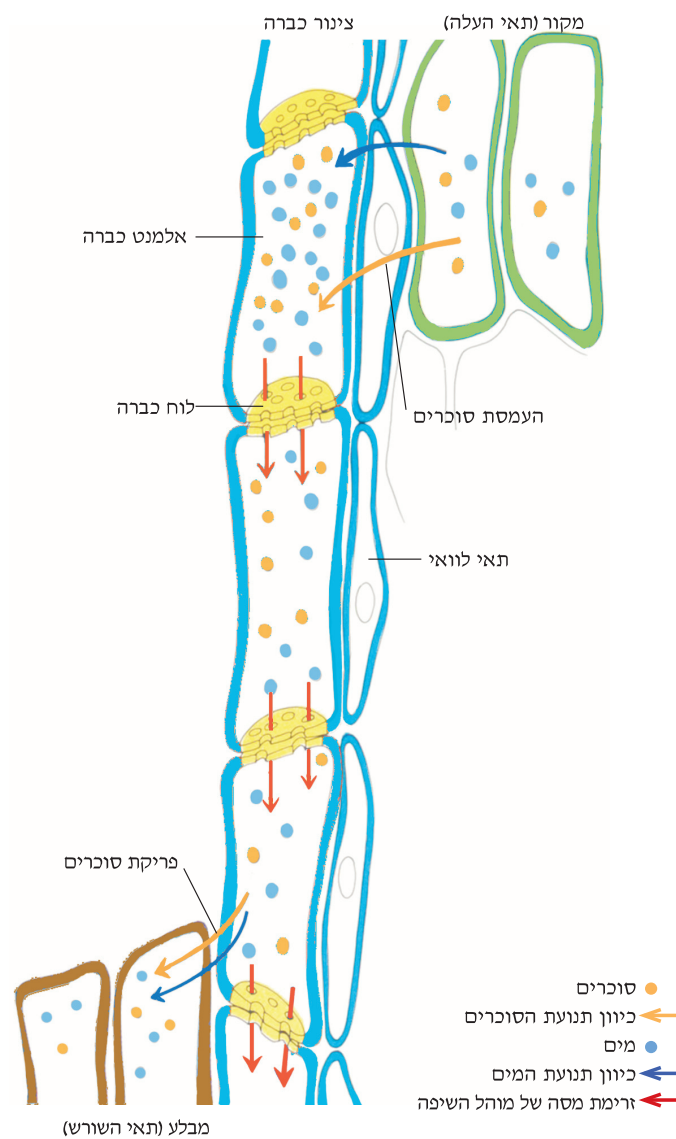
עדיין אין הסכמה לגבי מנגנון ההובלה בשיפה. התיאוריה שבאמצעותה מסבירים את מנגנון ההובלה בשיפה הוצעה לראשונה על ידי מונך (Munch), כבר בשנת 1926. כיום היא מקובלת עם שינויים קלים, והיא נקראת תאוריית הזרימה בלחץ (pressure flow) או זרימת מסה (mass flow). לפי התיאוריה הזאת, מוהל השיפה זורם לאורך צינורות הכברה בשיפה, כשהכוח המניע הוא מפל בלחץ הטורגור.

לחץ הטורגור (turgor pressure) הוא הלחץ שתוכן התא מפעיל על הדפנות. בתגובה ללחץ הטורגור, קרומי התאים מתמתחים ומקנים לתא את צורתו היציבה.

הסוכרים נוצרים, בתהליך הפוטוסינתזה, בתאי המזופיל בעלה, והם עוברים מתא לתא ברקמת המזופיל עד שהם מגיעים לצינור כברה בעורקים הקטנים של העלה (איור ו-23). תנועת הסוכרים בעלה, מרקמת המזופיל לרקמת השיפה, נקראת **העמסה** (loading). הסוכרים יכולים לנוע בתהליך ההעמסה ולחדור לצינור הכברה באמצעות הפלסמודסמה שמחברים את הציטופלסמה של התאים. הם יכולים גם לנוע דרך דופנות התאים. הסוכרים שעוברים דרך דופנות התאים, חודרים לצינור הכברה ולתאי הלוואי דרך קרומי התאים. תהליך ההעמסה של הסוכרים דרך קרומי התאים הוא תהליך אקטיבי, והוא נעשה באמצעות נשאים מיוחדים שנמצאים בקרום אלמנט הכברה ובקרום תאי הלוואי. רוב האנרגיה הנדרשת להעמסה אקטיבית מקורה בתאי הלוואי. העמסת סוכרים לתוך צינורות כברה מתרחשת גם באיברי אגירה מתרוקנים שמספקים סוכרים לאיברים אחרים בצמח.



איור ו-23: מסלול תנועת הסוכרים בפלסמודסמה ובדפנות של תאים בעלה, בתהליך העמסה



איור ו-24: הזרימה בלחץ של מוהל השיפה ממקור למבלע בצינור כברה

העמסת הסוכרים לתוך צינורות הכברה מורידה בצינורות את פוטנציאל המים. כתוצאה מכך, נכנסים מים לתוך הצינורות בהתאם למפל פוטנציאל המים (איור ו-24). כניסת המים מעלה את לחץ הטורגור בצינורות הכברה.

במבלעים, הסוכרים יוצאים מצינורות הכברה בתהליך שנקרא **פריקה** (unloading), והם נעים לתאים שבהם הם נצרכים. נראה, שגם תהליך הפריקה הוא תהליך אקטיבי. פריקת הסוכרים מתוך צינורות הכברה מעלה בצינורות את פוטנציאל המים. כתוצאה מכך, יוצאים מים מתוך הצינורות בהתאם למפל פוטנציאל המים (איור ו-24). יציאת המים מורידה את לחץ הטורגור בצינורות הכברה.

כתוצאה מתהליכי ההעמסה והפריקה של הסוכרים, יש לחץ טורגור גבוה במוהל השיפה שבאיברי המקור, ואילו במבלעים, לחץ הטורגור במוהל השיפה נמוך יותר. כתוצאה מהפרשי לחץ הטורגור יש זרימה של מוהל השיפה מאזורי מקור לאזורי מבלע. מכיוון שהכוח המניע את הזרימה הוא מפל בלחץ הטורגור, נקראת התיאוריה "זרימה בלחץ". המפל בלחץ הטורגור בין אזורי המקור לאזורי המבלע, דוחף את התמיסה כולה, המים עם החומרים המומסים, כמסה אחת לכיוון המבלעים. המים יחד עם החומרים המומסים נעים באופן פסיבי, מתא לתא, בצינורות הכברה דרך חוטי הפלסמה שעוברים בנקבים של לוחות הכברה. מעבר המים יחד עם המומסים דרך התאים נקרא זרימת מסה, ולכן התיאוריה נקראת גם "זרימת מסה".

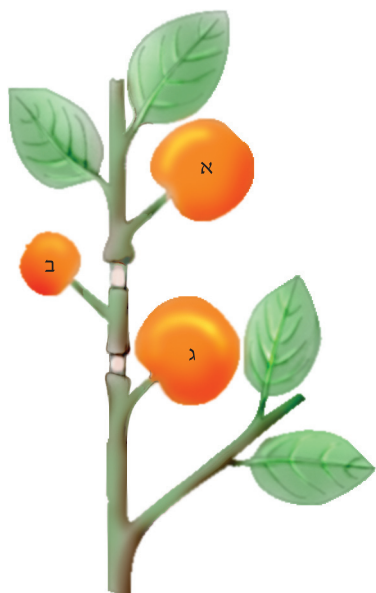
סיכום

1. המים והיסודות המינרליים נקלטים ביונקות השורש, ונעים בשורש בתנועה רוחבית, אל הגליל המרכזי. התנועה נעשית בדופנות התאים ובציטופלסמה של התאים.
2. המים והיסודות המינרליים נעים בצינורות העצה בצמח כלפי מעלה: מן השורשים דרך הגבעול אל העלים, בהתאם למפל פוטנציאל המים.
3. המים והיסודות המינרליים עולים הודות לשלושה כוחות משיכה שמופעלים עליהם: דיות, קוהזיה ואדהזיה. תהליך הדיות מושך כלפי

- מעלה את המים, כעמוד רציף, מיונקות השורש ועד לעלים. עמוד המים נוצר בצינורות העצה הודות לכוחות משיכה בין מולקולות המים (קוהזיה) והודות לכוחות משיכה בין המים לצינורות העצה (אדהזיה).
4. במיני צמחים מסוימים, בייחוד בעונות גשומות, לחץ השורש יכול לתרום להעלאת המים והיסודות המינרליים בצינורות העצה. לחץ השורש גם תורם לרציפות עמוד המים.
5. כ-90% מן החומרים המומסים שמועברים בשיפה הם סוכרים, בעיקר סוכרוז; שאר החומרים הם תרכובות חנקניות, חומצות אמיניות, יסודות מינרליים, מווסתי צמיחה וחומצות גרעין.
6. הובלת הסוכרים בצמח נעשית בצינורות כברה, מאזורי מקור לאזורי מבלע. מקור הוא אזור שבו נוצרים סוכרים בכמות גדולה יותר מן הכמות שנצרכת או אזור שממנו משתחררים סוכרים שהיו אגורים. מבלע הוא אזור שבו נצרכים סוכרים בכמות גדולה יותר מן הכמות שנוצרת או אזור שבו נאגרים סוכרים.
7. תנועת הסוכרים נעשית, כנראה, בזרימת לחץ (או זרימת מסה). הסוכרים נעים מאזור של לחץ טורגור גבוה (מקור), אל אזור של לחץ טורגור נמוך (מבלע), והכוח המניע את הזרימה הוא המפל בלחץ הטורגור בין אזורי המקור לבין אזורי המבלע.
8. זרימת המסה לאורך צינורות הכברה היא פסיבית. אולם, תהליך ההעמסה של הסוכרים אל תוך צינורות הכברה באזורי המקור הוא תהליך אקטיבי, וכך כנראה גם תהליך הפריקה של הסוכרים מצינורות הכברה באזורי המבלע.



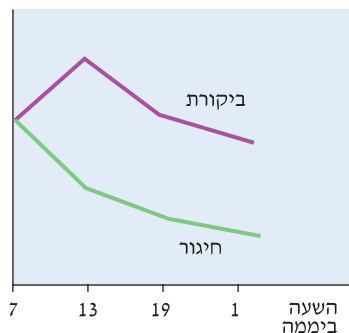
1. הסבירו מדוע מים לא יכולים לנוע מן העלים אל השורשים.
2. הסבירו כיצד המבנה של מולקולת המים תורם להעלאת המים בצמח.
3. תארו את המסלול שעוברת טיפת מים בצמח, מקליטתה מן הקרקע ועד יציאתה כאדי מים לאוויר החיצוני. היעזרו ברשימת המושגים הזאת: גליל מרכזי, תאי מזופיל, צינורות עצה בשורש, פתחי פיוניות, פריציקל, צינורות עצה בגבעול, יונקות, חללים בין תאי מזופיל, קליפת השורש, צינורות עצה בעלה, אנדודרמיס, קרקע, אוויר חיצוני.
4. השוו בין המסלול שעוברת מולקולת CO_2 מן האוויר אל תוך תא ברקמת המזופיל של העלה, ובין המסלול שעובר יון של יסוד מינרלי מן הקרקע אל אותו התא.
5. אילו איברים בצמח משמשים כמקור?



איור ו-25: הובלת סוכרים לפירות בענף שנעשה בו חיגור כפול

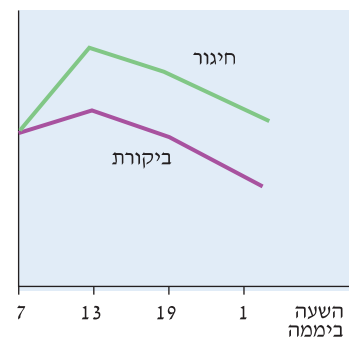
6. אילו איברים בצמח משמשים כמבלע?
7. אילו איברים בצמח הופכים ממבלע למקור?
8. אילו איברים משמשים כמקור בראשית התפתחות הצמח, לפני היווצרות העלים הראשונים?
9. הסבירו מדוע בחושך הופכים עלים ממקור למבלע.
10. הביאו דוגמאות לאזורי צמיחה ולאזורי אגירה בצמח, שאליהם עוברים סוכרים בכמות רבה.
11. בניסוי שערך מונך (Munch) נבדקה צמיחתם של פירות (א, ב, ג). הפירות היו על ענף של צמח, שנעשה בו חיגור כפול (איור ו-25).
 - א. האם כל הפירות ימשיכו להתפתח? הסבירו.
 - ב. מה יהיה מקור הסוכרים לכל אחד מן הפירות? הסבירו.
12. לאחר שנעשה חיגור בצמח כותנה, נבדקה תכולת הסוכרים בשיפה. הבדיקה נערכה במשך 18 שעות, מעל לאזור החיגור ומתחת לאזור החיגור. בדיקות זהות נערכו בצמח ביקורת שלא נעשה בו חיגור. תוצאות הניסוי מובאות באיור ו-26.
 - א. הסבירו מדוע משתנה ריכוז הסוכרים בשיפה במהלך היום.
 - ב. תארו והסבירו את השינוי בריכוז הסוכרים מעל לחיגור בצמח הניסוי ובצמח הביקורת, והשוו ביניהם.
 - ג. תארו והסבירו את השינוי בריכוז הסוכרים מתחת לחיגור בצמח הניסוי ובצמח הביקורת.

ריכוז הסוכרים
(יחידות יחסיות)



ב. שינויים בריכוז הסוכרים מתחת לחיגור

ריכוז הסוכרים
(יחידות יחסיות)

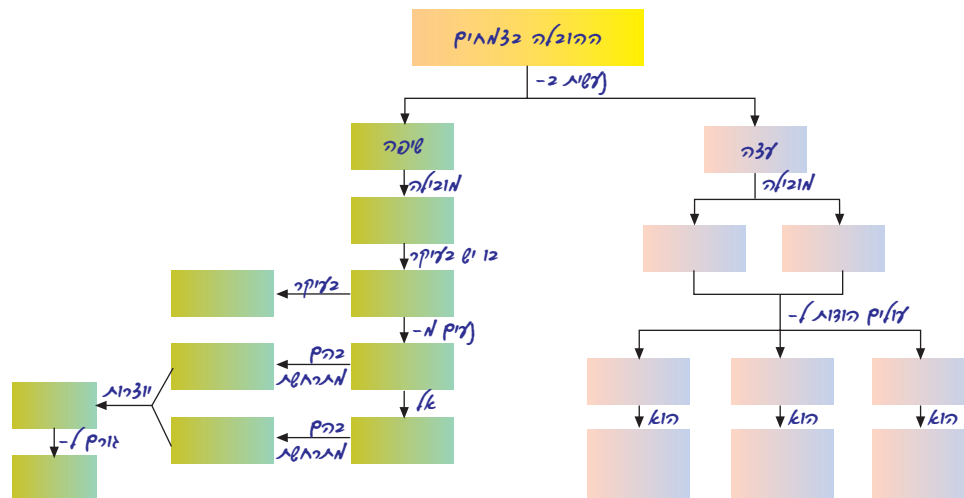


א. שינויים בריכוז הסוכרים מעל לחיגור

איור ו-26: שינויים בריכוז הסוכרים בענף כותנה מעל החיגור ומתחת לחיגור

13. צמח עבר חיגור בגזע.
 - א. מדוע החיגור יגרום בסופו של דבר למותו?
 - ב. האם חיגור באחד הענפים יגרום למות הצמח? הסבירו.

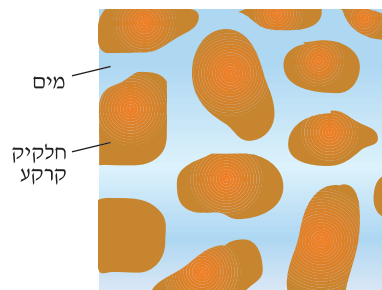
סוכרים; יסודות מינרליים; מוהל שיפה; כוח משיכה בין מולקולות המים; פריקה של סוכרים; כוח האדהזיה; מים; אזורי מבלע; תהליך הדיות; זרימה בלחץ; סוכרוז; כוח הקוהזיה; העמסה של סוכרים; התנדפות מים דרך הפיוניות; מפל בלחץ הטורגור; אזורי מקור; כוח המשיכה בין מולקולות המים לדפנות הצינורות.



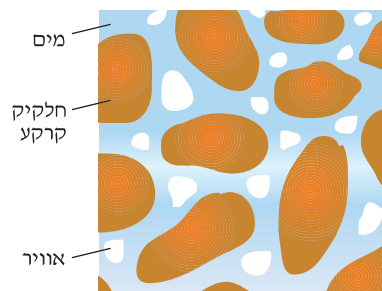
איור ו-27: ההובלה בצמחים

מאזן המים בצמח

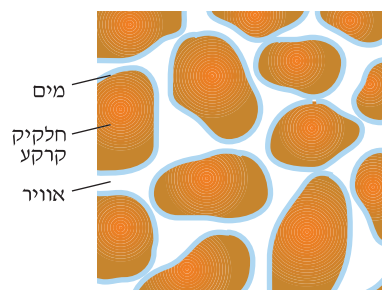
כדי לחיות ולתפקד חייבים הצמחים, כמו כל היצורים החיים, לשמור בגופם כמות קבועה של מים. המים מצויים בדופנות התאים, בציטופלסמה ובחלולית התא, והם המרכיב העיקרי ברקמות הצמח. כמות המים נעה בין 60% ל-90% מן המשקל הטרני של רקמות צמחיות, באיברי צמח בלתי מעוצים. המים נחוצים להמסת חומרים ולהובלת החומרים בין איברי הצמח השונים, לקיום תגובות כימיות ולשימור לחץ הטורגור. כאשר צמח קולט מים מן הקרקע בכמות השווה לכמות שאיבד בתהליך הדיות, נשמר בגופו מאזן מים תקין. קליטת המים מן הקרקע ואיבוד המים בדיות, תלויים בגורמים פנימיים של הצמח, ובגורמים חיצוניים, שהם גורמים סביבתיים.



א. רוויה



ב. קיבול שדה



ג. נקודת כמישה

איור ו-28: מצבי הרטיבות בקרקע

קליטת המים מן הקרקע

המים מן הקרקע נקלטים בצמח כאשר הם באים במגע עם היונקות של הצמח. היונקות מתפתלות בין חלקיקי הקרקע, לופתות אותם ו"יונקות" את המים שבסביבה ואת היסודות המינרליים שמומסים במים. כמות המים שהצמח קולט מותנית בכמות המים הזמינים בקרקע ובמבנה של מערכת השורשים.

מצבי הרטיבות בקרקע

כאשר יורד גשם או לאחר השקיה, מתמלאים החללים שבין חלקיקי הקרקע במים ונוצר בקרקע מצב של רווייה (איור ו-28, א). חלק מן המים האלה נע כלפי מטה ומחלחל לשכבות עמוקות של הקרקע, בהשפעת כוח המשיכה של כדור הארץ (כוח הכובד). המים האלה נקראים **מי כובד**, והם אינם זמינים לצמחים. הצמחים יכולים לקלוט מים רק משכבות הקרקע העליונות, עד לעומק צמיחת השורשים שלהם.

המים שלא מחלחלים, נשארים בשכבות הקרקע העליונות כשהם אחוזים בחלקיקי הקרקע, בכוחות תאחיזה שמתגברים על כוח הכובד. המים האלה ממלאים את החללים הזעירים שבין חלקיקי הקרקע, ואילו החללים הגדולים, שמהם הלחלו המים, מתמלאים באוויר. המצב שבו הקרקע מחזיקה את מלוא כמות המים האפשרית, לאחר שהסתיים הניקוז שנגרם על ידי כוח הכובד, נקרא **קיבול שדה** (איור ו-28, ב). מי קיבול שדה הם **מים זמינים לצמח**.

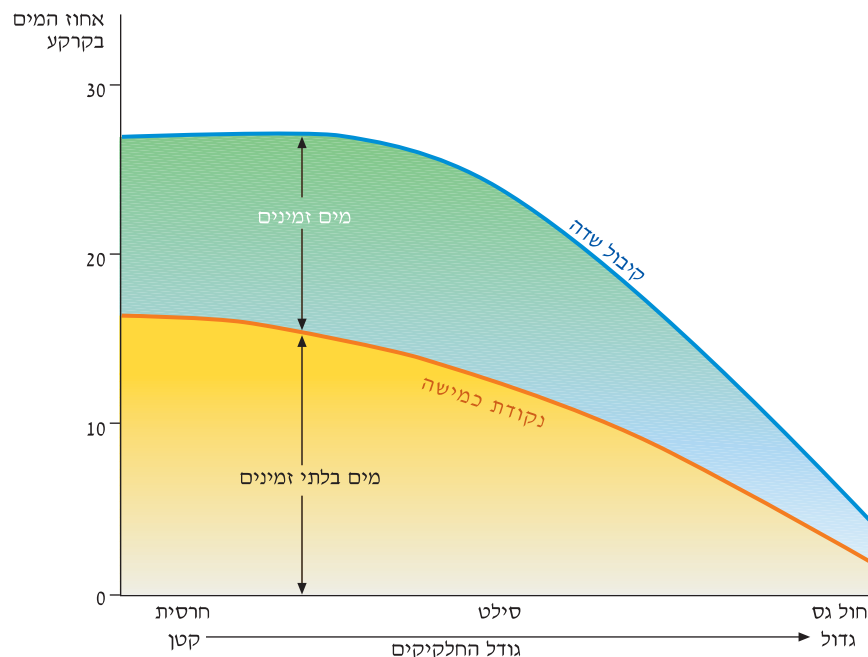
היונקות בשורשי הצמח מפעילות כוח יניקה שמנתק את המים שצמודים לחלקיקי הקרקע. מכיוון שהמים נעים בהתאם למפל פוטנציאל המים, כוח היניקה של היונקות תלוי בריכוז המומסים בתוך תאי היונקות; ככול שריכוז המומסים בתאי היונקות גבוה יותר, כך היונקות יכולות לנתק יותר מולקולות מים מחלקיקי הקרקע. כל עוד כוח היניקה של תאי היונקות גדול מכוחות התאחיזה של המים לחלקיקי הקרקע, תתקיים תנועה של מים מן הקרקע אל תאי היונקות. מולקולות המים אשר נעות ראשונות לעבר תאי השורש, הן אלה שמרוחקות ביותר מחלקיקי הקרקע, כלומר: מולקולות שכוחות התאחיזה הפועלים עליהן הם החלשים ביותר. בהמשך קליטת המים, הולכים וגוברים הכוחות הדרושים כדי לנתק את מולקולות המים מחלקיקי הקרקע. בסופו של דבר, מגיעים למצב שבו עדיין מצויים מים בקרקע, אך אין ביכולתו של הצמח להפעיל את הכוחות הדרושים ליניקת המים מן הקרקע. המים האלה אינם עומדים לרשות הצמח, בשל תאחיזתם החזקה לחלקיקי הקרקע, והם נקראים **מים בלתי זמינים לצמח**. המצב שבו בקרקע נשארים רק מים בלתי זמינים נקרא **נקודת הכמישה** (איור ו-28, ג), משום שצמחים שגדלים בקרקע כזו כושלים ונובלים, אף שהקרקע אינה יבשה לגמרי. הצמחים יכולים לקלוט מים מן הקרקע רק עד שהיא מגיעה לנקודת הכמישה. במילים אחרות: הצמחים מנצלים רק את המים הזמינים בקרקע, אלה שבתחום שבין קיבול שדה לנקודת הכמישה.

גורמים המשפיעים על כמות המים הזמינים לצמח

כמות המים הזמינים לצמח מושפעת מסוג הקרקע, ממליחות הקרקע ומתנאים סביבתיים אחרים.

סוג הקרקע - יש שוני רב בתכולת המים הזמינים בקרקעות שונות. השוני הזה נובע מגודל החלקיקים בקרקע, מסידור הקרקע בתלכידים ומתכולת החומר האורגני שבקרקע. לכל סוג קרקע יש קיבול שדה ונקודת כמישה האופייניים לו, ולפי זה גם משתנה כמות המים הזמינים בקרקעות שונות (איור ו-29). באופן כללי, קרקעות בעלות גרגרים דקים מכילות מים זמינים יותר מקרקעות בעלות גרגרים גסים. בקרקעות חוליות (בעלות גרגרים גסים), שטח הפנים של החלקיקים קטן יחסית, ולכן כמות המים המוחזקת על פניהם קטנה, יחסית. בקרקעות חרסיתיות (בעלות גרגרים דקים), שטח הפנים של החלקיקים גדול יחסית וכמות גדולה יותר של מים מוחזקת על פני חלקיקי הקרקע. בקרקעות בעלות גרגרים דקים גם נוצרים יותר תלכידים. התלכידים הם אוסף של חלקיקים שדבוקים זה לזה באמצעות "חומרי דבק", כגון: חומר אורגני וגיר. בתוך התלכידים יש חללים זעירים ובהם נשמרים מים זמינים. גם כמות החומר האורגני שבקרקע משפיעה על יכולת אחזקת המים שלה, משום שחומר

אורגני, כשהוא מפורק חלקית, נוטה לספוח מים, וכן משום שהחומר האורגני מסייע ביצירת תלכידים.



איור ו-29: הקשר בין גודל חלקיקי הקרקע לבין קיבול השדה ונקודת הכמישה

המליחות בקרקע - ריכוז המלחים המומסים בתמיסת הקרקע משפיע על כמות המים שהצמח יכול לקלוט. כאשר בתמיסת הקרקע יש ריכוז גדול יחסית של מלח, ההפרש בין ריכוז המומסים בתאי היונקות לבין זה שבתמיסת הקרקע קטן, יחסית. כתוצאה מכך, מעט מים יכולים להיקלט על ידי הצמחים. בקרקע בעלת מליחות גבוהה, הצמח קולט מעט מים, וכתוצאה מכך ההתפתחות שלו נפגעת, והוא אף עלול למות.

גורמי הסביבה - תנאי הסביבה יכולים להשפיע במידה רבה על כמות המים הזמינים לצמח. המים מן הקרקע מתאדים לאטמוספירה, ישירות מן הקרקע או מן הצמחים, בתהליך הדיות. התאדות המים מושפעת מגורמי סביבה, כמו: טמפרטורה, לחות יחסית של האוויר, מהירות הרוח וחיפוי הקרקע. טמפרטורה גבוהה ורוחות מגבירים את ההתאדות, ואילו לחות אוויר גבוהה וחיפוי קרקע מקטינים את שיעור ההתאדות. כדי להבטיח מאזן מים תקין בצמח יש להוסיף לו כמות מים בהתאם לכמות המים שמתאדים מן הקרקע.

בדיקת קיבול מים וקצב חלחול בקרקעות שונות



כלים וחומרים

משפך (50-100 מ"ל)	משורה (100 מ"ל)
נייר סינון	עלי ומכתש
כוס כימית (50 או 100 מ"ל)	קרקעות שונות (חול ים, חמרה/חול, חרסית)
שעון	מיובשות היטב בתנור

מהלך העבודה

את העבודה יש לעשות בקבוצות; כל קבוצה תבדוק סוג אחר של קרקע.

1. באמצעות עלי ומכתש, כתשו היטב אחת מן הקרקעות המיובשות.
 2. הניחו נייר סינון על המשפך כדי למנוע "נזילת" קרקע מן המשפך.
 3. בתוך כוס כימית, מדדו 50 מ"ל קרקע כתושה ושפכו את הקרקע למשפך, על גבי נייר הסינון. ישרו את פני השטח העליון של הקרקע והניחו את המשפך עם הקרקע על גבי משורה.
 4. בתוך כוס כימית, מדדו 50 מ"ל מים ושפכו את המים על גבי הקרקע שבמשפך. בעזרת שעון, מדדו תוך כמה זמן מצטברים בתחתית המשורה 10 מ"ל מים.
 5. המתינו כ-15 דקות, עד שכל מי הכובד יצטברו בתחתית המשורה. מדדו את נפח מי הכובד וחשבו את "קיבול השדה" על ידי החסרת מי הכובד שהצטברו במשורה מ-50 המ"ל ששפכתם על גבי הקרקע.
 6. רכזו את התוצאות של כל הקבוצות בטבלה. בטאו את קצב החלחול ביחידות של מ"ל מים (מי כובד) לשנייה, ואת קיבול השדה ביחידות של מ"ל מים (מים אצורים) למ"ל קרקע.
- ענו על השאלות האלה:
- א. מדוע חשוב היה לייבש את הקרקעות ולכתוש אותן?
 - ב. במה נבדלות הקרקעות שנבדקו מבחינת הרכבן (גודל חלקיקים וחומר אורגני)?
 - ג. מה הקשר בין גודל החלקיקים לקצב החלחול?
 - ד. מה הקשר בין גודל החלקיקים לקיבול השדה?

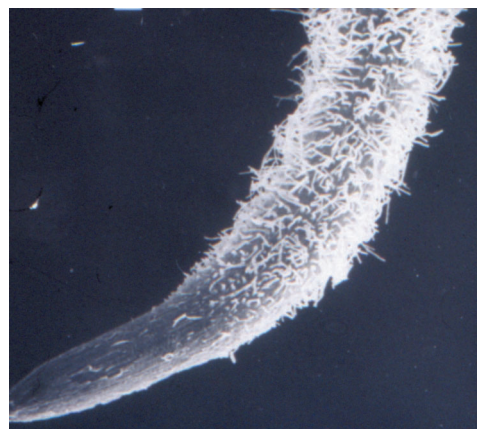
- ה. מה הקשר בין קיבול השדה לקצב החלחול?
 ו. הציעו הסבר פיסיקלי לתוצאות.
 ז. היכן נמצאים המים שלא יצאו מן המשפך? תארו בפירוט. כיצד נקראים המים האלה?
 ח. מהי חשיבותם של המים האלה לצמחים שיגדלו בקרקעות האלה?
 ט. כיצד אפשר לנצל את התוצאות שנתקבלו כדי לתכנן השקיה נכונה בקרקעות שונות?

התאמת מערכת השורשים לקליטת המים

כמות המים שהצמח יכול לקלוט מושפעת גם ממבנה מערכת השורשים: הסתעפות השורשים ומספר היונקות.

הסתעפות השורשים - ככול שהשורשים מתארכים, מתרבים ומסתעפים, כך גדל שטח הפנים שלהם, וגדל כושר הקליטה של המים מן הקרקע. שורשים מסועפים שמתפשטים לרוחב, קרוב לפני הקרקע, מאפשרים לצמח לקלוט רק את מי הגשמים מיד עם רדתם, ואילו שורשים ארוכים שחודרים לעומק יכולים לקלוט גם מים שכבר חלחלו לשכבות עמוקות של הקרקע.

מספר היונקות - עיקר הקליטה של המים והיסודות המינרליים מתבצע דרך היונקות (ראו עמ' 298). מכל שורש צומח מספר עצום של יונקות (איור ו-30), ועל ידי כך גדל שטח המגע בין השורש ובין הקרקע, ובהתאם לכך גדל גם כושר הקליטה של המים והיסודות המינרליים.



איור ו-30: יונקות בשורש של נבט עגבנייה (הגדלה $\times 50$)

אובדן המים בתהליך הדיות

כמויות המים שהצמח מאבד בתהליך הדיות הן עצומות, כפי שניתן לראות מן הממצאים של הניסוי שערך מילר (Miller) בשנת 1938, בשדה תירס בארה"ב. הממצאים של מילר מתייחסים לצמח אחד, במשך עונת גידול אחת.

טבלה ו-2: כמות המים שמאבד צמח תירס בעונת גידול אחת

המדד	כמות המים (בליטר)
כמות המים שהצמח קלט	204.2
כמות המים שהיו בצמח	1.9
כמות המים שהצמח צרך בפוטוסינתזה	0.3
כמות המים שהצמח צרך בסך הכול	2.2
כמות המים שהצמח איבד	202.0

על פי ממצאי הניסוי אפשר לראות שרק כ-1% מן המים שנקלטו על ידי הצמח נצרכו לבניין גופו, ואילו 99% עברו דרך הצמח והלכו לאיבוד. מדוע מאבדים הצמחים כמויות כה גדולות של מים בדיות?

התשובה לשאלה הזאת קשורה לתהליך הפוטוסינתזה. בתהליך הפוטוסינתזה, הצמח קולט CO_2 מן האוויר דרך הפיוניות שבעלים. כאשר הפיוניות פתוחות לקליטת CO_2 , יוצאים אדי מים דרך אותם פתחים.

מה האבולוציה לא הצליחה לעשות?

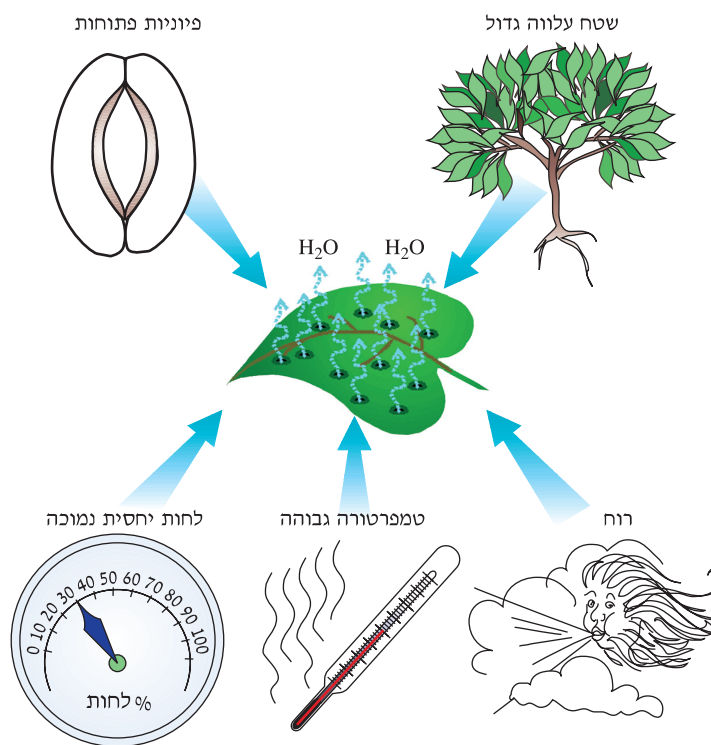
למרות האבולוציה הארוכה שעברו הצמחים, לא התפתח מנגנון לקליטת CO_2 מבלי לאבד מים רבים. בצמחי היבשה, מצטמצם איבוד המים בעת קליטת CO_2 בגלל הכיסוי בקוטיקולה, שהיא בלתי חדירה למים (וגם ל- CO_2), ובגלל הגבלת חילוף הגזים לפיוניות. אילו במהלך האבולוציה הייתה מתפתחת שכבת כיסוי חדירה ל- CO_2 ובלתי חדירה למים, היה בכך פתרון לבעיית איבוד המים מן הצמח. אבל שכבה כזאת לא התפתחה, כנראה, משום שאין מספיק הבדל בין המים וה- CO_2 כשמדובר בקצב החדירה שלהם דרך חומרים שונים.

מעניין לדעת



גורמים שמשפיעים על שיעור הדיות

יש כמה גורמים שמשפיעים על שיעור איבוד המים בתהליך הדיות; חלקם גורמים סביבתיים וחלקם קשורים בצמח עצמו (איור ו-31).



איור ו-31: גורמים שמגבירים את שיעור הדיות בצמח

הטמפרטורה - ככול שטמפרטורת הסביבה עולה, עולה שיעור הדיות. עליה של 10°C מכפילה את שיעור ההתאדות של המים.

הלחות היחסית - ככול שהלחות היחסית של האוויר החיצוני קטנה יותר, כך גוברת התאדות המים מן העלה, בהתאם למפל בריכוז אדי המים. כאשר הלחות היחסית באוויר היא 100%, שיעור הדיות נמוך מאוד עד להפסקה מוחלטת של הדיות.

הרוח - כאשר יש משב רוח, מתגבר שיעור הדיות; הרוח מפזרת את אדי המים מעל פני העלה ומאפשרת לכמות נוספת של מים להתאדות מן העלה.

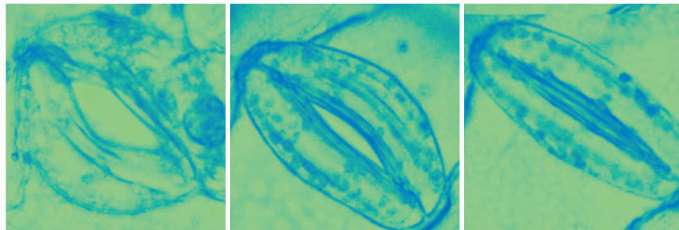
מבנה הצמח - ככול ששטח הפנים של עלי הצמח גדול יותר ביחס לנפח הצמח, כך איבוד המים מן הצמח רב יותר. גם למבנה העלה יש השפעה. צמחים שגדלים באזור יבש מתאפיינים בדרך כלל במבנים ייחודיים, כמו: קוטיקולה עבה, דופנות תאים עבים, פיוניות שקועות וכיסויי שערות. המבנים האלה מפחיתים את שיעור הדיות.

פתיחה וסגירה של הפיוניות - למנגנון הפתיחה והסגירה של הפיוניות יש השפעה מכרעת על שיעור הדיות. המנגנון הזה מושפע מגורמים רבים: אור, ריכוז CO_2 , טמפרטורה, לחות יחסית של האוויר, עקת יובש וכן מווסתני צמיחה (הורמונים). הפיוניות רגישות מאוד לאיבוד מים מן העלים וגם למחסור מים בקרקע. כאשר כמות המים בעלה יורדת מתחת לערך קריטי, יש צורך לחסוך במים, ומופעלת מערכת חירום שסוגרת את הפיוניות. לא ידוע בבירור כיצד "חש" הצמח את הירידה בכמות המים בעלה, או את המחסור במים בקרקע, אבל התברר כי החומצה האבציסית (ABA) מקשרת בין מנגנוני החישה למנגנון התגובה. הוכח כי החומצה האבציסית מיוצרת בעת עקת יובש, וגורמת לסגירת הפיוניות.

ברוב מיני הצמחים, הפיוניות נפתחות באור ונסגרות בחושך (איור ו-32), ואילו אצל צמחים שמותאמים במיוחד לתנאי יובש, למשל: צמחים ממשפחת הקטוסים והטבוריתיים, הפיוניות נפתחות בלילה ונסגרות ביום.

הפיוניות נוטות להיפתח בעת שריכוז ה- CO_2 בעלה יורד אל מתחת לסף קריטי, והן נסגרות כאשר ריכוז ה- CO_2 בעלה גבוה. בתנאים של עקת יובש, או כאשר הטמפרטורות גבוהות, גדל שיעור הנשימה בתאים, וכתוצאה מכך עולה ריכוז ה- CO_2 בחללי האוויר של העלה והפיוניות נסגרות. לתגובה הזאת יש חשיבות מיוחדת כאמצעי לשמירת מים ברקמות הצמח, בתנאים של עקת יובש וחום.

התאמתו של צמח לסביבה נתונה מותנית ביכולת הפיוניות שלו להגיב לכלל הגורמים בצורה שתבטיח שמירה על מאזן מים תקין, מבלי לפגוע בשיעור הפוטוסינתזה.



איור ו-32: פיוניות בשלבי פתיחה שונים

השפעת גורמי סביבה על הדיות



כלים וחומרים

מאוורר	5 כוסות (50-100 מ"ל)
אמבט מים (ב- 30°C)	סכין לקילוף הגבעול
אמבט מים (ב- 5°C)	סרגל מדידה
5 גבעולי סלרי	שקית ניילון
צבע מאכל אדום	גומיה
	שעון

מהלך העבודה

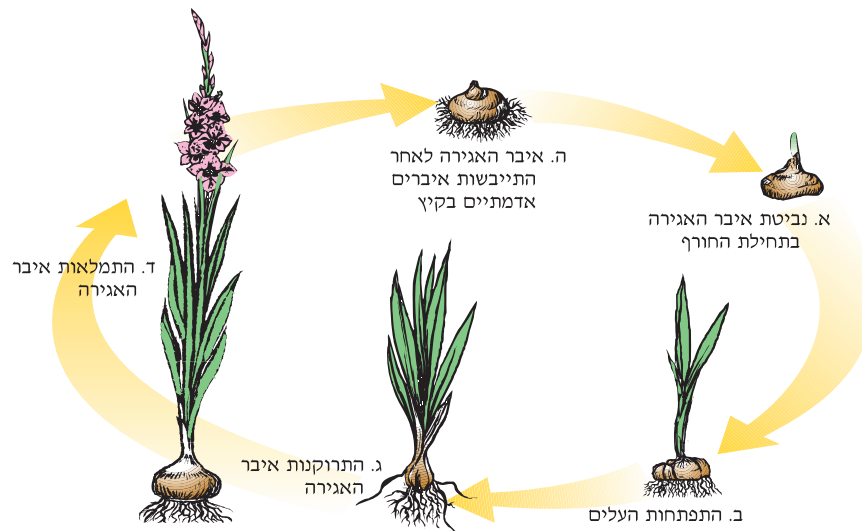
- הכינו 5 כוסות ובהן צבע מאכל אדום (10 טיפות צבע מאכל ב-50 מ"ל מים). סמנו את הכוסות במספרים 1-5.
- לכל כוס הכניסו גבעול סלרי שיש עליו כמה עלים (איור ו-20 בעמ' 320).
- את כוס 1 הציבו בתוך אמבט מים פושרים (ב- 30°C).
- את כוס 2 הציבו באמבט מים קרים (ב- 5°C).
- את הגבעול בכוס 3 עטפו בשקית ניילון וסגרו בגומיה.
- ליד כוס 4 הציבו מאוורר והפעילו אותו.
- את כוס 5 השאירו ללא כל טיפול.
- מדי 15 דקות קלפו בעזרת סכין חלק מהקליפה, בכול אחד מן הגבעולים. מדדו לאיזה גובה עלו המים בגבעול ורשמו. חזרו על המדידה, לפחות 5 פעמים. חשבו את קצב עליית המים בכול אחד מן הגבעולים.
- רשמו את התוצאות בטבלה.
- סרטטו גרף שיתאר את השפעת תנאי הסביבה (טמפרטורה, לחות, רוח) על קצב עליית המים בגבעול.
- ענו על השאלות האלה:
 - תארו והסבירו את תוצאות הניסוי.
 - מה ניתן להסיק מתוצאות הניסוי?
 - מדוע קצב עליית המים בעלה הוא מדד לתהליך הדיות?

