התא - יחידת החיים

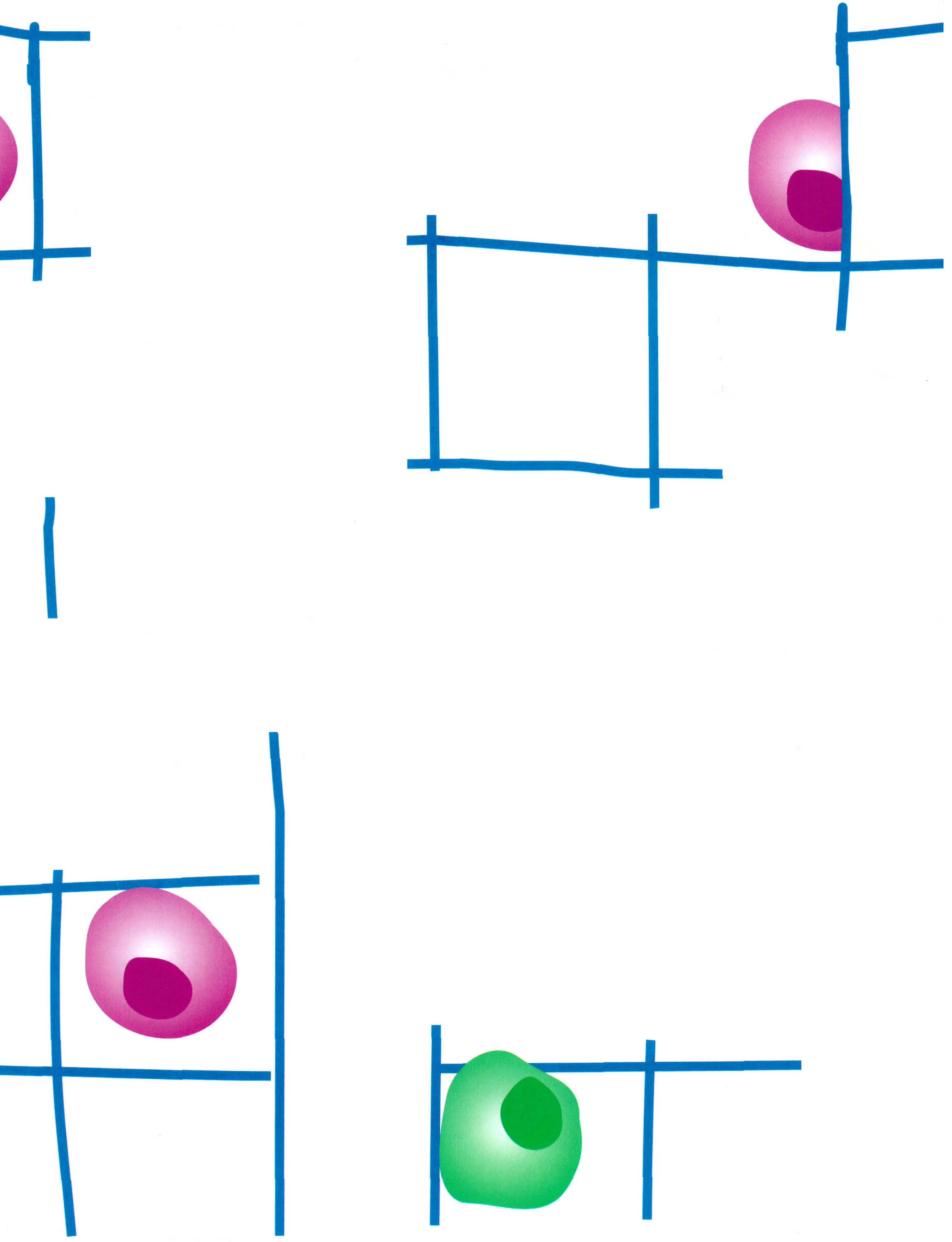
חיה גרוס

יהודית עתידיה

המרכז להוראת המדעים
האוניברסיטה העברית בירושלים
תשס"א 2000

התא - יחידת החיים

חיה גרוס
ד"ר יהודית עתידיה



התא - יחידת החיים

חיה גרוס

יהודית עתידיה

המרכז להוראת המדעים

האוניברסיטה העברית בירושלים

תשס"א 2000

יוצא לאור ביוזמתו ובפיקוחו של המרכז הישראלי לחינוך מדעי־טכנולוגי ע"ש עמוס דה-שליט, מיסודם של משרד החינוך התרבות והספורט, האוניברסיטה העברית בירושלים ומכון ויצמן למדע, רחובות.

THE CELL - THE UNIT OF LIFE Chaya Gross Judith Atidia

שותפה לכתיבת הגרסה הראשונה: ד״ר רחל בארי

ייעוץ מדעי:

פרק ג – פרופ׳ סרגיי בראון, כימיה ביולוגית, המכון למדעי החיים, האוניברסיטה העברית בירושלים

פרק ה – פרופ׳ יחזקאל ברנהולץ, ביוכימיה, רפואה, האוניברסיטה העברית בירושלים

פרק ז – פרופ׳ עודד מיוחס, ביוכימיה, רפואה, האוניברסיטה העברית בירושלים

פרק ח – פרופ׳ אברהם מ׳ מאיר, מדעי הצמח, המכון למדעי החיים, האוניברסיטה העברית בירושלים

פרק י – ד״ר ונדה רייך, תא ובעלי-חיים, המכון למדעי החיים, האוניברסיטה העברית בירושלים

נספח: רקע כימי – ד״ר יצחק מילגרום, המרכז להוראת המדעים, האוניברסיטה העברית בירושלים

עוד קראו ויעצו:

נועה אבולעפיה, ד״ר רות אמיר, חגית בכר, נורית בשן, בתיה גלעד, רותי וינקלר, רחל נוסינוביץ׳, ד״ר מרים עורבי, שרה פרח