התאמת צמחים ליובש

צמחים שגדלים במים או באזורים לחים קולטים מסביבתם את כמות המים הדרושה להם ואינם סובלים ממחסור במים. בצמחי יבשה, לעומת זאת, קליטת המים מוגבלת ואובדן המים בדיות הוא גדול מאוד. בצמחי יבשה, התפתחו מנגנונים שונים שמסייעים להם לשמור על מאזן מים תקין בגופם. כך למשל, יש מנגנונים שמסייעים לצמחים "לברוח" מן העונות היבשות. צמחים שגדלים בסביבות יבשות מאוד, כמו מדבריות, התפתחו מנגנונים שמאפשרים להם לשרוד גם בעונות היבשות.

צמחים ש"בורחים" מתנאי יובש

צמחים חד-שנתיים מסיימים את מחזור חייהם בעונת הגשמים של שנה אחת, ובתקופה היבשה נשארים רק הזרעים שלהם. הזרעים האלה נמצאים במצב של תרדמה, עד לנביטתם באחת מעונות הגשמים הבאות. בדרך הזאת מצליחים הצמחים החד-שנתיים להתקיים ולהעמיד צאצאים (זרעים) בלי להיחשף באופן ישיר לתנאי היובש. צמחים רב-שנתיים הם צמחים שמתקיימים במשך שנים אחדות, לעתים אפילו שנים רבות, ובכול שנה פורחים מחדש ומפיצים זרעים. גם בין הצמחים הרב-שנתיים יש כאלה ש"בורחים" מתנאי היובש. צמחים כאלה הם, למשל, הגיאופיטים (geo = ארץ; phyton = צמח).



איור ו-33: מחזור ההתפתחות של גיאופיט (סייפן)

הגיאופיטים הם צמחים בעלי איברים תת-אדמתיים, שבהם נאגרים מזון ומים. איברי אגירה כאלה הם: בצל (בחצב, בנרקיס ובסתוונית), פקעת (ברקפת, בסייפן ובכלנית), או שורש מעובה (בערירית). בתחילת החורף, רוב הגיאופיטים מוציאים עלים מן הניצנים שבאיבר התת-אדמתי (איור ו-33, א, ב, ג). בעונה הגשומה, מעבירים העלים לאיברי האגירה חלק מתוצרי הפוטוסינתזה שנוצרים בהם (איור ו-33, ד). עם בוא עונת היובש, נובלים כל החלקים העל-אדמתיים של הצמח, ונשארים רק האיברים התת-אדמתיים (איור ו-33, ה). האיברים האלה נמצאים בתרדמה אבל יש בהם חומרי מזון ומים אשר ישמשו את הצמח בראשית עונת הצמיחה הבאה.

צמחים המותאמים לתנאי יובש

בכול אזורי הארץ, גם במדבר, יש צמחים רבים שהסתגלו ליובש ושומרים על מאזן מים תקין בתנאים של מיעוט מים. השמירה על מאזן המים בצמחים האלה יכולה להיעשות בשתי דרכים: הקטנה של איבוד המים בדיות והגברה של קליטת המים מן הקרקע.

המנגנונים שמאפשרים הקטנה של איבוד המים

סגירת פיוניות - רוב הצמחים מווסתים את איבוד המים על ידי פתיחה וסגירה של הפיוניות בהתאם לכמות המים שעומדת לרשותם.

עלים גלדניים - יש עלים שמכוסים ברקמות קשיחות ובשעווה, ואלה מקטינים את הדיות. **עלים וגבעולים בשרניים** - יש צמחים בעלי עלים וגבעולים שאוגרים מים מעונת הגשם לעונת היובש.

צמחים רותמיים - יש צמחים בעלי גבעולים רותמיים, שהם גבעולים ירוקים חסרי עלים (כמו בצמח הרותם). מן הצמחים האלה מתרחש תהליך הדיות רק דרך הגבעולים, ולכן יש להם שטח דיות קטן יחסית.

פיוניות שקועות - יש צמחי מדבר שבהם הפיוניות שקועות בפטוטרת העלים או בגבעולים. הפיוניות השקועות אינן חשופות כלפי חוץ ולכן שיעור הדיות מהן נמוך.

מנגנונים שמאפשרים הגברה של קליטת המים

שורשים מסועפים - שורשים מסועפים שמתפשטים לרוחב, קרוב לפני הקרקע, מאפשרים לצמח לקלוט את מי הגשמים מיד עם רדתם.

שורשים מעמיקים - יש צמחים שהשורשים שלהם ארוכים ויכולים להגיע לעומק של 3 מ' (אפילו כשגובה הצמח הוא רק חצי מ'). שורשים כאלה קולטים מים משכבות עמוקות של הקרקע ומאפשרים לצמח לחיות באזורים צחיחים.

שמירת מאזן המים בצמחי חקלאות

באקלים חם ויבש, לעתים קרובות, צמחי החקלאות מאבדים בדיות יותר מים ממה שהם קולטים. במצבים כאלה נוצר גירעון מים ברקמות הצמח, והדבר משפיע בצורה שלילית על תהליך הפוטוסינתזה ועל חילוף החומרים. ניכרת הפרעה בגידול של הצמח, היבול של הצמח נפגע ובמקרים קיצוניים, הצמח עלול למות.

האמצעי העיקרי שבעזרתו שומרים החקלאים על מאזן מים תקין בצמח הוא תוספת מים בהשקיה. אמצעי נוסף לשמירת מאזן המים, הוא הקטנת הדיות. את הדיות ניתן להקטין על ידי הגדלת ריכוז ה- CO_2 באוויר. עלייה בריכוז ה- CO_2 באוויר גורמת לצמצום ניכר בפתיחת הפיוניות ולהקטנת הדיות, ובו בזמן מעלה את שיעור הפוטוסינתזה. האמצעי הזה יעיל ואפשרי רק בבתי צמיחה סגורים (לא בשדה הפתוח).

האפשרות לצמצם את הדיות מבלי לפגוע בפוטוסינתזה הובילה את החוקרים להשקיע מאמץ רב בחקר חומרים מעכבי דיות - אנטיטרנספירנטים. חומרים כאלה מרססים על העלים של גידולים חקלאיים, על מנת לצמצם את הפסדי המים בתהליך הדיות. אנטיטרנספירנטים יכולים לפעול על ידי מניעת פתיחת הפיוניות, או על ידי יצירת שכבה דקה של תחליב דונג או פלסטיק שמעכבת את פליטת אדי המים. עד כה טרם הושגו תוצאות מעשיות משימוש במעכבי דיות, ולכן מרב המאמצים מושקעים בפיתוח שיטות השקיה יעילות.

השקיה

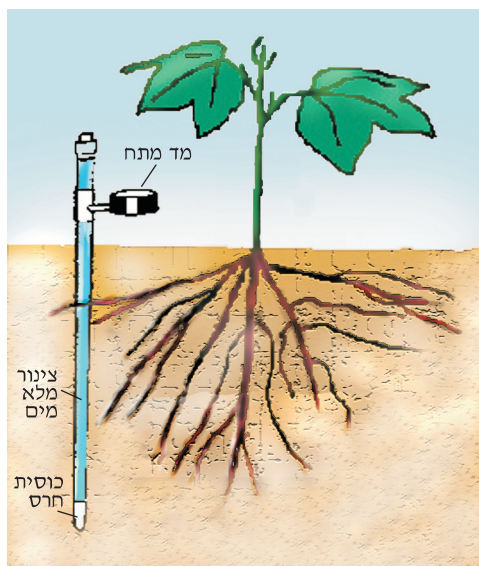
בארצות שחונות או שחונות למחצה (כמו ארצנו) כמות המשקעים הטבעיים, בעיקר הגשמים, לא מספקת את מלוא תצרוכת המים של הגידולים החקלאיים, ויש להוסיף מים בהשקיה. כיום, שני שלישים מכמות המים המתוקים בעולם מיועדת להשקיה. כמות המזון המיוצרת בשדות מושקים מגיעה, בכול רחבי העולם, ל-40% מכלל המזון המיוצר. חקלאות המבוססת על מערכות השקיה מאפשרת לגדל יותר ממחזור גידול אחד בשנה.

תכנון כמות ההשקיה

בתכנון כמות ההשקיה מתחשבים (א) בריביות הקרקע (ב) באקלים השורר באותו אזור (ג) בצרכים של הצמח.

רטיבות הקרקע - מדידת כמות המים בקרקע נעשית בעזרת מכשירים, למשל: טנסיומטר. כיום, משתמשים בעיקר במכשירים אלקטרוניים, שיש בהם רכיב אלקטרוני שמתחבר למחשב,

והוא קורא באופן רציף את כמות המים הזמינים בקרקע, בכול שעות היממה. בהתאם לכמות המים הזמינים בקרקע, יודע החקלאי לחשב את כמות המים שיש להוסיף לצמחים על מנת לקבל את היבול המרבי.



איור ו-34: טנסיומטר מודד את רטיבות הקרקע

טנסיומטר



הטנסיומטר הוא מכשיר לקביעת מתח מי הקרקע (tension=מתח), כלומר: הכוח שבו מוחזקים המים בין חלקיקי הקרקע. הטנסיומטר מודד את כוח יניקת המים של הקרקע; ככול שהקרקע יבשה יותר כך גדל כוח יניקת המים שלה, ובמילים אחרות: מתח המים שלה עולה.

הטנסיומטר מורכב מכוסית חרס נקבובית שמחוברת לצינור (איור ו-34). הכוסית והצינור מלאים במים. את הטנסיומטר מחדירים לקרקע כך שכוסית החרס תימצא באזור שבו מרובים ביותר השורשים. כשהקרקע מתייבשת, יוצאים מים, דרך נקבוביות הכוסית, מן הצינור אל הקרקע. ככול שהקרקע יבשה יותר, כך היא יונקת בעוצמה רבה יותר את המים מן המכשיר. עקב יציאת המים נוצר ריק (ואקום) במכשיר, ואת לחץ הריק אפשר לקרוא במד מתח. כאשר מכינים עקומת כיוול לטנסיומטר, מתאימים לכל מידת מתח את מידת רטיבות הקרקע המתאימה: בקרקע רוויה, חסרת כוח יניקה, נרשמים ערכים נמוכים; בקרקע יבשה נרשמים ערכים גבוהים.

מדדים אקלימיים - השדה מאבד מים לאוויר גם בהתאדות ישירה מן הקרקע וגם בדיות דרך הצמחים. כמות המים שיש להוסיף בהשקיה היא כמות המים שהולכת לאיבוד בשני התהליכים יחד. לכן, החקלאים מודדים בשדה את מידת ההתאדות היומית, באידי יסיר מן הקרקע ובדיות, וקובעים לפיה את מנת ההשקיה הדרושה. תנאי סביבה, כמו: לחות יחסית של האוויר, עננות, מהירות הרוח וטמפרטורה, משפיעים על התאדות המים מן השדה. שיטה נפוצה למדידת כמות המים היומית המתאדה מן השדה (באידי ובדיות) היא על ידי מדידת התאדות מגיגית. מדידת התאדות מים מגיגית, בכול אזור ובכול עונה, נותנת מידע לגבי צריכת המים של הצמחים, שכן תנאי הסביבה משפיעים על התאדות מים מגיגית באותו אופן שהם משפיעים על ההתאדות מן השדה. החקלאי מודד את ההתאדות מגיגית במשך יום ומחשב את מנת ההשקיה הדרושה ליום, ואת כמות המים הדרושה לעונת הגידול כולה.

צורכי הצמח - הנתונים של התאדות מגיגית אינם מתייחסים לסוג הצמח, למידת הכיסוי ולשלב הגידול. כדי לחשב את מנת ההשקיה הדרושה לצמח, יש להכפיל את ההתאדות

מגיגית במקדם שנקרא **מקדם ההשקיה** (נקרא גם: מקדם גיגית, או מקדם התאדות הגידול). מקדם ההשקיה תלוי בסוג הצמח, בגיל הצמח, בצפיפות השתילה, בשטח העלווה ובעומס היבול. מקדם ההשקיה מבוסס על ניסויים בשדה, על תצפיות ועל ניסיון שנצבר. לוח מקדמי השקיה לגידולים שונים מתפרסם מדי שנה על ידי שירות ההדרכה והמקצוע של משרד החקלאות (שה"ם) (טבלה ו-3).

טבלה ו-3: מקדמי השקיה של גידולים שונים, בשלבי גידול שונים

שלב הגידול	עגבנייה	פלפל	מלפפון	חציל
קליטה והתבססות	0.4	0.7-0.5	0.4-0.3	0.4
פריחה עד חנטה	0.6-0.5	0.8	0.7-0.5	0.7-0.5
חנטה עד מילוי פרי	0.8	0.9	0.8-0.7	0.9-0.8
מילוי פרי עד קטיפ	0.9	1.0	1.0-0.9	0.9
קטיפ	0.9	1.1	1.0	0.9

יש גם שיטה אחרת לקביעת כמות ההשקיה הדרושה לצמחים. לפי השיטה הזאת, בודקים את מאזן המים בצמח בעזרת מכשירים שמודדים מדדים פיסיולוגיים של הצמח, כמו: קוטר הגבעול (או הגזע). המדדים הפיסיולוגיים שנמדדים מגיבים לשינויים במאזן המים בצמח, והם נותנים מידע מוקדם על מצבי עקת מים, עוד לפני שסימני העקה נראים לעין. חסרונה של השיטה הזאת הוא בעובדה שברוב המקרים היא אינה ניתנת לשימוש נוח ויעיל בידו החקלאי.

השינויים היומיים בקוטר הגבעול או הגזע

השינויים היומיים בקוטר הגבעול של צמחים עשבוניים, ובקוטר הגזע של עצים, נמצאים בהתאמה לכמות המים בצמח. התכווצות הגזע במהלך היום נובעת מהתאדות, שגורמת למתיחת צינורות העצה יחד עם עמוד המים. את השינויים בקוטר מודדים בעזרת מכשיר מדידה שנקרא דנדרומטר. המדידה בעזרת דנדרומטר ידני נעשית פעמיים ביום, ואילו בעזרת דנדרומטר מכני נרשמים השינויים על נייר במשך שבוע. בעזרת דנדרומטר אלקטרוני, נרשמים הנתונים במחשב, במשך עונה שלמה. כשהגזע מתחיל להתכווץ בגלל יובש, המתקן מדווח על כך לחקלאי. החקלאי משקה עד להתרחבות הגזע למידה הרצויה.



תכנון תכיפות ההשקיה

את כמות המים העונתית החקלאי נותן בכמה השקיות. מרווח הזמן בין ההשקיות נקבע על פי יכולת ניצול המים של הצמח, והוא מותנה, בדרך כלל, בסוג הקרקע ובאופי מערכת השורשים של כל צמח. בדרך כלל, בקרקעות קלות מאוד וחוליות, יש צורך להשקות במנות קטנות ולעיתים תכופות, ואילו בקרקעות כבדות ובינוניות ניתן לרווח בין ההשקיות ולתת בכול השקיה מנות גדולות יותר של מים.

שיטות השקיה

ההשקיה המקובלת היום ברוב אזורי העולם היא **השקיה סגורה**, כלומר: המים זורמים ממקור המים אל השדה באמצעות מערכת צינורות סגורים, הודות ללחץ שמופעל על ידי משאבה. בשדה או במטע, המים זורמים ליעדם באמצעות אבזרים מיוחדים, הודות ללחץ המים שיש באותם אבזרים. אבזרים כאלה הם: מתזים, ממטרות וטפטפות.

מתז הוא אמצעי שמשמש להשקיה בהמטרה, והוא מפזר את המים על פני השטח למרחק של 3-4 מ'. המים פורצים מן המתז בלחץ דרך פייה קבועה, שאיננה מסתובבת. ההמטרה באמצעות מתז משמשת בעיקר במטעים, בפרדסים, בגידולים חסויים, בבתי צמיחה וריבוי, בגינות נוי ובהשקיה ממוכנת. ההשקיה הממוכנת נעשית במכונות מתנייעות, שמפזרות מים תוך כדי תנועה בשטח (למשל, קו-נוע) (איור ו-35).

הממטרה משמשת גם היא להשקיה בהמטרה, אלא שבניגוד למתז, המים פורצים דרך פייה מסתובבת. קוטר הפייה בממטרה קובע את כמות המים שנפלטים ביחידת זמן (ספיקה). טווח ההתזה בממטרה יכול להיות 6-80 מ'. אחת הבעיות המרכזיות בהשקיה בהמטרה היא חוסר האחידות של פיזור טיפות המים. כמות המים שמגיעה לקרקע הולכת ופוחתת ככול שגדל המרחק מן הממטרה, והדבר הזה גורם לתופעה של גליות. תופעת הגליות באה לידי ביטוי בצימוח בלתי אחיד של הגידול: הוא משגשג באזורים עתירי מים ומאחר באזורים פחותי מים. בעיה אחרת נובעת מתנאי הסביבה. כאשר נושבות רוחות חזקות, טיפות המים נסחפות אל מחוץ לשדה, וגם ההתאדות גדלה. גם החום מגביר את ההתאדות ויעילות ההשקיה קטנה. לכן, חקלאים מקפידים להשקות בהמטרה רק כאשר אין רוח ובשעות קרירות, שהן שעות הלילה או שעות הבוקר המוקדמות. כאשר ההמטרה היא בתנאים טובים, אובדן המים הוא בשיעור של 20-30% ונצילות המים היא אפוא 70-80%.

בטפטפות המים זורמים בצינורות פלסטיק שמונחים על הקרקע. לאורכם של הצינורות, במרחקים קבועים, מצויות הטפטפות. תפקידן העיקרי של הטפטפות הוא לסנן את המים ולווסת את קצב הטפטוף. יש סוגים שונים של טפטפות, אולם לכולן יש תכונה משותפת:



איור ו-35: קו-נוע משקה שדה בוטנים

בפתח היציאה לחץ המים הוא אפס, כך שהמים יוצאים מן הצינור טיפה אחר טיפה. הפחתת הלחץ נגרמת על ידי חיכוך בין המים הזורמים ובין דפנות של מבוך (או צינור לוליני דק) שמצוי בתוך הטפטפת. טיפות המים נקוות בזו אחר זו על פני הקרקע מתחת לטפטפת (איור ו-36).

המים שיוצאים מן הטפטפות חודרים לעומק הקרקע ומתפשטים לצדדים. מסביב לטפטפת נוצר שטח רטוב בצורת מעגל. עם הזמן, הולכים המעגלים שמתחת לטפטפות ומתרחבים, עד שהם יוצרים פס ארוך רטוב לאורך שני צדי הצינור. להשקיה בטפטוף יש יתרונות רבים: (א) נצילות המים בהשקיה בטפטוף היא גבוהה ומגיעה לשיעור של 95-98%; (ב) ניתן להשקות בכול שעות היום, גם כאשר מנשבות רוחות חזקות; (ג) ניתן להוסיף דשנים למי ההשקיה, הואיל ומי ההשקיה אינם ניתזים על העלים (בשונה מהמטרה), ולכן הדשנים אינם פוגעים בעלים; השקיה משולבת בדישון מאפשרת לגדל צמחים בתמיסות מזון מבוקרות, גם בקרקעות שהפוריות שלהן נמוכה; (ד) המים מתפזרים באופן אחיד לאורך השורות ולכן אספקת המים לכל הצמחים היא אחידה; (ה) ניתן להשקות במים מליחים בלי לפגוע ביבול, מאחר שבהשקיה בטפטוף המלחים אינם פוגעים בנוף הצמח; השקיה במים מליחים היא אחת הדרכים לפתרון הבעיה של מחסור במים להשקיה; (ו) ניתן להשקות גם קרקעות נתרניות (קרקעות עשירות ביסוד המינרלי נתרן); אם ממטירים קרקעות נתרניות נוצרת מעין עיסה סמיכה ובלתי חדירה לטיפות המים, בשכבה העליונה של הקרקע, ואילו בהשקיה בטפטוף לא נוצרת שכבה אטומה.

ואולם, להשקיה בטפטוף יש גם חסרונות: (א) מחיר המערכת והאחזקה גבוה, יחסית; (ב) יש צורך לסנן את המים מחלקיקים גסים כדי שלא ייסתמו מעברי המים בטפטפות, שהקוטר שלהן הוא 0.8-2 מ"מ; (ג) הטפטפות נוטות להיסתם בגלל משקעים אורגניים ואי-אורגניים; (ד) בשולי הכתמים הרטובים מצטברים מלחים, ובאזורים שאינם גשומים במידה מספקת יש לשטוף את הקרקע.



איור ו-36: השקיה בטפטוף

הטפטפת – המצאה כחול-לבן

הטפטפת הומצאה על ידי המהנדס הישראלי שמחה בלאס בשנות ה-70 של המאה ה-20. מפעל נטפים שבקיבוץ חצרים היה המפעל הראשון בעולם שייצר את הטפטפות. ההמצאה גרמה מהפכה עולמית בשיטות ההשקיה והדישון בחקלאות ובגני נוי, והפכה ללהיט היסטרי בארץ ובעולם. ביום העצמאות ה-50 למדינה הוענק לטפטפת התואר "המצאת היובל".



סיוור להכרת מערכת ההשקיה

בחרו חלקה לגידול חקלאי מסחרי, תאמו ביקור עם רכז ההשקיה וערכו סיוור. חשוב לבקר בתקופה שמשקים את החלקה. בשעת הסיוור שימו לב לנושאים האלה ואחר כך ענו על השאלות.

1. אילו גידולים גדלים בחלקה?
2. מהו מקור המים להשקיה?
3. מהי שיטת ההשקיה?
4. האם ההשקיה היא ממוחשבת? אוטומטית?
5. האם יש מערכת לבקרת ההשקיה? כיצד היא פועלת?
6. כיצד מחשב החקלאי את כמות ההשקיה?
7. כיצד קובע החקלאי את מועד ההשקיה?
8. מהי צריכת המים השנתית של הגידול בחלקה שביקרתם בה?
9. מהי איכות המים שבהם מושקה הגידול?
10. האם ננקטו אמצעי חיסכון? מהי כמות המים שנחסכה בעקבות כך?
11. האם ננקטו אמצעים למניעת זיהום הקרקע ומי התהום?
12. האם יש תכנון לשיפור וייעול מערכת ההשקיה? אם כן, מה הם השינויים המתוכננים?

סיכום

1. מאזן מים תקין חייב להישמר בגופם של הצמחים. המים דרושים להמסת חומרים ולהובלה שלהם בצמח, לקיום תגובות כימיות ולשמירה על לחץ טורגור. מחסור של מים משפיע לרעה על התפתחות הצמח ויכול להביא בסופו של דבר למותו.
2. מאזן המים בצמח תלוי ביחס שבין שיעור קליטת המים מן הקרקע לבין איבוד המים בתהליך הדיות. 99% מן המים שנקלטים בצמח הולכים לאיבוד בתהליך הדיות.
3. תהליך הדיות מושפע מגורמים סביבתיים, כמו: טמפרטורה, לחות אוויר, רוח, וגם מגורמים שקשורים בצמח, כמו: שטח פני העלים, מבנה העלים ומספר הפיוניות.
4. מאזן המים בצמח מבוקר על ידי פתיחת הפיוניות וסגירתן, תוך שמירת מצב של "פשרה" בין מקסימום פוטוסינתזה למינימום דיות.
5. רק חלק ממי הקרקע זמינים לצמח. המים הזמינים הם המים שבין "קיבול שדה" ל"נקודת הכמישה". המים הזמינים נמצאים בחללים הקטנים של הקרקע והם ספוחים לחלקיקי הקרקע.

6. כמות המים הזמינים מושפעת מסוג הקרקע (דקת גרגר או גסת גרגר), מחומר אורגני בקרקע, ממליחות הקרקע ומגורמי סביבה המשפיעים על התאדות המים מן הקרקע.
7. כמות המים שהצמח קולט תלויה בכמות המים הזמינים בקרקע, במערכת השורשים שלו, ובצריכת המים שלו.
8. יש צמחים ששומרים על מאזן מים תקין, גם בתנאי יובש, על ידי "בריחה" מעונות יבשות (בעזרת זרעים בחד-שנתיים, ובעזרת איברים תת-קרקעיים ברב-שנתיים). צמחים שגדלים באזורים יבשים מצליחים לשרוד גם בעונות יבשות. יש התאמות שמקטנות את איבוד המים (סגירת פיוניות, פיוניות שקועות, עלים גלדניים ובשרניים), ויש התאמות שמגדילות את קליטת המים (מערכת שורשים מסועפת או מעמיקה).
9. בחקלאות, שומרים על מאזן מים תקין בצמח, בעיקר, על ידי הוספת מים בהשקיה. אפשר לשמור על מאזן מים תקין גם על ידי הקטנת הדיות, אך האפשרות הזאת מוגבלת ואינה כלכלית.
10. בתכנון מנת ההשקיה מתחשבים ברטיבות הקרקע, בנתונים אקלימיים ובצרכים המשתנים של הצמח.
11. מרווח הזמן בין ההשקיות נקבע על פי יכולת ניצול המים של הצמח, ויכולת הצמח תלויה בסוג הקרקע ובאופי מערכת השורשים.
12. שיטות ההשקיה המקובלות בארץ הן המטרה וטפטוף.



1. התבוננו בעקום באיור ו-29 (בעמ' 331) וענו על השאלות האלה:
 - א. כמה אחוזים מן המים בקרקע הם זמינים לצמח בקרקעות שונות? התייחסו בתשובתכם לקרקעות המורכבות מחרסית, מסילט ומחול גס.
 - ב. כמה אחוזים מן המים בקרקע אינם זמינים לצמח, בכול אחת מן הקרקעות?
 - ג. תארו והסבירו את הקשר בין גודל החלקיקים בקרקע לבין קיבול השדה ונקודת הכמישה.
 - ד. תארו והסבירו את הקשר בין גודל החלקיקים לבין כמות המים הזמינים לצמח.
 - ה. באיזה סוגי קרקע כדאי להשקות בכמויות קטנות, אבל במרווחי זמן קטנים בין השקיה להשקיה? הסבירו.
 - ו. באיזה סוג קרקע כדאי להשקות בכמויות גדולות ובמרווחי זמן גדולים? הסבירו.
 - ז. ציינו באיזה אחוז רטיבות יכמשו הצמחים בכול אחת מן הקרקעות.

2. שתי קרקעות הושקו עד לרוויה, ולאחר ההשקיה גידלו בהן צמחי חיטה במשך 20 יום. כל תנאי הגידול האחרים היו שווים. בטבלה ו-4 מובאות כמויות המים שהיו בשתי הקרקעות, במשך תקופת הגידול.

טבלה ו-4: אחוז המים בשתי קרקעות במשך 20 יום

ימים	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
קרקע א	100	80	60	50	43	38	33	30	27	25	25
קרקע ב	100	15	8	5	5	5	5	5	5	5	5

- א. איזו משתי הקרקעות היא קרקע חרסיתית, ואיזו - חולית? הסבירו את תשובתכם.
 ב. בקרקע א יש 40% מי כובד, ובקרקע ב - 90%. מהו אחוז המים בקיבול שדה בקרקע א? מהו אחוז המים בקיבול שדה בקרקע ב?
 הסבירו את הסיבה להבדל בין שתי הקרקעות, באחוז המים במצב של קיבול שדה.
 ג. מהו אחוז המים בנקודת הכמישה בקרקע א?
 מהו אחוז המים בנקודת הכמישה בקרקע ב?
 הסבירו מה הן הסיבות להבדל בין שתי הקרקעות, באחוז המים שבנקודת הכמישה.
 3. לפניכם רשימה של תופעות ותהליכים:
 (א) טמפרטורה גבוהה; (ב) קוטיקולה דקה; (ג) עלים שעירים; (ד) גבעולים ועלים בשרניים;
 (ה) חיוגור; (ו) פיוניות שקועות; (ז) שלכת בקיץ; (ח) תמיסת מלחים מרוכזת בקרקע;
 (ט) הגברת הפוטוסינתזה; (י) הגברת הנשימה; (יא) לחות גבוהה באוויר; (יב) רוח.
 איזה מבין התופעות והתהליכים הללו -
 א. גורם להגברת עליית המים בצמח? הסבירו מדוע.
 ב. גורם להפחתת עליית המים בצמח? הסבירו מדוע.
 ג. אין לו השפעה ישירה על קצב עליית המים?
 4. מהו מקום גידולם של צמחים חסרי פיוניות? הסבירו.
 5. לפי רשקה (1976, Raschke), תפקיד הפיוניות בצמח הוא "לשבור את הרעב מבלי לגרום לצמא". הסבירו.

6. בטבלה ו-5 מופיעים נתונים על מספר הפיוניות בסמ"ר של עלה, בשני צדדיו, בסוגי צמחים שונים.

טבלה ו-5: מספר הפיוניות באפידרמיס עליון ובאפידרמיס תחתון, בעלים של צמחים שונים

הצמח	אפידרמיס עליון	אפידרמיס תחתון
אספסת	16,900	13,800
שעועית	4,000	28,100
תפוח	0	29,400
תירס	5,200	6,800
שיבולת שועל	2,500	2,300
עגבנייה	1,200	13,000

- א. איזה יתרון יש לצמח בעל פיוניות רבות בצדו התחתון, בהשוואה למספרן בצדו העליון של העלה? הסבירו.
- ב. חשבו את היחס בין מספר הפיוניות באפידרמיס התחתון לבין מספר הפיוניות באפידרמיס העליון ודרגו את הצמחים לפי היחס הזה.
- ג. מי מהצמחים מותאם לגדול בתנאי חום ויובש? הסבירו.
- ד. כאשר חם, עלי הדגניים (למשל, שיבולת שועל) מתקפלים ויוצרים מעין צינור, כשהחלק הפנימי של הצינור הוא החלק העליון של העלה. הסבירו מדוע.
7. היעזרו בטבלה ו-3 (בעמ' 342) וענו על השאלות הבאות:
 - א. איזה צמח צורך את כמות המים הגדולה ביותר? מה יכולות להיות הסיבות לכך?
 - ב. באיזה שלב הצמחים צורכים את כמות המים הקטנה ביותר? הסבירו מדוע.
 - ג. באילו שלבים הצמחים צורכים את כמות המים הגדולה ביותר? הסבירו מדוע.
8. סרטטו טבלה ובה 4 עמודות וסכמו בה את שיטות ההשקיה המקובלות בארץ. רשמו בעמודות: (א) שיטת ההשקיה; (ב) תיאור שיטת ההשקיה; (ג) היתרונות; (ד) החסרונות.



1. היישום **ויסות הדיות על ידי הצמח** נמצא באתר

http://agribio.snunit.k12.il/main/upload/.ab/id_diut.html

ביישום נעשה שימוש בגיליון אלקטרוני לעיבוד וניתוח תוצאות של ניסוי, שבו נבדק ויסות הדיות בצמח בתנאי סביבה שונים.

2. היישום **גינה חסכונית** נמצא באתר

http://agribio.snunit.k12.il/main/upload/.ab/id_gina.html

היישום עוסק ב"מקדם הגיגית" כשיטה למדידת כמות המים היומית שמתאדה משדה. ביישום נעשה שימוש בגיליון אלקטרוני לעיבוד נתונים, והתלמיד צריך להסיק מסקנות לגבי שיעור ההתאדות היומי באזורים שונים בארץ.

מאזן המים בישראל

מקורות המים בישראל

בישראל, מקורות המים העיקריים שזמינים לחקלאות, לתצרוכת ביתית ולתעשייה הם **מקורות מים טבעיים** שניזונים ממי הגשמים. על פני שטחה של ישראל יורדים בכול שנה כ-10 מיליארד מטרים מעוקבים (מ"ק) של מים. מרבית המשקעים שיורדים באזור שלנו מתאדים וחוזרים לאטמוספירה. לפיכך, התרומה הממוצעת של הגשמים למקורות המים היא כ-1.8 מיליארד מ"ק לשנה. מכיוון שמקורות המים הטבעיים אינם יכולים לספק את כל כמות המים הנצרכת בישראל, משתמשים גם **במקורות מים חלופיים**.

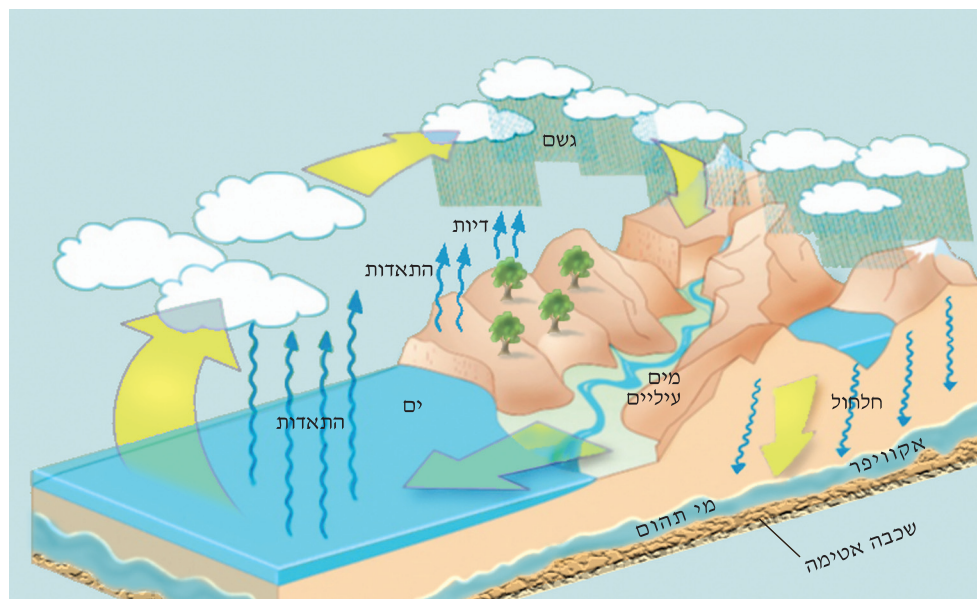
מקורות המים הטבעיים

למים הטבעיים יש שני מקורות (איור ו-37):
מי תהום - מי גשמים ומי נחלים שמחלחלים אל תוך הקרקע, חודרים דרך שכבות סלע חדירות, עד שהם נתקלים בשכבה אטומה ונקווים מעליה. מי התהום יכולים להיות קרובים לפני הקרקע או בעומק של מאות מטרים. שכבת הסלעים שנושאת בתוכה את מי התהום נקראת **אקוויפר** (aquifer). שני האקוויפרים החשובים בישראל הם אקוויפר ההר (מן המורדות הדרומיים של הכרמל ועד לבקעת באר שבע) ואקוויפר החוף (מחולות קיסריה ועד לרצועת עזה). מי התהום מספקים יותר ממחצית כמות המים הנצרכת בישראל.
מים עיליים - מי שיטפונות שזורמים על פני הקרקע ונקווים במאגרים מלאכותיים ובכינרת, או זורמים אל הים התיכון ואל ים המלח. מעט ממי השיטפונות מתנקזים גם לכיוון מפרץ אילת.

מקורות המים החלופיים

למים החלופיים יש שני מקורות:
מי קולחים - מי שפכים (ביוב) מטוהרים. על ידי שימוש באמצעים טכנולוגיים אפשר לסלק חלק גדול מן החומרים המזהמים שנמצאים במי השפכים, וכך לטהר את המים. את המים המטוהרים אפשר לנצל שוב לשימושים שונים, בהתאם לרמת הטיהור שהם עברו (ראו עמ' 356).

מים מותפלים - מי ים או מים מליחים שהרחיקו מהם את המלחים (ראו עמ' 358).



איור ו-37: מקורות המים הטבעיים

משבר המים

מדינת ישראל נמצאת על גבול המדבר, ונתוני האקלים מגבילים את כמות המים הזמינים שעומדים לרשות תושביה. שינויי אקלים שחלים בעולם, וכמה שנות בצורת עלולים להחמיר יותר את המצב. נושא המים הוא אחד האתגרים המורכבים ביותר שעומדים כיום בפני מדינת ישראל, ויש לו השלכה ישירה על חוסנה של המדינה, עתידה הכלכלי, בריאות תושביה ובריאות הדורות הבאים.

בסוף 1990 ותחילת 1991 הגיע מצב המים בישראל עד משבר. שנות בצורת רצופות הורידו את מפלס המים במי התהום ובכינרת לרמה נמוכה מאוד. היה חשש שעקב ירידת המפלסים יומלחו מי התהום (ראו עמ' 352), וחלק גדול מאוד של מקורות המים ייפגע ללא תקנה. היה חשש ממשי שלא יהיה אפשר לספק מים לערים הראשיות. כמות המים לחקלאות הוקטנה בכ-25%, והציבור הרחב נקרא לחסוך במים ולהימנע מבזבז מים בשימוש הביתי. במסע הסברה נרחב נקרא הציבור לצמצם את השקיית המדשאות וצמחי הנוי. ואכן, נחסכו 20%

מכמות המים הרגילה. למרבה המזל, התאדות המים בקיץ של שנת 1991 הייתה נמוכה באופן מיוחד, והחורף בשנת 1991-1992 היה מן הגשומים ביותר. מפלס המים באקוויפרים עלה בבת אחת. אלא שמאז, המפלס הולך ויורד משנה לשנה בקצב שלא היה בעבר. ירידת מפלס המים במי התהום נובעת גם מן העובדה שבמשך השנים עלתה צריכת המים בכול המגזרים. שאיבת המים עלתה על קצב מילוי מקורות המים בשיעור של כ-300 מיליון מ"ק לשנה (יותר מ-15% מכל כמות המים שעומדת לרשותנו). אם שאיבת המים תמשיך בקצב הנוכחי עד שנת 2010, תגיע שאיבת היתר ליותר מ-50% מכמות המים. המחסור במים מהווה סכנה גדולה ביותר לחקלאות. אם מקורות המים ימשיכו להצטמצם, יצטרכו להקטין משמעותית את החקלאות המושקית. הצורך להעביר כמות מים גדולה יותר לשימוש עירוני יגרום בהכרח לייבוש גידולים חקלאיים שצורכים מים רבים.

הפגיעה באיכות המים

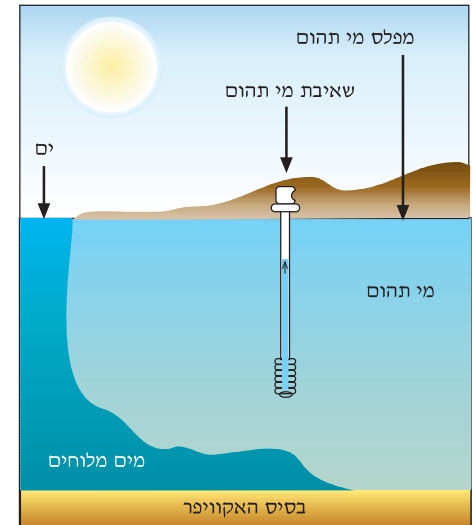
בעיית המים בארץ אינה נובעת רק מפגיעה בכמות המים, אלא גם מפגיעה באיכותם. פגיעה באיכות המים יכולה להיות תוצאה של המלחת מי התהום או תוצאה של זיהום מי התהום.

המלחת מי התהום

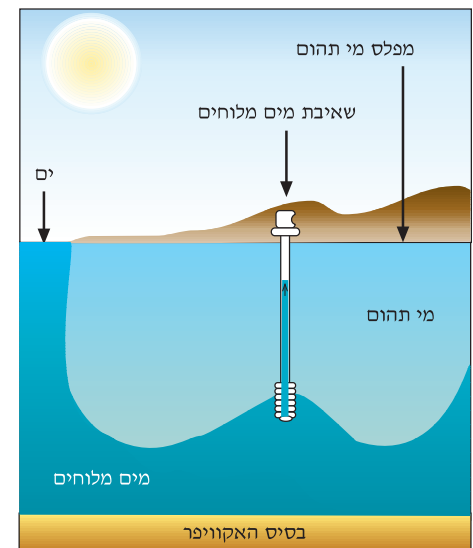
המלחת מי התהום מושפעת מכמה גורמים.

שאיבת יתר - מאגרי מי התהום מתמלאים במים שמקורם במי הגשמים. מים שחודרים דרך הסלע ממסיסים מלחים שנמצאים בסלע, והמלחים מגיעים לתחתית שכבת האקוויפר. מי התהום קלים יותר והם צפים מעל המים המלוחים. שאיבת מים מן הבארות בקצב שעולה על קצב המילוי במי גשמים, גורמת להקטנת שכבת מי התהום (ירידה במפלס מי התהום). במצב הזה, המים המלוחים מתחתית שכבת האקוויפר עולים וגורמים להמלחתן של הבארות.

קרבה אל הים - באקוויפר החוף, מי התהום באים במגע עם מי הים המלוחים. המליחות של מי התהום נמוכה יותר ממליחות מי הים, ולכן מי התהום קלים יותר והם צפים על מי הים (איור ו-38, א). כאשר שואבים שאיבת יתר, כמות מי התהום פוחתת, ומים מלוחים מן הים זורמים מתחת לשכבת מי התהום לכיוון היבשה. המים המלוחים חודרים לבארות שניזונים ממי התהום (איור ו-32, ב) ולא ניתן לנצל את הבארות האלה.



א. שאיבת מי תהום



ב. שאיבת מי תהום שהומלחו

איור ו-38: המלחת מי תהום כתוצאה משאיבת יתר בקרבה אל הים

בנייה צפופה - הבנייה הצפופה מקטינה את שטח פני הקרקע שסופג גשמים. באזור בנוי, המים זורמים ברחובות על בטון ואספלט ונשטפים אל הים, דרך מערכת הביוב. מאגרי מי התהום אינם מתחדשים בקצב הדרוש ורמת המליחות שלהם עולה.

השקיה במי קולחים - במי השפכים המטוהרים, שמשמשים להשקיה, יש כמות גדולה יותר של מלחים, בהשוואה למי גשם. השקיית שדות במי קולחים גורמת לחדירה של מלחים אל מי התהום.

זיהום מי התהום

זיהום חקלאי

הזיהום שנגרם בגלל פעילות חקלאית הוא תוצאה של השימוש בחומרים שבעזרתם רוצים החקלאים להגדיל את היבול. חומרים כאלה הם חומרי הדישון וחומרי ההדברה. גם השקיה בקולחים והפרשות בעלי חיים שנמצאים במשקים החקלאיים גורמים זיהום של מי התהום.

חומרי דישון שמעשירים את הקרקע ביסודות מינרליים, משמשים כדי להגדיל את היבול החקלאי. חומרי דישון שלא נקלטים על ידי הצמחים (בעיקר חנקות) נשטפים בגשם, מחלחלים למי תהום או זורמים במי הנגר העילי אל הנחלים, ומוזהמים את מקורות המים.

חומרי הדברה, שמכילים רעלים שונים, משמשים כדי להילחם במזיקים ובמחלות שפוגעים בגידולים החקלאיים. חומרי הדברה שלא מתפרקים מחלחלים עם מי ההשקיה ומי הגשמים ומגיעים אל מי התהום ואל מאגרי המים העיליים.

הפרשות בעלי חיים במשקים חקלאיים מכילות ריכוז גבוה של חנקות. החנקות נשטפות בגשם ומגיעות למי התהום באזור הרפתות, הדירים והלולים (איור ו-39).

מי קולחים משמשים לעתים להשקיית השדות. ואולם, תהליכי טיהור המים אינם מסלקים ממי הקולחים את המלחים שהצטברו בהם, ולכן הם מלוחים יותר ממי גשם. המלחים שנשארים בקרקע נשטפים בגשם וחודרים למי התהום.

זיהום ביתי (עירוני)

הגורמים העיקריים לזיהום עירוני הם: שפכים ביתיים ואתרי פסולת לסילוק אשפה.

שפכים ביתיים מנוקזים על ידי מערכות הביוב שמעבירות אותם למתקני טיהור. במתקני הטיהור מטפלים בשפכים רק באופן חלקי, ולאחר מכן מוזרמים השפכים אל הים (איור ו-40) או אל הנחלים בקרבת מקום. השפכים האלה, גם לאחר הטיהור הראשוני, אינם נקיים ממלחים ובשעה שהם מחלחלים בקרקע המלחים חודרים למי התהום.



איור ו-39: מים מזוהמים זורמים מרפת



איור ו-40: שפכים זורמים לים

אתרי פסולת לסילוק אשפה גורמים גם הם זיהום של מי התהום. תוצרי הפירוק של חומרי הפסולת נשטפים במי הגשמים, ובשעה שהם מחלחלים בקרקע חודרים התוצרים האלה למי התהום ומזהמים אותם.

זיהום תעשייתי

השפכים התעשייתיים הם הגורמים העיקריים לזיהום תעשייתי. השפכים התעשייתיים מכילים, לעתים, חומרים רעילים. מתקני הטיהור של הביוב הביתי אינם יכולים לפרק את השפכים התעשייתיים, שמכילים חומצות, מתכות כבדות ורעלים. הטיפול הראשוני של מחזור ועיבוד הפסולת חייב להתבצע על ידי המפעלים עצמם. אולם מפעלים רבים אינם עושים זאת, והשפכים שמוזרמים מן המפעלים, מגיעים לנחלים ומחלחלים למי התהום.

שיפור איכות המים

הפגיעה באיכות המים מקטינה את כמות המים השפירים ומגבילה את השימוש בהם. השמירה על מקורות מים באיכות ראויה, חיונית לשמירה על בריאות הציבור. ניהול מקורות מים ושימור איכותם, חיוניים **לפיתוח בר-קיימא**, פיתוח שלא יפגע באיכות הסביבה ובאיכות חייהם של הדורות הבאים. את איכות המים ניתן לשפר על ידי צמצום ההמלחה ועל ידי צמצום הזיהום.

מים שפירים - מים הראויים לשימוש לכל מטרה, לשתייה, לרחצה ולבישול.

צמצום ההמלחה

עם המלחת מי הבארות ניתן להתמודד על ידי צמצום השאיבה במקומות המועדים להמלחה (איור ו-38). דרך אחרת לצמצם את המליחות היא להחדיר מים אל האקוויפר. באופן כזה עולה מפלס מי התהום, ומליחות המים יורדת. את ההמלחה שנגרמת מקולחים אפשר להקטין על ידי התפלת הקולחים לפני ההשקיה.

צמצום הזיהום החקלאי

כדי להקטין את סכנת הזיהום החקלאי נחקקו חוקים שמחייבים לצמצם את השימוש בחומרי הדברה רעילים, ומחייבים להשתמש בחומרי הדברה שמתפרקים לחומרים שאינם מסוכנים. כמו כן יש לצמצם, ככול האפשר, פיזור של דשנים. התקנות גם מחייבות להרחיק רפתות, דירים ולולים ממקורות מים וממתקנים לאספקת מים.

כדי לצמצם את הזיהום החקלאי, משתמשים בשיטות של "חקלאות אורגנית" – חקלאות ללא דשנים וללא חומרי הדברה כימיים. התחליפים לחומרי הדישון וההדברה הכימיים הם (א) זיבול בזבל אורגני; (ב) הדברה ביולוגית – הדברה בעזרת האויבים הטבעיים של המזיקים; (ג) פגיעה ברבייה של המזיקים – פיזור חומרי ריח שמושכים את הזכרים של החרקים ומרחיקים אותם מן השדה. החרקת הזכרים מונעת את הרבייה של המזיק.

צמצום הזיהום הביתי והתעשייתי

ברוב היישובים הוקמו מתקנים לטיפול ראשוני במי השפכים. נוסף לכך, מוקמים מתקני טיהור אזוריים לטיהור מי השפכים עד לאיכות שמאפשרת שימוש להשקיה. את הפסולת המוצקה אוספים באתרים מיוחדים, ושם עוברת הפסולת מיון: חלק מן הפסולת עובר מחזור, חלק אחר (למשל, סוללות) עובר פירוק מבוקר, והיתר נשרף בשרפה מבוקרת או נקבר במכלים אטומים. הקרקעית של אתרים כאלה אטומה ואינה מאפשרת חלחול של חומרים למי תהום.

הפסולת התעשייתית מטופלת בשלב ראשון במפעל עצמו, ולאחר מכן היא מועברת להמשך טיפול במתקנים אזוריים. חומרי פסולת מסוכנים מובלים בצורה מבוקרת לאתרים מיוחדים לטיפול בפסולת רעילה. אתרים כאלה נמצאים באזורים שמאוכלסים בדלילות, ואין בהם סכנה של חלחול אל מי תהום. באתרים האלה החומרים נטמנים במכלים אטומים או נשרפים בתהליך מבוקר.

מדיניות ניהול ושימור המים

עלייה בגידול האוכלוסיה, עלייה ברמת החיים ושנות בצורת קשות שפוקדות את האזור מפעם לפעם, גורמים מחסור במים בישראל. האפשרויות העיקריות לטיפול בבעיית המים של ישראל הן חיסכון במים ופיתוח מקורות מים חלופיים.

חיסכון במים

חיסכון ביתי – הבסיס לכל פעולה של חיסכון הוא חינוך והסברה מקיפה. עם זאת, דרושים גם אמצעים טכנולוגיים, שיאפשרו צמצום בצריכת המים בבית, כמו: מכלי הדחה דו-כמותיים. **חיסכון בחקלאות** – החקלאות צורכת בין 60% ל-70% מן המים הנצרכים במדינה. לגידול

פרי אחד של אבוקדו, לדוגמה, דרושים 180 ליטרים של מים!!! את כמות המים ש"זוללים" גידולים שונים ניתן לראות בטבלה ו-6.

טבלה ו-6: כמות המים (בליטרים) הדרושה לגידול פריט אחד (ירק או פרי)

הפריט	כמות המים הדרושה (בליטרים)
אבוקדו	180
עגבנייה	30
פרי הדר	65
בננה	85
מלפפון	20
תפוח אדמה	40

דרך אחת לחסוך מים בחקלאות היא להשקות בלילה ולהשתמש באבזרים חוסכי מים, כמו: מתקני בקרה (השקיה ממוחשבת), קוצבי מים, טפטפות ומתזים. גם השימוש בקולחים, במקום במים שפירים, הוא אמצעי חיסכון בעל ערך רב ביותר. בגינות הנוי ניתן לחסוך מים על ידי שתילת צמחים שצורכים מעט מים. קיימים מינים רבים של צמחי נוי שגדלים יפה ללא תוספת מי השקיה, אפילו בשנות בצורת. כאלה הם, למשל, הרדוף הנחלים, אלה אטלנטית, שיזף מצוי ואשל.

חיסכון בתעשייה - כמות גדולה מאוד של מים אפשר לחסוך בתעשייה על ידי מחזור מים, למשל: על ידי שימוש חוזר במים למטרות קירור. חשיבות רבה יש לאיתור דליפות של מים במתקנים תעשייתיים ולשימוש באבזרים חוסכי מים.

פיתוח מקורות מים חלופיים

מחזור של שפכים (השבת קולחים)

בשל המחסור במים, מנצלים כיום מי שפכים מטהרים (איור ו-41) כמקור מים חלופי (בעיקר לחקלאות). תהליך הפיכת מי שפכים למים מטהרים נקרא **השבת קולחים** והמים המטהרים נקראים **קולחים**. כבר היום (2005), כ-70% מן המים לחקלאות הם קולחים.



איור ו-41: מתקן לטיהור שפכים

לפי תקנים של משרד החקלאות אפשר להשקות גידולים תעשייתיים, כמו כותנה, במים מטוהרים באיכות ירודה; גידולי מרעה ומספוא או פרחים, אפשר להשקות במים מאיכות בינונית; גידולי עצים שפירותיהם נאכלים בלי הקליפה, כמו פרי הדר, אפשר להשקות במים מטוהרים מאיכות טובה. לעומת זאת, ירקות שגדלים בשיחים סמוך לקרקע, כמו: עגבניות, מלפפונים ופלפל, יש להשקות במים מטוהרים משובחים. המים המוזרמים לחקלאות עוברים טיהור ובדיקות חוזרות ונשנות, כדי לוודא שלא נמצאים בהם מחוללי מחלות או מינרלים רעילים, שעלולים להזיק לבריאות האדם.

ניצול הקולחים לשימוש חקלאי הוא פתרון רווחי ונאות לבעיות תברואתיות וסביבתיות הקשורות בסילוק השפכים. במקומות מסוימים, המים המטוהרים מוזרמים לערוצי הנחלים כדי לקיים בהם צומח וחי, או כדי למהול את השפכים שזורמים באותם ערוצים ממקורות אחרים, ולהקטין את זיהום הסביבה. מהילת השפכים מקטינה גם את סכנת הזיהום של מי התהום, משום שבשפכים האלה המחלחלים לאקוויפר יש ריכוז קטן, יחסית, של מזהמים.

תהליך הטיהור במפעל השפד"ן



העמקה

גולת הכותרת של המאמץ הלאומי לטיפול בקולחים ובהשבתם היא הקמת מפעל השפד"ן (שפכי גוש דן) ותשלובת קישון. תהליך הטיפול בשפכים בשפד"ן כולל ארבעה שלבים:

- שלב 1: מסננים את מי השפכים ומרחיקים מתוכם גופים צפים. מרחיקים גם אבנים וחול ששוקעים לקרקעית.
- שלב 2: מחדירים חמצן לשפכים, בעזרת מכלים המצוידים במאווררים גדולים; החדרת החמצן מאפשרת לחיידקים לפרק את החומרים המזהמים. כעבור 12 שעות הנוזל העשיר בחיידקים מועבר למכלי הצללה.
- שלב 3: מפרידים את החיידקים (בוצה) מן המים על ידי השקעת החיידקים בקרקעית המכלים; מגרפות שניות על רצפת המכלים אוספות את הבוצה. חלק מן הבוצה חוזר לתהליך פירוק החומרים המזהמים (שלב 2).
- שלב 4: המים המטוהרים מוחדרים לקרקע חולית ועוברים סינון וחיטוי בחול. השהייה בחול מפחיתה את כמות החיידקים הפתוגנים עד לסף שמתאים למטרות השקיה. לאחר כ-400 יום נשאבים המים המטוהרים ומועברים לשימוש בחקלאות ובתעשייה.

התפלת מים

המים השפירים מהווים פחות מ-1% מכלל המים שבעולם. לעומת זאת, מי הים שמצויים בכמויות רבות אינם מתאימים לשתייה, להשקיה ולרוב השימושים האחרים, בגלל תכולת המלחים הגבוהה שבהם. כדי להכשיר את מי הים לשימוש, צריך להרחיק מהם את המלחים כלומר, להתפיל אותם. המים המותפלים הם נקיים ואינם זקוקים לטיפול נוספים, כגון: סינון וחיטוי. התפלת מים משמשת כבר עשרות שנים דרך לפתרון בעיית המים באזורים שונים בעולם (איור ו-42). בערבה, כל מי השתייה הם מים שהותפלו. באשקלון נפתח (בשנת 2005) מתקן חדש להתפלת מי ים שנחשב לגדול מסוגו בעולם. המתקן הזה אמור לספק 100 מיליון מ"ק מים בשנה (כמות מים ששווה בערך לרבע מהכמות שנשאבת מהכינרת). עד סוף שנת 2008 יוקמו בישראל עוד 4 מפעלי התפלה (בפלמחים, בגליל המערבי, באשדוד ובחדרה), וביחד הם יספקו יותר מ-300 מיליון מ"ק בשנה.



איור ו-42: מתקן להתפלת מים

שיטות להתפלת מים



יש כמה שיטות טכנולוגיות להתפלת מים, ביניהן: זיקוק תרמי ואוסמוזה הפוכה.

זיקוק תרמי הוא תהליך שבו מרתיחים מי ים או מליחים בתוך מכלים ומאדים אותם. האדים שמתקבלים הם נטולי מלחים. את האדים מעבים באמצעות מערכת קירור ואוספים את המים שמתקבלים לתוך מכלים נפרדים. חימום המים צורך השקעה רבה של אנרגיה ולכן, התפלת המים בשיטה הזאת היא תהליך יקר, ומחיר המים שמקבלים גבוה בהרבה ממחיר של מים ממקורות טבעיים.

אוסמוזה הפוכה היא תהליך של סינון בעזרת קרום בררני; כאשר מפעילים לחץ על מים מלוחים שנמצאים בצד אחד של קרום בררני, המים מסתננים דרך הקרום, והמלחים נשארים בצד האחר. את המלחים האלה אפשר להעמיס על אוניות ולהשליך בחזרה לים.

מים מליחים - מים שיש בהם אחוז מלחים קטן יותר מאשר במי ים, אבל גדול יותר מאשר במים שפירים.

שיטות התפלת המים צורכות אנרגיה רבה והן יקרות להפעלה. פתרון ההתפלה מציב גם כמה שאלות הנוגעות לאיכות הסביבה, למשל: עד כמה יגדל זיהום האוויר כאשר נשרוף דלק לצורך תהליכי הטיהור וכיצד תושפע סביבת החוף מהקמת מתקני התפלה גדולים כאלה?

הגברת משקעים

אפשר להגביר את כמות המשקעים באמצעות התערבות בתהליכים שמחוללים את הגשם בעננים. הדבר נעשה על ידי פיזור חלקיקי יודיד הכסף בעננים, ממטוסים או מתנורי קרקע. לתהליך הזה קוראים **זריעת עננים**. בישראל זורעים עננים בהיקף רחב, מעל צפון הארץ ומרכזה, כבר יותר מ-30 שנה.

זריעת עננים



יש עננים שאינם מורידים משקעים, אבל מכילים כמות גדולה מאוד של טיפות מים זעירות במצב צבירה נוזל, גם כשהטמפרטורה בענן היא מתחת לאפס. אפשר להוריד משקעים מעננים כאלה על ידי הוספה של יודיד הכסף לענן באמצעות מטוס. "זריעת" יודיד הכסף גורמת להתלכדות של טיפות המים הזעירות לטיפות גדולות וכבדות, ואלה יכולות לרדת כגשם.

תפיסת מי נגר

מי הגשמים זורמים על פני השטח אל אפיקים, ערוצים ונחלים בדרכם אל הים. למים הזורמים האלה קוראים **נגר עילי** או **מי נגר**. חלק ממי הנגר העילי מחלחלים לתוך הקרקע או מתאדים. את מי השיטפונות "תופסים" בעזרת סכרים. הסכרים עוצרים את זרימת המים, ובמקום מתהווה מאגר מים (איור ו-43). את המים במאגר אפשר להעמיד לרשות הצרכנים או שהם מחלחלים לקרקע ומעשירים את מי התהום.

סיכום

1. מקורות המים בישראל הם: (א) מקורות טבעיים שמקורם בגשם (מי תהום ומים עיליים); (ב) מקורות חלופיים (מי קולחים ומים מותפלים).
2. מחסור המים בישראל הוא תוצאה של נתונים אקלימיים, שמגבילים את כמות מי הגשמים, ושאיבת יתר של מי תהום עקב העלייה בצריכת המים לחקלאות, לתעשייה ולצריכה ביתית.
3. הפגיעה באיכות המים בישראל נובעת בעיקר מחלחול מי שפכים (עירוניים ותעשייתיים) למקורות המים, ומשאיבת יתר שגורמת להמלחת מי התהום. חומרי דשן וחומרי הדברה, וכן הפרשות בעלי חיים במשק החקלאי גורמים גם כן לזיהום מי תהום.



איור ו-43: מאגר מים מלאכותי

4. את איכות המים ניתן לשפר על ידי צמצום המלחת המים ועל ידי צמצום הזיהום בכול המגזרים: החקלאי, העירוני והתעשייתי.
5. את בעיית המחסור במים ניתן לפתור בישראל (א) על ידי חיסכון במים בכול המגזרים: בחקלאות, בצריכה הביתית ובתעשייה; (ב) על ידי פיתוח מקורות מים חלופיים, כמו: השבת קולחים, התפלת מים, זריעת עננים ותפיסת מי נגר.



1. היעזרו באתרים שונים ברשת האינטרנט ובמקורות מידע אחרים וענו על השאלות האלה:
- כמה מים (במ"ק) צורך אזרח ישראלי בממוצע בשנה? השוו לנתונים מארצות אחרות.
 - מהי הצריכה השנתית הממוצעת? (באחוזים, מכלל הצריכה בישראל) של החקלאות? של התעשייה? של הצריכה הביתית?
 - רשמו את אחוזי צריכת המים בשימושים השונים בבית.
 - רשמו את כמות המים שהייתה זמינה לתצרוכות השונות בארץ (במ"ק) בשנה האחרונה. רשמו את הכמות ממקורות טבעיים ואת הכמות ממקורות חלופיים.
 - רשמו את הצריכה השנתית (במ"ק) בשנה האחרונה בחקלאות, בתעשייה ובצריכה ביתית, וחשבו את הצריכה השנתית הכוללת בישראל.
 - אם מאזן המים הוא שלילי, רשמו את כמות המים שחסרה.
2. מה הם היתרונות ומה הם החסרונות של שימוש במי קולחים להשקיה?
3. הכינו מפת מושגים שתכלול לפחות 15 מושגים, ותסכם את הגורמים לפגיעה באיכות המים בישראל.
4. הכינו מפת מושגים שתכלול לפחות 15 מושגים, ותסכם את הדרכים לטיפול בבעיית המים של ישראל.

פרק ז

הגנה בצמח

מנגנוני הגנה בצמח

לצמחים אין כושר תנועה, הם אינם יכולים לקום ולברוח כאשר הם מותקפים. בסביבתם הטבעית, מוקפים הצמחים על ידי מספר עצום של אורגניזמים, כמו: חיידקים, נגיפים, פטריות, נמטודות, צמחים טפילים, חרקים, יונקים ואוכלי צמחים אחרים, וכל האורגניזמים האלה יכולים להזיק לצמחים. אילו הצמחים היו חסרי אונים בפני כל מתקיפיהם, מרבית הצמחים היו נעלמים מן העולם.

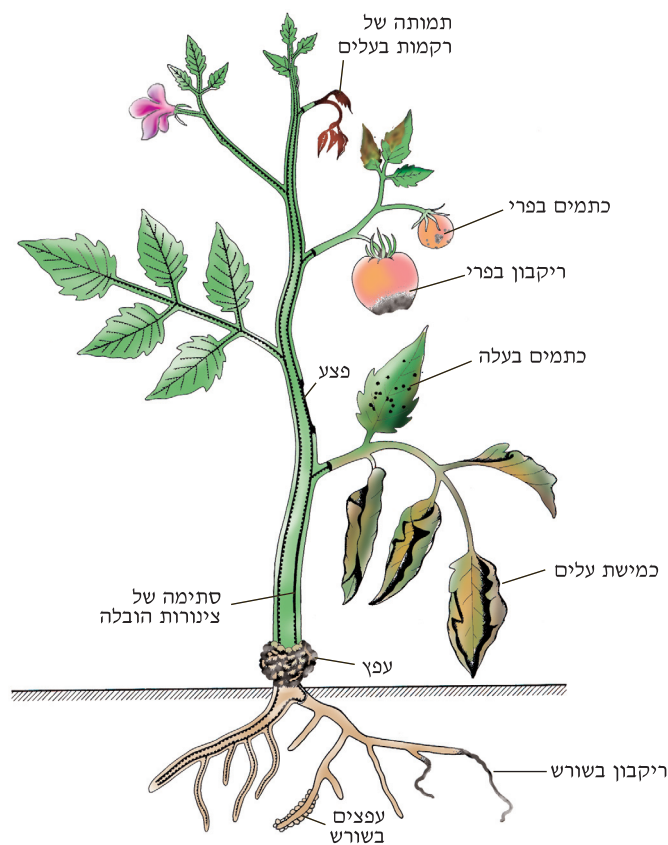
המאובן החי

הצמח גינקו בילובה (Ginkgo Biloba) הוא העץ העתיק ביותר בעולם. מוצאו במרכז סין, וכיום הוא גדל בעיקר במזרח אסיה, ונעשה יותר ויותר פופולרי גם במערב. יכולת ההישרדות המופלאה של הגינקו זיכתה אותו בכינוי שטבע דארווין "המאובן החי". כושר ההישרדות המופלא של העץ בא לידי ביטוי לאחר הטלת הפצצה האטומית בהירושימה בשנת 1945. עצי הגינקו נשרפו לגמרי, אך הודות לכושר העמידה של שורשיהם בחום גבוה, הצליחו העצים לשרוד ובאביב שלאחריו כבר בלבבו וחזרו לצמוח.

עץ הגינקו יכול להגיע לגיל של 4,000 שנה. המדענים מניחים שהעמידות הגבוהה שלו לזיהום אוויר, למזיקים, למחלות ולגורמים אחרים שתוקפים את העץ, מאפשרת לעץ לשרוד ולהאריך ימים. חומרים שונים ברקמות העץ מאפשרים לו להיות עמיד בפני נגיפים, חיידקים ופטריות. הודות לתכונותיו יוצאות הדופן של הגינקו, משמש העץ כצמח מרפא.



בעלי החיים שפוגעים בצמחים נקראים **מזיקים** (pests). בין המזיקים נמנים חולייתנים, למשל: ציפורים ויונקים, וכן בעלי חיים זעירים, כמו: חרקים, עכבישים ושבוללים. מיקרואורגניזמים שחודרים לצמחים וגורמים להם מחלות נקראים **פתוגנים** (pathogens) – מחוללי מחלות. הפתוגנים העיקריים הם פטריות, נמטודות, חיידקים ונגיפים. כל חלקי הצמח – השורש, הגבעול, העלים, הפרחים, הפירות והזרעים – חשופים להתקפה (איורים ז-1 וז-2). כל אחד מן המזיקים והפתוגנים תוקף חלקים מסוימים של הצמח. במקרים הקלים, הנזק הוא חלקי בלבד: גידול הצמח מואט ויכולתו ליצור פירות וזרעים פוחתת. במקרים הקיצוניים, הצמח מת.



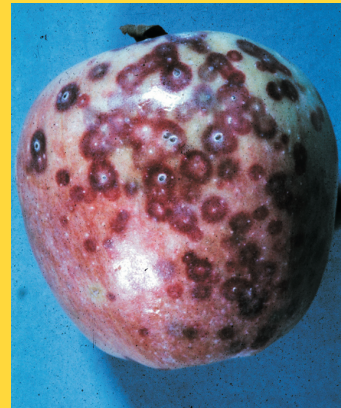
איור ז-1: איברי צמח מותקפים



ד. עפצים בשורש הגור
גורם המחלה: נמטודה



ג. כימשון בפרי עגבנייה
גורם המחלה: פטרייה



ב. מציצות בפרי תפוח
גורם המחלה: כנימה



א. שבירת צבע בפרח סייפן
גורם המחלה: נגיף



ח. נבירה בענף תפוח
גורם המחלה: זחל



ז. קימחון בעלי פטרוזיליה
גורם המחלה: פטרייה



ו. תמותת עלי שקד
גורם המחלה: כנימה



ה. עפצים בשורשי עגבנייה
גורם המחלה: נמטודה

איור 2-2: פגיעות של מזיקים בפרח, בפרי, בשורש, בגבעול ובעלים של צמחים

למרות כל המזיקים והפתוגנים שיכולים לפגוע בצמחים, הצמחים ממשיכים להתקיים ולהתרבות; יכולת ההישרדות שלהם מצביעה על כך שיש להם אמצעי הגנה בפני המזיקים והפתוגנים. אמצעי ההגנה האלה התפתחו בצמחים במהלך האבולוציה. חלק ממנגנוני ההגנה קיימים בצמח באופן קבוע ואחרים מושרים על ידי התקפה של פתוגנים או מזיקים. מנגנוני ההגנה (הקיימים והמושרים) שהתפתחו בצמחים יכולים להיות משני סוגים: מנגנונים מבניים או מנגנונים כימיים. בדרך כלל, הצמחים מתגוננים נגד מזיקים ופתוגנים על ידי שילוב של מנגנונים מסוגים שונים.

מנגנוני הגנה קיימים

לכל הצמחים יש מנגנוני הגנה שקיימים בהם באופן קבוע, ללא קשר לתקיפת פתוגן או מזיק. חלק ממנגנוני ההגנה הקיימים הם מנגנונים מבניים, שפועלים כמחסומים פיסיים מפני פגיעה או התקדמות התוקף בתוך רקמות הצמח. מנגנוני הגנה קיימים אחרים הם מנגנונים כימיים, שהם חומרים שדוחים את התוקפים או מהווים רעלנים שפוגעים בתוקפים.

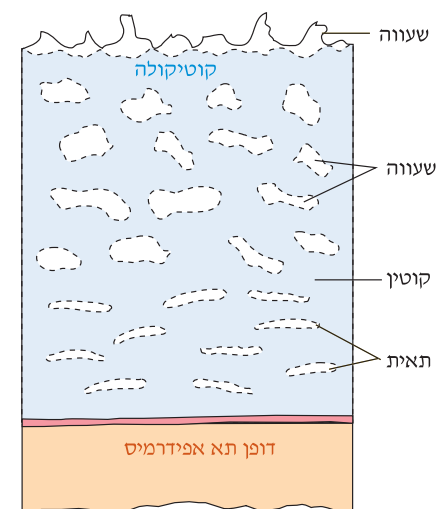
רעלן (toxin) - רעל שמיוצר על ידי אורגניזם חי ופוגע באורגניזם אחר (או באורגניזמים אחרים).

מנגנוני הגנה קיימים מבניים

כאשר מזיק או פתוגן מנסה לחדור לצמח הוא נתקל במנגנוני הגנה מבניים כבר בהיותו בשטח החיצוני של הצמח. מנגנוני ההגנה האלה הם: שכבת קוטיקולה, חומרים בדופן התאים, שערות וקוצים. גם מספר הפיוניות בצמח ומועד פתיחתן משפיעים על מידת החדירות של הפתוגנים לצמחים.

שכבת הקוטיקולה - כל איברי הצמח מצופים רקמת חיפוי של תאי אפידרמיס, ורקמת החיפוי מכוסה בשכבה חיצונית קשיחה שנקראת **קוטיקולה** (cuticle) (איור ו-7 בעמ' 304). הקוטיקולה מורכבת בעיקר מחומר שומני שומני שנקרא קוטין (cutin), משעווה (wax) ומתאית (cellulose) (איור ז-3). החומרים האלה מהווים מחסום פיסי נגד חיידקים ופטריות ומקשים עליהם לחדור לצמח. בגלל אופייה השומני של הקוטיקולה היא דוחה מים, וכך היא גם מעכבת התפתחות של פטריות וריבוי של חיידקים - תהליכים שדורשים לחות. ככול שהקוטיקולה עבה יותר, כך ההגנה שהיא מספקת יעילה יותר.

חומרים בדופןות התאים - ההרכב של דופןות התאים משפיע על מידת חדירותם לפתוגנים. חומרים שמצויים בדופןות התאים באופן קבוע, כמו: ליגנין (lignin) ותאית, מקשים על חדירת הפתוגנים לצמח. לליגנין יש מבנה קשיח שמרחיק גם מזיקים מן הצמח, מפני שהוא



איור ז-3: מבנה הקוטיקולה

מקשה על המזיקים את עיכול המזון הצמחי. הליגנין עצמו אינו מתעכל על ידי המזיקים והוא יכול להיקשר לתאית ולחלבונים ולהפוך גם אותם לבלתי נעכלים.

שערות - השערות שמכסות את העלים והגבעולים יכולות להפריע לחרקים להטיל ביצים על פני הצמח, וכך להגן עליו מפני זחלי החרקים. השערות יכולות להכיל גם חומרים ארסיים שדוחים רבים מאוכלי העשב (למשל, השערות הצורבות של הסרפד).

קוצים - הקוצים הם אמצעי הגנה יעיל נגד חולייתנים אוכלי צמחים, כגון: ארנבות, שפנים, צבאים, כבשים ועזים (איור ז-4). עם זאת, יש חולייתנים שאוכלים גם צמחים קוצניים, למשל: הגמל, שעור לשונו קשה ומחוספס. יתרה מזאת, עיקר אוכלי הצמחים הם חרקים, ואותם אין הקוצים "מפחידים". הצלף הקוצני, למשל, נאכל בתיאבון על ידי הזחלים של לבנין הצלף.



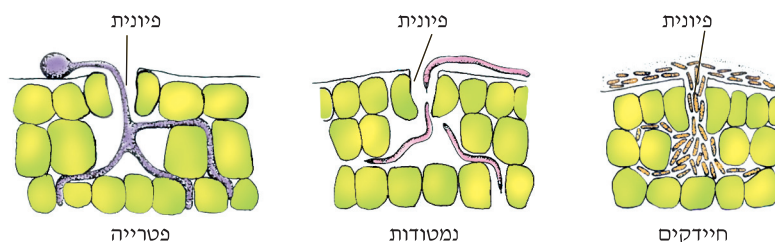
ב. קוצים בגזע עץ הקאפוק



א. עץ הקאפוק

איור ז-4: הגנה באמצעות קוצים בעץ הקאפוק (*Kapok*)

מספר הפתחים הטבעיים בצמח - פטריות, נמטודות וחידקים רבים חודרים לצמח דרך פתחים טבעיים, למשל דרך הפיוניות בעלים (איור ז-5) והעדשתיות בגבעולים. אם מספר הפיוניות קטן, לפתוגנים קשה יותר לחדור. גם למועד הפתיחה של הפיוניות יש חשיבות; צמחים שהפיוניות שלהם נפתחות בסוף היום עמידים יותר בפני פטריות, שהנבגים (יחידות הרבייה) שלהן נובטים בנוכחות טל הלילה. הנבגים של הפטריות האלה נובטים בלילה, כשהם מחוץ לצמח, ובמשך היום הפטריות מתייבשות עוד בטרם חדרו דרך הפיוניות.



איור ז-5: חדירת פתוגנים דרך פיוניות

לעמידות המבנית יש תרומה קטנה יחסית להגנה על הצמח מפני מזיקים ופתוגנים. העמידות הכימית היא זו שמקנה לצמחים את עיקר ההגנה.

מנגנוני הגנה קיימים כימיים

צמחים יכולים להתגונן מפני מזיקים ופתוגנים באמצעות חומרים כימיים שקיימים בהם באופן קבוע. בצמחים, מרבית חומרי ההגנה הקיימים שייכים לקבוצת **המטבוליטים המשניים** (secondary metabolites). המטבוליטים המשניים הם חומרים שנוצרים רק בחלק מן הצמחים (להבדיל ממטבוליטים ראשוניים שנוצרים בכול הצמחים). למטבוליטים המשניים יש תפקידים ביולוגיים שונים, ביניהם: הגנה מפני תוקפים, אך בדרך כלל הם אינם חיוניים לקיום של הצמח. חלק מן המטבוליטים המשניים, שמשתתפים במערכות ההגנה של הצמח, דוחים את התוקפים עוד בטרם מתחילה ההתקפה. מטבוליטים משניים אחרים הם רעלנים שפוגעים בתהליכים חיוניים של התוקפים.

מטבוליטים משניים שדוחים אוכלי צמחים

חלק מן המטבוליטים המשניים הם חומרים בעלי טעם וריח שדוחים מזיקים ופתוגנים. חומרים דוחים בעלי ריח הם **השמנים האתריים** (essential oils). שמנים אתריים הם חומרים נדיפים שמקנים ריח מיוחד לעלווה של הצמחים, כמו: נענע, לימון, ריחן (בזילקום) ומרווה.



איור ז-6: בלוטת שמן אתרי באזובית פשוטה
(צולם במיקרוסקופ אלקטרוני סורק;
הגדלה $1,300 \times$)

הם נוצרים בשערות בלוטיות שבולטות מן האפידרמיס (איור ז-6) והריח שלהם דוחה את אוכלי הצמחים עוד לפני שהם נוגסים בצמח. ממחקרים אחרונים נמצא שלשמנים אתריים יש תרומה חשובה נוספת בהגנת הצמח. בתירס, בכותנה ובצמחים אחרים, מופרשים השמנים האתריים רק לאחר שהמזיקים מתחילים ב"ארוחה" שלהם. השמנים שמופרשים מן הצמח מושכים אל הצמח אויבים טבעיים של החרקים אוכלי הצמחים, וכך הם מקטינים את נזקי החרקים.

קוטל מזיקים רב עוצמה מופק מעץ הנים



בעץ הנים (neem), שגדל באסיה ובאפריקה יש חומר מר ביותר, והוא מגן על העץ מפני מזיקים. בעת התקפות של נחילי ארבה בשדות, כאשר רוב הצמחים והעצים מושמדים, עץ הנים לא נפגע כלל. החומר המר בעץ הנים אינו רעיל ליונקים, אינו פוגע בסביבה, אבל הוא פועל נגד מגוון רחב של מזיקים, כמו: חיפושיות, זבובים, יתושים, עשים, ארבה, תיקנים, תולעים וחלזונות, וגם נגד פטריות. החומר הפעיל מדכא את התיאבון של המזיקים, ומשבש את פעולת ההורמוני הגדילה שלהם.

מזרעי עץ הנים, ההודים מייצרים חומר קוטל מזיקים. את הזרעים הם משרים במים או בכוהל, למשך לילה אחד, ולמחרת מפזרים את נוזל המיצוי על הגידולים החקלאיים. בשנת 1992 רשמה חברה אמריקאית פטנט על שיטה להפקת קוטל מזיקים רב עוצמה מזרעי עץ הנים. החברה הקימה יחד עם חברה בהודו מפעל למיצוי החומר מתוך הזרעים ועיבודו, כדי שיהיה אפשר לאחסן אותו למשך זמן רב.

מטבוליטים משניים רעלניים

הרבה מטבוליטים משניים הם רעלנים שפוגעים בתהליכים חיוניים במזיקים ובפתוגנים. הפגיעה יכולה להיות בתהליכים חיוניים לקיומם של המזיקים או הפתוגנים, או בתהליכים חיוניים לרבייה שלהם. במזיקים, רוב הרעלנים פוגעים בתהליך העיכול, בהולכה העצבית, בייצור ובפעילות החלבונים, ברבייה (של חרקים) ובנשימה התאית.

פגיעה בעיכול - מטבוליטים משניים רבים פוגעים בפעילות של מערכת העיכול של המזיק. **הטנינים** (tannins), למשל, הם מטבוליטים משניים שנקשרים לחלבונים במערכת העיכול של המזיקים ומפריעים לתהליך העיכול שלהם. הם יכולים להפוך אנזימים שמשתתפים בעיכול המזון לבלתי פעילים, או ליצור צברים של טנינים וחלבונים שקשים לעיכול. טנינים

טנינים הם אותם חומרים שגורמים לתחושת ההתכווצות בפה, כאשר אנו אוכלים פרי שאינו בשל. התחושה הזאת נגרמת כתוצאה מהתקשרות הטנינים לחלבוני הרוק בפה.

שנמצאים בעצים רבים מגנים עליהם גם מפני פטריות וחיידקים. רבים מעצי הבר בישראל, למשל: מיני אלון ואלה, עשירים מאוד בטנינים. מן העצים האלה נהגו להפיק טנינים לצורך עיבוד עורות (בורסקאות).

יש אוכלי צמחים שניזונים ללא הפרעה מצמחים שמכילים טנינים, למשל: ארנבות ומכרסמים. בעלי החיים האלה יוצרים חלבוני רוק בעלי משיכה חזקה לטנינים. התקשרות חלבוני הרוק האלה לטנינים מנטרלת את ההשפעה הרעלנית של הטנינים.

רעלנים אחרים שפוגעים במערכת העיכול של מזיקים הם חלבונים שמעכבים פעילות של אנזימי עיכול, כגון: עמילאזות (שחיוניות לעיכול עמילן) ופרוטאזות (שחיוניות לעיכול חלבונים). חלבונים רעלנים אחרים פוגעים בספיגת חומרי המזון בצינור העיכול של המזיק.

פגיעה בהולכה העצבית - המטבוליטים המשניים העיקריים שפוגעים בהולכה העצבית של אוכלי הצמחים הם רעלנים שנקראים **אלקלואידים** (alkaloids). האלקלואידים מצויים בכ-20% מן הצמחים העילאיים, והם מגנים על הצמחים בעיקר מפני יונקים. האלקלואידים ידועים מאוד בשל הרעילות שלהם לבני אדם ובשל תכונותיהם הרפואיות.

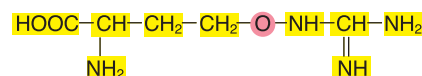
האלקלואידים – רעלים, תרופות וסמים



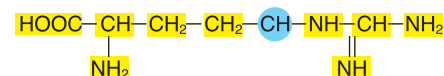
מספר גדול של חיות משק מתות מדי שנה בשנה בגלל הרעלה של אלקלואידים. תופעה זו היא, כנראה, תוצאה של העובדה שבעלי חיים מבויתים, שלא כמו חיות הבר, אינם חשופים לברירה הטבעית, שמונעת אכילת צמחים רעילים. אלקלואידים רבים הם רעילים גם לאדם. במינונים נמוכים, אלקלואידים רבים משמשים כתרופות. מורפין, קודאין, אטרופין ואפדרין הן רק דוגמאות אחדות לאלקלואידים צמחיים שמשמשים ברפואה. אלקלואידים אחרים, כמו: קוקאין, ניקוטין וקפאין, משמשים כחומרים מעוררים או כסמי הרגעה.

פגיעה בייצור חלבונים או בפעילותם - יש אלקלואידים שפוגעים במנגנון יצירת החלבונים בגופו של המזיק. רעלנים אחרים שפוגעים בייצור חלבונים הם חומצות אמיניות שאינן משתתפות בבניית חלבונים, אך יש להן מבנה דומה מאוד למבנה של חומצות אמיניות אחרות שמשתתפות בבניית חלבונים (איור ז-7). החומצות האמיניות האלה יכולות לגרום נזק בדרכים שונות: יש כאלה שמפסיקות את יצירת החלבון, אחרות נכללות בטעות במבנה החלבון ויכולות לגרום לחלבון שנוצר שיהיה בלתי פעיל. בצמחים שמייצרים חומצות אמיניות כאלה, יש מערכת שמסוגלת להבחין בעת יצירת החלבונים בין חומצה אמינית רגילה לבין

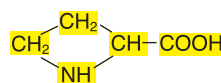
חומצה אמינית רעילה, ועל ידי כך נמנעת הרעלה עצמית של הצמחים. יש חרקים שניזונים מצמחים כאלה, ואינם ניזוקים, כי יש להם אותן מערכות שמבחינות בין חומצות אמיניות רעילות לבין חומצות אמיניות שבונות חלבונים.



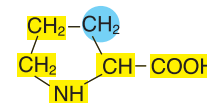
קנבנין



ארגינין



אזטידין



פרולין

ב. חומצות אמיניות רעילות
(לא חלבוניות)

א. חומצות אמיניות חלבוניות

איור 7-7: מבנה חומצות אמיניות רעילות

פגיעה ברבייה של חרקים - בצמחים מסוימים נוצרים מטבוליטים משניים בעלי מבנה שדומה למבנה של הורמון הנעורים של חרקים. הורמון הנעורים בחרקים מונע התפתחות של איברי בוגר, ומשרה התנשלות חוזרת לדרגת זחל. כאשר חרקים ניזונים מן הצמחים האלה, הרמה של הורמון הנעורים בגופם עולה, ולכן ההתפתחות של איברי הבוגר מעוכבת והם אינם יכולים להשלים את מחזור החיים שלהם. על ידי כך נפגעת ההתרבות של אותם חרקים מזיקים.

פגיעה בנשימה התאית - מטבוליטים משניים אחרים פוגעים בנשימה התאית של מזיקים. המטבוליטים המשניים האלה הם רעלים שמקורם ב**תרכובות ציאנוגניות**. תרכובות ציאנוגניות אינן רעילות, אולם כאשר הצמח מותקף, משתחרר מן התרכובות ציאניד, שהוא גז רעיל מאוד. הציאניד נקשר לברזל בקבוצת ההם של אנזימי הנשימה של אוכלי הצמחים ומפסיק במהירות את תהליך הנשימה התאית. תרכובות ציאנוגניות יכולות להיות מסוכנות מאוד גם לאדם. הציאניד אינו פוגע בתאי הצמח עצמו, מכיוון שבצמח יש הפרדה בין התאים שבהם נמצאות התרכובות הציאנוגניות לבין התאים שבהם מצוי החומר שדרוש לשחרור הציאניד. הציאניד משתחרר רק כאשר יש מגע בין התרכובות הציאנוגניות לבין החומר שמשחרר את הציאניד. מגע כזה מתרחש רק לאחר ששני סוגי התאים נהרסים, בדרך כלל על ידי בעל חיים שניזון מהם.