תודה גם למורות:

עידית ארליכמן, מירי ברומר, אירית ורשאור, נירה מור, אתי רימרמן שמואלי, אירית שדה, ולי שטיינהרט

עריכת לשון: עדנה חכם-בסקין

הפקה, עיצוב ואיורים: סטודיו דן – יוליה אגרנוביץ׳, נאוה מוסקו, גדעון דן. עוד לאיורים: חיה גרוס

תודה לכל המסייעים במלאכה. האחריות על הכתוב – כולה על הכותבות.

מסת״ב 965-295-014-9 ISBN. נדפס בישראל.

© כל הזכויות שמורות

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

המרכז להוראת המדעים, האוניברסיטה העברית בירושלים, תשס״א 2000

אל הקוראים,

הספר שלפניכם מיועד לתלמידי החטיבה העליונה של בית-הספר התיכון, הלומדים ביולוגיה.
ספר זה עוסק הן בתאי בעלי-חיים והן בתאי צמחים, וכולל רק אזכורים קצרים הנוגעים לתאי חיידקים.

בכתיבת הספר השתדלנו להדגיש את המשותף לכל התאים; ניסינו לתאר את הקשר שבין המבנה של מרכיבי התא לבין תפקודם, וכן להציג את הפעילות המתואמת בתא, פעילות המאפשרת את תפקוד יחידת החיים הבסיסית.
כמו כן ניסינו להציג ידע מעודכן ומדויק ככל האפשר, מתוך היכרות עם מחקר מדעי ובלי לטבוע בפרטי מידע.

אפשר לחלק את פרקי הספר לשלוש קבוצות:
בראשונה, הכוללת את פרקים א-ב-ג, נידונים נושאים כלליים הנוגעים לתאים;
השנייה, המקיפה את רוב פרקי הספר, פרקים ד-ה-ו-ז-ח, עוסקת במבנים בתא ובתפקודם;
והשלישית, ובה פרקים ט-י, נוגעת לדורות הבאים של התאים ולדורות שעברו.