פקעות מאכל קטלניות



פקעות הקספה משמשות מזון עשיר בפחמימות בארצות טרופיות, ויש בהן ריכוז גבוה של תרכובות ציאנוגניות. האנשים בארצות הטרופיות למדו להרחיק חלק גדול מן התרכובות המסוכנות, והם עושים זאת במהלך בישול הפקעות. ואולם, התופעה של הרעלה כתוצאה מאכילת הפקעות עדיין נפוצה. מאמצים רבים נעשים כדי להקטין את רמת התרכובות הציאנוגניות בפקעות, בעזרת שיטות מסורתיות של הכלאות ובעזרת הנדסה גנטית. עם זאת, החוקרים מעוניינים לשמור על רמה מסוימת של תרכובות ציאנוגניות בפקעות, כיוון שהן מאפשרות לאחסן את הפקעות תקופה ארוכה מבלי שיותקפו על ידי מזיקים.

סיירת הנמלים נושכת ועוקצת



לעצי שיטה באזורים טרופיים במרכז אמריקה יש יחסי גומלין הדוקים עם נמלים שמקננות בתוך הקוצים שלהם. הקוצים נפוחים בבסיסם ומשמשים מקום מסתור לנמלים. עצי השיטה מצוידים בצופנים שמפרישים תמיסת סוכר ובגופי מזון חלבוניים. חומרי מזון אלה נאספים על ידי הנמלים.

הנמלים חיות על גבי השיטים, מסיירות בזריזות על גבי הענפים ותוקפות בנשיכה או בעקיצה כל חרק או יונק שמנסה להתקרב אל ענפי השיטה. הן תוקפות גם צמחים שונים שבאים במגע עם העלווה של השיטה. תלות השיטה בנמלים היא מוחלטת ועצי שיטה שאינם מאכלסים נמלים מאבדים את חיוניותם ונכחדים. ההגנה שמספקות הנמלים לשיטים היא מעין תחליף להגנה הכימית. במיני שיטה שמוגנים על ידי נמלים, חסרים המטבוליטים המשניים שמקנים הגנה זו. מיני שיטה שאין להם מבנים מיוחדים לאכסן ולהזין נמלים, מכילים מטבוליטים משניים כחומרי הגנה.

השפעה של מיצוי צמחים שונים על התפתחות פטריות פתוגניות



עבודה 14

כלים	חומרים
4 כוסות כימיות (500 מ"ל)	עלים מיובשים של גפן או כל גידול
נייר סינון	חקלאי אחר
2 משפכים	עלים מיובשים של טיון דביק
3 בקבוקים לאוטוקלב (500 מ"ל)	תפטיר של הפטריות ריזופוס
7 צלחות פטרי	ובוטריטיס
ניילון דביק	25 גרם אגר תפוחי אדמה (PDA)
סרגל מדידה	600 מ"ל מים רותחים
מבער בונזן	
מחט בקטריוולוגית	
אוטוקלב	

מהלך העבודה

1. שקלו 4 גרם של עלים מיובשים מכל צמח.
2. הכניסו כל סוג של עלים לכוס כימית, והוסיפו לכל כוס 200 מ"ל מי ברז רותחים. צננו את נוזל המיצוי במשך דקות אחדות.
3. הניחו נייר סינון בתוך משפך וסננו דרכו את נוזל המיצוי לתוך כוס כימית נקייה. רשמו על כל כוס את שם הצמח שממנו נעשה המיצוי.
4. קחו 2 בקבוקים לאוטוקלב ורשמו על כל אחד מהם את שמו של אחד הצמחים שממנו נעשה המיצוי. לכל בקבוק הכניסו 7.8 גרם של אגר תפוחי אדמה (אגר מזין, שמשמש כמצע ומכיל מרכיבים הכרחיים להתפתחות פטריות). לכל בקבוק העבירו את נוזל המיצוי המתאים לו, מן הכוסות הכימיות.
5. על הבקבוק השלישי כתבו ביקורת. הכניסו גם לתוכו 7.8 גרם של אגר תפוחי אדמה, והוסיפו 200 מ"ל מי ברז.
- את הבקבוקים אל תפקדו חזק, כדי שלא ייווצר לחץ בתוכם.
6. נערו היטב את הבקבוקים, והכניסו אותם לאוטוקלב ב-121°C, ב-1 אטמוספירה, למשך 30 דקות. העיקור ימית את החיידקים והפטריות שמצויים במיצוי ובאגר. צננו את המצע עם המיצוי ל-50°C.

7. רשמו מספרים על 7 צלחות פטרי. על צלחת 1 רשמו ריזופוס וטיון, על צלחת 2 רשמו בוטריטיס וטיון, על צלחת 3 רשמו ריזופוס ואת השם של הצמח האחר שאותו אתם בודקים, על צלחת 4 רשמו בוטריטיס ואת השם של הצמח האחר שאותו אתם בודקים, על צלחת 5 רשמו ביקורת ריזופוס, על צלחת 6 רשמו ביקורת בוטריטיס, על צלחת 7 רשמו אגר.

8. לצלחות 1-4 שפכו מצע עם מיצוי מתאים עד לכיסוי קרקעית הצלחת. לצלחות 5-7 שפכו מצע ללא מיצוי (מבקבוק הביקורת). כסו מיד את כל הצלחות והמתינו כמחצית השעה עד שהאגר יתקשה.

9. בעזרת מחט בקטרילוגית מעוקרת, קחו מעט מתפטיר הפטריות והניחו במרכז כל צלחת, לפי הסימון. לפני שאתם לוקחים סוג אחר של תפטיר, יש לעקר את המחט: חממו אותה בלהבה וקררו על פני האגר, בצלחת 7. הניחו תפטיר מכל סוגי הפטריות, גם בצלחות הביקורת. אטמו את הצלחות בעזרת ניילון דביק.

10. הדגירו את הצלחות בטמפרטורת החדר, למשך שבוע.

11. כאשר מגדלים את הפטריות האלה על גבי קרקע מזון מוצק, הן יוצרות תפטיר (גוף רב-תאי, מעין מושבה). לאחר שבוע מדדו את קוטר התפטיר שהתפתח בכול צלחת ורשמו את הממצאים.

12. אספו את הממצאים מכל התלמידים, חשבו ממוצעים וסכמו את כל התוצאות בטבלה.

13. סרטטו גרף שיתאר את השפעת סוג המיצוי על קוטר התפטיר של כל פטרייה. הסבירו מדוע בחרתם בתצורה הגרפית שבחרתם.

14. ענו על השאלות האלה:

א. מהו המשתנה התלוי בניסוי? מהו המשתנה הבלתי תלוי?

ב. כיצד נבדק המשתנה התלוי?

ג. מה יש בצלחות הביקורת? הסבירו את חשיבותן.

ד. מדוע חשוב לעקר את התמיסות?

ה. השוו בין הצמחים מבחינת יכולת הפגיעה שלהם בפטריות. האם מצאתם הבדלים משמעותיים בין צמח הבר לצמח החקלאי? אם כן, הסבירו מהו הגורם לשוני הזה.

ו. איזו מן הפטריות הושפעה יותר מן המיצויים?

ז. מהי המסקנה מן הניסוי?

ח. מה הם השימושים החקלאיים שניתן ליישם לפי המסקנה מן הניסוי הזה? הסבירו.

מנגנוני הגנה מושרים

גם בצמחים, בדומה לבעלי החיים, המזיקים או הפתוגנים שתוקפים את הצמח משרים בו תגובת הגנה. מנגנוני ההגנה המושרים (induced defense mechanisms) מתחילים לפעול רק כאשר הצמח מותקף, והם כוללים שינויים מבניים ושינויים כימיים. השינויים האלה מקשים על חדירת התוקף לצמח או שהם פוגעים בכושר שלו לגרום מחלה.

מנגנוני ההגנה המושרים בצמח מופעלים על ידי חומרים שנקראים **משַׁרְנִים** או **אֵלִיצִיטוֹרִים** (elicitor=מעורר). המשרנים כוללים חומרים שונים, כמו: פחמימות, חלבונים וחומצות שומן, והם מזוהים בצמח על ידי קולטנים מתאימים. יש משרנים חיצוניים שמקורם בתוקף, ויש משרנים פנימיים שמקורם בצמח. משרנים פנימיים נוצרים בצמח כתוצאה מפירוק של דופנות התאים הצמחיים על ידי המזיק או הפתוגן. מנגנוני ההגנה של הצמח מופעלים גם על ידי גורמים אביוטיים, כגון: פציעה, מתכות כבדות וקרינה על-סגולה.

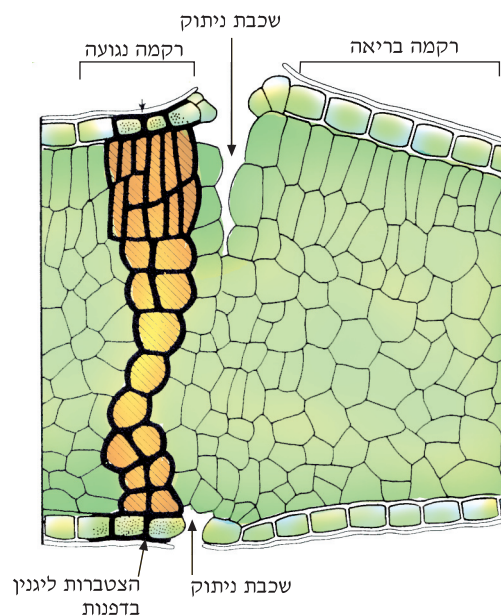
גורמים אביוטיים - גורמים דוממים (שאינם חיים) בסביבתו של האורגניזם, כגון: תנאי אקלים, תנאי קרקע ועוצמת קרינה.

מנגנוני הגנה מושרים מבניים

יש משרנים שמפעילים שינויים מבניים, ואלה מגנים על הצמח בעיקר בפני פתוגנים. השינויים האלה יכולים להקשות באופן מכני על המשך ההתפשטות של הפתוגן בצמח או לגרום לניתוק הפתוגן ממקורות המזון והמים בצמח וכך לגרום למותו. יש כמה סוגים של שינויים מבניים שמתרחשים בצמחים בתגובה לחדירת פתוגן.

יצירת שכבת ניתוק - שכבת ניתוק (abscission layer) נוצרת, לדוגמה, בעלים צעירים של עצי פרי גלעניים, לאחר שהם נדבקים בפטריות או בחיידקים (איור ז-8). שכבת הניתוק מאפשרת הפרדה בין החלקים בעלה שכבר נגועים לבין החלקים האחרים בעלה, שעדיין לא נדבקו. ההפרדה נוצרת על ידי המסת למלת הביניים בין שתי שכבות התאים שמקיפות את אתר ההדבקה. למלת הביניים היא שכבה של חומר ש"מדביק" את דופנות התאים הצמחיים זה לזה. ההמסה של למלת הביניים גורמת נתק בין שתי שכבות התאים וכתוצאה מכך הרקמה שמכילה את הפתוגן מתנתקת ממקורות המים והמזון. הניתוק הזה גורם למותה של הרקמה הנגועה; היא מתייבשת ונופלת, ובמקומה נשארים חורים עגולים באזור ההדבקה. הצמח "מקריב" אפוא קטע מרקמתו על מנת להגן על שאר חלקי העלה.

שינויים במבנה ובהרכב של דופנות התאים - בתגובה לחדירת פתוגנים מסוימים, דופנות התאים באזור החדירה תופחים, כמות סיבי התאית בהם עולה ולעיתים עולה בהם גם כמות הליגנין (איור ז-8). ריבוי התאית והליגנין מגדיל את ההתנגדות לחדירת הפתוגן לתא.



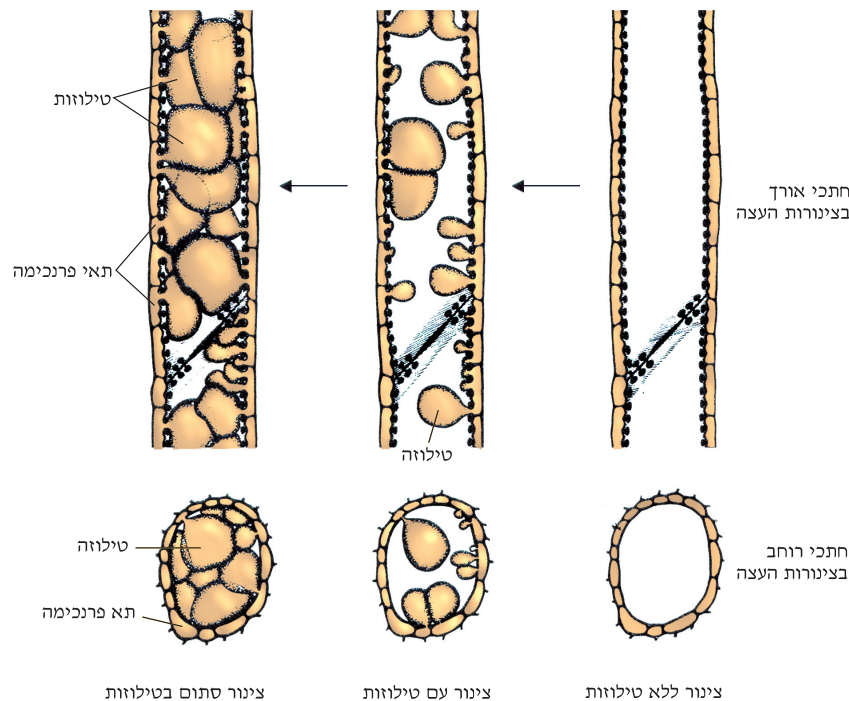
גם **פפילות** (papillae) מקשות על המשך ההתפשטות של הפתוגנים בצמח. הפפילות הן מבנים סוכריים שנוצרים תוך דקות על הדופן הפנימי של התאים, בתגובה לחדירה של פתוגנים מסוימים.

הפרשת שרף - השרף (resin) נוצר ברוב הצמחים, אך בעיקר, הוא נוצר בעצי אורן ובעצי פרי גלעיניים (איור ז-9). על ידי סתימת הרווחים הבין-תאיים סביב אזור ההדבקה יוצר השרף מחסום בלתי עביר להתפשטות הפתוגן ולהעברת המזון להתפתחותו. הפתוגן המבודד מתנוון ומת. כשהשרף נחשף לאוויר הוא מתקשה מאוד וכך הוא מונע חדירה של פתוגנים נוספים. בשרף יש גם רעלנים שפוגעים במזיקים.

יצירה של טילוזות - הטילוזות (tyloses) הן מבנים שנוצרים כתוצאה מחדירה של תאי הפרנכימה של צינורות העצה אל תוך חלל צינורות העצה (איור ז-10). הטילוזות יכולות לסתום צינורות עצה נגועים בפתוגן עוד לפני שהפתוגן מצליח להתפשט לצינורות אחרים.

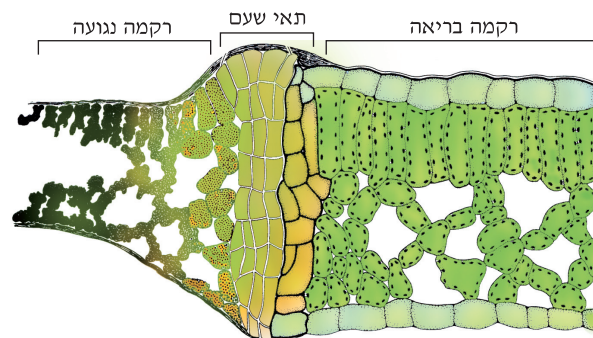


איור ז-9: שרף מופרש מעץ ברוש



איור ז-10: טילוזות בצינורות עצה

יצירה של שכבות תאי שעם - תאי השעם (cork) הם תאים מתים שבדופן שלהם יש חומר שנקרא סוברין (suberin). הסוברין הופך את דופן התא לבלתי חדיר למים ולגזים. תאי השעם מונעים את המשך התפשטות הפתגון בצמח, וכן את מעבר החומרים הרעילים שהוא מפריש. הם גם מונעים את מעבר חומרי המזון מן הרקמה הבריאה אל הפתגון ועל ידי כך גורמים לבידודו ולהתנוונותו (איור ז-11).



איור ז-11: שכבות תאי שעם בעלה נגוע

עפצים



אחד השינויים המבניים הבולטים שמתרחשים בצמחים, בתגובה לחדירה של מזיק או פתגון, הוא יצירת עפצים (איורים ז-1 וז-2, עמ' 362, 363). העפץ הוא גידול של רקמת הצמח והוא נוצר בתגובה לפעילות של אורגניזם זר, שפוגעת בצמח, כגון: הטלת ביצים. האורגניזמים שגורמים ליצירת עפצים הם בדרך כלל חרקים, כמו: צרעות קטנות וכנימות, וגם נמטודות וחיידקים. נקבות החרקים מטילות ביצים בתוך הרקמות הרכות של הצמח. הזחלים שבוקעים מן הביצים גורמים לשינוי המאזן ההורמונלי בצמח, והשינוי הזה גורם לצמח לגדל רקמה עסיסית סביב הזחלים. הרקמה העסיסית היא העפץ, והזחל שגר בתוכה ניזון ממנה. ביצירת העפץ, החרק מגייס את המטבוליזם של הצמח לצרכיו, והצמח אינו יכול "להתנגד". יש צמחים שהם עמידים לחרקים יוצרי עפצים, למשל, על ידי המתת התאים באזור החדירה של החרק. בצמחים אחרים, לעומת זאת, יצירת העפצים חיונית לקיומם. צמחים כאלה הם, למשל, עצי תאנה (ומיני פיקוס אחרים) שבהם נוצרים עפצים על ידי הצרעות שמאביקות אותם.

מנגנוני הגנה מושרים כימיים

יש משרנים שמפעילים שינויים כימיים, ואלה מגנים על הצמח בפני המזיק או הפתוגן. בצמחים שונים יש מנגנונים כימיים שונים והם יכולים לפעול בכמה דרכים.

הפעלת תגובת רגישות יתר - צמחים מסוימים מגיבים להתקפת פתוגן או לנזק מכני, במוות של התאים באזור הפגיעה. מיד לאחר שהפתוגן חודר לצמח, נוצרים בצמח חומרים שגורמים לתמותה של תאים באזור החדירה. תמותת התאים האלה ותמותה של תאים שכנים באזור ההדבקה גורמת לבידוד הפתוגן ממקורות המזון ולהרעבתו עד מוות. התגובה הצמחית הזאת נקראת **תגובת רגישות יתר** (hypersensitive response = HR) והיא נפוצה כמנגנון הגנה בעיקר נגד חיידקים, פטריות ונגיפים (איור ז-12). תגובת רגישות היתר גורמת גם הפרשת חומרים שפוגעים ישירות בפתוגנים.

יצירת חומרים אנטי מיקרוביאליים - זמן קצר לאחר חדירה של פתוגן לצמח, עולה בתאי הצמח הרמה של החומרים שנקראים **פיטואלקסינים** (alexos=צמח, phytos=חומרים מרחיקים). הפיטואלקסינים הם מטבוליטים משניים מסוגים שונים, והם מרחיקים את הפתוגן שחדר או מעכבים את התפתחותו. הפיטואלקסינים עשויים להיווצר בצמח גם בתגובה לעקה אביוטית. רוב הפיטואלקסינים הם בעלי פעילות אנטיביוטית נגד טווח רחב של מיקרואורגניזמים. הם נוצרים בכמות גדולה בתאים שקרובים לתאים שניזוקו, והם מצטברים ופועלים במקום הפגוע בלבד. ככול שכמות הפיטואלקסינים גדולה יותר ומהירות היווצרתם בצמח גבוהה יותר, כך הצמח יהיה עמיד יותר בפני המיקרואורגניזמים הפתוגניים.

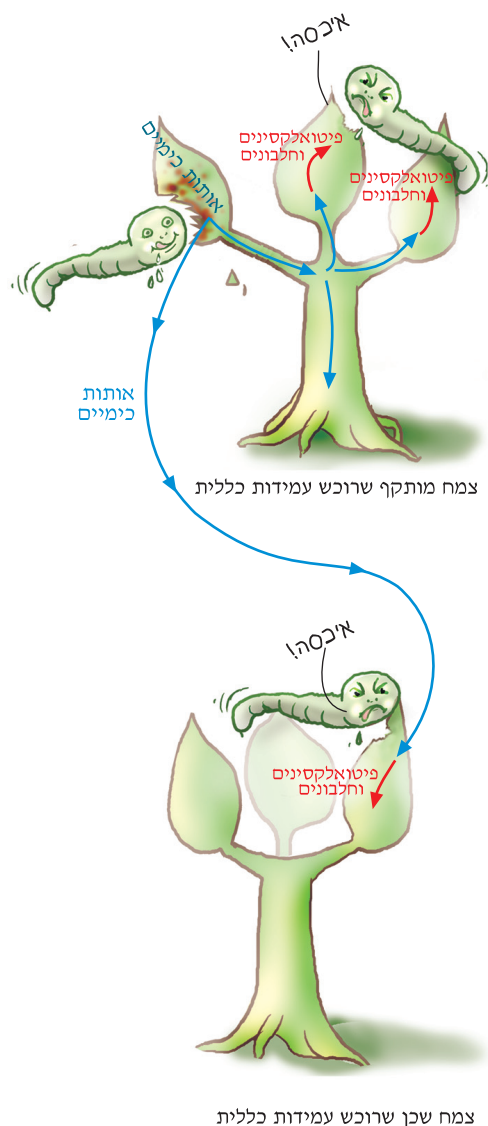
למרות המחקרים הרבים בזיהוי הפיטואלקסינים ובמיונם, עדיין לא ברור כיצד הם פועלים על הפתוגנים, ולא ידוע אם סוגים שונים של פיטואלקסינים משפיעים על תהליכים מטבוליים שונים בפתוגנים. עם זאת, ניתן לראות שבנוכחות הפיטואלקסינים הפטריות והחיידקים מפסיקים להתפתח.

חומרים אנטימיקרוביאליים אחרים שנוצרים בצמח בתגובה לחדירת פתוגן הם רדיקלים חופשיים, בעיקר, רדיקלים חופשיים של חמצן. הרדיקלים החופשיים משתחררים בתגובה מהירה, שניות או דקות אחדות לאחר יצירת המגע של הפתוגן או המשרן עם התא. רדיקלים חופשיים של חמצן גורמים לחמצון שומנים, לפגיעה בפעילות של אנזימים ולפירוק של חומצות גרעין. רדיקלים חופשיים של חמצן מעורבים, כנראה, גם ביצירת חומרים רעילים לפתוגן התוקף.

יצירת חלבוני PR - יש צמחים שמגיבים להתקפת מזיק או פתוגן על ידי יצירה מוגברת של חלבונים ייחודיים שנקראים **חלבוני PR** (pathogenesis-related proteins). קבוצה אחת של



איור ז-12: התפתחות תגובת רגישות יתר בצמח טבק כתגובה להדבקה בנגיף מוזאיקת הטבק (TMV)



איור 13-ז: עמידות כללית נרכשת בצמח מותקף ובצמח שכן

חלבוני PR הם אנזימים שמפרקים את דופנות הפתוגן. אנזימים כאלה הם, למשל, כיטינאזות וגלוקנאזות שמפרקות כיטין וגלוקן בדופן התאים של פטריות, וכן ליזוזימים שמפרקים מרכיבים בדפנות של תאי חיידקים. מרכיבי הדופן שחלבוני PR מפרקים אינם מצויים בדופן התא הצמחי ולכן האנזימים לא פוגעים בצמח עצמו.

קבוצה אחרת של חלבוני PR, שנוצרים בעקבות פגיעה בצמח, היא קבוצה של מעכבי פרוטאזות. כאשר מעכבי הפרוטאזות מגיעים למערכת העיכול של המזיק, הם משבשים את הפעילות של הפרוטאזות שחיוניות לעיכול חלבונים.

עמידות כללית נרכשת

בצמחים מסוימים, כמה ימים לאחר הפגיעה של המזיק או הפלישה של הפתוגן, מתפתחת עמידות כללית שנקראת **עמידות כללית נרכשת** או **עמידות סיסטמית נרכשת** (SAR = systemically acquired resistance). בעקבות הפגיעה נוצרים חומרים שנעים בצמח ושולחים אותות לאזורים אחרים, שמרוחקים ממוקד הפגיעה. האותות האלה מעוררים בצמח ייצור של פיטואלקסינים וחלבונים שמגנים על כל הצמח מפני הפתוגן או המזיק. העמידות הכללית מקנה עמידות לכל חלקי הצמח נגד תקיפה חוזרת של אותו מזיק או פתוגן, ונגד מגוון רחב של תוקפים אחרים (איור ז-13).

יש מקרים שבהם העמידות הכללית מושרית על ידי מיקרואורגניזמים שאינם פתוגנים, בעיקר מיקרואורגניזמים שנמצאים בסביבת השורשים, והם משרים עמידות לחלקים העל-אדמתיים של הצמח. חלק מן המיקרואורגניזמים האלה הם מיקרואורגניזמים שמועילים לצמח גם בדרכים אחרות.

בצמחים מסוימים, העמידות הכללית הנרכשת אינה מוגבלת לצמח הפגוע בלבד. בצמחים כאלה קיים מנגנון שמעביר את המידע אודות התקיפה מצמח אחד לצמחים שכנים מאותו מין. עצי ערבה, למשל, שמתקפים על ידי זחלים של חרקים מן המין מַלְקוֹסוֹמָה, מגיבים בשינוי טעם העלים וביצירה של חומרים שמקטינים את קצב הגידול של הזחלים. השינויים האלה מתרחשים לא רק בעצים המותקפים אלא גם בעצים סמוכים, שעל עליהם לא היו כלל זחלים. מניחים, שה"מידע" אודות התקיפה עובר מצמח לצמח באמצעות חומרים נדיפים שנוצרים בצמח הפגוע ומופרשים ממנו לסביבה (איור ז-13).

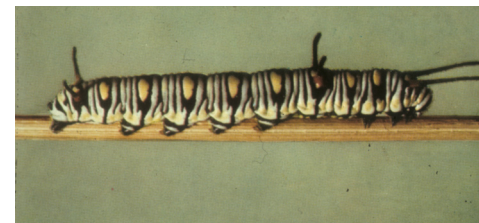
ההתפתחות האבולוציונית של מנגנוני ההגנה

מנגנוני ההגנה בצמחים התפתחו במהלך האבולוציה. מוטציות אקראיות הובילו ליצירת חומרים חדשים שהם רעילים למזיקים או לפתוגנים. כל עוד החומרים החדשים לא הרעילו את הצמח עצמו, היה לצמח יתרון על פני צמחים אחרים, והתכונה הזאת עברה בתורשה לצאצאים והקנתה הגנה לצמחים בדורות הבאים.

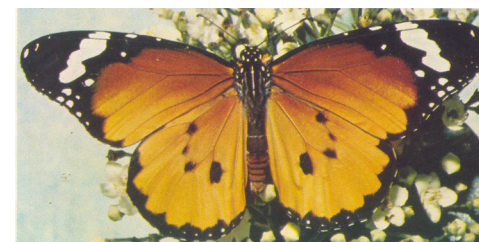
כאשר לרוב מיני הצמחים בסביבה יש אמצעי הגנה מגוונים, קשה למזיקים ולפתוגנים להשיג את כמות המזון שדרושה להם. במצב כזה, יש יתרון למזיקים ולפתוגנים בעלי יכולת להתגבר על אמצעי ההגנה של הצמחים. מזיקים ופתוגנים יכולים להתמודד עם אמצעי ההגנה של הצמחים על ידי שיבוש תהליך ההכרה, שמאפשר לצמח לזהות את נוכחותם. על ידי כך נמנעת ההפעלה של מנגנוני ההגנה המושרים בצמח. מזיקים ופתוגנים אחרים מפרקים ומנטרלים את חומרי ההגנה שהצמח מייצר, ויש גם כאלה שאוגרים את החומרים הרעילים ומנצלים אותם להגנה עצמית. כך, נוצרת שרשרת של תהליכים אבולוציוניים מקבילים בין הצמחים לתוקפים שלהם, והשרשרת הזאת מהווה מעין "מירוץ חימוש"; הצמחים מפתחים אמצעים חדשים, יעילים יותר, נגד מזיקים ופתוגנים שכבר התגברו על האמצעים הקודמים, ולאחר מכן המזיקים והפתוגנים מפתחים אמצעי נגד שמתגברים גם על מנגנוני ההגנה החדשים של הצמחים, וכך הלאה. תהליך כזה של אבולוציה נקרא **קואבולוציה** (coevolution), והוא ממשיך להתרחש כל הזמן.

הנשק הכימי של הכושן הארסי ושל הדנאית

לצמח פתילת המדבר (תפוח סדום) יש רעלנים שמשפיעים על מערכת הדם ועל העצבים והשרירים של בעלי חיים, כולל האדם. לעומת זאת, יש חרקים שניזונים מן הצמח הזה ואינם נפגעים כלל. יתרה מזאת, החרקים האלה משתמשים ברעלנים להרתעת האויבים שלהם. החבב כושן ארסי צובר את הרעלנים של תפוח סדום בבלוטה מיוחדת בגופו, ומתיז אותם לעבר אויביו כדי להרתיעם. הזחלים והבוגרים של פרפר הדנאית (איור ז-14) צוברים את הרעלנים בגופם, ולכן אינם מהווים טרף לציפורים. הציפורים "יודעות" שפרפר הדנאית רעיל לפי הצבעים הבולטים שלו, שמשמשים כצבעי אזהרה (איור ז-14, ב). צבעי הדנאית משמשים כדגם חיקוי לפרפר ממשפחת הנמפתיים; לפרפר הזה יש את אותו דגם של צבעי אזהרה כמו לפרפר הדנאית, אבל אין לו כלל רעלנים. הפרפר הזה חי בבית גידול אחד עם הדנאית ואין לו אמצעי הגנה אחרים.



א. זחל



ב. בוגר

איור ז-14: זחל ובוגר של פרפר הדנאית

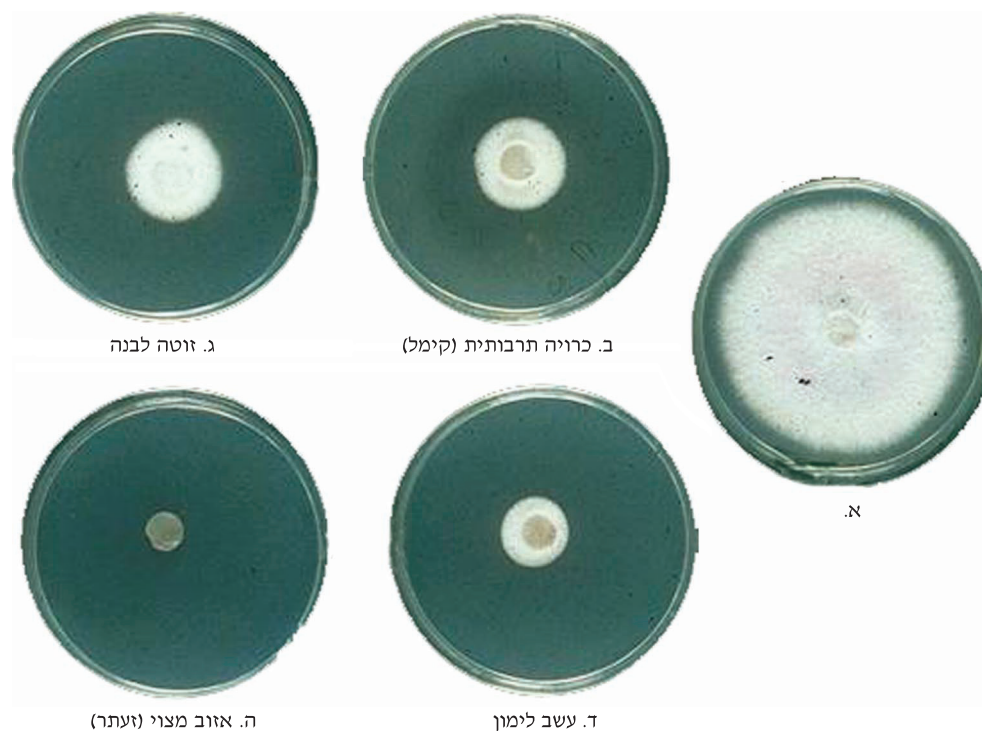
סיכום

1. לצמחים עילאיים יש מנגנוני הגנה שקיימים בצמח באופן קבוע ויש מנגנונים שמושרים בתגובה להתקפת מזיק או בתגובה לחדירת פתוגן. חלק מן המנגנונים הם מבניים וחלק – כימיים.
2. מנגנוני ההגנה הקיימים המבניים הם: שכבת קוטיקולה עבה ואטומה, דופן קשיח, שערות וקוצים. כולם מעכבים או מונעים את חדירת התוקף.
3. מנגנוני ההגנה המושרים המבניים הם יצירה של תאי שעם, של טילוזות, של ליגנין ותאית, ושל רקמת ניתוק ושרף; כל אלה חוסמים את התקדמות הפתוגן בתוך הצמח, מבודדים אותו ובסופו של דבר גורמים למותו.
4. מנגנוני ההגנה הקיימים הכימיים הם מטבוליטים משניים שפוגעים בתוקפים או מרחיקים אותם מן הצמח.
5. מנגנוני ההגנה המושרים הכימיים הם: תגובת רגישות יתר, יצירת חומרים אנטימיקרוביאליים (פיטואלקסינים ורדיקלים חופשיים), ויצירה של חלבוני PR שפוגעים, למשל, בדופנות התאים של הפתוגן או בתהליכי העיכול של התוקף.
6. יש צמחים שלאחר התקיפה מתפתחת בהם עמידות כללית. החומרים שנוצרים באזור המותקף בצמח מעבירים את המידע אודות התקיפה לחלקים אחרים בצמח, ולעתים אף לצמחים אחרים בקרבת הצמח הפגוע. העמידות שנרכשת באופן כזה היא נגד מגוון רחב של מזיקים ופתוגנים.
7. מנגנוני ההגנה בצמחים התפתחו במהלך האבולוציה בתהליכים קואבולוציוניים שהתרחשו בצמחים ובתוקפים שלהם.



1. מה משמש לצמח רקמת מגן?
2. מה היה קורה אם רקמות החיפוי של הצמח היו מבודדות אותו באופן מוחלט מסביבתו החיצונית?
3. מה ההבדל בין אמצעי התגוננות קיימים ובין אמצעי התגוננות מושרים? תנו דוגמה אחת לכל סוג.
4. חלק מן הרעלנים שמשתחררים מן הצמח ממיתים את המזיק. נסו לשער, כיצד "לומדת" אוכלוסיית המזיק שלא כדאי להמשיך לאכול את הצמח הרעיל?

5. יש רעלנים שאינם גורמים למותו של התוקף, אלא מעכבים את התפתחותו או פוגעים בהתרבות שלו.
- א. איזו תועלת מפיק צמח מרעלן שאינו גורם למותו של התוקף?
- ב. מלבד הצמח עצמו (הפרט) שמייצר את הרעלן, מי עוד "נהנה" מן הנזק שנגרם לתוקף?
6. מהו פיטואלקסין? איך ניתן לבדוק אם חומר מסוים הוא פיטואלקסין?
7. הדופן לא מהווה רק מחסום מכני לחדירה, אלא הוא מהווה גם מערכת חישה שמפעילה את מערכות ההגנה המושרות בצמח. הסבירו.
8. במה שונות ובמה דומות מערכות ההגנה של צמחים לאלה של בעלי חיים?
9. בניסוי לבדיקת ההשפעה של שמנים אתריים על התפתחות פטריית הפוזריום, גידלו את הפטריות בצלחות פטרי, כאשר בכול צלחת היה שמן אתרי אחר. את השמנים הפיקו מארבעה צמחים שונים. תוצאות הניסוי מוצגות באיור ז-15.



איור ז-15: השפעת שמנים אתריים של צמחים שונים על התפתחות פטריית הפוזריום

- א. מה תפקידה של צלחת א? הסבירו.
- ב. תארו את תוצאות הניסוי והסבירו אותן.
- ג. דרגו את הצמחים שמהם הופקו השמנים, לפי מידת הרעילות שלהם לפטריית הפוזריום.
- ד. איזה יישום חקלאי אפשר לפתח על סמך תוצאות הניסוי הזה?
10. צמחי טבק משני טיפוסים (עמידים ורגישים) הודבקו בנגיף מוזאיקת הטבק (TMV). בצמחים העמידים הופיעו על פני העלה המודבק בהרות, שהם אזורים של תאים מתים. בצמחים הרגישים לא נראתה על פני העלה המודבק כל עדות להימצאות הנגיף (איור ז-16). לאחר כמה ימים הופיעו תסמיני המחלה על העלים הצעירים של הצמח הרגיש. על העלים הופיעו פיגמנטים, בפיזור לא אחיד, שיצר מראה של מוזאיקה. לעומת זאת, בעלים הצעירים של הצמח העמיד לא חל כל שינוי.



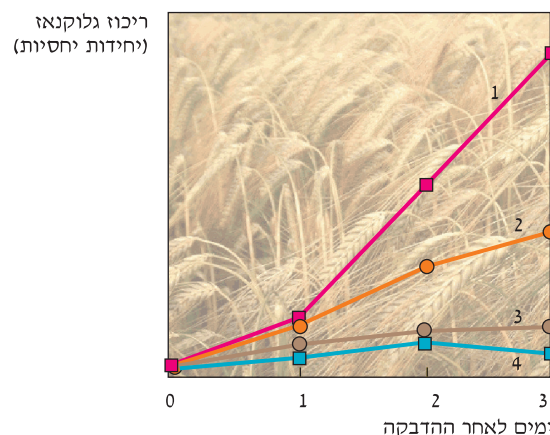
צמח עמיד

צמח רגיש

איור ז-16: צמחי טבק שהודבקו בנגיף מוזאיקת הטבק (TMV)

- א. תארו את התגובה שהתפתחה בצמחים העמידים בעקבות פגיעת הנגיף. כיצד נקראת התגובה הזאת?
- ב. תארו את התהליכים שהתרחשו בצמחים הרגישים בעקבות פגיעת הנגיף.
- ג. האם ייתכן שבצמחים העמידים פעלו גם תהליכים אחרים, ואם כן, מה הם אותם תהליכים?
- ד. ימים אחדים לאחר ההדבקה הראשונה, הדביקו בנגיף עלה אחר של הצמח העמיד. ההדבקה לא גרמה לפגיעה כלשהי בעלה. הסבירו מדוע.

11. חוקרים הדביקו עלי שעורה מזן רגיש ועלי שעורה מזן עמיד בפטרייה שגורמת קימחון בשעורה. במשך 3 ימים, לאחר ההדבקה, נבדקה רמת האנזים גלוקנאז בעלים שהודבקו ובעלי ביקורת שלא הודבקו בפטרייה. את תוצאות הניסוי ניתן לראות בעקומים באיור ז-17.



איור ז-17: שינויים בריכוז גלוקנאז בעלים רגישים ובעלים עמידים של שעורה, לאחר הדבקה בפטריית הקימחון

א. איזה מבין העקומים (1 ו-2) מתאר את הצמח העמיד ואיזה מהם מתאר את הצמח הרגיש? הסבירו.

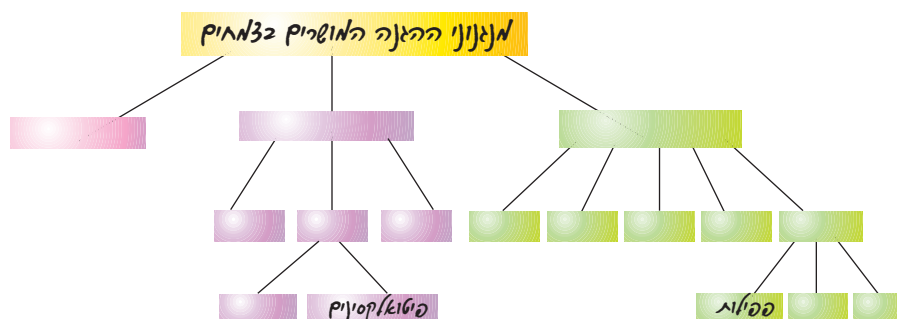
ב. מה מתארים העקומים 3 ו-4? הסבירו.

ג. מה גרם לעלייה בריכוז הגלוקנאז בעלי השעורה?

ד. כיצד הגלוקנאז מגן על הצמח בפני הפטרייה?

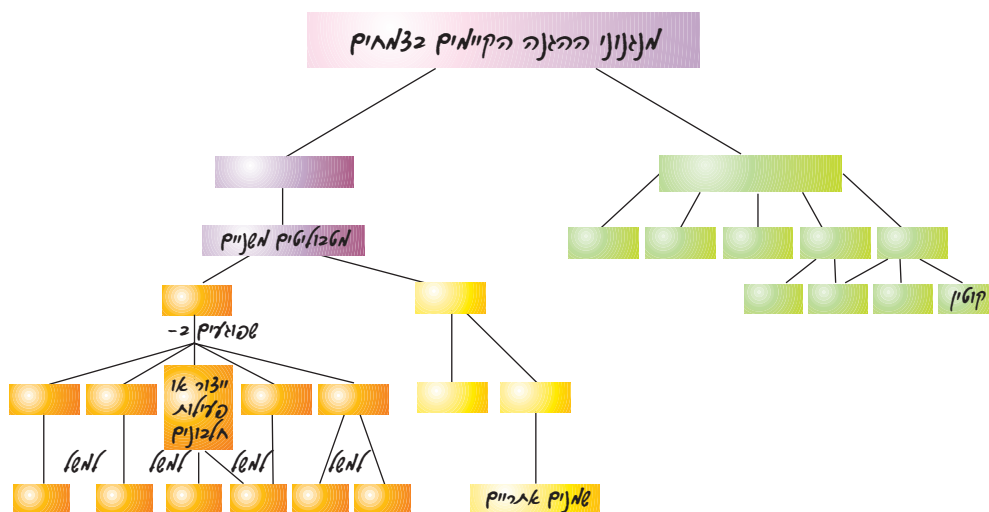
ה. האם העמידות לפטריית הקימחון בשעורה היא תכונה קיימת או נרכשת? הסבירו.

12. העתיקו את מפת המושגים שמתארת את מנגנוני ההגנה המושרים בצמחים (איור ז-18) והשלימו בה את המושגים החסרים. היעזרו ברשימת המושגים הזאת: עמידות כללית נרכשת; רדיקלים חופשיים; טילוזות; ליגנין; רגישות יתר; שכבת ניתוק; תאית; מנגנונים מבניים; חלבוני PR; חומרים בדופנות התאים; שרף; מנגנונים כימיים; תאי שעם; חומרים אנטימיקרוביאליים.



איור ז-18: מנגנוני ההגנה המושהים בצמח

13. העתיקו את מפת המושגים שמתארת את מנגנוני ההגנה הקיימים בצמחים (איור ז-19) והשלימו בה את המושגים החסרים. היעזרו ברשימת המושגים הזאת: טנינים; מנגנונים כימיים; שערות; מערכת העיכול; חומרים שדוחים מזיקים ופתוגנים; אלקלואידים; חומצות אמיניות; נשימה תאית; חומרי טעם; הולכה עצבית; מעט פתחים טבעיים; קוצים; שעווה; חומרי ריח; רביית חרקים; תרכובות ציאנוגניות; חומרים דמויי הורמון הנעורים; רעלנים למזיקים ופתוגנים; קוטיקולה; חומרים בדופנות התאים; מנגנונים מבניים; תאית; חלבונים; ליגנין.



איור ז-19: מנגנוני ההגנה הקיימים בצמח

הקניית עמידות בצמח

ההפסדים שנגרמים לצמחי חקלאות ממזיקים ומפתוגנים הם בסדר גודל של 10-20% מכלל התוצרת החקלאית. המזיקים והפתוגנים יכולים לפגוע ביבול בעת הגידול וכן בהובלה ובאחסון. בארצות מפותחות, משמעותה של הפגיעה ביבול היא הפסדים כלכליים למגדלים. בארצות מתפתחות, במקרים רבים, משמעותה של הפגיעה ביבול היא רעב לאוכלוסיה. אחת הסיבות, ואולי החשובה ביותר, לנזק הרב שנגרם לצמחי חקלאות ממזיקים ומפתוגנים היא הפרת שיווי המשקל הביולוגי על ידי האדם, במהלך פיתוח החקלאות; בתהליך בררת צמחי התרבות לחקלאות, האדם בחר מיני צמחים שיש בהם מעט חומרים רעילים, כדי שהיבול שנאכל לא יפגע בבני האדם או בבעלי החיים במשק, שניזונים מאותם צמחים. לכן, בצמחי החקלאות שנבחרו וטופחו יש יחסית מעט מנגנוני הגנה כימיים והם רגישים יחסית למחלות.

בתהליך בררת צמחי התרבות טופחו זנים עתירי יבול. היום, בחקלאות המודרנית, מגדלים החקלאים רק את הזנים האלה, וכל זן נזרע על פני שטחים נרחבים. בשיטה הזאת, משיגים החקלאים יבולים גבוהים. אולם, מכיוון שבשדה אחד כל הצמחים זהים, מזיק או פתוגן שתוקף צמח אחד יכול להתפשט במהרה על פני כל השטח (איור ז-20), ואובדן היבול במקרה כזה הוא גדול. אם באותו אזור, התוקף מתפשט גם לשדות אחרים שבהם מגדלים אותו צמח, אובדן היבול עלול להמיט אסון על אוכלוסיות שלמות של בני אדם, שהזנתן מבוססת על אותו הגידול. לעומת השדה החקלאי, בשדה של צמחי בר גדלים זה לצד זה צמחים בעלי תכונות שונות מאוד, ולכן התפשטותו של המזיק היא איטית.



איור ז-20: שדה תירס שנפגע מנגיף HPV
(High Plains Virus)

פטריית הכימשון גרמה למותם של חצי מיליון מתושבי אירלנד

אחד האסונות המפורסמים שנגרמו על ידי פתוגנים של צמחים, כתוצאה משיטות הגידול המודרניות, התחולל באירלנד בשנים 1846-1849. עד לשנת 1846, הגידול העיקרי באירלנד היה תפוחי אדמה, והוא היה מקור המחיה של מרבית התושבים והמזון העיקרי. בשנת 1846 פרצה בשדות תפוחי האדמה באירלנד מחלת הכימשון (שנגרמת על ידי פטרייה), והיא חיסלה את רוב יבול תפוחי האדמה. התוצאה הייתה רעב המוני שגרם למותם של כחצי מיליון בני אדם ולהגירה של למעלה ממיליון איש אל מחוץ לגבולות המדינה.



גורם אחר בחקלאות המודרנית שמגביר את נזקי הפתוגנים הוא השימוש בדשנים כימיים. השימוש המוגבר בדשנים מגדיל את עלי הצמח ואת צפיפותם, וצפיפות העלים מגבירה את הלחות בסביבת הצמח. כך נוצרים תנאים נוחים להתפתחות אורגניזמים שמעדיפים לחות, כמו פטריות. יש גם מקרים שבהם כמות גדולה מדי של חומרי דישון (למשל, חנקן) מגבירים את הרגישות של הצמחים לפתוגנים. גם השימוש בחומרי הדברה מגדיל בעקיפין את הנזקים שנגרמים על ידי מזיקים מסוימים; חומרי ההדברה פוגעים אמנם ביצורים מזיקים, אבל הם פוגעים גם ביצורים מועילים, שלפעמים הם האויבים הטבעיים של המזיקים. השמדת מינים רבים של עופות דורסים ושל טורפים קטנים הקטינה מאוד את אוכלוסיית בעלי החיים שניזונים בעיקר מאותם חרקים ומכרסמים שפוגעים ביבוליו של האדם.

הפרת שיווי המשקל הביולוגי, בין הצמחים לבין המזיקים שלהם, התרחשה גם משום שבני אדם העבירו יצורים מזיקים רבים לאזורי מחייה חדשים, מבלי שידעו על כך או מפני שלא נזהרו. כך, כנראה, הגיע לארצנו זבוב הפירות הים-תיכוני, שמקורו באפריקה, והוא כיום האויב העיקרי של הפירות בישראל, וכך הגיע גם זחל העש נובר התירס שמקורו באירופה, והוא המזיק הקשה ביותר של התירס בישראל.

המזיקים והפתוגנים גורמים נזק כלכלי למגדלים משום שהם מורידים את כמות היבול ופוגעים באיכותו וכן בגלל ההוצאות לצורכי הדברה. מדי שנה מוציאים החקלאים בעולם יותר מ-7.8 ביליון דולר על הדברה כימית של מזיקים ופתוגנים. חומרי ההדברה הכימית הם חומרים שמזהמים את הקרקע, את האוויר ואת מי השתייה. השאריות הרעילות שממשיכות לפעול ביבול לאחר הטיפול, גם הן עלולות להזיק לבני האדם ולבעלי החיים שניזונים מן היבולים האלה. יתרה מזו, בגלל השימוש המרובה בחומרי ההדברה, התפתחו גזעים של מזיקים ופתוגנים עמידים, וקשה להדביר אותם. אם נצליח לשפר את יכולתם של הצמחים להגן על עצמם, הרווח יהיה עצום. לא רק שנקבל יבולים גדולים יותר (עד 20% יותר מאלה של היום), אלא שנוכל לצמצם את השימוש בחומרים כימיים רעילים. צמצום השימוש בחומרי הדברה יחסוך כסף רב ויאפשר להפחית את סכנת הזיהום הסביבתי וזיהום היבול. אחת הדרכים לצמצם את השימוש בהדברה כימית היא להקנות עמידות לצמחים. את העמידות ניתן להקנות באמצעות טיפולים חיצוניים, או בשיטות גנטיות.

הקניית עמידות באמצעות טיפול חיצוני

הקניית עמידות כללית

חוקרים לקחו חומרים שנוצרים בצמחים באופן טבעי, כחלק ממנגנון העמידות הכללית הנרכשת, ובאמצעותם טיפלו בצמחים. הטיפול החיצוני הזה השרה בצמחים עמידות כללית. ההצלחה הזאת עוררה את התקווה שבעתיד יהיה ניתן להגביר את העמידות של צמחים נגד הפתוגנים שלהם, באמצעות טיפול חיצוני. יש גם אפשרות להקנות עמידות כללית לצמחים על ידי הדבקתם במיקרואורגניזמים שמעוררים בצמח את מנגנון העמידות הכללית הנרכשת. אולם, עד היום לא הצליחו לפתח שימוש מסחרי יעיל בשיטות האלה.

הקניית עמידות ייחודית

יש שיטה אחרת להקנות עמידות לצמחים והיא כבר מיושמת בכמה מיני צמחים. בשיטה הזאת מדביקים צמח בגזע מתון של נגיף ועל ידי כך מונעים את הדבקתו בגזעים אלימים של אותו הנגיף. בשיטה זאת הצליחו בארץ לחסן צמחים ממשפחת הדילועיים (אבטיח, קישוא ומלון) בפני גזע אלים של הנגיף ZYMV, שגורם למחלת המוזיאקה הצהובה בדילועיים (איורים ז-21 ו-22). ואולם, ה"חיסון" שמתקבל בשיטה הזאת הוא בעל ייחודיות גבוהה, והוא מגן על הצמחים אך ורק מהדבקה באותו נגיף ולא בנגיפים אחרים.



איור ז-21: "חיסון" צמחי קישוא במשתלה על ידי הדבקה של הצמחים בנגיפי ZYMV מתונים

הקניית עמידות בשיטות גנטיות

פיתוח זנים עמידים באמצעות הכלאות

את תכונת העמידות ניתן להקנות לצמחים בשיטות גנטיות מסורתיות, באמצעות השבחה וטיפוח. מאחר שהעמידות היא תכונה גנטית, ניתן לפתח צמחים עמידים באמצעות הכלאות, שבהן הגן לעמידות עובר מצמח עמיד לצמח רגיש. בישראל ידועים מיני בר של חיטה ושעורה, שהם עמידים למחלות הדגניים הנפוצות - הקימחון והחילדון. הכלאה של זנים תרבותיים משובחים במיני בר עמידים עשויה להוליד צירופים חדשים שהעמידות תהיה אחת מתכונותיהם. מן הכלאות של זנים בעלי תכונות שונות נוצרים צירופים רבים, ומתוכם בוררים את הצירוף בעל התכונות הרצויות. התהליך של הכלאת זנים ובחירת המתאימים הוא תהליך ארוך (בדרך כלל, 10-12 שנים). עם זאת, ידוע שגם המזיקים והפתוגנים מפתחים



איור ז-22: צמחי קישוא שחוסנו בפני מחלת המוזיאקה הצהובה (משמאל) וצמחי קישוא שלא חוסנו ונדבקו בנגיף ZYMV אליים (מימין)

אמצעים נגד הזנים החדשים של הצמחים ו"שוברים" את עמידותם. לכן, כל הזמן דואגים לפתח זנים עמידים חדשים שיחליפו, מדי כמה שנים, את הזנים שאינם עמידים עוד.

פיתוח צמחים עמידים באמצעות הרכבות

דרך אחרת להקנות עמידות לצמחים היא באמצעות הרכבות. **בהרכבה** משלבים בין שני שתילים: שתיל אחד (הכנה) "תורס" את החלק התחתון של הצמח, כלומר את מערכת השורשים, והשתיל האחר (הרוכב) "תורס" את החלק העליון של הצמח, כלומר את הנוף. כך ניתן לשלב כנה בעלת עמידות למחלות קרקע, עם רוכב בעל תכונות נוף רצויות, למשל: כמות פרי ואיכות פרי. ההרכבה היא תהליך פשוט בהרבה מתהליך הטיפוח, והיא דורשת פחות זמן. שיטת ההרכבות נפוצה בעיקר בעצי פרי, אך כיום מנסים להשתמש בשיטה הזאת גם בגידולים חד-שנתיים, כגון: אבטיחים, מלונים, עגבניות ומלפפונים.

פיתוח זנים עמידים באמצעות הנדסה גנטית

בראשית שנות ה-70 של המאה ה-20 פותחה ההנדסה הגנטית, שמאפשרת העברה של גנים מיצור אחד ליצור אחר. לפיתוח זנים באמצעות ההנדסה הגנטית יש כמה יתרונות על פני הטיפוח באמצעות ההשבחה המסורתית: (א) בהשבחה המסורתית מכליאים שני צמחים, וכתוצאה מכך כל הגנום שלהם מתערבב, ומשתנות גם תכונות שלא רוצים לשנות. בהנדסה גנטית, לעומת זאת, מעבירים רק את הגנים שאחראיים לתכונה הרצויה ולכן השינויים הרבה יותר מבוקרים; (ב) בהנדסה גנטית אפשר לקבל את התוצר הרצוי בזמן קצר, יחסית, בהשוואה לשנים הרבות הדרושות לשינוי תכונה בהשבחה המסורתית; (ג) בהנדסה גנטית אפשר להעביר תכונות גם ממנים רחוקים, ואפילו מחיידקים ומבעלי חיים, ואילו בהכלאות ניתן להעביר תכונות רק בין מיני צמחים קרובים שאפשר להכליא ביניהם.

בהנדסה גנטית אפשר להקנות עמידות לצמחים על ידי החדרה של גנים שאחראיים לייצור רעלנים ואנזימים שפוגעים במזיקים ובפתוגנים, למשל: רעלנים שפוגעים בפירוק חלבונים במערכת העיכול של חרקים, רעלנים שפוגעים בייצור החלבונים בפטריות, או אנזימים שפוגעים בדפנות של חיידקים. המקור של הגנים האלה יכול להיות בצמחים עמידים או באורגניזמים אחרים. כדי להקנות עמידות נגד נגיפים, בדרך כלל מחדירים אל תוך הגנום הצמחי גנים שמקורם בנגיפים. תוצרי הגנים המוחדרים פוגעים בשלבים מסוימים במחזור ההדבקה של הנגיף, למשל: בשכפול או בהפצה שלו. עד היום הצליחו להקנות עמידות באמצעות הנדסה גנטית, בעיקר נגד נגיפים, במספר רב של מקרים (איור ז-23). צמחים מהונדסים, שהם עמידים למזיקים ולפתוגנים שונים, מצויים בשלבים שונים של בדיקה ואחדים כבר נמצאים בשוק.



צמחים לא מהונדסים
שניזוקו מן הנגיף

צמח מהונדס
שלא ניזוק מן הנגיף

איור ז-23: צמחי טבק מהונדסים עמידים לנגיף
PVY וצמחי טבק רגישים לנגיף

צמחים מייצרים רעל חיידקי נגד חרקים



הדוגמה הנפוצה והמוצלחת ביותר להקניית עמידות לצמחים, באמצעות הנדסה גנטית היא השימוש בגנים לרעלנים מחיידק שנקרא *בצילוס* (*Bacillus thuringiensis* = Bt). באופן טבעי, הבצילוס מייצר חלבונים רעלנים שפוגעים בחרקים. החלבונים האלה משמשים מאז 1948 כחומרי ריסוס להדברה של מזיקים מסוימים. כל אחד מהרעלנים האלה פעיל רק נגד מספר קטן של חרקים, ולכן השימוש בהם אינו מסכן חרקים אחרים, ולא חיות או בני אדם. ואולם, אורך החיים של רעלני הבצילוס קצר, ולכן נדרשים ריסוסים חוזרים במהלך תקופת הגידול. חומרי הריסוס האלה גם אינם יעילים נגד חרקים שמצויים בתוך הצמח, מתחת לעלים או בתוך האדמה. לעומת זאת, באמצעות ההנדסה הגנטית אפשר להחדיר לצמחים את הגנים לרעלנים מהחיידק. צמחים מהונדסים כאלה מייצרים בעצמם את רעלני הבצילוס, שפוגעים בחרקים המזיקים להם. צמחי תירס, תפוחי אדמה וכותנה מהונדסים, שמייצרים אחד מרעלני הבצילוס, היו בין הצמחים המהונדסים הראשונים שהגיעו לשוק באמריקה (החל מ-1995) והתקבלו לשימוש על ידי מגדלים רבים. בשנת 2001, למשל, 20% מכלל גידולי התירס בצפון אמריקה היו גידולים מהונדסים כאלה, ובשנת 2003, 60% מן הכותנה שגודלה בסין הייתה כותנה מהונדסת כזאת.

ההתנגדות להקניית עמידות בהנדסה גנטית

למרות היתרונות הרבים של ההנדסה הגנטית בצמחים, ולמרות התועלת המרובה שהאנושות יכולה להפיק ממנה, החדרת מוצרים מהונדסים לשוק מעוררת התנגדות רבה. הטיעון המרכזי של המתנגדים להפצה של מוצרים מהונדסים הוא החשש שחשיפת הסביבה למינים חדשים, מהונדסים גנטית, תגרום להפרת שיווי המשקל הקיים בטבע, באופן שאינו ניתן לצפייה מראש. המתנגדים חוששים שגנים זרים שהוחדרו לגידולים מהונדסים, יעברו לצמחי בר ויקנו להם תכונות חדשות, למשל, עמידות לחרקים מזיקים. בדרך הזאת, יתפתחו "עשבי-על" שיתפשטו במהירות, וההתמודדות עם העשבים האלה תהיה קשה ויקרה. המתנגדים גם חוששים שהגידול המהונדס עצמו יתרבה בקצב בלתי מרוסן ויהפוך לעשב רע שפוגע באוכלוסיות צמחים אחרות מסביבו. חשש נוסף שהמתנגדים מציגים הוא שזנים שמכילים גן הגנה מפני מזיק חקלאי, יובילו בעקיפין להתרבות של חרקים שיהיו עמידים נגד אותו מנגנון הגנה. כך יתפתחו "חרקי על" שיפגעו באוכלוסיות של חרקים אחרים וההדברה

שלהם תהיה קשה עוד יותר. נוסף לכל אלה, מעלים המתנגדים גם את האפשרות שרעלן שמיוצר בצמח מהונדס, ואמור לפגוע רק בחרקים מזיקים, יפגע גם בחרקים אחרים. בתגובה לכל הטענות האלה, טוענים התומכים בגידולים מהונדסים שהחקלאות מעצם הגדרתה פוגעת בשיווי המשקל הטבעי של הסביבה, ודווקא השינויים שההנדסה הגנטית מציעה יכולים להפחית את הנזק הזה. הם טוענים שרוב הפעולות של האדם המודרני כרוכות בהפרה מתמדת של האיזון בטבע, ולמעשה ההנדסה הגנטית אינה שונה מבחינה זו משימוש בחומרי הדברה, מכריתת יערות, מסלילת כבישים ומטיפוח בגישה המסורתית של הכלאות. התומכים טוענים למשל, שהחשש שגידול חקלאי יהפוך לעשב רע אינו מוצדק כלל; כדי שדבר כזה יקרה דרוש שינוי בתכונות רבות, ולא סביר ששינוי בגן בודד יוכל לגרום תהליך כזה. לגבי חששות אחרים, טוענים המצדדים שאפשר להקטין את הסיכויים להתרחשותם; אפשר למנוע העברה של תכונות מהונדסות לצמחי בר, אם מוודאים שלצמח המהונדס אין קרובי משפחה בין צמחי הבר, והוא אינו יכול להכליא אתם באופן טבעי. אפשר גם להקטין את הסיכוי שיתפתחו חרקים עמידים למנגנון ההגנה המהונדס על ידי יצירה של צמח מהונדס שיש לו כמה מנגנוני הגנה שונים.

המתנגדים לשימוש במוצרי מזון מהונדסים טוענים שהמוצרים האלה מסכנים את בריאות הציבור. הם מעלים את החשש שבמזון המהונדס תהיה עלייה ברמה של רעלנים טבעיים או שיווצרו חומרים בלתי צפויים שעלולים לגרום אלרגיות. לעומתם, טוענים המצדדים בהנדסה גנטית שעד היום שום בדיקה מדעית אמינה לא הוכיחה שקיימת רעילות כלשהי באחד המזונות המהונדסים. נהפוך הוא, השימוש בצמחים מהונדסים, עמידים למזיקים ופתוגנים, מפחית את השימוש בחומרי הדברה שמסכנים את הבריאות גם של המגדלים וגם של הצרכנים.

המלחמה במזיקים ובפתוגנים בחקלאות בת-קיימא

יש עוד דרכים לצמצם את הפגיעה של פתוגנים ומזיקים בצמחים ולהפחית את השימוש בחומרי הדברה כימיים. הדרכים האלה מיושמות בגישה החקלאית שנקראת חקלאות בת-קיימא. בחקלאות בת-קיימא מנסים לשמר את משאבי הסביבה, תוך שמירה על האיזון בין צריכת המשאבים לבין קצב התחדשותם. בגישה הזאת משתדלים לבחור גידולים שמתאימים לתנאי האזור: לסוג הקרקע, לאקלים, לאיכות המים ולזמינותם. נוסף לכך, מקפידים על מחזור, צמצום זיהום הסביבה וצמצום הפגיעה בבעלי החיים למיניהם, בקרקע, באוויר ובמים.



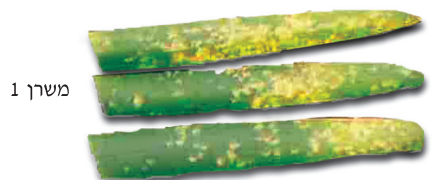
אחד העקרונות החשובים בחקלאות בת-קיימא הוא צמצום השימוש בחומרי הדברה כימיים. בחקלאות בת-קיימא משלבים חלופות שונות, כגון: הדברה ביולוגית, שבה משתמשים באויבים הטבעיים של המזיקים והפתוגנים; הדברה אורגנית, שבה משתמשים במיצויים צמחיים כחומרי הדברה; איסוף ידני של המזיקים; הקמת מחסומים פיסיים שמונעים מן המזיקים להגיע לצמחים והעמדת מלכודות. בחקלאות בת-קיימא מקפידים גם על טיפולים חקלאיים שמצמצמים באופן עקיף את הפגיעה של פתוגנים ומזיקים בצמחים, למשל: מצמצמים את השימוש בדשנים כימיים, מחליפים את הגידול מעונה לעונה ובוחרים שיטת השקיה מתאימה.

סיכום

1. מזיקים ופתוגנים בגידולים חקלאיים מקטינים את הרווח הכלכלי, בגלל אובדן יבול ובגלל ההוצאות הכרוכות בהדברה.
2. צמחי החקלאות רגישים יותר למזיקים ולפתוגנים, בהשוואה לצמחי הבר, בגלל פיתוח של טכנולוגיות חקלאיות, כמו: (א) טיפוח זנים שיש בהם מעט חומרים רעילים וגידול זנים אחידים על פני שטחים נרחבים; (ב) שימוש בדשנים כימיים שמגבירים, לעתים, את רגישות הצמחים לפתוגנים ומעלים את הצפיפות בשדה וכך מקילים על הפצת הפתוגנים והמזיקים; (ג) שימוש בחומרי הדברה שפוגעים באויבים הטבעיים של מזיקי החקלאות.
3. השיטה המקובלת ביותר במלחמה נגד פתוגנים ומזיקים היא ההדברה הכימית. ואולם, ההדברה הכימית יקרה וגם פוגעת באדם, בבעלי החיים ובסביבה. כדי להקטין את הנזקים האלה מחפשים אמצעים להגביר את העמידות של הצמחים בפני פתוגנים ומזיקים.
4. במקרים מסוימים, ניתן להקנות לצמחים עמידות נגד זנים אלימים של נגיפים על ידי הדבקה בזן מתון של אותו נגיף.
5. ניסיונות מסחריים להקנות עמידות לצמחים על ידי טיפול חיצוני, בחומרים שמעוררים בצמח תגובה של עמידות כללית נרכשת, לא עלו יפה עד כה.
6. ניתן להקנות עמידות לצמחים בשיטות גנטיות, על ידי העברה של תכונת העמידות מזן עמיד לזן רגיש, באמצעות הכלאות.
7. ניתן לשלב את תכונת העמידות של זן אחד עם תכונות רצויות אחרות של זן אחר באמצעות הרכבות. בשיטה הזאת, הכנה בדרך כלל מקנה עמידות נגד פתוגנים בקרקע.

8. שיטה גנטית אחרת להקניית עמידות היא ההנדסה הגנטית. באמצעות הנדסה גנטית ניתן להעביר גן לעמידות מזן עמיד לזן רגיש, ולהקנות עמידות בזמן קצר ובאופן מבוקר. ההנדסה הגנטית מאפשרת גם להעביר לצמחים גנים לעמידות מחיידקים או מכל אורגניזם אחר.

9. השימוש בחומר מהונדס גנטית עדיין שנוי במחלוקת, אף על פי שלא הוכח כי שימוש כזה יכול לגרום נזק כלשהו.



איור ז-24: עלי שעורה שטופלו במשרנים שונים לפני הדבקה בפטריית הקימחון

1. כוחם הרב של החרקים כמזיקים התגלה רק לאחר שהתפתחה החקלאות המודרנית. הסבירו מדוע.

2. הסבירו את הבעייתיות בשימוש בחומרי הדברה כימיים במלחמה נגד מזיקים ופתוגנים.

3. בחקלאות בת-קיימא מקובל לגדל באותה קרקע, גידול אחר בכול עונה, ומקובל לצמצם את השימוש בדשנים כימיים. כיצד יכולות הפעולות האלה לצמצם את הפגיעה של מזיקים ופתוגנים בצמחים?

4. מה הם היתרונות של הגדלת העמידות של צמחים למזיקים ולמחלות על פני הדברת המזיקים והפתוגנים?

5. כיצד ניתן להגדיל את העמידות של צמחים למחלות ולמזיקים באמצעות טיפול חיצוני?

6. מה הם היתרונות ומה הם החסרונות של הקניית עמידות לצמחים בשיטות של הנדסה גנטית בהשוואה להקניית עמידות באמצעות הכלאות?

7. איזה מן האמצעים להקניית עמידות לצמחים דומה ביותר לחיסון בעלי חיים? הסבירו.

8. עלים מנותקים של שעורה רוססו בשלושה משרנים שונים, שהופקו משמרי אפייה (פטריות). 24 שעות לאחר הריסוס, הודבקו העלים בפטרייה שגורמת קימחון בשעורה.

באיור ז-24 נראים עלי הביקורת שלא רוססו במשך לפני ההדבקה, בהשוואה ל-3 קבוצות של עלים שרוססו לפני ההדבקה בשלושה חומרים שונים.

א. תארו והסבירו את תוצאות הניסוי.

ב. מה הייתה מטרת הניסוי?

ג. באיזה סוג של הקניית עמידות השתמשו בניסוי הזה? הסבירו.

ד. מה הן מסקנות הניסוי?

ה. מהו השימוש החקלאי שניתן ליישם על סמך מסקנות הניסוי?

9. קישוא מזן ארליקה הוא הזן הנפוץ והמקובל ביותר בארץ. הזן הזה רגיש למחלת המוזאיקה הצהובה של הקישוא, מחלה שנגרמת על ידי הנגיף ZYMV. הנזק העיקרי של המחלה הוא עיוות הפירות עד כדי כך שאינם ראויים לשיווק. הנזק יכול לגרום לאובדן מוחלט של היבול. בניסוי שנערך במשתלה בחבל הבשור, טופלו שתילי קישואים בנגיף מתון של ZYMV, כשבוע לפני השתילה בשדה. כחודשיים לאחר השתילה, נבדקה חומרת מחלת המוזאיקה הצהובה בצמחים. במהלך הקטיף נשקלו הקישואים ונבדקה מידת הנגיעות שלהם. התוצאות מובאות בטבלה ז-1.

טבלה ז-1: השפעת הטיפול בנגיף מתון לפני השתילה על צמחי קישוא בשדה

קישוא מטופל בנגיף מתון	קישוא לא מטופל	
11%	92%	צמחים חולים
4%	19%	סימני מחלה על הקישואים
6,432 ק"ג	2,842 ק"ג	יבול משווק

- באיזו שיטה של הקניית עמידות השתמשו בניסוי?
- תארו והסבירו את תוצאות הניסוי.
- האם לפי התוצאות ניתן להמליץ על "חיסון" הקישואים בשיטה הזאת? הסבירו.
- מה הם יתרונות השיטה בהשוואה לשיטות אחרות שנהוגות במלחמה נגד פתוגנים?



1. את יישום המחשב העגבנייה לומדת להתגונן ניתן למצוא באתר

http://www.amalnet.k12.il/sites/genetic/frm_activities.htm

ביישום יש הזמנה לחקר בנושא הקניית עמידות לעגבנייה נגד פטריית הפוסאריום באמצעות הנדסה גנטית.

2. את יישום המחשב צמחים בטוחים ניתן למצוא באתר

http://www.amalnet.k12.il/sites/genetic/frm_activities.htm

ביישום יש פעילות מקוונת שדנה בהתנגדויות להנדסה גנטית בצמחים.

מילון מונחים

HIV (human immunodeficiency virus) – נגיף הגורם לתסמונת הכשל החיסוני הנרכש - (ראו איידס)

ADH (antidiuretic hormone) – הורמון מעכב השתנה - הורמון המיוצר בהיפותלמוס; מגביר את הספיגה החוזרת של מים מהנפרונים שבכליה אל הדם, וכך מקטין את נפח השתן.

ADP (adenosine di-phosphate) – אדנוזין די-פוספט - מולקולה המעורבת בתגובות כימיות תאיות שבהן מועברת אנרגיה כימית מתרכובת לתרכובת; ADP מתקבל כאשר מולקולת ATP מגיבה עם מולקולת מים ומשתחררת קבוצה אחת של זרחה מן ה-ATP.

ATP (adenosine tri-phosphate) – אדנוזין טרי-פוספט - מולקולה המשמשת כחומר מתווך בין תהליכים משחררי אנרגיה לתהליכים צורכי אנרגיה בתאים; "מטבע האנרגיה" העיקרי של התאים; המולקולה מורכבת מאדנין (בסיס של חומצת גרעין), מריבוז (סוכר בן 5 פחמנים) ומשלוש קבוצות של זרחה (תרכובת שמכילה זרחה).

FAD (flavin adenine dinucleotide) – ראו נשאי מימנים.

MHC - ראו מולקולות תואם הרקמות.

NAD (nicotinamide adenine dinucleotide) – ראו נשאי מימנים.

אבובית הנפרון (tubule) – צינורית דקיקה מפותלת המהווה חלק מהנפרון שבכליה; אבובית הנפרון מחולקת לשלושה חלקים: אבובית מקורבת (שהיא החלק שקרוב לגופיף מלפיגי), לולאת הֶנְלֶה (שהיא החלק שצורתו כצורת האות U) והאבובית המרוחקת (שהיא החלק שמרוחק מגופיף מלפיגי).

אבובית מקורבת (proximal tubule) – ראו אבובית הנפרון.

אבובית מרוחקת (distal tubule) – ראו אבובית הנפרון.

אבי העורקים (aorta) – העורק הראשי במערכת ההובלה של החולייתנים; בעופות וביונקים, אבי העורקים יוצא מן החדר השמאלי של הלב ומוביל דם עשיר בחמצן אל כל חלקי הגוף, פרט לריאות.

אבנים בכליות (kidney stones) – התגבשות של מלחים שנמצאים בשתן ושוקעים בכליה או בדרכי השתן; אבנים בכליות יכולות לחסום את זרימת השתן, לפצוע את צינור השופכה ולגרום כאבים חדים.

אגן הכליה (renal pelvis) – אזור חלול בבסיס של כל כליה, שבו מתלכדים הצינורות המאספים מכל הנפרונים לצינור אחד מוביל שתן; מוביל השתן יוצא

מן הכליה אל שלפוחית השתן.

אדהזיה (adhesion) – כוח משיכה שפועל בין מולקולות של חומרים שונים; בצמחים, כוחות אדהזיה בין מולקולות המים למולקולות תאיות תורמים להעלאת המים בצינורות העצה.

אֶדְרִי (צֶדֶר) (pleura) – ציפוי שמקיף את הריאות מבחוץ ואת בית החזה מבפנים; מורכב משני קרומים וביניהם שכבת נוזל דקה.

אדרנלין (adrenalin) – הורמון שנוצר ומופרש על ידי בלוטת יותרת הכליה; האדרנלין גורם, בין היתר, להגברת קצב פעולת הלב ולעלייה בלחץ הדם.

אוורור ריאתי (lungs ventilation) – החלפה של אוויר בריאות כתוצאה מהתכווצות של שרירים בפעולות השאיפה והנשיפה; גם - נפח האוויר שנשאף לריאות בדקה.

אוטם שריר הלב (התקף לב) (myocardial infarction) – פגיעה או תמותה של אזור בשריר הלב, כתוצאה מחסימה מוחלטת של העורקים הכליליים המזינים את האזור והפסקת האספקה של הדם אליו; אוטם שריר הלב יכול לגרום להפרעות בקצב הלב, לדום לב ולמוות.

אוסמוזה (osmosis) – דיפוזיה של ממס, בדרך כלל מים, דרך קרום בררני (החדיר למולקולות הממס אך אינו חדיר למולקולות המומס) מן התמיסה המהולה (ריכוז מומס נמוך) אל התמיסה המרוכזת (ריכוז מומס גבוה).

אוסמוזה הפוכה (reverse osmosis) – שיטה להתפלת מים שבהם מומסים מלחים; על ידי הפעלת לחץ, המים עוברים דרך קרום בררני מתמיסה בעלת ריכוז מומסים גבוה (תמיסה מרוכזת) אל תמיסה בעלת ריכוז מומסים נמוך (תמיסה מהולה). הקרום הבררני מאפשר מעבר מים בלבד ואינו מאפשר מעבר מלחים.

אוקסימוגלובין (oxyhemoglobin) – המוגלובין מחומצן.

איברי לימפה (lymphoid organs) – איברים, כמו: טחול ותימוס, שמהווים חלק ממערכת הלימפה, למרות שלא זורם בהם נוזל לימפה; איברי הלימפה מעורבים בהתמיינות ובאגירה של תאי דם לבנים מסוג לימפוציטים.

אידיז - ראו התאדות.

איידס - AIDS - (Acquired Immune Deficiency Syndrome) תסמונת הכשל החיסוני הנרכש; מחלה הנגרמת על ידי נגיף HIV הפוגע באופן ייחודי בלימפוציטים T-עוזרים; הפגיעה משבשת באופן חמור את פעולתה של מערכת החיסון.

אימונוגלובולינים (immunoglobulins) – ראו נוגדנים.

אינטרלוקינים (interleukins) – חלבונים שמופרשים בעיקר מתאי מערכת

החיסון; משפיעים על גדילה, התמיינות והפעלה של תאים במערכת החיסון.
אינטרפרונים (interferons) – קבוצה של חומרים שנוצרים בתאים; אינטרפרונים אחדים נוצרים בתאים לאחר שחדרו אליהם נגיפים, והם פועלים למניעת הדבקת תאים נוספים בנגיף. אינטרפרונים אחרים נוצרים בתאי מערכת החיסון ויש להם השפעות שונות על פעולתה של המערכת.
אי-ספיקת כליות – ראו כשל כליתי כרוני.

אלבומין (albumin) – אחד מחלבוני הפלסמה העיקריים; נוצר בכבד ומהווה גורם חשוב בוויסות הלחץ האוסמוטי של הדם ובהובלה של חומצות שומן.
אלדוסטרון (aldosterone) – הורמון המופרש מקליפת יותרת הכליה; מווסת את ריכוז יוני הנתרן והאשלגן בדם.
אליצטורים – ראו משרנים.

אלמנטים טרכאריים (tracheary elements) – התאים העיקריים שמרכיבים את רקמת העצה בצמחים; המים והמומסים מובלים באלמנטים אלה.

אלמנטים של כברה (sieve elements) – התאים העיקריים ברקמת השיפה בצמחים; דרכם מובלים תוצרי הפוטוסינתזה. בשלבי ההתמיינות המאוחרים, רוב המרכיבים התוך-תאיים מאבדים את ארגונם או נעלמים.

אלקטרוקארדיוגרם (אק"ג) (electrocardiogram; ECG) – תרשים השינויים החשמליים הנוצרים בעת מעבר הדחף החשמלי במהלך מחזור פעולתו של הלב.

אלקלואידים (alkaloids) – מטבוליטים משניים בצמח שמכילים חנקן; רובם מרים וחלקם רעילים ומגנים על הצמח מפני מזיקים. הם פוגעים בהולכה העצבית של אוכלי צמחים.

אלרגיה (allergy) – תגובת יתר של מערכת החיסון לאלרגן; התגובה כוללת שחרור חומרים מסוימים מתוך תאי פִּיטוּס ומתאים בזופילים, ואלה גורמים לתופעות האלרגיות.

אלרגן (allergen) – אנטיגן הגורם לתגובה אלרגית.

אמוניה - NH_3 (ammonia) – חומר ההפרשה החנקני של רבים מן האורגניזמים שחיים בסביבה מימית; האמוניה נוצרת מפירוק חלבונים, והיא גז מסיס במים ורעילה מאוד לבעלי חיים.

אנדודרמיס (endodermis) – שכבת התאים הפנימית של הקליפה שמקיפה את הגליל המרכזי בשורשי הצמחים ובגבעולים של צמחים מסוימים; האנדודרמיס עשוי תאי פרנקימה צפופים בעלי דופן מעובה. מווסת את מעבר המים והיסודות המינרליים אל הגליל המרכזי.

אנדותרל (endothelium) – שכבה של תאי אפיתל המרפדת מבפנים את הלב, את כלי הדם ואת צינורות הלימפה.

אנדותרמים (endotherms) – בעלי חיים שבהם המקור העיקרי של החום הוא פנימי (חום מטבולי); לרוב בעלי החיים האנדותרמיים (עופות ויונקים) יש מנגנונים משוכללים לוויסות טמפרטורת הגוף, ולכן הם הומותרמיים.

אנטיגן (antigen) – כל גורם שמפעיל את מערכת החיסון להגיב נגדו; חידקים, נגיפים, תאים סרטניים ותאים של שתל זר הם דוגמאות לאנטיגנים.

אנטיגנים של תואם הרקמות – ראו מולקולות תואם הרקמות.

אנמיה (anemia) – מחלה שנגרמת ממחסור בברזל או בהמוגלובין בדם ומתבטאת לרוב במיעוט תאי דם אדומים; אנמיה פוגעת באספקת החמצן לרקמות בגוף.

אנמיה חרמשית (sickle cell anemia) – מחלה תורשתית שבה נוצר הומוגלובין פגום, ובשל כך תאי הדם האדומים מקבלים מבנה מעוות (חרמשי); תאי הדם המעוותים נהרסים והעברת החמצן לתאי הגוף נפגעת.

אסתמה (קצרת) (asthma) – הפרעה באווירורי הריאות כתוצאה מתגובה אלרגית; באה לידי ביטוי בהתקפים של קשיי נשימה, מלווים בצפופים ובשיעול, שנובעים מהיצרות הסימפונות.

אפידרמיס (epidermis) – שכבת התאים החיצונית ביותר, אצל צמחים בחלקי הצמח הבלתי מעוצים ואצל רוב בעלי החיים הרב-תאיים.

אפיתל (epithelium) – רקמה המצפה את כל המשטחים החיצוניים ומרפדת צינורות ומבנים חלולים בגופם של בעלי חיים. האפיתל מורכב משכבה אחת או משכבות אחדות של תאים צפופים.

אפקט בוהר (Bohr effect) – מנגנון ויסות בבעלי חיים, המפחית את הנטייה של ההמוגלובין לקשור חמצן כתגובה לעלייה בלחצו החלקי של CO_2 בדם.

אק"ג (ECG) – ראו אלקטרוקארדיוגרם.

אקוויפר (aquifer) – שכבת סלע תת-קרקעית רוויית מי-תהום, בעלת שיעור נקבוביות המאפשר זרימת מים בתוך הסלע אל מעיינות, אל קידוחים, אל נחלים ואל גופי מים אחרים.

אקטותרמים (ectotherms) – בעלי חיים שבהם חימום הגוף לטמפרטורה הרצויה תלוי במקורות חום חיצוניים (בדרך כלל השמש); לבעלי חיים אקטותרמיים (חסרי חוליות, דגים, דו-חיים וזוחלים) אין מנגנונים משוכללים לוויסות טמפרטורת הגוף, ולכן הם פויקילותרמיים.

אריטרופויטין (erythropoietin) – הורמון שנוצר בכליות והפרשתו מעודדת הבשלה של תאי דם אדומים; הפרשתו גוברת כאשר אספקת החמצן אינה מספקת.

בדיקת דם (blood test) – בדיקה מעבדתית לקביעת הרכבו של הדם, על מנת לקבל מידע על מצבו הבריאותי של הנבדק.

גלוקוז (glucose) – חד-סוכר בעל 6 פחמנים שנוסחתו $C_6H_{12}O_6$; מהווה מקור עיקרי של אנרגיה כימית בתהליך הנשימה התאית במרבית האורגניזמים. הוא מהווה חומר מוצא לתרכובות רבות ואבן בניין לפחמימות גדולות יותר, כגון: עמילן, גליקוגן ותאית.

גליל מרכזי (central cylinder) – החלק המרכזי בשורשים; הגליל המרכזי מורכב מעצה, משיפה ומפריציקל. לעתים, הוא מכיל גם ליבה וקרני ליבה.

גליקוליזה (glycolysis) – השלב הראשון בתהליך הנשימה התאית, שבו מתפרקת מולקולת גלוקוז לשתי מולקולות של חומצה פירובית; בגליקוליזה משתחררת אנרגיה ובאמצעותה מורכבות שתי מולקולות ATP. הגליקוליזה מתרחשת בציטופלסמה של תאי כל היצורים החיים.

גמציים (pits) – אזורים שנותרו בלתי מעובים בדופן תא של צמח שחלה בו התעבות משנית; הגמציים מהווים מעין גומות בדופן, והם מאפשרים מעבר של חומרים מתא לתא.

דום לב (cardiac arrest) – הפסקה פתאומית של פעולת הלב, שיכולה לגרום תוך דקות למוות; דום לב מתרחש, לעתים קרובות, כתוצאה מאוטם שריר הלב.