לאורך הפרקים שזורות שאלות למחשבה, ובסוף כל פרק מובא סיכום קצר, המרכז את עיקר הנושאים והמונחים שנידונו בפרק; הסיכום מאפשר לקורא לוודא שתוכן הפרק ברור לו. כמו-כן מסתיים כל פרק בשאלות מתאימות, ובסוף הספר מרוכזות תשובות נבחרות.
בפרקים מסוימים משולבים במסגרות קטעי הרחבה וכן נקודות הקשורות לחיי היום-יום.

רקע כימי הנוגע באופן ישיר לכתוב בפרק משולב בגוף הפרק. נוסף לכך נלווה לספר נספח שבו מובא רקע כימי רחב קצת יותר, מתוך מחשבה שהבנה נאותה של תהליכים ביולוגיים מותנית בהכרה של הבסיס הכימי - לפחות בקווים כלליים. עיון בנספח זה, לפני תחילת הלימוד או על-פי הפניות בגוף הספר, מומלץ לכל התלמידים - ובמיוחד לאלה שאינם מכירים את מושגי הכימיה הבסיסיים.

דפדוף מהיר בעמודים 193-73 יאפשר לכם לצפות ב״סרט״ המתאר תא מתחלק.

לימוד מהנה.

תוכן

מבוא	**11**
משימה לסיכום	13
פרק א: מעט היסטוריה - התפתחותה של תאוריית התא	**15**
א1. רוברט הוק מגלה תאים במיקרוסקופ	15
א2. שם המשחק: אחידות	17
א3. ניסוח תאוריית התא	18
א4. סיכום	21
שאלות ומשימות לפרק א	21
פרק ב: לראות תאים - מבט כללי	**23**
ב1. "תא טיפוסי" – מבנה בסיסי משותף לכל התאים	23
קצת כימיה: חומרים בתא	24
ב2. על ממדיהם של תאים	28
ב3. זה הקטן גדול ייראה: מיקרוסקופים	32
ב4. ארגון התאים בגוף הרב-תאיים	36
ב5. סיכום	37
שאלות ומשימות לפרק ב	38