דופן התא (cell wall) – דופן חדיר נוקשה המקיף את קרום התא של תאי הצמחים, הפטריות ורוב החיידקים; הדופן מספק לתא תמיכה, מגן עליו ומקנה לו את צורתו.

דו-פסיגיים (dicotyledonae) – מחלקה במערכת צמחי הפרחים; הצמחים השייכים למחלקה זו מתאפיינים, בין היתר, בזרעים שעוברים הם בעלי שני פסיגים (עלים ראשוניים של העובר), ובעלים בעלי עורקים מרושתים.

דופק (pulse, heartbeat) – התכווצות והתרחבות קצבית של עורק כאשר הלב מזרים דרכו דם; הדופק תואם את קצב הלב.

דיאליזה (dialysis) – שיטה להפרדת מולקולות קטנות ממולקולות גדולות המצויות בתמיסה, באמצעות דיפוזיה; הדיאליזה משמשת ל"תיקון" הרכב הדם אצל חולים שסובלים מכשל כליתי סופי. התיקון נעשה באמצעות כליה מלאכותית.

דיאסטולה (diastole) – השלב בפעולת הלב, שבו שריר הלב נמצא במצב הרפיה והלב מתמלא דם שמגיע אליו מן הוורידים.

דיות (transpiration) – התאדות מים מעלים, מגבעולים ומחלקי צמח אחרים, בעיקר דרך פתחי הפיוניות; לשיעור הדיות יש השפעה רבה על מאזן המים של הצמח.

דיפוזיה (diffusion) – תנועה עצמית מתמדת של חלקיקים (מולקולות או יונים), שגורמת לפיזורם האחד במרחב; כיוון התנועה של כל חלקיק הוא אקראי, אך

בדיקת שתן כללית (urine analysis) – בדיקת הרכבו של החומרים שאמורים להיות בשתן, כדי לקבוע אם מצויים חומרים ותאים שלא אמורים להיות בשתן.

בועית מזון (food vacuole) – חלל מוקף קרום בציטופלסמה של תאים מסוימים, שבו מתפרקות המולקולות הגדולות של המזון למולקולות קטנות.

בועית מתכווצת (contractile vacuole) – חלל מוקף קרום בציטופלסמה של תאים מסוימים, שקולט עודפי מים ואחר כך מתכווץ ומסלק אותם דרך נקב בפני התא.

בזופילים (basophils) – תאי דם לבנים שמשוטטים בגוף ומעורבים בתהליך הדלקת ובתגובות האלרגיות; בציטופלסמה של התאים האלה יש בועיות המכילות חומרים (כמו היסטמינים) ואלה פעילים בדלקת ובתגובה לנוחות אלרגיים.

ביקרבונט (HCO_3^- bicarbonate); הצורה העיקרית שבה נישא CO_2 בדם. נוצר בתאי הדם האדומים מהתרכבות של CO_2 עם מים.

בלוטות זיעה (sweat glands) – ראו הזעה.

בלוטת יותרת הכליה (adrenal gland) – ראו יותרת הכליה.

בלען – ראו תא בלען.

בלענות (פגוציטוזה) (phagocytosis) – מנגנון בליעה של גופים זרים המתבצע על ידי הקפת הגוף הזר, סגירתו בבועית תוך-תאית ועיכולו בעזרת אנזימים; נייטרופילים ומקרופאגים הם תאים בעלי כושר בלענות.

בצקת (edema) – נפיחות ברקמה בגלל עודף נוזלים שמצטברים בנוזל הבין-תאי.

גופיץ מלפיגי (Malpighian corpuscle) – חלק של הנפרון המצוי בקליפת הכליה ומורכב מקופסית באומן ומפקעית; בגופיץ מלפיגי מתרחש השלב הראשון של ייצור השתן – סינון הדם.

גורמי קרישה (clotting factor) – ראו קרישת דם.

גיאופיטים (geophytes) – צמחים רב-שנתיים בעלי איברים תת-קרקעיים, שבהם נאגרים מזון ומים; גיאופיטים מתקיימים בקרקע כאיברים תת-קרקעיים ורק בעונה המתאימה מצמיחים עלים או איברי רבייה שצומחים מעל פני הקרקע.

גלובולינים (globulins) – קבוצת חלבונים שמצויים בדם; חלקם מתפקדים בהובלת חומרים ואחרים מתפקדים כנוגדנים (אימונוגלובולינים).

גלובין (globin) – חלבון המהווה יחד עם הפיגמנט הֶם את מולקולת ההמוגלובין.

התנועה נטו של כל החלקיקים היא במורד מפל הריכוז שלהם.

דלקת (inflammation) – תגובה מושרית בלתי ייחודית המתפתחת באזור חדירה של גורם זר לגוף, ומספקת הגנה ראשונית לאזור הפגוע; בתגובת הדלקת משתתפים תאים בלעניים, שבולעים ומעכלים את הגורמים הזרים. הדלקת מתאפיינת בכאב, אדמומיות, חום ונפיחות.

דם (blood) – רקמת חיבור נוזלית שמורכבת ממים, ממומסים, מתאים (תאי דם אדומים, תאי דם לבנים) ומחלקי תאים (טסיות דם); בגוף החולייתנים הדם מוביל גזים, חומרי מזון, חומרי פסולת, הורמונים וחומרי חיסון, ומסייע בשמירה על סביבה פנימית מתאימה לפעילות התאים.

דם ורידי (venous blood) – דם עשיר, יחסית, ב- CO_2 ועני, יחסית, בחמצן, גם אם הוא זורם בעורקים (כמו: עורקי הריאה).

דם עורקי (arterial blood) – דם עשיר, יחסית, בחמצן ועני, יחסית, ב- CO_2 , גם אם הוא זורם בוורידים (כמו: ורידי הריאה).

דמיעה (guttation) – הפרשה של מים מקצות העורקים בעלים, בהשפעת לחץ השורש.

דממת (המופיליה) (hemophilia) – מחלה תורשתית שנגרמת בגלל חסר בגורם הקרישה, פקטור VIII. המחלה באה לידי ביטוי בדימומים ממושכים מכל פצע, ובדימומים פנימיים.

הגנה ייחודית (specific defense) – הגנה בחולייתנים מפני חומרים ותאים זרים באמצעות נוגדנים ותאים המזהים באופן ייחודי את הזר ומנטרלים אותו.

הגנה לא-ייחודית (non specific defense) – הגנה בחולייתנים מפני חומרים ותאים זרים הפועלת בעיקר באמצעות בלענות, ללא זיהוי ייחודי.

הולכה (conduction) – העברת חום על ידי מגע ישיר בין חומרים; הולכת חום מן הגוף או אל הגוף מתרחשת כאשר בעל חיים בא במגע ישיר עם סביבתו - עם מוצק, עם נוזל או עם גז.

הומוציסטאין (homocysteine) – חומר שנוצר בגוף בתהליך הייצור של החומצה האמינית ציסטאין; רמה גבוהה שלו בדם מעודדת התפתחות טרשת עורקים.

הומותרמים (homeotherms) – בעלי חיים שיש להם מנגנון ויסות פיסיולוגי לשמירת טמפרטורת גוף קבועה, פחות או יותר, גם כאשר טמפרטורת הסביבה משתנה.

הומיאוסטזיס (homeostasis) – מצב פיסיולוגי שבו התנאים הפיסיקליים והכימיים של הסביבה הפנימית של יצור חי אינם חורגים מגבולות מסוימים, שמתאימים לפעילויות התאים.

הזעה (sweating) – תהליך איבוד נוזל מימי (זיעה) המורכב בעיקר מנתרן כלורי ומשתנן; הזיעה מופרשת מבלוטות זיעה (בלוטות הפרשה חיזונית) הנמצאות בעור של יונקים. להזעה יש חשיבות בסילוק פסולת חנקנית מהגוף והיא אמצעי לקירור הגוף.

הטרוטרמים (heterotherms) – בעלי חיים שטמפרטורת הגוף שלהם לעתים קבועה ולעתים היא נתונה לתנודות.

היסטמינים (histamines) – חומרים המצויים בתאים בזופילים ובתאי פיטוס ומשתחררים בעת התפרקותם; עם שחרורם למערכת הדם הם גורמים להתכווצות של שרירים חלקים, להתרחבות כלי דם, לדלקת מקומית ולתופעות אלרגיות.

היפותלמוס (hypothalamus) – מרכז בבסיס המוח בחולייתנים; ההיפותלמוס מפקח על פעילויות רבות, בעיקר כאלה המעורבות בהומיאוסטזיס, ביניהן: שמירה על טמפרטורת הגוף ושמירה על מאזן המים והמלחים.

היפותרמיה (hypothermia) – טמפרטורת גוף נמוכה מתחת לנורמלי (באדם, מתחת ל- 33°C); במצב של היפותרמיה, יורד קצב הלב והנשימה, חלה הידרדרות מהירה של מערכות שונות בגוף, והיא עשויה לגרום למוות תוך זמן קצר.

היפרתרמיה (hyperthermia) – טמפרטורת גוף גבוהה מעל לנורמלי (באדם מעל 42°C). בהיפרתרמיה, חלה הידרדרות מהירה של מערכות שונות בגוף, והיא עשויה להסתיים במוות תוך זמן קצר.

הלחתה (panting) – אידיוי מים דרך הפה, הלשון ומערכת הנשימה (שלא באמצעות בלוטות הזיעה); מנגנון לצינון הגוף אצל בעלי חיים מסוימים, כמו: עופות, כלבים ולטאות.

הם (heme) – פיגמנט אדום המכיל ברזל ומהווה מרכיב של המוגלובין ושל מיוגלובין.

המוגלובין (vhemoglobin) – חלבון בתאי הדם האדומים; מכיל ברזל ומוביל את מרבית החמצן בדם. ההמוגלובין הוא פיגמנט שמקנה את הצבע האדום לתאי הדם האדומים.

המוליזה (hemolysis) – הרס של תאי דם אדומים ושחרור המוגלובין לסביבת התאים.

המטוקריט (hematocrit) – אחוז נפח תאי הדם האדומים מכלל נפח הדם.

הנדסה גנטית (genetic engineering) – מגוון של שיטות המשמשות לשינוי המידע המקודד ב-DNA.

הסעה (convection) – העברת חום על ידי תנועת אוויר או מים; ההסעה היא גורם חשוב באיבוד חום אצל בעלי חיים יבשתיים.

הסתגלות (acclimatization) – שינוי הפיך במורפולוגיה או בפיסיולוגיה של

המים לבין נימי הדם. הזימים משתתפים גם בהרחקת הפסולת החנקנית מן הגוף ובוויסות מאזן המים והמלחים בגוף.

זיעה – ראו הזעה.

זרחון חמצוני (oxidative phosphorylation) – הוספת יחידה של זרחה ל-ADP וקבלת ATP באמצעות אנרגיה שמקורה בריאקציות חמצון-חיזור; תהליך הזרחון החמצוני מתרחש במיטוכונדריון והוא חלק מתהליך הנשימה התאית. בתהליך הזה נוצרות מרבית מולקולות ה-ATP שנוצרות בנשימה התאית.

זרימה נגדית (countercurrent flow) – זרימה של שני נוזלים בכיוונים מנוגדים, כאשר אחד הנוזלים, לפחות, זורם בתוך צינור. הזרימה הנגדית מייעלת את מעבר החומרים או החום בין שני הנוזלים.

זרימה נגדית מתגברת (countercurrent multiplier flow) – זרימה של התסנין בכיוונים מנוגדים בלולאת הנלה; יוצרת ריכוזים אוסמוטיים גבוהים ביותר בנוזל הבין-תאי שבליבת הכליה, ועל ידי כך מתאפשר ריכוז השתן.

זרימת לחץ (נקרא גם זרימת מסה) (pressure flow) – זרימה של מוהל השיפה לאורך צינורות הכברה בצמחים, כשהכוח המניע הוא מפל בלחץ טורגור; ראו זרימת מסה.

זרימת מסה (bulk flow) – תנועה של מולקולות מסוג אחד או יותר באותו כיוון ובאותו תנך בתגובה למפל לחץ; זרימת מוהל השיפה בצמחים היא דוגמה לזרימת מסה.

זריעת עננים (cloud seeding) – הגברת המשקעים על ידי פיזור חלקיקי יודיד הכסף בעננים; פיזור חלקיקי יודיד הכסף נעשה ממטוסים או מתנורי קרקע.

זריקת דחף (booster shot) – תרכיב חיסון שניתן כדי לעורר את פעילותם של תאי הזיכרון; באופן כזה נשמר הזיכרון החיסוני לאורך זמן.

חד-פסיגיים (monocotyledonae) – מחלקה במערכת צמחי הפרחים; הצמחים השייכים למחלקה זו מתאפיינים, בין היתר, בזרעים שעובריהם הם בעלי פסיג (עלה ראשוני של העובר) יחיד, ובעלים בעלי עורקים מקבילים.

חדר (ventricle) – אחד ממדורי הלב בחולייתנים; מקבל דם מעלייה ומזרים אותו אל העורקים. התכווצויות החדר מזרימות את הדם בגוף. בבעלי מחזור דם כפול יש שני חדרים: חדר אחד מזרים דם אל הריאות והחדר האחר מזרים דם אל שאר חלקי הגוף.

חוליות טרכאה (vessel members) – אחד משני סוגי התאים העיקריים שמהם בנויה רקמת העצה בצמחים (האלמנטים הטרכאריים). חוליות הטרכאה הן תאים קצרים ורחבים, והם מתים בבגרותם. חוליות טרכאה שניצבות זו על גבי זו יוצרות צינורות ארוכים (טרכאות) המובילים מים ומומסים.

צמחים או של בעלי חיים בתגובה לשינוי בתנאי הסביבה.

העמסה (loading) – תנועת הסוכרים בעלה, מרקמת המזופיל לרקמת השיפה; הסוכרים יכולים לנוע דרך פלסמודסמטה או דרך דופנות התאים.

הצמטה (agglutination) – היווצרות תצמיד אנטיגנים-נוגדנים, המביא להרחקת האנטיגנים מן הגוף.

השקיה (irrigation) – תוספת מים מלאכותית הניתנת למצע הגידול של צמחים.

השתלה (איברים או רקמות) (transplantation) – טכנולוגיה רפואית שבה מוחלפים איברים, חלקי איברים או רקמות לא תקינים באיברים, בחלקי איברים או ברקמות תקינים; האיבר המושל יכול להילקח מאותו אדם, מאדם אחר (חי או מת) או מבעל חיים.

התאדות (evaporation) – תהליך של שינוי מצב צבירה של חומר מנוזל לגז; תהליך ההתאדות כרוך בהשקעה של אנרגיית חום.

התאמה (adaptation) – שינויים תורשתיים שמתרחשים באוכלוסיה של אנשים, של בעלי חיים או של צמחים, במשך תקופה ארוכה, ומתאימים את האוכלוסיה לתנאים שבה היא חיה.

התנגדות היקפית (periferal resistance) – פעולת ההתנגדות לזרימת הדם בכלי הדם הקטנים, בעיקר בעורקים.

התפלה (desalinization) – הרחקת המלחים ממי ים או ממים מליחים, כדי שיהיו ראויים לשימושים שונים.

התקף לב (heart attack) – ראו אוטם שריר הלב.

וריד (vein) – כלי דם דק-דופן, רחב יחסית; מוביל דם מן הוורידונים אל הלב.

וריד הריאה (pulmonary vein) – וריד שמוביל דם עשיר בחמצן ועני ב- CO_2 מן הריאות אל העלייה השמאלית של הלב.

ורידון (venule) – כלי דם צר ודק-דופן; מוביל דם מן הנימים אל הוורידים.

ורידים חלולים (vena cava) – הוורידים הרחבים ביותר, דרכם זורם הדם מכל רקמות הגוף (פרט לריאות) אל העלייה הימנית של הלב. וריד חלול תחתון מוביל את הדם שחוזר מחלקי הגוף שנמצאים מתחת לבית החזה; וריד חלול עליון מוביל את הדם שמגיע מן הראש ומחלקי הגוף העליונים.

זיכרון חיסוני (immunologic memory) – תכונה של מערכת החיסון הייחודית המתקיימת באמצעות תאי זיכרון; זיכרון חיסוני מאפשר למערכת החיסון להתבטא בתגובה מתוגברת בעקבות חשיפה חוזרת לאותו אנטיגן.

זימים (gills) – איברי הנשימה של רבים מבעלי החיים שחיים במים, ביניהם הדגים; הזימים בנויים קרומים רבים דקים מאוד; דרכם נעשה חילוף הגזים בין

מכילה מים ומומסים. ברוב התאים הבוגרים יש חלולית אחת גדולה שתופסת את מרבית נפחו של התא, והיא מתפקדת בעיכול, באגירה ובהפרשה של חומרים.

חמצון-חיזור (oxidation-reduction reaction) – העברה של אלקטרונים מאטום של חומר אחד לאטום של חומר אחר. החומר המוסר אלקטרונים הוא החומר המחזור והוא עובר חמצון; החומר המקבל אלקטרונים הוא החומר המחמצן והוא עובר חיזור. בתהליך הנשימה התאית מתרחשים תהליכי חמצון-חיזור המלווים בהפקת אנרגיה.

חסינות נרכשת (acquired immunity) – חסינות המוקנית באופן טבעי או כתוצאה מפעילות רפואית מכוונת באמצעות מתן תרכיב חיסון.

חסרי חוליות (invertebrates) – בעלי חיים חסרי עמוד שדרה; תולעים וחרקים, למשל, הם חסרי חוליות.

חקלאות בת-קיימא (sustainable agriculture) – גידול צמחים ובעלי חיים בשיטות שמנסות לשמר את משאבי הסביבה תוך שמירת איזון בין צריכת המשאבים לבין קצב התחדשותם.

חריפה (hibernation) – מצב של פעילות מינימלית בחורף, מלווה בירידה משמעותית בחילוף החומרים; מאפשרת לבעלי חיים מסוימים לשרוד בתנאים של טמפרטורות נמוכות מאוד.

טבעות שנתיות (טבעות התעבות) (growth rings) – טבעות היקפיות בגזע של עצים שבצמיחתם חלים מחזורים עונתיים; הטבעת בנויה מתאים שנוספו בשנה אחת; התאים שנוצרו בתחילת העונה הם גדולים ודקי דופן, לעומתם התאים שנוצרו בסוף עונת הצמיחה הם קטנים ועבי דופן.

טילוזות (tyloses) – מבנים שנוצרים בצמחים כתוצאה מחדירה של תאי פרנכימה אל תוך חלל צינורות העצה; הטילוזות סותמות את צינורות העצה הנגועים בפתוגן, ומונעות את התפשטות הפתוגן.

טנינים (tannins) – מטבוליטים משניים המצויים בפירות, בעלים ובגבעולים של צמחים מסוימים; הטנינים נקשרים לחלבונים ויוצרים אתם תצמידים. התקשרות הטנינים לחלבונים במערכת העיכול של אוכלי צמחים מפריעה לתהליך העיכול שלהם ועל ידי כך מגנים הטנינים על הצמחים.

טנסיומטר (מד לחות הקרקע) (tensiometer) – מכשיר לקביעת מתח מי הקרקע על ידי מדידת כוח יניקת המים של הקרקע.

טסיות דם (לוחיות דם) (platelets או thrombocytes) – חלקיקי תאים קטנים ושיטוחיים שמצויים בדם ומשתתפים בתהליך עצירת הדימום וקרישת הדם.

טפטוף (drip irrigation) – שיטת השקיה; בשיטה זו ניתנים המים ישירות על הקרקע או לתוך הקרקע; המים ניתנים בכמויות נמוכות יחסית ולמשך זמן רב. פיזור המים מתבצע על ידי טפטפות בטיפות בודדות.

חוליות צינורות כברה (sieve-tube members) – הסוג העיקרי של תאים שמהם בנויה רקמת השיפה בצמחים; חוליות אלה הן אלמנטים של כברה, בעלי לוחות כברה. חוליות צינורות כברה מתחברים זה לזה ויוצרים את צינורות הכברה.

חולייתנים (vertebrates) – תת-מערכה של בעלי חיים בעלי עמוד שדרה הבנוי מסדרת חוליות גרמיות או סחוסיות; מחלקות החולייתנים הן: דגים, דו-חיים, עופות ויונקים.

חומצת חלב (חומצה לקטית) (lactic acid) – חומצה תלת-פחמנית; נוצרת בתהליך התסיסה בחיידקי החלב ובתאי שריר של מרבית החולייתנים בעת מאמץ גופני. טעמה של חומצת החלב חמוץ והיא מעניקה למוצרי החלב ולירקות המוחמצים את טעמם החמוץ.

חומצת שתן (uric acid) – חומר ההפרשה החנקני של רוב הזוחלים, של החרקים ושל החלזונות היבשתיים; חומצת השתן נוצרת מפירוק חלבונים; היא אינה רעילה וכמעט שאינה מסיסה במים, ולכן היא מופרשת כגוש מוצק. הפרשת חומצת שתן מאפשרת חיסכון במים אצל היצורים המפרישים אותה.

חיגור (girdling) – הסרת רצועה מן המעטה החיצוני של הגזע, של הגבעול או של הפטוטרת; בטבעת החיגור מורחקת השיפה אך לא מורחקת העצה.

חיזור (reduction reaction) – ראו חמצון-חיזור.

חילוף גזים (gas exchange) – ראו נשימה.

חילוף חומרים (metabolism) – כלל התהליכים הכימיים המתרחשים ביצור החי; תהליכים אלו כוללים פירוק תרכובות אורגניות מורכבות לתרכובות פשוטות; כמו כן נוצרות תרכובות אורגניות מורכבות מתרכובות פשוטות. תהליכי חילוף החומרים מלווים בשחרור אנרגיה או בהשקעת אנרגיה.

חיסון (immunity, immunization) – יצירת הגנה בגוף בפני אנטיגנים, בעיקר גורמי מחלות; חיסון יכול להתרחש באופן טבעי, על ידי חשיפה לגורם המחלה, או באופן מלאכותי, על ידי החדרת אנטיגן לגוף.

חיסון מלאכותי (vaccination) – ראו חיסון.

חיסון סביל (passive immunization) – החדרת נוגדנים שנוצרו בגופו של בעל חיים אחד לגופו של בעל חיים אחר או לגופו של אדם חולה; חיסון כזה פועל באופן מיידי על גורם המחלה.

חיסון פעיל (active immunization) – יצירת נוגדנים על ידי מערכת החיסון של בעלי חיים או של אדם כתגובה להחדרת אנטיגן לגופם.

חלבוני PR (pathogenesis-related proteins) – חלבונים שנוצרים בצמחים מסוימים בתגובה להתקפת מזיק או פתוגן ופוגעים במזיק או בפתוגן.

חלולית (vacuole) – חלל מוקף קרום בציטופלסמה של תאי צמחים; החלולית

הדם של אדם בריא. בין הדם לבין תמיסת הדיליזיה מתרחש מעבר חומרים בדיפוזיה, עד שההרכב של דם החולה מגיע לערכים תקינים.

כשל חיסוני (immune deficiency) – מצב שבו מערכת החיסון אינה מגיבה (או כמעט אינה מגיבה) לאנטיגנים ואינה יכולה להגן על הגוף מפני מחלות זיהומיות; כשל חיסוני יכול להיות תורשתי או נרכש במשך החיים.

כשל כלייתי כרוני (אי-ספיקת כליות) (kidney failure chronic) – מחלת כליות שבה תהליכי הסינון והספיגה החוזרת בכליות אינם מתפקדים כהלכה וכתוצאה מכך מופר המאזן של המים, של היונים ושל המלחים בגוף, וריכוז השתן בדם עולה.

כשל כלייתי סופי (end stage renal disease; ESRD) – מחלת כליות שמתפתחת בדרך כלל מכשל כלייתי כרוני; תפקוד הכליות מגיע ל-5% מן התפקוד הנורמלי. במצב של כשל כלייתי סופי מצטברים בגוף נוזלים וחומרי פסולת, ואם לא מטפלים במחלה באמצעות דיאליזה או באמצעות השתלת כליה, המחלה גורמת למוות.

לב (heart) – איבר חלול שרירי, הפועל כמשאבה ומזרים את הדם בגופם של בעלי חיים.

לוח כברה (sieve plate) – שטח בעל נקבים בדפנות של חוליות צינורות כברה בצמחים (בעיקר בדפנות הרוחב); דרך הנקבים עוברים חוטים ציטופלסמטיים המקשרים בין הציטופלסמה של חוליות שכנות.

לוחיות דם – ראו טסיות דם.

לולאת הנֶּלָה (loop of Henle) – חלק מאבובית הנפרון שבכליה; צורתו צורת U. בלולאת הנלה המים והמומסים שבים ונספגים מן התסנין אל הדם.

לוע (pharynx) – צינור שרירי ביונקים; משמש מעבר לאוויר מחלל האף והפה אל הגרון, ומהווה מעבר למזון מן הפה אל הוושט.

לחות יחסית (relative humidity) – היחס שבין כמות האדים הנמצאים בנפח מסוים של אוויר ובין הכמות המרבית שהאוויר יכול להכיל (בהתאם לטמפרטורה שלו).

לחץ דם (blood pressure) – לחץ שמפעיל הדם על דופנות כלי הדם עקב התכווצויות הלב.

לחץ דם דיאסטולי (diastolic blood pressure) – לחץ הדם שנוצר בעורקים בעת התרופות שריר הלב (בדיאסטולה).

לחץ דם סיסטולי (systolic blood pressure) – לחץ הדם שנוצר בעורקים בעת התכווצות שריר הלב (בסיסטולה).

לחץ חלקי של גז (partial gas pressure) – הלחץ שמפעיל גז אחד מכלל הגזים בתערובת; נהוג לבטא לחץ חלקי של גז ביחידות של מ"מ כספית.

טרַכֵּהָ (trachea)

א. בחרקים – צינור שמעביר אוויר מפתחים שבצדי הגוף אל חלל הגוף. הטרַכֵּהָ מסתעפות בתוך הגוף ומסתיימות בטרַכֵּהָלֹת, שהן צינורות זעירות שבקצותיהן הלחים מתבצע חילוף הגזים עם התאים.

ב. בחולייתנים – קנה הנשימה.

ג. בצמחים – צינור הובלה רב-תאי ברקמת העצה; מורכב מחוליות טרַכֵּהָ אחדות שניצבות זו על גבי זו; משמש להובלת מים ויסודות מינרליים.

טרַכֵּהָלֹת (tracheoles) – ראו טרַכֵּהָ בחרקים.

טרַכֵּהָיִד (tracheid) – אלמנט הובלה ברקמת העצה של צמחים; עשוי תא אחד לא-חי, חלול ומוארך, מחודד בקצותיו. דופנות הטרַכֵּהָיִדים מתחברים זה לזה ויוצרים צינורות המובילים מים ומומסים.

טֶרֶף (blade) – החלק המורחב והשטוח של העלה; הטרף יושב על הפטוטרת.

טרשת העורקים (atherosclerosis) – מחלה המאופיינת בהיצרות חלל העורקים, חסימתם והתעבות דופנותיהם עקב הצטברות רבדים שומניים (רבדים טרשתיים); הליקויים האלה גורמים לקשיים בזרימת הדם בעורקים הטרשתיים.

יונקות השורש (root hairs) – שלוחות מתאי אפידרמיס דמויות שערות, בחלקים הצעירים של השורשים; היונקות מגדילות מאוד את שטח הפנים של השורש שדרכו נקלטים מים ויסודות מינרליים.

יותרת הכליה (adrenal) – בלוטה שנמצאת מעל לכליה; ביותרת הכליה נוצרים הורמונים, כמו: אلدוסטרון ואדרנלין.

כולסטרול (cholesterol) – חומר שומני המצוי אצל בעלי חיים בדם וברקמות אחרות; מיוצר בעיקר בכבד. משמש חומר מוצא להורמונים מסוימים ולמלחי מרה ומהווה מרכיב חשוב בקרום התא. עודף כולסטרול בדם יכול לגרום לטרשת עורקים.

כימורצפטורים (קולטנים כימיים) (chemoreceptors) – תאים רגישים לנוכחות חומרים כימיים שבסביבתם ולריכוז של החומרים הכימיים.

כלי דם (blood vessels) – צינורות דם, כגון: עורקים, ורידים או נימים, שדרכם זורם הדם.

כליה (kidney) – איבר הפרשה (זוגי) של חולייתנים; הכליה מסננת ומרחיקה מן הדם את הפסולת המטבולית (בעיקר שתן). ברוב החולייתנים, הכליה גם מווסתת את מאזן המים והמלחים בדם ובנוזל הבין-תאי.

כליה מלאכותית (artificial kidney) – מכשיר שבו הדם של אדם (הסובל מכשל כלייתי סופי) עובר תהליך דיאליזה; הדם של החולה זורם בצד אחד של קרום ברנזי, כאשר בצדו האחר מצויה תמיסת דיאליזה בעלת הרכב דומה להרכב

למלת ביניים (middle lamella) – שכבה עשירה בפקטין המצמידה את הדפנות של תאים צמחיים סמוכים זה לזה.

מבלע (sink) – איבר בצמח, כגון: קדקוד צמיחה, פרח או איבר אגירה מתמלא, אשר מקבל סוכרים מאיברים אחרים בצמח.

מוגלה (pus) – נוזל סמיך המכיל שאריות של מרכיבים שהשתתפו בתהליך הדלקת; הנוזל מכיל תאי דם לבנים מתים, חיידקים חיים ומתים ותאי רקמה הרוסים.

מוהל השיפה (phloem sap) – תמיסה של חומרים אורגניים שנעים בצינורות השיפה בצמחים; רוב החומרים המומסים במוהל השיפה הם סוכרים שנוצרו בפוטוסינתזה.

מוח העצם (bone marrow) – רקמת חיבור שממלאת את החללים המרכזיים בעצמות; בתוך הרקמה נוצרים תאי הגזע של תאי הדם השונים ושם מתרחשים השלבים הראשונים של התמיינות תאי הדם וטסיות דם.

מולקולות תואם הרקמות (אנטיגנים של תואם הרקמות) (MHC; major histocompatibility complex) – מולקולות חלבוניות המהוות חלק ממרכיבי הקרום של כל תאי החולייתנים; המולקולות האלה אופייניות לכל פרט ומשמשות "תעודת זהות" שלו.

מזופיל (mesophyll) – רקמת הפרנכימה בעלה, שבה מתרחשת הפוטוסינתזה; המזופיל נמצא בין האפידרמיס העליון לאפידרמיס התחתון.

מזיקים (pests) – בעלי חיים שפוגעים בצמחים.

מחזור (recycling) – התהליך שבו מחזירים חומרי פסולת ביתית, כמו: נייר, זכוכית, מתכות ופלאסטיק, לשימוש חוזר; המחזור חוסך בהוצאות של חומרי גלם יקרים, מקטין דילול משאבים מתכלים ומסייע להקטנת זיהום הסביבה.

מחזור דם בודד (single circulation) – מסלול הזרימה שבו הדם היוצא מן הלב עושה רק מחזור אחד בכל חלקי הגוף לפני שהוא חוזר אל הלב; מחזור דם בודד אופייני לחולייתנים נחותים, כגון: דגים.

מחזור דם כפול (double circulation) – מסלול הזרימה שבו הדם היוצא מן הלב עושה שני מחזורים זרימה נפרדים לפני שהוא חוזר אל הלב; במחזור אחד (מחזור הגוף) הדם זורם בין הלב לגוף, ובמחזור האחר (מחזור הריאות) הדם זורם בין הלב לריאות. מחזור דם כפול אופייני לעופות וליונקים.

מחזור הגוף (המחזור הגדול) (systemic circuit) – חלק מן המסלול שבו זורם הדם במחזור דם כפול; במחזור הזה, דם עשיר בחמצן זורם מן הצד השמאלי של הלב לכל תאי הגוף (שם הוא משחרר חמצן וקושר CO_2), ואחר כך חוזר אל הצד הימני של הלב.

לחץ טורגור (turgor pressure) – הלחץ שמפעילים הנוזלים שבתוך תא הצמח על קרום התא ובאמצעותו על דופן התא; לחץ טורגור פועל בכל הכיוונים במידה שווה.

לחץ שורש (root pressure) – לחץ מים בצינורות העצה שמקורו בשורשים; מסייע לעליית המים בצמחים צעירים וקטנים.

ליבה (pith) – רקמת פרנכימה המצויה במרכז הגבעול; בצמחים מסוימים (בעיקר חד-פסיגיים) – גם במרכזו של השורש.

ליבת הכליה (renal medulla) – אזור פנימי בכליה; מורכב מפירמידות, ובהן נמצאים לולאות הנלה, כלי דם שמקיפים אותן וצינורות מאספים.

ליגנין (lignin) – חומר שמצוי בדופן התא של רקמות מסוימות בצמחים; הליגנין מחזק את דופנות התאים, עושה אותם אטומים למים ומקשה על חדירת פתוגנים.

לימפה (lymph) – ראו מערכת הלימפה.

לימפוציטים (lymphocytes) – תאי דם לבנים; פעילים בתגובת החיסון הייחודית. נודדים בצינורות הדם, בצינורות הלימפה ובאיברי הלימפה, ושם נעשה המפגש העיקרי שלהם עם האנטיגן. ללימפוציטים יש קולטנים לאנטיגנים, המאפשרים להם להתקשר לאנטיגנים ייחודיים ולפעול נגדם. הלימפוציטים נחלקים לשתי אוכלוסיות עיקריות: לימפוציטים B ולימפוציטים T.

לימפוציטים B (תאי B) (B cells) – לימפוציטים שמייצרים ומפרישים נוגדנים כתוצאה מחשיפה לאנטיגן, ופועלים בתגובת החיסון ההומורלית; ביונקים, תהליך התמיינותם והבשלתם נעשה במוח העצם.

לימפוציטים T (תאי T) (T cells) – לימפוציטים שתהליך התמיינותם והבשלתם נעשה בבלוטת התימוס; לימפוציטים T אחראים לבקרת התגובה החיסונית ולפעולה נגד גופים וטפילים, וכן להרס שתלים זרים ותאים סרטניים.

לימפוציטים T-הורגים (תאי T-הורגים) (T-killer cells) – תת-קבוצה של לימפוציטים T; פועלים נגד תאים נגועים בנגיפים, נגד תאי סרטן ונגד תאים של שתל זר. על ידי הפרשת חומרים מסוימים, הם גורמים להריסתם של התאים האלה.

לימפוציטים T-מדכאים (תאי T-מדכאים) (T-suppressor cells) – תת-קבוצה של לימפוציטים T; מווסתים את רמת התגובה החיסונית, על ידי דיכוי פעולת לימפוציטים T ולימפוציטים B.

לימפוציטים T-עוזרים (תאי T-עוזרים) (T-helper cells) – תת-קבוצה של לימפוציטים T; מפעילים לימפוציטים T-הורגים ולימפוציטים B בתגובה לזיהוי של אנטיגן.

לאחר שהתנקזה; ההפרש בין קיבול שדה לבין נקודת כמישה.

מים מותפלים - ראו התפלה.

מים מליחים (slightly saline water) – מי תהום שכמות המלחים שבהם נעה בין 400 ל-4,000 מ"ג לליטר; מליחותם עולה על זו של מי שתייה, אולם עדיין נמוכה מזו של מי הים.

מים שפירים (freshwater) – מים נקיים ממזהמים וטובים לכל מטרה.

מסתם (valve) – מבנה שמאפשר זרימה בכיוון אחד בלבד; בלב של אדם יש 4 מסתמים: בין העליות לחדרים ובפתח העורקים הראשיים. הפתיחה והסגירה של מסתמי הלב מופעלות על ידי זרימת הדם בלב. גם בדופנות הוורידים יש מסתמים.

מעגל חומצת הלימון (מעגל קרבס) (citric acid cycle) – סדרת תהליכים מחזורית שמתרחשת במטריקס של המיטוכונדריון ומהווה חלק מתהליך הנשימה התאית האווירנית; במעגל חומצת הלימון מתפרקות מולקולות של אצטיל CoA, משתחררות מולקולות של CO_2 , מתקבלים נשאי מימנים מחזוריים (FADH₂ ו-NADH) ונוצרות מולקולות של ATP.

מעגל קרבס (Krebs cycle) – ראו מעגל חומצת הלימון.

מערכת דם סגורה (closed circulatory system) – מערכת דם, שבה זורם הדם אך ורק בצינורות (בכלי דם ובלב); מצויה אצל חסרי חוליות מפותחים ואצל כל החולייתנים.

מערכת דם פתוחה (open circulatory system) – מערכת דם, שבה הדם חודר לחללי הגוף, שוטף את הרקמות ובא במגע ישיר עם תאי הגוף. במערכת דם פתוחה הדם זורם בצינורות, רק בחלק קטן מדרכו; מערכת דם פתוחה מצויה אצל חרקים, סרטנים ורכיכות.

מערכת הדם (circulatory system) – מערכת שקיימת בכל החולייתנים וברוב חסרי החוליות; מערכת הדם כוללת איבר שרירי הפועל כמשאבה (על פי רוב - לב), כלי דם ודם. בחולייתנים, מערכת הדם מובילה גזים, חומרי מזון, חומרי פסולת, הורמונים וחומרי חיסון. כמו כן, יש לה תפקיד חשוב בשמירה על הומיאוסטזיס.

מערכת ההפרשה (excretory system) – מערכת שבאמצעותה מסולקת פסולת מטבולית (בעיקר פסולת חנקנית) מן הגוף של בעלי חיים; מערכת ההפרשה משתתפת בוויסות של מאזן המים, ושל היונים והמלחים בדם ובנוזל הבין-תאי.

מערכת הובלה (transport system) – מערכת שמעבירה חומרים שונים ממקום למקום בגוף ויוצרת קשר בין חלקים שונים בגוף.

מערכת החיסון (immune system) – מערכת ההגנה בחולייתנים המגנה על הגוף

מחזור הריאות (המחזור הקטן) (pulmonary circuit) – חלק מן המסלול שבו זורם הדם במחזור דם כפול; במחזור הזה, דם דל בחמצן זורם מן הצד הימני של הלב אל הריאות (שם הוא משחרר CO_2 וקושר חמצן), ואחר כך חוזר אל הצד השמאלי של הלב.

מחיצה (septum) – דופן שמפריד בין הצד הימני לצד השמאלי של הלב ומונע מעבר דם מצד אחד לצד אחר.

מחלה אוטואימונית (autoimmune disease) – מחלה שבה יש הפרעה בבקרה החיסונית; ההפרעה גורמת למערכת החיסון להגיב נגד תאים ורקמות עצמיים.

מחלת האמודאים (decompression sickness) – תסמונת שמופיעה אצל צוללנים לאחר שהייה ממושכת במעמקים ועלייה מהירה מדיי אל גובה פני הים; התסמונת נגרמת כתוצאה מהיווצרות בועות של חנקן בדם.

מחלת לב כלילית (coronary heart disease) – פגיעה בפעילות שריר הלב; נגרמת בגלל אספקת דם לקויה לשריר הלב, כתוצאה מטרשת בעורק כלילי אחד או יותר.

מטבוליזם - ראו חילוף חומרים.

מטבוליטים משניים (secondary metabolites) – חומרים כימיים שנוצרים במטבוליזם של אורגניזמים מסוימים; הם אינם חיוניים לגדילה, להתפתחות ולרבייה של האורגניזם אבל יש להם תפקידים אחרים, למשל: הגנה מפני תוקפים. המטבוליטים המשניים נוצרים במינים מסוימים של צמחים, חיידקים, פטריות ובעלי חיים ימיים ירודים.

מטריקס (matrix) – ראו מיטוכונדריון.

מי כובד (gravity water) – מים המחלחלים לשכבות עמוקות של הקרקע בהשפעת כוח הכובד והם אינם זמינים לצמח.

מי נגר – ראו נגר עילי.

מי קולחים – ראו קולחים.

מי תהום (ground water) – מים תת-קרקעיים שמקורם בחלחול מי גשמים; המים המחלחלים נעצרים בשכבות אטימות ונאגרים במאגרים תת-קרקעיים.

מיוגלובין (myoglobin) – חלבון נושא חמצן המצוי בשרירים של חולייתנים; ממלא תפקיד דומה לזה של המוגלובין.

מיטוכונדריון (מיטוכונדריה בריבים) (mitochondrion) – אברון ציטופלסמטי בתא אאוקריוטי שבו מתרחש השלב הסופי של הנשימה התאית האווירנית ונוצרות בו מרבית מולקולות ה-ATP; המיטוכונדריון מוקף קרום כפול (קרום חיצוני וקרום פנימי) והוא מלא בתמיסה מימית שנקראת מטריקס.

מים זמינים (available water) – כמות המים שעומדת לרשות הצמחים בקרקע

יש משרנים חיצוניים שמקורם בגורם התוקף, ויש משרנים פנימיים שמקורם בצמח.

נאדיות (alveoli) – שקיקים זעירים, מלאים אוויר, שמהווים את קצה הסימפוניות בריאות של חולייתנים; לנאדיות יש דפנות דקות והן מוקפות נימי דם. בנאדיות מתקיים חילוף הגזים בנשימה: חמצן מן הנאדיות עובר בדיפוזיה אל הדם ו- CO_2 עובר מן הדם אל הנאדיות.

נגר עילי (מי נגר) (surface run-off water) – מי גשמים או מי השקיה שלא נספגו בקרקע וזורמים על פני השטח אל אפיקים, אל ערוצים ואל נחלים בדרכם אל הים.

נוגדן (antibody) – מולקולת חלבון שנוצרת בחולייתנים כתגובה לחדירת אנטיגן לגוף; הנוגדן פועל נגד האנטיגן באופן ייחודי; הנוגדנים נוצרים על ידי לימפוציטים B, ונעים בזרם הדם.

נוזל בין-תאי (interstitial fluid) – נוזל הרקמות הממלא את החלל הבין-תאי ומקיף את תאי הגוף בבעלי חיים; בהרכבו, דומה הנוזל הבין-תאי לפלסמת הדם (פרט להעדר חלבונים גדולים). הנוזל דולף מהנימים ופועל כמתווך בחילוף החומרים בין התאים לבין הדם שבנימים.

נוזל הלימפה (lymph) – הנוזל שזורם בנימי הלימפה ובצינורות הלימפה מן הרקמות אל הדם; צבעו צהבהב בהיר; מכיל 94% מים ומומסים, שזהים בהרכבם לחומרים שמומסים בדם, וכן תאי דם לבנים.

נויטרופילים (neutrophils) – קבוצת התאים הגדולה ביותר מבין תאי הדם הלבנים; עיקר פעולתם בבליעה של חיידקים.

נימי לימפה (lymph capillaries) – רשת של צינורות דקיקים שנמצאים בין התאים, כמעט בכל הרקמות בגוף החולייתנים; הצינורות מהווים חלק ממערכת הלימפה. נימי הלימפה חדירים, יחסית, ולכן חומרים מן הנוזל הבין-תאי יכולים להיכנס אליהם בקלות.

נימים (capillaries) – כלי הדם הצרים ביותר, שפרוסים כרשת רחבה וצפופה בין תאי הגוף; דרכם מתבצע מעבר החומרים וחילוף הגזים בין הדם לתאים.

ניתוח מעקפים (bypass surgery) – ניתוח שנועד להסיט את זרימת הדם מכלי דם חסום, על ידי יצירת מעקף. המעקף בנוי בדרך כלל מעורקים סינתטיים או מורידים.

נפח הפעימה (stroke volume) – נפח הדם שמוזרם מכל אחד מחדרי הלב בכל פעימה.

נפח השאריט (residual volume) – נפח האוויר שנשאר בריאות לאחר נשיפה מרבית; שיעורו אצל אדם בריא בוגר הוא כ-1.2 ליטרים.

נפח מת (dead space) – נפח האוויר "האחרון" שנשאף בכל שאיפה, נשאר בתוך

מפני גורמים זרים שחדרו אליו.

מערכת החיסון הייחודית (immune system specific) – מערכת חיסון נרכשת שפועלת בחולייתנים בתגובה לחדירה של גורמים זרים לגוף; מרכיביה מזהים חומרים זרים ומונעים את חדירתם או את התפשטותם בגוף. מרכיבי המערכת יכולים להבחין בין "עצמי" לבין "זר", וכן לזכור לאורך זמן את המפגש עם גורם זר. הלימפוציטים הנעים בדם ובלימפה ממלאים בה תפקיד מרכזי.

מערכת הלימפה (lymphatic system) – מערכת צינורות בחולייתנים להובלת מים ומומסים שונים, מן הרקמות אל הדם. למערכת הלימפה יש תפקיד חשוב בשמירה על הרכב הדם. ביונקים ובעופות מסוימים יש במערכת הלימפה איברים לימפואידיים בעלי תפקידים חיוניים במערכת ההגנה.

מערכת הנשימה (respiratory system) – מערכת שמכניסה לגוף אוויר מהסביבה, ואת האוויר שמכיל פחות חמצן ויותר CO_2 , ביחס לאוויר הסביבה, היא מוציאה מן הגוף.

מערכת העצבים האוטונומית (autonomic nervous system) – מערכת עצבים שפועלתה עצמאית ובלתי רצונית; מווסתת את פעילות הלב וכלי הדם, את הפעילות של מערכת הנשימה, את מערכת העיכול ומערכת ההפרשה. מערכת העצבים האוטונומית מורכבת משתי חטיבות אשר פועלות באופן מנוגד זו לזו: חטיבה סימפתטית וחטיבה פאראסימפתטית.

מקור (source) – איבר בצמח, כגון: עלה או איבר אגירה מתרוקן, אשר מספק סוכרים לאיברים אחרים בצמח.

מקרופאגים (macrophages) – תאי דם לבנים גדולים שמסלקים בפעולת בלענות חומרים זרים מן הגוף; המקרופאגים משרים גם את הפעלתה של מערכת החיסון על ידי הצגת שאריות האנטיגן בפני תאי מערכת החיסון.

מריסטמה (meristem) – רקמה צמחית בעלת תאים ששומרים על תכונות עובריות; תאי הרקמה הזאת טרם התמיינו, והם מסוגלים להמשיך להתחלק. בצמחים עילאיים מצויות המריסטמות בקדקודי הצמיחה, בקצות השורשים ובקמביום, ומהן מתפתחים תאי רקמות הצמח.

מרכז הלב וכלי הדם (cardiovascular center) – אזור במוח המוארך שממנו יוצאים גירויים חשמליים שמווסתים את פעילות הלב וכלי הדם, בהתאם לצרכים של הגוף בפעילויות שונות ובתנאים שונים.

מרכז הנשימה (respiratory center) – אזור במוח המוארך המקבל מידע על ריכוז CO_2 בדם ומגיב באמצעות השפעה על שרירי הנשימה; מרכז הנשימה מווסת את האוויר הריאתי בהתאם לצרכים של הגוף בפעילויות שונות ובתנאים שונים.

משרנים (אליצטורים) (elicitors) – חומרים שמפעילים מנגנוני הגנה בצמח;

סימפוניות (bronchioles) – ההסתעפויות הדקיקות מן הסימפונות בריאות; דופנותיהן מכילים שרירים, והן מסתיימות בנאדיות.

סיסטולה (systole) – השלב בפעולת הלב, שבו מתכווץ שריר הלב ומזרים דם למערכת העורקים.

סיסטיק פיברוזיס (CF; cystic fibrosis) – מחלה תורשתית שפוגעת בתפקוד של תאי בלוטות ההפרשה החיצונית בגוף, ביניהם: תאי הגביע במערכת הנשימה; תאי הגביע הפגועים מפרישים ריר סמיך ודביק שחוסם את מעברי הנשימה ומפריע להרחקת גורמים זרים. בגלל הזיהומים נוצר מצב דלקתי מתמשך בריאות.

סקלרנכימה (sclerenchyma) – רקמת תמיכה בצמחים; מורכבת מתאים מעובי דופן, ורובם מתים בבגרותם.

סרוטונין (serotonin) – חומר שמצוי במערכת העצבים, בטסיות דם ובדופן המעי; הסרוטונין פועל כחומר המקשר בין תאי עצב וכחומר שגורם להתכווצות כלי דם. הוא מופרש על ידי טסיות דם בתגובה לפציעה בכלי דם, ומקטין את זרימת הדם לאזור הפגוע.

סרטן (cancer) – קבוצת מחלות המאופיינת בכך שתאי הגוף גדלים ומתרבים ללא בקרה, ולעתים התאים אף מתפשטים ויוצרים גרורות באזורי גוף שונים.

סרעפת – ראו שריר הסרעפת.

עדשתיות (lenticles) – פתחים בשכבת הפרִיֶדֶר בגבעול של צמחים מעוצים; דרך העדשתיות נעשים חילופי הגזים עם הסביבה החיצונית.

עורק –

א. בבעלי חיים (artery) – כלי דם רחב, יחסית, המוביל דם מן הלב אל רקמות הגוף.
ב. בצמחים (vein) – צרור צינורות המשמש להובלת חומרים בעלה, ומהווה חלק מרקמת התמיכה של העלה.

עורק הריאה (pulmonary artery) – עורק שמוביל דם עני בחמצן ועשיר ב- CO_2 , מן החדר הימני של הלב אל הריאות.

עורק כלילי (coronary artery) – עורק שמוצא באבי העורקים והוא מספק דם לשריר הלב.

עורקיק (arteriole) – כלי דם צר, יחסית, המקשר בין עורק לנים; כיווץ או הרפיה של העורקיקים מווסתים את זרימת הדם לאיברי הגוף השונים, בהתאם לתצרוכת שלהם.

עלייה (atrium) – אחד מהחללים של הלב; מקבל דם מוורידים ראשיים ומעביר אותו לתוך חדר. לחוליותניים יבשתיים יש שתי עליות: אחת מקבלת דם עני בחמצן ועשיר ב- CO_2 מכל חלקי הגוף, והאחרת מקבלת דם עשיר בחמצן ועני ב- CO_2 מן הריאות.

הקנה והסימפונות ונפלט ראשון עם הנשיפה; האוויר הזה (כ-0.15 ליטר באדם) אינו משתתף בחילוף הגזים.

נפח מתחלף (tidal volume) – נפח אוויר השאיפה או הנשיפה בנשימה אחת; שיעורו אצל אדם בריא בוגר, במצב מנוחה, הוא כ-0.5 ליטר.

נפרון (nephron) – יחידת הפרשה תפקודית בכליה של חולייתניים; בנפרון מתרחש סינון הדם ונוצר השתן מן המים העודפים ומן החומרים המיותרים שמסולקים מן הדם. הנפרון מורכב מקופסית באומן, אבובית וצינור מאסף.

נָצֵר (shoot) – חלקי הצמח העל-קרקעיים, ובהם הגבעולים, העלים והפרחים.

נקודת כמישה (wilting point) – מצב בקרקע שבו נשארים רק מים בלתי זמינים לצמח; צמחים שגדלים בקרקע שנמצאת במצב כזה כומשים ונובלים.

נשאי מימנים (carriers of hydrogen atoms and electrons) – חומרים בעלי נטייה לקשור מימנים ולשחרר אותם, בהתאם לנטייה של חומרים אחרים למסור להם או לקבל מהם את המימן; נשאי המימנים NAD ו-FAD משמשים כקו-אזנים והם מעבירים מימנים בנשימה התאית.

נשימה (breathing) – התהליך של חילופי גזים בין האורגניזם לסביבתו; בתהליך הנשימה האורגניזם קולט חמצן ופולט CO_2 .

נשימה תאית (cellular respiration) – מכלול של תהליכים כימיים המתרחשים בתאים של כל האורגניזמים ובמהלכם חומרים אורגניים עוברים חמצון הדרגתי תוך כדי שחרור אנרגיה, המנוצלת לבניית מולקולות ATP; האנרגיה המופקת בתהליך הנשימה התאית משמשת לביצוע תהליכים בתאים.

נשימה תאית אווירנית (aerobic respiration) – נשימה תאית המתרחשת בתאים של רוב האורגניזמים; בנשימה תאית אווירנית חל פירוק וחמצון של תרכובות אורגניות בנוכחות חמצן. התרכובות האלה מתפרקות עד לקבלת התוצרים הסופיים: CO_2 ומים.

נשימה תאית אל-אווירנית (anaerobic respiration) – נשימה תאית שמתרחשת בתאי חיידקים שחיים בסביבות חסרות חמצן; בתהליך הזה חל פירוק וחמצון של תרכובות אורגניות בהעדר חמצן חופשי. קולט האלקטרונים הסופי בתהליך אינו חמצן אלא חומר אנאורגני אחר, כמו: ניטרט, סולפט או CO_2 .

נשיפה (exhalation) – יציאת אוויר מן הריאות, דרך צינורות מערכת הנשימה, אל הסביבה החיצונית, במהלך הנשימה.

סימפונות (bronchi) – שני הצינורות שמסתעפים מקנה הנשימה, האחד לריאה השמאלית והאחר לימנית; הסימפונות מסתעפים לסימפוניות. דופנותיהם עבים והם מכילים סחוס ושרירים. בצדם הפנימי מכוסים הסימפונות באפיתל רירי וריסני.

עמידות כללית נרכשת (עמידות סיסטמית נרכשת)

(systemically acquired resistance; SAR) – עמידות המתפתחת בכל חלקי הצמח בעקבות פגיעה של מזיק או פלישה של פתוגן; העמידות היא בפני התוקף שפגע, בפני פגיעה חוזרת של אותו תוקף ובפני פגיעה של מגוון רחב של תוקפים אחרים.

עצה (xylem) – מערכת צינורות הובלה בצמחים המעבירה מים ויסודות מינרליים מן השורשים אל כל חלקי הצמח; העצה גם משמשת לתמיכה ולאגירת חומרים. רוב התאים המרכיבים את צינורות העצה הם תאים מתים עבי דפנות.

פגוזום (phagosome) – שלפוחית בציטופלסמה של תא בלען, שבה מתפרקים גורמים זרים באמצעות אנזימים מעכלים.

פגוציט – ראו תא בלען.

פגוציטוזה – ראו בלענות.

פוטנציאל מים (water potential) – המדד שמבטא את השפעת המומסים בתא בעל דופן על קליטת המים; פוטנציאל המים קובע אם מים ייכנסו לתוך תא או ייצאו ממנו.

פויקילותרמים (poikilotherms) – בעלי חיים שטמפרטורת הגוף שלהם משתנה והיא מושפעת משינויים בטמפרטורת הסביבה; מקור החום שלהם הוא חימום וטמפרטורת גופם מווסתת במנגנונים התנהגותיים בלבד.

פטוטרת (petiole) – החלק הצר בבסיס העלה; מעין "גבעול" שנושא את טרף העלה.

פיברין (fibrin) – חומר בעל מבנה סיבי, בלתי מסיס, שמהווה מרכיב מרכזי בקרישי דם.

פיברינוגן (fibrinogen) – חלבון מסיס המצוי בדם; בהשפעת האנזים תרומבין הוא נהפך לפיברין. קשור למנגנון קרישת הדם אצל חולייתנים.

פיגמנט (צבען) (pigment) – כל חומר שבולע אור; רוב הפיגמנטים בולעים אור באורכי גל מסוימים, ומחזירים או מעבירים אורכי גל אחרים, ועל ידי כך קובעים את צבעו של החומר.

פיוניות (stomata) – פתחים זעירים באפידרמיס של עלים וגבעולים לא מעוצים, שדרך מתרחש חילוף גזים בין הצמח לבין הסביבה, כולל אידוי מים; CO_2 נכנס מבעד לפיוניות, ואדי מים וחמצן יוצאים דרכן.

פיטואלקסינים (phytoalexins) – מטבוליטים משניים שנוצרים בצמח בתגובה לחדירת פתוגן; הפיטואלקסינים מרחיקים את הפתוגן או מעכבים את התפתחותו. הם נוצרים גם בתגובה לעקה אביוטית.

פירוגנים (pyrogenes) – חומרים שמופרשים מתאי דם לבנים וגורמים לעליית

הטמפרטורה באזור שבו הם נמצאים.

פירמידות הכליה (renal pyramids) – מבנים דמויי משולש בליבת הכליה; בפירמידות הכליה נמצאים לולאות הנלה, כלי דם שמקיפים אותן וצינורות מאספים. ראשה של כל פירמידה מסתיים באגן הכליה.

פיתוח בר-קיימא (קיימות) (sustainable development) – ניצול משאבים לטובת האדם באופן שלא תיפגע היכולת של המערכות לקיים חיים בעתיד; ניצול השטח צריך להיות כזה שהמשאבים בו לא ידולדלו.

פלסמה (plasma) – החלק הנוזלי של הדם (ללא תאי הדם); מהווה 55% מנפח הדם. כ-90% מן הפלסמה הם מים והשאר – חומרים מומסים שונים.

פלסמודסמטה (plasmodesmata) – חוטי פלסמה דקיקים שחוצים את דופנות התאים הצמחיים, מקשרים בין הציטופלסמה של תאים סמוכים ומאפשרים מעבר חומרים מתא לתא.

פס קספרי (Casparian strip) – שכבה בלתי חדירה, עשויה מחומר דמוי שעווה, בדופן תאי האנדודרמיס בשורשים; מונעת מעבר של מים ויסודות מינרליים אל הגליל המרכזי של השורש במסלול התנועה דרך דופנות התאים.

פעמת לב (heartbeat) – רצף שלם אחד של כיווץ והרפיה של חלקי הלב; במהלכו, נכנס נפח של דם ללב ואותו נפח יוצא ממנו. באדם, כל פעימה נמשכת כ-0.8 שניות, ובמהלכה זורם הדם בלב, מן העליות אל החדרים ומן החדרים אל העורקים.

פפילות (papillae) – מבנים סוכריים שנוצרים בצמח על הדופן הפנימי של תאים, בתגובה לחדירה של פתוגנים מסוימים.

פקעית (glomerulus) – ראו גופיף מלפגי.

פרותרומבין (prothrombin) – ראו תרומבין.

פרידרם (periderm) – רקמת חיפוי משנית; בצמחים מעוצים, היא באה במקום האפידרמיס. הרקמה מורכבת מפלוגן ומתאי שעם.

פריציקל (pericycle) – השכבה החיצונית של הגליל המרכזי בשורש בין האנדודרמיס ובין השיפה; הפריציקל עשוי שכבה אחת או שכבות אחדות של תאי פרנכימה צפופים, דקי דופן.

פריקה (unloading) – תנועת סוכרים בצמח מצינורות הכברה לתאים שבהם הם נצרכים במבלעים.

פרנכימה (parenchyma) – הרקמה הנפוצה ביותר בגוף הצמח; מורכבת מתאים חיים גדולים בעלי דפנות דקות וביניהם חללים בין-תאיים רבים מלאים באוויר; תאי הרקמה משתתפים בפוטוסינתזה, באגירת פחמימות, בהפרשה ובתפקידים אחרים.

הקוטיקולה מורכבת משעווה, מקוטין ומתאית ומופרשת משכבת האפידרמיס; מגנה מפני איבוד מים, ובמידה מסוימת גם מפני פלישה של פתוגנים.

קולחים (treated wastewater) – שפכים שעברו תהליך טיהור וניתן להשתמש בהם להשקיית גידולים חקלאיים ולתעשייה.

קולטן (receptor) – מולקולה על פני קרום התא שהמבנה המרחבי הייחודי שלה מותאם למבנה מרחבי של גורם אחר; תכונה זו מאפשרת לקולטן להיקשר אל הגורם האחר באופן ייחודי.

קולנכימה (collenchyma) – רקמה בצמח שמקנה תמיכה וגמישות לחלקי צמח הנמצאים בצמיחה, כגון: קליפת גבעולים צעירים ועורקי עלים; הקולנכימה מורכבת מתאים מוארכים המסוגלים להוסיף ולהתאריך.

קופסית באומן (Bowman's capsule) – ראו גופיף מלפגי.

קוצב לב (pacemaker) – קבוצת תאי שריר, בלב של חולייתנים, שבהם מתחילים הגירויים החשמליים שגורמים להתכווצות שריר הלב.

קוצר נשימה (shortness of breath) – קשיי נשימה כתוצאה ממאמץ גופני מוגבר או כתוצאה ממחלות, שבהן יש הפרעה באורור הריאות, כגון: אסתמה או מחלת לב.

קיבול שדה (field capacity) – מצב שבו הקרקע מחזיקה את מלוא כמות המים האפשרית, לאחר שהסתיים הניקוז שנגרם על ידי כוח הכובד.

קיבולת חיונית (vital capacity) – נפח האוויר המרבי שאדם יכול לנשוף לאחר שאיפה מרבית; שיעורו אצל אדם בריא בוגר הוא 4-5 ליטרים.

קליפת הכליה (renal cortex) – האזור החיצוני של הכליה; נמצאים בו גופיפי מלפגי, קופסיות באומן, האבוביות המקורבות והאבוביות המרוחקות.

קליפת העץ (cortex) – הרקמה בגבעול שנמצאת בין הגליל המרכזי ובין האפידרמיס; מורכבת בעיקר מתאי פרנכימה.

קמביום (cambium) – רקמה מריסטמטית (עוברית) שבין העצה לשיפה, בגבעול ובשורשים; הקמביום יוצר עצה כלפי פנים ושיפה כלפי חוץ וגורם להתעבות משנית של שורשים וגבעולים.

קנה הנשימה (trachea) – צינור הנשימה בחולייתנים יבשתיים; מחבר את הסביבה החיצונית אל הריאות. קנה הנשימה מחובר בצד אחד אל הלוע ובצד האחר הוא מסתעף לשתי סימפונות. דופנותיו עבים והם מכילים סחוס ושרירים, ומכוסים בצדם הפנימי באפיתל רירי וריסני.

קצב הלב (heart rate) – מספר פעימות הלב בדקה.

קצב נשימה (breathing rate) – מספר שאיפות או מספר נשיפות בדקה.

קצרת – ראו אסתמה.

פתוגן (pathogen) – אורגניזם הגורם למחלה.

צדר (pleura) – ראה אדר.

ציטופלסמה (cytoplasm) – כל האברונים, הגופיפים, והחומרים הנוזליים למחצה, התחומים בתוך קרום התא, פרט לגרעין.

צינור כברה (sieve tube) – צינור להובלת תוצרי הפוטוסינתזה ברקמת השיפה; מורכב מחוליות צינורות כברה שניצבות זו על גבי זו.

צינור מאסף (collecting duct) – חלק מן הנפרון שמחובר לאבובית המרוחקת ונמצא בליבת הכליה; הצינורות המאספים מכל הנפרונים מתלכדים באגן הכליה לצינור מוביל השתן, שיוצא מן הכליה אל שלפוחית השתן. בצינור המאסף מתרחשת ספיגה חוזרת של מים אל הדם.

צינור מוביל השתן (ureter) – הצינור שבו זורם השתן מהכליה אל שלפוחית השתן; צינור מוביל השתן מנקז באגן הכליה את הצינורות המאספים מכל הנפרונים בכליה.

צינורות לימפה (lymphatic ducts) – ראו מערכת הלימפה.

צינורות מלפגי (Malpighian tubules) – צינורות מערכת ההפרשה של חרקים ועכבישים; חומרי פסולת מסתננים מן הדם אל חלל צינורית מלפגי ומתרוקנים למעי.

צמח מעוצה (woody plant) – צמח שגדל להיות עץ או שיח והגבעול שלו מתעבה ונעשה קשיח.

צמרמורת (shiver) – רעד בלתי רצוני של שרירי הגוף, שמופעל בתגובה לירידה בטמפרטורת הגוף; הרעד הזה מגביר את ייצור החום וגורם לחימום הגוף.

צרו צינורות (bundle vascular) – קבוצה של צינורות הובלה העוברת לאורך הגבעול, הענפים והעלים; צרו צינורות מורכב מעצה ומשיפה. בדו-פסיגיים הוא מורכב גם מקמביום.

קואבולוציה (coevolution) – שינויים התפתחותיים אבולוציוניים המתרחשים במקביל בשני מיני אורגניזמים המקיימים ביניהם יחסי גומלין.

קואנזים (coenzyme) – מולקולה אורגנית קטנה שקשורה לאנזים וחיונית לתפקודו.

קוהזיה (cohesion) – כוח משיכה שפועל בין מולקולות של אותו חומר וגורם להן להיצמד זו לזו; במים, בגלל המבנה הקוטבי של המולקולה, כוחות הקוהזיה חזקים במיוחד.

קוטין (cutin) – חומר שומני שמהווה את המרכיב העיקרי של שכבת הקוטיקולה.

קוטיקולה (cuticula) – שכבה חיצונית של צמחים ובעלי חיים; בצמחי יבשה,

קרבאמינוהמוגלובין (carbaminoheмоglobin) – מולקולת המוגלובין שקשור אליה CO_2 ; אחת הדרכים שבהן נישא CO_2 בדם.

קרום הנשימה (alveolo-capillary membrane) – הקרום שדרכו עובר החמצן מן הנאדיות לדם, וה- CO_2 עובר מן הדם לנאדיות; מורכב מדופן הנאדיות ומדופן הנימים.

קרינה (radiation) – פליטה של קרני אור באורכי גל שונים; הקרינה העיקרית שנפלטת ונקלטת בבעלי חיים היא קרינה תת-אדומה.

קריש דם (blood clot) – ראו קרישת דם.

קרישת דם (blood clotting) – תגובת שרשרת שמתרחשת בתגובה לפציעה בכלי דם; יש לה תפקיד מרכזי בעצירת הדימום. בתגובת השרשרת משתתפים חומרים שונים (גורמי קרישה) שמקורם בטסיות הדם או בפלסמה.

קרן ליבה (pith ray) – רקמת תאי פרנכימה הנמצאת בין צורות צינורות בגבעול או בשורש.

קשרי לימפה (lymph nodes) – אתרים קטנים במערכת הלימפה של יונקים ושל חלק מן העופות; קשרי הלימפה מרוכזים בעיקר סביב פתחים בגוף ובמקומות של ניקוז איברים. יש בהם לימפוציטים שפעילים בתגובת החיסון הייחודית.

רובד טרשתי (plaque) – ראו טרשת העורקים.

ריאה (lung) – איבר הנשימה העיקרי של מרבית בעלי החיים היבשתיים (חוץ מחרקים), של דגי ריאה ושל דו-חיים בוגרים; הריאות, הן זוג שקים אלסטיים שנמצאים עמוק בתוך הגוף והם מחוברים במערכת צינורות מסועפת אל הסביבה החיצונית. בריאות מתקיים חילוף הגזים בין הדם לסביבה.

רעלן (toxin) – חומר רעל שמקורו באורגניזמים מסוימים ופועל על אורגניזמים אחרים.

רקמת העצה – ראו עצה.

רקמת חיבור (connective tissue) – רקמה המתפקדת בתמיכה, בהגנה ובריפוד של איברים בגוף בעלי חיים; מורכבת מתשתית בסיסית שמופרשת על ידי תאים, ובתוכה סיבים ותאים שונים. יש רקמות חיבור שונות, כמו: עצם, סחוס, גידים ודם, ולכל אחת מהן תכונות אחרות.

שאיפה (inhalation) – הכנסת אוויר מן הסביבה החיצונית אל תוך הריאות בתהליך הנשימה.

שומן חום (brown fat) – סוג של שומן, שנאגר בוולדות של יונקים (ביניהם האדם), ובבוגרים שנכנסים לתרדמת חורף; ברקמת השומן החום יש ריכוז גבוה במיוחד של טיפות שומן, ופירוקן הוא אמצעי יעיל לייצור חום.

שופכה (urethra) – צינור שרירי שדרכו זורם השתן משלפוחית השתן אל מחוץ לגוף.

שטח כברה (sieve area) – אזור מנוקב כמו כברה (מסננת); נמצא בדופנות אלמנטים של כברה ברקמת השיפה בצמח. דרך הנקבים עוברים הסוכרים מתא לתא, באמצעות חוטי פלסמה.

שיפה (phloem) – מערכת צינורות הובלה בצמח; דרכם מועברים סוכרים, שנוצרים בתהליך הפוטוסינתזה, מן העלים אל כל חלקי הצמח. השיפה מורכבת מתאי הובלה חיים, מתאי פרנכימה ומסיבים.

שכבת בידוד (insulating layer) – שכבה שמפחיתה את איבוד החום מן הגוף לסביבה; נוצרת, פרווה, שיער ושומן הם שכבות בידוד. שכבת בידוד מצויה אצל בעלי חיים אנדותרמיים מעל לעור או מתחת לעור.

שכבת ניתוק (abscission layer) – שכבת תאים דקי דופן שנמצאת בבסיס עלים, פרחים, פירות או חלקי צמח אחרים; השכבה מנתקת איברים או אזורים בצמח. שכבת ניתוק שנוצרת לאחר הדבקה בפתוגנים מאפשרת הפרדה בין חלקים נגועים לחלקים אחרים שעדיין לא נדבקו.

שכבת שומן (fat layer) – שכבה מתחת לעור שמשמשת כשכבת בידוד; מפחיתה את איבוד החום מן הגוף לסביבה. שכבת שומן מצויה אצל יונקים ועופות מים, ועוֹבִיָּה מותאם לתנאי הסביבה.

שלפוחית שתן (urinary bladder) – שק גמיש ובו מצטבר השתן באופן זמני לפני הפרשתו מן הגוף.

שמנים אֶתֶרִיִּים (essential oils) – מטבוליטים משניים נדיפים שמקנים ריח מיוחד לעלווה ולפרחים של צמחים מסוימים, וחלקם דוחים מזיקים ופתוגנים; השמנים האתריים נוצרים בשערות בלוטיות באפידרמיס.

שעם (cork) – שכבה בצמחים המורכבת מתאים מתים; בדופן של התאים האלה יש סוברין, שהוא חומר בלתי חדיר למים ולגזים. שכבת שעם מונעת התפשטות פתוגן בצמח.

שפכים (wastewater) – מים משומשים שעברו זיהום ואינם ראויים עוד לשימוש כלשהו.

שפרונים (chaperones) – חלבונים יציבים שנצמדים לחלבונים ששרויים בסכנה של איבוד המבנה התקין שלהם, ומחזירים אותם למצבם המתפקד; רבים מהשפרונים הם חלבונים של עקת חום, והם נוצרים בתגובה לחשיפה לטמפרטורות גבוהות.

שקי אוויר (air sacs) – חללים מלאי אוויר בעופות, המסתעפים מן הריאות וחודרים אל בין איברי הגוף הפנימיים ואפילו אל תוך העצמות הגדולות החלולות; שקי האוויר מייעלים את הנשימה ומפחיתים את המשקל הסגולי של העופות.

תאי T-עוזרים – ראו לימפוציטים T-עוזרים.

תאי גביע (goblet cells) – תאי בלוטה דמויי גביע שנמצאים ברקמות האפיתל של מערכת הנשימה ומערכת העיכול; תאי הגביע מפרישים ריר שיש לו תפקיד חשוב במניעת חדירת זיהומים לגוף.

תאי גזע של הדם (stem cells blood) – תאים במוח העצם שלא עברו התמיינות; הם מתחלקים כל הזמן ומהם נוצרים כל הסוגים של תאי הדם.

תאי הרג טבעיים (natural killer cells) – לימפוציטים שמשותפים בתגובת החיסון התאית; פוגעים בתאים סרטניים ובתאים שהותקפו על ידי נגיפים באופן דומה לפעולתם של תאי T-הורגים.

תאי זיכרון (memory cells) – לימפוציטים מסוג T ומסוג B, בעלי תוחלת חיים ארוכה; נוצרים בתגובת חיסון ראשונית ומופעלים בתגובת חיסון שניונית; לאחר שנוצרו, הם מהווים חלק מאוכלוסיית הלימפוציטים בגוף.

תאי לוואי (companion cells) – תאי פרנכימה בעלי גרעין, שמצויים ברקמת השיפה בצמחים ומתלווים לאלמנטים של כברה באמצעות פלסמודסמה; מסייעים בהעמסת סוכרים אל תוך צינורות הכברה.

תאי פִּיטוּס (mast cells) – תאים שמשותפים בתגובות האלרגיות; מרוכזים בעיקר במקומות שדרכם יכולים לחדור לגוף גורמים זרים. מכילים חומרים, כמו: הפריין, היסטמין וסרוטונין, אשר מופרשים בתגובה לנוכחות אלרגנים.

תאים ממאירים (תאים סרטניים) (cancer cells) – תאים שחל בהם שיבוש במנגנון הבקרה של החלוקה והם מתרבים בצורה בלתי מרוסנת.

תגובת חיסון הומורלית (humoral immunity) – תגובת חיסון המתבצעת על ידי נוגדנים ייחודיים לאנטיגן; תגובה זו יעילה בעיקר נגד אנטיגנים המגיעים אל נוזלי הגוף כגון: נגיפים, חיידקים ורעלים.

תגובת חיסון ייחודית (immune response specific) – תגובת מערכת ההגנה המתרחשת בעקבות זיהוי ייחודי של גורם זר; התגובה מתקיימת באמצעות נוגדנים ותאים בעלי קולטנים, המותאמים ייחודית לגורם הזר.

תגובת חיסון ראשונית (primary immune response) – תגובת מערכת החיסון, שמתפתחת לאחר פגישה ראשונה עם אנטיגן מסוים; התגובה מתפתחת לאט; עוצמתה ויעילותה פחותים מאלה של תגובת חיסון שניונית.

תגובת חיסון שניונית (secondary immune response) – תגובת חיסון המתפתחת לאחר מפגש חוזר עם אנטיגן מסוים; התגובה השניונית מהירה יותר מהתגובה הראשונית, והיא מתבצעת על ידי מספר תאים רב יותר מאשר בתגובה הראשונית.

תגובת חיסון תאית (cellular immunity) – תגובה חיסונית המתבצעת על ידי

שריר הסרעפת (diaphragm) – שריר שנמצא בתחתית בית החזה; מהווה מחיצה שרירית בין חלל הבטן לבין חלל בית החזה, ופועל במשותף עם השרירים הבין-צלעתיים בתהליך האוורור הריאתי.

שרירים בין-צלעתיים (intercostal muscles) – שרירים שנמצאים בין הצלעות ופועלים במשותף עם הסרעפת בתהליך האוורור הריאתי.

שָׁרֵף (resin) – חומר דביק המופרש מרוב הצמחים בתגובה לפציעה; השרף מתקשה מאוד כשנחשף לאוויר. סותם רווחים בין-תאיים סביב אזור הדבקה בפתגון ומונע את התפשטות הפתגון.

שרשרת העברת אלקטרונים (electron transfer chain) – קבוצה של חומרים בעלי נטייה לקשור אלקטרונים בקרום הפנימי של המיטוכונדרון. חומרים אלה משותפים בתהליך הזרחון החמצוני, בנשימה התאית האווירנית. האנרגיה שמשחררת במעבר האלקטרוניים בשרשרת משמשת בסופו של הזרחון החמצוני לייצור ATP.

שתן (urine) – הנוזל שנוצר בכליות ומופרש מן הגוף דרך השופכה או הביב; השתן מורכב ממים, מחומרי הפרשה חנקניים (בעיקר שתן או חומצת שתן), מיונים שונים וכן מכמויות מזעריות של פיגמנטים.

שתנן (urea) – חומר ההפרשה החנקני שנוצר מפירוק חלבונים אצל יונקים, דו-חיים וכרישים; השתנן מתמוסס היטב במים ורעילותו נמוכה, יחסית. הוא נוצר בכבד, מגיע אל הכליות ומופרש בשתן.

תא בלען (פגוציט) (phagocyte) – תא שבולע חומרים ותאים זרים ומעכל אותם; נויטרופילים ומקרופאגים הם תאים בלעניים.

תא דם אדום (erythrocyte) – תא הדם השכיח ביותר בדם; מכיל כמות גדולה של המוגלובין; מוביל חמצן בדם אל כל רקמות הגוף. צורתו כדסקית קעורה; הוא קטן וגמיש, וכשהוא בשל הוא חסר גרעין ואברונים תאיים אחרים.

תא דם לבן (leukocyte) – תא דם גדול, יחסית, בעל גרעין ואברונים; בחולייתנים, הוא משתתף בהגנה על הגוף מפני גורמים זרים. יש כמה קבוצות של תאי דם לבנים, ולכל קבוצה יש תפקיד אחר במערכת ההגנה והחיסון של הגוף.

תא מציג אנטיגן (antigen-presenting cell) – תא המציג על פני הקרום שלו תצמיד אנטיגן-MHC; לימפוציטים המזהים את תצמידי האנטיגן-MHC מגיבים בהפעלת תגובת חיסון.

תאי B – ראו לימפוציטים B.

תאי T – ראו לימפוציטים T.

תאי T-הורגים – ראו לימפוציטים T-הורגים.

תאי T-מדכאים – ראו לימפוציטים T-מדכאים.

לימפוציטים T, שנוודים לעבר תא המטרה והורסים אותו; תגובה זו יעילה נגד תאים שחדר אליהם אנטיגן, נגד תאים מושתלים ונגד תאים סרטניים.

תגובת רגישות יתר (hypersensitive response) – תגובת הצמח להתקפת פתוגן או לנזק מכני; התגובה באה לידי ביטוי במוות של התאים באזור הפגיעה.

תימוס (הרת) (thymus) – איבר לימפה הנמצא בחלק הקדמי של בית החזה; לתימוס יש תפקיד חשוב בהתמיינות תאי T.

תסיסה (fermentation) – תהליך מטבולי שמתרחש במינים אחדים של שמרים ושל חיידקים ובמהלכו מופקת אנרגיה; בתהליך התסיסה חל פירוק וחמצון של תרכובות אורגניות ללא נוכחות חמצן.

תסיסה כוהלית (alcohol fermentation) – תהליך תסיסה שבו התוצר הסופי הוא הכוהל אתנול; תסיסה כוהלית מתרחשת בעיקר בשמרים ובמינים אחדים של חיידקים. התסיסה הכוהלית של שמרים מנוצלת לייצור יין ובירה ולהתפחת בצק.

תסיסת חומצת החלב (lactic acid fermentation) – תהליך תסיסה שבו התוצר הסופי הוא חומצת החלב; תסיסת חומצת החלב מתרחשת במינים אחדים של חיידקים ובתאי שריר של רוב החולייתנים. תסיסת חומצת החלב מנוצלת לייצור מוצרי חלב, להחמצת ירקות ולייצור תחמיץ לבקר.

תסנין (ultrafiltrate) (בכליה) – התמיסה המימית שמסתננת בגופי מלפיגי בכליה והופכת לשתן לאחר ספיגה חוזרת של מים ומומסים מסוימים.

תעוקת לב (angina pectoris) – כאב בחזה שנובע מפגיעה באספקת הדם לשריר הלב; בדרך כלל - בגלל טרשת בעורק כלילי.

תפוקת הלב (cardiac output) – נפח הדם שמוזרם בדקה מכל אחד מחדרי הלב; זו היא גם כמות הדם הכללית שזורמת במחזור הדם במשך דקה אחת. באדם בוגר, במצב מנוחה, תפוקת הלב היא 5-6 ליטר. תפוקת הלב היא המכפלה של קצב הלב ונפח הפעימה.

תרבית שתן (urine culture) – בדיקה שבה קובעים אם יש זיהום בדרכי השתן, על ידי הדגרת דגימת שתן על מצע לגידול חיידקים ומיקרואורגניזמים אחרים.

תרומבין (thrombin) – אנזים שנוצר בדם בתגובה לפציעה בכלי דם ומשתתף בתהליך קרישת הדם.

תרכיב חיסון (vaccine) – חומר המוחדר לגוף ומכיל גורם מחלה מוחלש או מומת; תרכיב החיסון ניתן כדי לעורר את תגובת החיסון הייחודית נגד אותו גורם מחלה.

תרכיב חיסון גנטי (genetic vaccine) – תרכיב חיסון שמכיל את הגן האחראי לייצור החלבון המחסן.

תרכיב חיסון צמחי (plant vaccine) – תרכיב חיסון המבוסס על חלבון אנטיגני, שמיוצר בצמח מהונדס גנטית.

מפתח

- אוורור ריאתי 96, 98, 104, 107, 111-113, 127,
 393
 אוורור רפתות ולולים 221, 222, 224, 225, 228
 אוטם שריר הלב 68, 70, 393
 אוכלי צמחים 365, 366, 368
 אוסמוזה הפוכה 358, 393
 אוסמורצטורים 182
 אוקסיהמוגלובין 120, 393
 אוקסלואצטט 149
 איבוד חום 195-198, 200, 203, 218-219, 222
 איברי לימפה 89, 90, 393
 אידיוי (ראו התאדות)
 איידס 263, 285-290, 393
 אימונותרפיה 292
 אינטרלוקינים 250-251, 265, 393
 אינטרפרונים 234, 238-240, 292, 394
 אי-ספיקת כליות 185-186, 394
 אלבומין 51, 73, 85, 394
 אלדוסטרון 183, 189, 394
 אליציטורים (ראו משרנים)
 אלמנטים טרכאריים 306, 311, 394
 אלמנטים של כברה 308, 394
 אלקטרוקרדיוגרם (ראו אק"ג)
 אלקלואידים 368, 394
 אלרגיה 107, 282-283, 293, 394
 אלרגן 107, 282-283, 293, 394
 אמבה 9, 18, 93, 163
 אמוניה 162-166, 233, 394
 אנדודרמיס 298, 315, 394
 אנדותל
 בדופן כלי הדם 44-45, 394
 בדימום 80
 דיפוזיה בנימים 51, 52
 בדלקת 235
 בוויסות זרימת הדם 56, 58
 בטרשת העורקים 63, 64, 67, 70, 135
 בנימי הלימפה 88
 בנימי הפקעית 176
 אנדותרמים 198-207, 211, 218, 225, 394
 אנטיגן 237, 244-253, 259-264, 272, 273,
 281-283, 291, 394
 אנטיגנים של תואם הרקמות 265-269, 273,
 394, 400
 אנטיטרנספירנטים 340
 אנמיה 77-78, 394
 אנרגיה
 אנרגיית חום 196, 197, 200
 בנשימה התאית 39, 76, 92, 96, 106,
 146-158, 216, 218, 219, 223
 בתהליכים צורכי אנרגיה 177, 181, 182, 219,
 319, 323, 324, 358
 אסתמה 107-108, 283, 394
 אפידרמיס (בצמחים) 298-302, 304-305, 315,
 316, 364, 394
 אפיתל 102, 176, 394
 אפקט בוהר 123, 394
 אצטאלדהיד 156
 אצטיל קואנזים A 148-149, 152, 154
 אק"ג 36, 42, 394
 אקטותרמים 197-206, 211, 238, 394
 אריתרופויטין 76, 126, 394
 אתנול 156
ב
 בדיקת דם 84-85, 394
 בדיקת שתן 184, 395
 בועית מזון 9, 395
 בועית מתכווצת 9, 395
 בורסה 248
 בוצה 357
 בזופילים 75, 282, 395
 ADH 182-183, 189, 393
 ADP 80, 146-147, 149, 151, 393
 ATP 146-152, 202, 210, 393
 DNA 246, 261-262, 265, 285, 287, 291
 HIV 286-289, 293, 393
 MHC 265-267, 273, 400
 NO 56-58, 131
 pH
 השפעה על אוורור ריאתי 112, 117
 השפעה על קשירת חמצן להמוגלובין 130, 131
 ויסות בגוף 8, 18, 19, 157, 181, 183
 Rh 268-269, 273
א
 אבובית 172, 175-183, 189, 393
 אבולוציה
 של הגנה בצמחים 364, 378, 379
 של ויסות טמפרטורת הגוף 195, 197, 198
 של מערכת ההגנה בבעלי חיים 334
 של מערכת ההובלה בבעלי חיים 9, 15, 16, 17, 19
 של מערכת הנשימה 93, 96, 98, 101
 אבי העורקים 23-30, 393
 זרימת הדם 46-48
 תאי חישה כימיים 37, 38, 44, 58, 112
 אביוטי 373, 376
 אבנים בכליות 184-185, 189, 393
 אבעבועות שחורות 259-260
 אגן הכליה 172, 174, 393
 אדהזיה 316, 318-319, 326, 393
 אדר 102, 105-106, 393
 אדרנלין 38, 393

- ביב 166
 בידוד
 גגות של רפתות ולולים 225, 222
 שכבת בידוד 199-198, 211, 216, 218, 406
 בלירובין 85
 ביקרבונט 125-123, 128, 395
 בית החזה 24, 32, 36, 104-106, 117
 בלוטות 165, 167, 252
 זיעה 171, 199, 201, 209, 219, 395
 לימפה 243, 288
 תאי בלוטה 102-104
 בלען (ראו תא בלען)
 בלענות 235, 395
 בצקת 53, 90, 186, 238, 395
 ברזל 73, 78, 84, 85, 120
- ג**
 גינר אדוארד 259, 260
 גבעול 300-303, 310-309, 319, 322, 339
 גורם זר
 בדחיית שתלים 265-268, 273
 בהטעית מערכת החיסון 280-283, 291-292
 בהפעלת מערכת החיסון 8, 18, 78-79, 86, 89
 210, 230-240, 243-245, 249, 253, 259
 גורמי קרישה 81-82, 238, 292, 395
 גזע (עץ) 302-303, 322, 365, 386
 גזע המוח 112
 גיאופיטים 338, 395
 גלובולינים 73, 84, 395
 גלוקוז 395
 בדם 73, 84, 85, 176
 בנשימה תאית אווירנית 147-152
 בנשימה תאית אל-אווירנית 154-158
 בשתן 181, 184
 בתמיסת דיאליזה 186
- בתסנין בכליות 176, 177
 גליל מרכזי 299, 301, 325, 395
 גליקוליזה 147-148, 151-159, 395
 גמצים 306, 395
- ד**
 דגים
 הפרשה 166-168
 ויסות טמפרטורת הגוף 194, 197, 202, 205, 211
 מחזור הדם 16, 19
 נשימה 93-95, 98
 דו-חיים
 הפרשה 162, 168
 ויסות טמפרטורת הגוף 197, 205, 211
 מחזור הדם 16, 17
 נשימה 96
 דום לב 68, 270, 395
 דופן התא 395
 מבנה 299, 301, 302, 306-308, 311, 336
 כמנגנון הגנה 364, 373-377, 379
 מעבר חומרים דרך 298, 315, 316, 324
 דו-פסיגיים 301, 305, 309, 395
 דיאליזה 186-189, 395
 דיאסטולה 30-32, 40, 395
 דיות 304, 316-319, 325, 329, 331, 334-341, 346-349, 395
 דימום 53, 77-83, 86
 דיפוזיה 395, 396
 בבעלי חיים 9-13, 18, 51-52, 59, 93-98, 114-117, 120-121, 163-166, 176, 182-186, 179
 בצמחים 296, 316, 323
 דליות 63
 דלקת 396
 בכליה 184
 כמנגנון הגנה 210, 234-240
- בסימפונות 107-108, 133-134, 140
 בקשרי הלימפה 90
 בריאות, במחלת האיידס 288
 בתגובה אוטואימונית 281
 דם 396
 בדיקת דם 84-85
 דם בלב 25-27, 30-40
 דם ורידי 23-27, 115, 396
 דם עורקי 23-27, 115, 396
 הרכב הדם 72-79
 ויסות זרימת הדם לרקמות 55-59
 זרימת הדם 44-47
 לחץ הדם 48-50, 135, 139
 מחזור הדם 14-17, 19, 23-24
 מחלות דם 63-70, 135-136, 140
 נפח הדם 38, 40, 53, 55, 182
 קרישת הדם 63, 65, 66, 73, 74, 79-86, 238
 דמיעה 319, 396
 דממת 81, 82, 396
 דפניה 33-34
 דפנסינים 289
- ה**
 הולכת חום 195, 196, 198, 396
 הומוציסטאין 66, 396
 הומותרמים 197, 207, 211, 396
 הומיאוסטזיס 7, 8, 18, 19, 38, 73, 162, 167, 195, 207, 211, 235, 396
 הורמונים
 הובלה בדם 18, 19, 73, 84
 הורמון הנעורים בחרקים 369
 הורמוני מין במחלות אוטואימוניות 282
 ויסות מאזן המים (אלדוסטרון) 182, 183
 ייצור תאי דם אדומים (אריתרופויטין) 76
 בצמח 323, 336
 הזעה 182, 201, 208, 209, 211, 220, 222, 225, 396

- הנשמה 96, 98
 זיהום
 אוויר 138-142
 מי תהום 352-355, 357-360
 זיכרון חיסוני 244, 248, 250-253, 260, 264, 397
 זימים 16, 93-94, 98, 166, 397
 זיקוק תרמי 358
 זרחה 146, 147
 זרחון חמצוני 149-152, 397
 זרימה מקבילה 94-95
 זרימה נגדית 397
 בזימים ובריאות של עופות 94, 95, 98
 בחילוף חום 204, 211
 בכליה 178-180
 זרימת לחץ 323-326, 397
 זרימת מסה 323-326, 397
 זריעת עננים 359, 360, 397
 זריקות דחף 260, 261, 263, 397
- ח**
 חגב 14, 15
 חד-פסיגיים 302, 305, 397
 חד-שנתיים 338, 346, 387
 חד-תאיים
 הובלה 9, 18
 הפרשה 163, 167
 חילוף גזים 92, 93, 98
 נשימה תאית 154
 חדר (בלב) 24-27, 30-32, 35-36, 40, 46, 48, 68, 397
 חוליות טרכאה 306, 397
 חוליות צינורות כברה 308, 398
 חולייתנים 398
 הפרשה 165-168
 מזיקים לצמחים 362, 365
 מערכת הדם 7, 14-19, 23
- התאמה 126, 127, 128, 397
 התנגדות היקפית 47, 48, 55, 56, 397
 התעטשות 231, 232
 התעלפות 49, 113
 התפלה 358, 360, 397
 התקף לב 68-70, 397
- ו**
 ויטמינים 66, 78, 84, 185
 ויסות
 הדיות 339, 349
 זרימת הדם 55-59, 203
 חומציות הדם 183
 טמפרטורת הגוף 11, 18, 38, 151, 194-212, 218-225, 237
 נפח המים וריכוז המלחים 175, 181-183
 הנשימה 111-112, 123
 קצב הלב 37-38
 תפקידי הדם בוויסות 18, 19
 ורידונים 23, 47, 48, 59, 172-173, 397
 ורידים
 דופן הוורידים 45, 59
 דליות בוורידים 63
 וריד הכליה 172-173
 ורידי הריאה 24-27, 397
 ורידים חלולים 24-27, 35, 37, 172, 397
 זרימת הדם בוורידים 47, 50, 55
 מבנה ותפקוד 23-27, 44-45, 59, 203-204, 211, 221, 397
 בנייתוח מעקפים 66
- ז**
 זוחלים
 הפרשה 163, 168
 ויסות טמפרטורת הגוף 197, 202, 205, 206, 211
 מחזור הדם 16-17
- הטרוטרמים 197, 396
 הידרה 10, 18, 93
 היסטמין 235, 283, 396
 היפותלמוס 207-212, 396
 היפותרמיה 207, 396
 היפרוונטילציה 113
 היפרתרמיה 207, 220, 396
 הלחתה 201, 214, 219, 220, 225, 396
 הָם (קבוצת) 120, 122, 369, 396
 המוגלובין 74, 76-78, 85, 120-124, 126, 128, 129, 131, 134, 136, 396
 המוליה 267, 396
 המופיליה (ראו דממת)
 המטוקריט 85, 396
 המטרה 343, 346
 המלחה (של מי תהום) 352, 354
 הנדסה גנטית 396
 בבעלי חיים 82, 194
 במיקרואורגניזמים 239, 261, 264
 בצמחים 262, 370, 387, 388, 391
 הסעת חום 195, 196, 396
 הסתגלות 127, 128, 387, 396, 397
 העמסת סוכרים 324-326, 397
 הפרין 83
 הצמחה 249, 267, 272, 273, 397
 הרכבה בצמחים 387, 390
 השקיה 340-346, 353, 356, 390, 397
 בהמטרה 343, 346
 בטפטוף 343, 344, 346, 398
 השתלת כליה 186, 188, 189
 השתלת רקמות 265-271, 273, 397
 התאדות (אידי) 397
 בבעלי חיים 196, 199-203, 211, 219, 220, 222
 בצמחים 300
 בקרקע 331, 335, 341-343, 346, 349, 352

בשיפה 323	בחד-תאיים 93	מערכת החיסון 259, 240, 231-230
רעלנים בצמח 388	בחולייתנים יבשתיים 98-96	מערכת הלימפה 88
בתאי דם 79, 76, 74	בחרקים 95	נשימה 117, 96
חלולית 398, 329, 308	בנאדיות הריאה 134, 117-114, 103	תסיסת חומצת החלב בשרירים 158, 157
חמצון 398, 158, 155-146	בפרוקי רגליים וברכיכות 14	חום
חמצן	בצמחים 334, 305	חום מטבולי 149-146, 151, 152, 195, 197,
בדם עורקי ובדם ורידי 40, 27, 23	ברב-תאיים 92	225, 223, 220-218, 210, 209, 205
הובלה בדם 18, 51, 73, 74, 76, 123-120,	ברב-תאיים ירודים 10	חילוף חום עם הסביבה 196, 195, 212-198,
128	חילוף חום 221, 211, 204, 200, 195	238, 225-218
בחילוף גזים בבעלי חיים 98-92	חילוף חומרים (מטבוליזם) 398	מקורות החום של הגוף 198, 197
בחילוף גזים באדם 104, 107, 112-117, 126,	הפרשת פסולת של חילוף חומרים 167, 162	בתגובת הדלקת 252, 237, 235
127	והובלת חומרים 9, 11, 19, 39	חומצה פחמתית 124-123
בנשימה תאית 146, 147, 150, 152, 154, 155,	וטמפרטורת הגוף 195, 197, 201, 202,	חומצה פירובית 148, 152, 156, 157, 159
158	225, 223, 218, 216, 211-209	חומצות אמיניות
חנקן דו-חמצני 139, 138	בצמחים 340	הובלה בשיפה 326
חנקן חד-חמצני 139, 138, 58-56	חיסון 398	בפלסמה 176, 85, 73, 72, 51, 18
חסינות 398, 289, 283, 282, 259	גנטי 281, 263-262	רעילות בצמחים 369, 368
חסרי חוליות 14, 197, 206, 211, 398	מלאכותי 273, 264-259	חומצת חלב 73, 58, 157, 158, 232, 398
חקלאות אורגנית 355	סביל 398, 273, 264	חומצת לימון 152, 151, 149
חקלאות בת-קיימא 398, 390, 389	פעיל 398, 273, 263-260	חומצת שתן 398, 168, 167, 163
חרیפה 398, 216, 202-201, 198	צמחי 262	חומרי פסולת (של חילוף החומרים)
חרקים	חלבונים	הובלה 73, 58, 55, 51, 15, 14, 11, 10
הפרשה 168, 165, 164	בחיסון 265, 262, 261, 251, 250, 246, 244	הפרשה 162, 164, 165, 167, 171, 175, 181,
כמוזיקים לצמחים 361, 362, 365, 367, 369,	בחלב 220	189, 186
389-385, 378, 377, 375	חלבוני PR 398, 379, 377, 376	חיגור 398, 322
מערכת דם 14	בלימפה 91, 90	חיזור 398, 157, 150, 149, 146
נשימה 98, 95	במזון בעלי חיים 223	חיידקים
ט	במחלות (מוטציות) 104, 70	אל-אוורניים 158-154
טבעות התעבות (טבעות שנתיות) 302, 303, 311,	משרנים 373	גורמי מחלות בבעלי חיים 90, 134, 184, 187,
398	נגיפיים 239, 238	280, 272, 248, 244, 236-230
טבק	שנפגעים על ידי רעלני צמחים 387, 369-367	גורמי מחלות בצמחים 361, 362, 364, 376,
בחיסון צמחי 262	בעקת חום 209	377
נוזקים 137-135, 132, 67	פירוק חלבונים 167, 162, 152	בטיהור שפכים 357
עמידות לנגיפים 387	בפלסמה 51, 52, 74-72, 84, 85, 176, 181,	חילוף גזים 398
בתגובת רגישות יתר 376	238	באדם 102
	בקרישת דם 238, 81, 80	בדגים 93

- טורגור (ראו לחץ טורגור)
 טחול 243, 230, 89, 88
 טטנוס 264, 260, 257
 טילוזה 398, 379, 374
 טירוקסין 210, 209
 טמפרטורת הגוף (ראו ויסות, טמפרטורת הגוף)
 טנינים 398, 368, 367
 טנסיומטר 398, 341, 340
 טסיות דם 398, 176, 135, 86-79, 74
 טפטוף 398, 346, 344, 343
 טפטפות 356, 344, 343
 טרכאולות 399, 95
 טרכאות
 בחרקים 399, 98, 95, 93
 בצמחים 399, 306
 טרכאידים 399, 306
 טָרָף 399, 305, 304
 טרשת העורקים 399, 135, 83, 70-63
- י
 יוני מימן
 בוויסות חומציות הדם 183, 181
 בייצור ATP 151, 150
 בפירוק חומצה פחמתית 124
 יונקות 399, 298, 299, 310, 315, 317, 329-331, 333
 399
 יונקים
 הפרשה 168, 162
 ויסות טמפרטורת הגוף 210, 206, 202-197
 225, 216, 211
 כמזיקי צמחים 368, 362, 361
 מערכת החיסון 248, 243
 נשימה 122, 98-96, 93, 92
 יותרת הכליה 399, 183, 38
- יחס בין שטח פנים לנפח
 וויסות טמפרטורת הגוף 219, 218, 211, 200
 ומהירות הדיפוזיה 93, 76, 52, 22, 18, 13-11
 172, 114, 98, 96
 וקליטת מים בשורשים 333, 298
 ותפקוד העלים 336, 304
 של חלקיקי הקרקע 330
 ייחודיות חיסונית 362, 253-243, 240, 232-230
 293, 273
 יסודות מינרליים 326, 325, 323, 316, 315, 298
- כ
 כולסטרול 399, 84, 70-63
 כימורצפטורים 399, 126, 112, 58
 כלי דם 399
 בוויסות זרימת הדם 59-55
 בוויסות טמפרטורת הגוף 399, 126, 112, 58, 211-209, 204-200
 220-219
 וזרימת הדם 51-46
 מבנה 45, 44
 מחלות 70-63
 במערכת דם סגורה 26, 23, 19, 15, 14
 במערכת ההפרשה 175, 173, 172, 165
 נזקי עישון 135-134
 בעצירת דימום 83, 81-79
 בתגובת האלרגיה 283
 כליה 399
 באדם 183-171
 השתלה 189, 188
 בחולייתנים 166, 165
 כליה מלאכותית 399, 187, 186
 מחלות 189-184
 כשל חיסוני 399, 290-283, 280
 כשל כלייתי 399, 186, 185
- ל
 לב 399
 בחולייתנים 24, 23, 19, 17, 16
 בחסרי חוליות 15, 14
 מבנה באדם 40, 27-24
 מחלות 281, 184, 140, 135, 134, 107, 70-63
 ומערכת הלימפה 89
 ומערכת ההפרשה 172
 פעילות חשמלית 40, 36-35
 פעימות 40, 32-30
 קצב 216, 202, 126, 40, 38-37
 תפוקה 408, 127, 55, 50, 40-38
 לוחות כברה 399, 309, 308
 לולאת הנלה 399, 180-178, 175, 173-172
 לחות אוויר
 והתאדות מים מהקרקע ומהצמח 336, 331, 345, 341
 וויסות טמפרטורת הגוף 229, 222, 196
 ונשימה 141, 102
 לחץ אוסמוטי
 בדם 182, 85, 73, 53, 52
 והומיאוסטזיס 19, 18, 8
 בליבת הכליה 179, 178
 לחץ דם 399
 דיאסטולי 399, 49, 48
 בוויסות קצב הלב 38, 37
 וזרימת הדם 59, 53-48, 46
 לחץ דם גבוה (יתר לחץ דם) 69, 62, 53, 49
 184, 70
 לחץ דם נמוך 49
 במחלות לב וכלי דם 70, 69, 67
 וסינון מנימי הדם 176, 90, 53, 52
 סיסטולי 399, 49, 48
 לחץ חלקי של גזים 399
 באוויר 116, 115
 בריאות וברקמות 123-121, 117-114

- לחץ טורגור 400, 345, 326, 325, 323
 לחץ שורש 400, 326, 319
 לטאות (ויסות טמפרטורת הגוף) 205, 203, 201, 206, 238
 ליבה (של צמחים) 400, 301, 300
 ליבת הכליה 400, 190, 180, 173, 172
 ליגנין 400, 379, 373, 365, 364, 306
 לימפה
 ומערכת החיסון 248, 243, 230
 מערכת הלימפה 402, 91-88, 74, 73, 53
 לימפוציטים 400
 באידס 293, 288-286
 בדחיית שתלים 266, 265
 בכשל חיסוני תורשתי 284
 לימפוציטים B (ראו תאי B)
 לימפוציטים T (ראו תאי T)
 במחלות אוטואימוניות 281
 במערכת הלימפה 91-88
 בסרטן 292
 בתגובת החיסון הייחודית 253-243
 למלת ביניים 400, 373
- מ**
 מאזן המים
 בבעלי חיים 167, 162
 בישראל 360-350
 בצמחים 345, 342, 340, 339, 329
 מאמץ גופני (ראו גם פעילות גופית)
 ונשימה 121, 112, 107
 ותסיסת חומצת החלב 158, 157
 מבצע 400, 326, 325, 322
 מוביל השתן (ראו צינורות מובילי השתן)
 מוגלה 400, 259, 238
 מוחל השיפה 400, 325, 323, 322
 מוח
 בהתמכרות לניקוטין 136
- בוויסות זרימת הדם 58-55, 23
 בוויסות טמפרטורת הגוף 209-207
 בוויסות הנשימה 117, 113-111
 בוויסות פעולת הלב 39, 38, 37
 בוויסות ריכוז השתן 182
 מוח העצם 245, 243, 239-236, 230, 79-74, 68, 400, 248
 השתלה 293, 285, 284, 282
 מוטציה 378, 289, 224, 104, 78, 77, 70
 מולקולות תואם הרקמות (ראו אנטיגנים של תואם הרקמות)
 מזהמים
 באוויר 142-138, 132
 במזון ובסביבה 357, 273, 272, 232
 מזופיל 400, 326, 324, 317, 316, 305, 304
 מזיקים (בצמחים) 385-384, 379-373, 370-362
 400, 390-388
 מחזור 400
 מים 356
 פסולת תעשייתית 355, 354
 שפכים 356
 מחזור הדם
 מחזור בודד 400, 19, 16
 מחזור הגוף 400, 46, 39, 24, 23
 מחזור כפול 400, 19, 16
 מחזור הריאות 401, 46, 40, 39, 24, 23
 מחיצה (בלב) 401, 40, 25, 24, 19, 17, 16
 מחלות
 אוטואימוניות 401, 293, 292, 282, 281
 לב וכלי דם 401, 142, 140, 134, 83, 70-63
 מחלת האמודאים 401, 127
 ממאירות 292, 291, 135
 מטבוליים (ראו חילוף חומרים)
 מטבוליטים משניים 401, 379, 376, 370-366
 מטריקס 401, 151, 150, 148
 מי כובד 401, 329
- מי נגר 402, 401, 360, 359
 מי קולחים (ראו קולחים)
 מי תהום 401, 359, 355-350
 מיוגלובין 401, 135, 122
 מיטוכונדריה 401, 148, 127, 79, 76, 152-150, 202, 210, 308, 401
 מים בלתי זמינים לצמח 330
 מים זמינים לצמח 401, 331-329
 מים חלופיים 360-355, 350
 מים מותפלים 401, 360-358, 350
 מים מליחים 401, 358, 350
 מים שפירים 401, 358, 354
 מיקרואורגניזמים
 כגורמי מחלות בבעלי חיים 272, 257, 232
 כגורמי מחלות בצמחים 377, 376, 362
 בהנדסה גנטית 264, 261
 בתסיסה 158, 157
 מליחות בקרקע 354
 מלפגי מרצילו 164
 מנגנוני הגנה
 בלתי ייחודיים בחולייתנים 240-230
 ייחודיים בחולייתנים 253-243
 מושרים בחולייתנים 240-234
 מושרים בצמחים 379-373
 קיימים בחולייתנים 233-231
 קיימים בצמחים 370-364
 מסתמים 401, 89, 59, 50, 45, 40, 32-30, 26
 מעגל חומצת הלימון 401, 152-148
 מעגל קרבס (ראו מעגל חומצת הלימון)
 מעוצה (גבעול) 309, 303-301
 מעקפים (לכלי דם סתומים) 68-66
 מערכת דם (ראו גם דם) 401
 אבולוציה בחולייתנים 17, 16
 באדם 27-23
 סגורה 401, 168, 19, 15, 14
 פתוחה 401, 19, 15, 14

- נויטרופילים 402, 240, 236
 נימי דם 402
 דיפוזיה דרך הדופן 11, 51-53, 59, 117
 והובלת גזים 120, 123-125
 בימים 94
 מבנה 44, 45, 59, 90
 במערכת הדם 15, 17, 23, 44, 59
 בנפרון 172, 173, 177, 180
 סינון דרך הדופן 52-53, 59, 90, 238
 בפקעית 175-177, 189
 קצב זרימת הדם בנימים 46-48, 59
 בריאות 103, 114-117
 נימי לימפה 88-91, 402
 ניקוטין 49, 132-137, 272, 368
 ניתוח מעקפים 66, 68, 402
 נמטודות 361, 362, 363, 366, 375
 נפח הדם (ראו **זם**, נפח הדם)
 נפח הפעימה 39, 40, 402
 נפח השארית 107, 402
 נפח מת 106, 402, 403
 נפח מתחלף 106, 107, 403
 נפחת הריאות 133, 134
 נפרון 172, 173, 175-183, 189, 403
 נצר 300, 403
 נקודת הכמישה 330, 331, 345, 403
 נרגילה (עישון) 67, 136, 142
 נשאי מימנים 148-150, 403
 נשימה (ראו חילוף גזים)
 נשימה תאית 146-159, 403
 נשימה תאית אווירנית 147-152, 209, 210, 403
 נשימה תאית אל-אווירנית 154-159, 403
 נשיפה 104-107, 116, 123, 403
 נתון 84, 176-178, 181, 183, 344
- מקדם ההשקיה 342
 מקור (בצמחים) 322, 323, 325, 326, 402
 מקורות המים 350, 351, 352, 353, 359
 מקרופאגיים 236-237, 240, 245-250, 265, 287, 402
 מריסטמה 301, 402
 מרכז הלב וכלי הדם 37-39, 58, 111, 402
 מרכז הנשימה 111-113, 117, 402
 משרנים 373, 376, 391, 402
 מתו 343
- נ**
 נאדיות 11, 96, 98, 103, 106-107, 113, 114-117,
 121, 123, 125, 127, 134, 402
 נגיפים
 איידס 272, 286-290, 293
 ואינטרפרונים 234, 238-240
 כאנטיגנים 243-244, 281, 292
 כגורמי מחלות באדם ובבעלי חיים 90, 134, 230, 231
 כגורמי מחלות בצמחים 361-363, 386, 387, 390
 בהנדסה גנטית 262, 387
 וחיסונים 263, 264
 נגר עילי 359, 360, 402
 נוגדי קרישה 83, 84, 238
 נוגדנים 402
 בהשתלת רקמות 266-269
 בחיסונים 260-262, 264
 בסרטן 291
 בשירות הרפואה 272-273
 בתגובה אוטואימונית 281, 282
 בתגובת האלרגיה 283, 293
 בתגובת החיסון 248-253, 287
 נוזל בין-תאי 52, 53, 72, 90, 91, 177-180, 402
 נוזל הלימפה 88-91, 402
- קשר למערכת ההפרשה 165, 168, 177, 180,
 181
 קשר למערכת החיסון 243
 קשר למערכת הלימפה 88, 89
 תפקודים 18, 19
 מערכת ההובלה 401
 בבעלי מערכת דם 14-19
 בחד-תאיים 9, 18
 ברב-תאיים ירודים 10, 18
 ברב-תאיים מפותחים 11
 מערכת ההובלה בצמח 296-311
 מערכת ההפרשה 401
 באדם 171-189
 בחולייתנים 165-168
 בחרקים 164, 165
 בתולעים 163, 164
 מערכת החיסון 243-253, 401
 מערכת הלימפה 53, 73, 88-91, 402
 מערכת הנשימה 402
 באדם (מבנה) 102-103, 117
 בדגים 93-95, 98
 בחולייתנים יבשתיים 96-98
 בחרקים 95, 98
 בעופות 97-98
 מערכת העיכול
 ומערכת ההובלה 8, 11, 55
 ומערכת ההפרשה 165, 166
 ומערכת הלימפה 89, 91
 כמקום חדירה של גורמים זרים 282, 283, 293
 כנפגעת על ידי רעלני צמחים 367
 מערכת העצבים 402
 בוויסות טמפרטורת הגוף 201, 203, 205,
 208
 בוויסות הנשימה 111, 112
 בוויסות קצב הלב 37, 38, 39, 40, 59

ס

סביבה פנימית 403
 וויסות טמפרטורת הגוף 195, 207
 ומערכת הדם 8, 18, 19, 73
 ומערכת ההפרשה 162, 167, 171, 189
 סוברין 375
 סוג הקרקע 330, 331, 343, 346
 סוגי דם 267-272, 273
 סוכרוז 323, 326
 סוכרת 69, 70, 184, 185, 281
 סחוס 102, 103
 סיבים (בצמח) 300, 306-310, 373
 סיגריות 65, 67, 108, 132, 133, 136, 137, 142, 282
 סידן 63, 84, 176, 181, 185
 סימפונות 102, 103, 106-108, 117, 133, 134, 232, 403
 סימפוניות 103, 403
 סינון
 באף 102, 117
 בטיפול בשפכים 357
 במערכת ההפרשה 164, 165, 172, 175, 176, 187, 189
 בנימים 52, 53
 סיסטולה 30, 31, 32, 40, 403
 סיסטיק פיברוזיס 104, 403
 סנדלית 9, 18, 93, 163
 ספיגה חוזרת (בנפרון) 175, 177, 178, 181-183, 189
 סקלרנכימה 301, 306-311, 403
 סרוטונין 80, 81, 403
 סרטן (מחלות) 132-134, 184, 239, 245, 272, 288, 291-293, 403
 סרעפת 102, 104-106, 117, 403

ע

עדשיות 302, 366, 403
 עומס חום 220-225
 עופות
 הפרשה 163, 168, 177
 ויסות טמפרטורת הגוף 197-202, 204, 206, 211, 218-219, 222-225
 מערכת הדם 16, 19
 נשימה 96-98
 עופרת 138, 139
 עור
 בוויסות טמפרטורת הגוף 195-203, 208-212, 219
 כמחוסם בפני גורמי מחלה 231, 232, 234, 240
 עורקים
 זרימת הדם בעורקים 46, 47, 59
 בחילוף חום 204, 211, 221
 טרשת העורקים 63-70, 83, 135
 לחץ דם עורקי 48, 49, 59
 מבנה 44, 45
 במערכת הדם 23, 24, 30, 31, 44, 59, 403
 עורקי הכליה 172, 173
 עורקי הריאות 24, 25, 27, 30, 403
 עורקים כליליים 26, 66, 68, 70, 135, 403
 בעלה 305
 עורקיקים
 ויסות זרימת הדם 56-59
 זרימת הדם 47, 48
 בכליה 172, 173
 מבנה 44, 45, 59
 במערכת הדם 23, 24, 403
 עטלפים 202, 216
 עטרן 132, 135
 עירוי דם 267-268, 273, 284, 288

עישון

מלחמה בעישון 137
 נזקים 69, 70, 132-137, 142
 עלייה (בלב) 24-27, 30-32, 40, 46, 403
 עלים
 כאזורי מקור 322, 324
 דיות 316, 317, 339
 הגנה 365
 התאמה לתנאי יובש 339, 346
 מבנה ותפקוד 300, 304, 305, 310
 מחלות 362, 363, 366
 עמידות צמחים למחלות
 הקניית עמידות 384-390
 עמידות כללית 377-379, 404
 עפצים 362, 363, 375
 עצה 404
 הובלת בעצה 296, 315-319, 325, 326
 מבנה 299, 301, 302, 303, 305, 306-307, 309, 310, 311
 עצירת הדימום 80-82
 עצירת נשימה 112, 113
 עקת חום 209, 219, 223
 ערפיח 141
 פ
 פגוזים 235, 404
 פגוציטוזה (ראו בלענות)
 פגוציטים (ראו תא בלען)
 פוטנציאל מים 316, 317, 325, 330, 404
 פויקילותרמיים 197, 211, 404
 פחמימות 72, 152, 223, 299, 373
 פחמימים 132, 138, 139
 פחמן דו-חמצני (CO_2)
 הובלה בדם 18, 51, 73, 74, 76, 123-126, 128
 בחילוף גזים באדם 104, 107, 112-117

- צינורות מלפגי 164, 165, 405
 ציקלוספורין 266
 צמרמורת 205, 211, 405
 צפק 187
 צרור צינורות 301, 302, 305, 310, 405
- ק**
- קו הגנה ראשון 231, 234, 240, 243
 קו הגנה שני 231, 234, 240, 243
 קו הגנה שלישי 231, 243
 קואבולוציה 378, 379, 405
 קואנזים A 148-152, 405
 קוהזיה 316, 318, 325, 326, 405
 קוטביות 318
 קוטיין 364, 405
 קוטיקולה 300, 305, 316, 334, 336, 364, 379, 405
 קולגן 80
 קולחים 350, 353, 356, 357, 359, 360, 405
 קולטנים 405
 לאנטיגנים 244-250, 265, 266, 286
 למשרנים 373
 לניקוטיין 136
 קולנכימה 301, 306, 307, 405
 קופסית באומן 172-177, 189, 405
 קוצב לב 35-38, 40, 405
 קוצר נשימה 68, 107, 108, 134, 283, 405
 קיבול שדה 329-331, 345, 405
 קיבולת חיונית 106, 405
 קליפת הכליה 172, 173, 180, 405
 קליפת השורש 298, 299, 315, 405
 קליפת הגבעול 300, 301, 302, 322, 405
 קמביום 301, 302, 303, 309, 311, 319, 322, 405
 קנה הנשימה 102, 106, 113, 117, 405
 קצב הלב 35-40, 68, 216, 405
 קצב הנשימה 58, 107, 111-113, 117, 219, 405
- וטרשת עורקים 67
 ולחץ דם 49
 ותפוקת לב 39, 40, 55
 פעימות לב 30-32, 35-40, 135, 216, 404
 פפילות 374, 404
 פקעית 172-177, 189, 404
 פרוטאזות 134, 377
 פורתומבין 73, 83, 404
 פרידרם 302, 404
 פריציקל 299, 315, 404
 פריקה (סוכרים) 325, 326, 404
 פרכימה 299, 301, 305-308, 311, 374, 404
 פתוגנים 405
 באדם ובבעלי חיים 260, 261, 263
 בצמחים 362-367, 373-379, 384-390
 פתחי הנשימה 102
- צ**
- צָדָר
 של אנטיגנים ונוגדנים 249-251, 267
 של תסיות 80, 81
 צָדָר (ראו אדר) 262, 260
 צהבת 260, 262
 ציאניד 132, 369
 ציטופלסמה 405
 והפרשה בחד-תאיים 163
 והתפתחות טילוזות 374
 בנשימה תאית 147, 148, 155, 157
 בצמחים 306, 323, 329
 תנועה של ציטופלסמה 9, 18
 צינור כברה 308, 405
 צינור מאסף 172, 173, 175, 177, 178, 180, 182, 183, 405
 צינור מוביל שתן 165, 168, 171, 172, 189, 405
 צינורות העצה (ראו עצה)
 צינורות לימפה 73, 88, 405
- בחילוף גזים בבעלי חיים 92-98
 בנשימה תאית אווירנית 146-149, 152
 קליטה בפינוניות 334, 336, 340
 בתסיסה 156, 157, 159
 פחמן חד-חמצני (CO) 132-136, 138, 139
 פטוטר 304, 305, 404
 פטמים 219, 224
 פטריות
 כאלרגנים 282
 כגורמי מחלות בצמחים 361-368, 376-377, 384, 385
 בתסיסה 156
 פיברין 63, 80, 81, 83, 292, 404
 פיברינוגן 73, 80, 81, 404
 פיגמנט 76, 122, 205, 404
 פיוניות 404
 ודיות 316, 317, 334, 336, 339, 340, 345, 346
 וחדירת פתוגנים 364, 366
 וחילוף גזים 300, 304, 305, 334, 336
 פיטואלקסינים 376, 377, 379, 404
 פירוגנים 237, 404
 פיתוח בר קיימא 354, 404
 פלנריה 10, 93
 פלסמה 404
 והובלת גזים 120, 124, 126
 הרכב 72-73, 85, 176, 181, 186, 267, 268
 וקרישת דם 80
 פלסמודסמטה 308, 315, 324, 404
 פסולת (ראו חומרי פסולת)
 פסטר לואי 158, 260
 פסי קספרי 298, 299, 315, 404
 פעילות גופנית (ראו גם מאמץ גופני)
 ובצקת 53
 והתקפי לב 69, 70
 וחלוקת הדם לרקמות 55

שריר הלב	שומנים	קרבאמינוהמוגלובין 406, 401, 128, 126, 123
באדם 49, 40-35, 24	בבדיקת שתן 184	קרום בסיס 45, 44
בחולייתנים 19, 16	בוויסות טמפרטורת הגוף 211, 210, 202, 199	קרום הנשימה 406, 115, 114
נזק בטרשת עורקים 70, 69, 68, 58	216	קרינת השמש 406, 222, 206, 205, 196, 195, 185
נזק בעישון 135	בחלב 220	קרישת הדם 406, 238, 86-79, 74, 73, 66, 65, 63
שריר הסרעפת 407, 117, 112, 106-104	במוזן לבעלי חיים 223	קרני הליבה 406, 309, 301
שרירי השלד 89, 59, 50	בלימפה 91, 90, 88	קרקעות (מים בקרקע) 336, 333-329, 319, 316
שרירים	בנשימה תאית 152	346-343, 341-339
בין-צלעתיים 407, 106, 105	ברובד טרשתי 84, 70-63	קשרי לימפה 406, 243, 230, 91, 73
טבעתיים בכלי הדם 58, 56, 55, 45	שופכה 406, 189, 185, 173, 171	קשרי מימן 319, 318
וייצור חום ברעידות 219, 211, 210, 205	שורש	
237	כמבלע 322	ר
מיגלובין 122	מבנה 299-298	רב-שנתיים 346, 338
בפעולת הנשימה 96, 95	מחלות 363, 362	רדיקלים חופשיים 376, 65
שרף 407, 374	וקליטת מים 326, 325, 319, 317, 315, 310	רובד טרשתי 406, 70, 69, 66-63
שרשרת העברת אלקטרונים 407, 150	346, 341, 339, 333	רוח
שתן 407	שחפת 114	השפעה על התאדות ודיות 341, 335, 331
באדם 189, 175, 173-171	שטח פנים (ראו יחס בין שטח פנים לנפח)	345-343
בבעלי חיים 168-162	שטחי כברה 406, 308	וויסות טמפרטורת הגוף 218, 207, 206, 196
כהגנה בפני גורמי מחלות 232	שיפה 406	225, 220
הרכב 184, 181	הובלה בשיפה 326-322, 310, 296	ריאות 406
מחלות 186, 185	מבנה 310, 309-308, 305, 304, 301, 299	באדם, מבנה ותפקוד 108-102
תהליך ריכוז השתן 183, 181, 180, 178, 177	311	בחולייתנים 98-96, 93
189	שכבת בידוד 406, 218, 211, 199-198	חילופי גזים 117-114
שתנן 407	שכבת ניתוק 406, 379, 373	מחלות 288, 264, 184, 142, 140, 137-132
בדם 186, 185, 176, 73	שכבת שומן 406, 202, 199	ריסים 232, 231, 103, 102
בהעברה פעילה לנפרון 181, 180	שלפוחית שתן 406, 189, 173-171, 165	ריפוי גני 285, 284
הפרשה 168, 167, 164, 163-162	שלשול (תולעת) 15, 14	ריר 232, 231, 134, 103
ביעה 232	שלשול 184-181	רעלנים 406
ריכוז בתסנין ובשתן 181, 176	שומנים אתריים 406, 367, 366	במערכת החיסון 272, 264, 249, 243
ת	שמרים 158, 156, 155	בצמחים 389-387, 378, 374, 370-364
תא בלען 407, 240, 237-235, 70, 64, 10	שעם 406, 379, 375, 302, 298	ש
תא גזע לימפואידי 248, 245, 75, 74	שפכים 406, 359, 357, 356, 353, 350	שאפה 406, 116, 107-104, 98
תא גזע מילואידי 237, 236, 79, 75, 74	שפרונים 406, 209	שבץ מוחי 65
תא מציג אנטיגן 407, 265, 251, 250, 247-245	שקי אוויר 406, 98, 97	שומן חום 406, 216, 211, 210, 202

תאית 306, 318, 319, 364, 365, 373, 379
 תגובת חיסון הומורלית 248-251, 253, 407
 תגובת חיסון ראשונית 252, 253, 260, 261, 268, 407
 תגובת חיסון שניונית 252, 253, 260, 268, 407
 תגובת חיסון תאית 245-247, 250, 251, 253, 265, 408, 407
 תגובת רגישות יתר 376, 379, 408
 תוצרי הפוטוסינתזה 300, 301, 308, 322, 323, 339
 תימוס 91, 243, 408
 תלכידים (בקרקע) 330, 331
 תסיסה 146, 155-159, 408
 תסנין 176-181, 408
 תעוקת לב 68, 70, 408
 תפוקת הלב (ראו לב, תפוקה)
 תרדמה בצמחים 338, 339
 תרומת איברים 269, 270, 271, 273, תרופות
 כאלרגנים 282
 לדיכוי מערכת החיסון 281, 283
 להורדת טמפרטורת הגוף 216
 הפרשה בשתן 180
 לטרשת עורקים 66, 70
 מונחות מטרה 272, 273
 נגד איידס 289, 293
 נגד דחיית שתלים 188, 266
 נגד דלקת 108, 281, 283
 נגד קרישת דם 84
 תרומבין 80, 81, 83, 408
 תרכובות ציאנוגניות 369, 370
 תרכיב חיסון 260-264, 408

תאי B 248-253, 265-266, 407
 תאי T 245-253, 265-266, 286-289, 291, 293, 407
 תאי גביע 102, 104, 134, 193, 407
 תאי גזע
 במוח העצם 68, 69, 74-76, 79, 230, 284, 407, 285
 עובריים 188, 189
 תאי דם אדומים 407
 בבדיקת דם 85
 בהובלת גזים 86, 120, 123-126
 זרימה בנימים 52, 66
 בחולי אנמיה 77, 78
 ייצור 76, 77
 מאפיינים 74-76, 216
 בעירוי דם 267, 268, 273
 בקרישי דם 80
 בתסנין ובשתן 176, 184
 תאי דם לבנים 407
 בלימפה 88-91
 במערכת ההגנה והחיסון 78, 79, 230
 בתגובת הדלקת 238-240, 243
 בתגובת החיסון הייחודית 243-253
 תאי הרג טבעיים 247, 407
 תאי זיכרון 244, 250, 251, 252, 260, 407
 תאי חישה
 בוויסות זרימת הדם 58
 בוויסות טמפרטורת הגוף 208-210, 212
 בוויסות הנשימה 112
 בוויסות פעולת הלב 37-39
 בוויסות ריכוז השתן 182, 183
 תאי כברה 308
 תאי לוואי 308, 309, 324, 325, 407
 תאי פיטום 283, 407
 תאים סרטניים 244, 247, 253, 291, 292, 293, 407

תודתנו נתונה לאנשים ולמוסדות שברשותם האדיבה פורסמו התמונות המלוות את הספר.

אילן אוקו - איור ו-36.

פרופ' יעקב אוקון, הפקולטה למדעי החקלאות, המזון ואיכות הסביבה, האוניברסיטה העברית, ירושלים - איור ו-30.

אתר האינטרנט של התאחדות מגדלי בקר בישראל - איור ד-15 ואיור ד-16.

אתר האינטרנט של המשרד לאיכות הסביבה:

אילן מלסטר - איור ב-34, איור ו-40, איור ו-41 ואיור ו-42.

יוסי בן חמו - איור ב-35.

אברי לכמן - איור ו-39.

חברת ביו-עוז ביוטכנולוגיות בע"מ, יד מרדכי - איור ז-21 ואיור ז-22.

ענבר ביזיינסקי - איור ז-9.

פרופ' עבד גרה, המחלקה לוירולוגיה, מכון וולקני - איור ז-20.

פרופ' רוני וולך, הפקולטה למדעי החקלאות, המזון ואיכות הסביבה - איור ו-35.

ד"ר אלה ורקר, ד"ר נתיב דודאי, מר דני סנדרוביץ, ד"ר אלי פוטיבסקי, ד"ר עוזי רביד - איור ז-6.

נעם כהנא - איור ד-5, איור ו-43 ואיור ז-4.

פרופ' אביגדור כהנר, הפקולטה למדעי החקלאות, המזון ואיכות הסביבה - איור ד-17.

מאגר צילומים ASAP - איור ה-2.

ד"ר מנחם מושליון, הפקולטה למדעי החקלאות, המזון ואיכות הסביבה, האוניברסיטה העברית, ירושלים - איור ו-32.

משרד החקלאות, שרות ההדרכה והמקצוע, מחלקת ההמחשה - איור ז-2 ואיור ז-14.

ד"ר סוניה פילוסוף הדס, ד"ר נתיב דודאי, ד"ר עוזי רביד, ד"ר סמיר דרובי, ד"ר אלי פוטיבסקי - איור ז-15.

ד"ר מרק פינס, המכון לבעלי חיים, מכון וולקני - איור ה-27.

פרופ' אילן סלע, הפקולטה למדעי החקלאות, המזון ואיכות הסביבה - איור ז-23.

ד"ר גואידו ססה, המחלקה למדעי הצמח, אוניברסיטת תל אביב - איור ז-12 ואיור ז-16.

אסף צוער, האוניברסיטה העברית, ירושלים - איור ד-14.