פרק ג: העוסקים במלאכה ותנאי עבודתם – אנזימים 39

קצת כימיה: חלבונים 40

ג1. האנזימים - זרזים ביולוגיים 42

ג2. קצב התגובה האנזימטית 48

ג3. סיכום 55

שאלות ומשימות לפרק ג 57

פרק ד: גרעין התא ויצירת חלבונים 59

ד1. לגרעין מקום מרכזי בחיי התא 59

ד2. DNA 63

קצת כימיה: חומצות גרעין 63

ד3. הרכבת RNA על-פי DNA: תעתוק 67

קצת כימיה: RNA 68

ד4. הרכבת החלבון: תרגום 73

ד5. DNA - הגשר בין הדורות 79

ד6. בקרה על ביטוי גנים 82

ד7. מוטציות 85

ד8. סיכום 87

שאלות ומשימות לפרק ד 88

פרק ה: קרומים בתא 91

ה1. מבנה הקרום הביולוגי 91

קצת כימיה: ליפידים 92

ה2. דיפוזיה ואוסמוזה 98

ה3. הקרום כגבול 102

ה4. תעלות, נשאים ומשאבות 103

ה5. אֶנְדוֹצִיטוֹזָה ואֶקְסוֹצִיטוֹזָה 107

ה6. התא מגיב גם לחומרים שאינם חודרים לתוכו 109

ה7. רשת תוך-תאית, מערכות גולג'י וליזוזומים 110

ה8. סיכום 117

שאלות ומשימות לפרק ה 118

פרק ו: השלד התוך-תאי ותנועה 121

ו1. ציטופלסמה והשלד התוך-תאי 121

ו2. תפקודי השלד התוך-תאי 123

ו3. סיכום 129

שאלות ומשימות לפרק ו 130

פרק ז: אנרגיה בתא והמיטוכונדריון 131

ז1. אנרגיה בתא - לשם מה ומאין? 131

קצת כימיה: פחמימות 134

ז2. ATP מתַוֵוך בתהליכים אנרגטיים בתא 137

ז3. פירוק תרכובות אורגניות והרכבת ATP בתא 139

ז4. על המיטוכונדריון והמתרחש בו 143

ז5. הפקת אנרגיה בהיעדר חמצן 144

ז6. סיכום 146

שאלות ומשימות לפרק ז 147

פרק ח: תא צמח ופוטוסינתזה 149

ח1. הצמחים כאוטוטרופים 150

ח2. הכְלוֹרוֹפְּלָסְט 150

ח3. פוטוסינתזה: מחומרים אי-אורגניים לחומרים אורגניים 152

ח4. מבנים בתא הצמח 156

ח5. סיכום 159

שאלות ומשימות לפרק ח 159

פרק ט: מחזור התא וחלוקותיו 161

ט1. שלבי מחזור התא 161

ט2. שכפול DNA 164

ט3. מיטוזה 166

ט4. מיוזה 169

ט5. סיכום 175

שאלות ומשימות לפרק ט 176

פרק י: תא - מאין באת? – האבולוציה של התא האיקריוטי 179

י1. חומרים אורגניים ראשונים 183

י2. מחומרים אורגניים לתאים 184

י3. אנרגיה וחומרים בתאים המתפתחים 186

י4. תא פרוקריוטי ותא איקריוטי 189

י5. האבולוציה של התא האיקריוטי 191

י6. מחד-תא לרב-תא: התמחות תאים 195

י7. סיכום 199

שאלות ומשימות לפרק י 200

נספחים 203

נספח 1: רקע כימי 203

נספח 2: הקוד הגנטי 215

נספח 3: על מיון בעולם החי 216

תשובות קצרות לשאלות נבחרות 217

מילון מונחים 230

מפתח 245

מקורות 250

מבוא

יצורים רבים יש בעולמנו - ורב השוני ביניהם. רבים ההבדלים בין צמח לבעל-חיים, בין צמח לצמח ובין בעל-חיים אחד למשנהו; השוני בא לידי ביטוי בגודל, בצורה, בצבע, באורח החיים ועוד. עם זאת, רבים גם קווי הדמיון בין כל היצורים החיים: כולם גדלים ומתפתחים, מתנועעים, מגיבים לסביבתם, מתרבים, מרכיבים חומרים ומפרקים אותם.

האם יש בקווי דמיון אלה, המאפיינים את היצורים החיים, כדי להבדילם מ״שאינו חי״? השאלה נראית פשוטה, לכאורה. אולם בבואנו לאפיין ״חיים״ אנו נתקלים בקשיים לא מעטים. בדקו בעצמכם:

נסו למצוא הגדרה ל״חיים״, או לציין את המאפיין ״תכונה״ זו.
תוכלו להיעזר במאפיינים שהוזכרו ובדיון שלהלן.

נרחיב מעט על כל אחד מהמאפיינים שהזכרנו.

יצורים חיים **גדלים**; במהלך החיים מתרחש שינוי בגודל היצור: זרע שנבט מתפתח לעץ, ותינוק גדל ומתפתח לאדם מבוגר. **הגדילה** מבוססת על צריכת מזון. הצמחים מרכיבים את מזונם בעצמם - בעזרת אנרגיית האור - מחומרים פשוטים הנמצאים בסביבתם, ואילו אספקת מזונם של היצורים האחרים תלויה בתוצרי הצמחים. אלה וגם אלה גדלים ומתפתחים על-ידי כך שהם מפרקים את מזונם ומשתמשים בתוצרי פירוק זה להרכבת מולקולות חדשות, המשתלבות בגופם.
אפשר להכליל ולומר שפעילויות המתרחשות ביצורים חיים ניתנות לתיאור במונחים של תגובות כימיות: הרכבה ופירוק. תגובות כימיות אלה נקראות **חילוף חומרים** (או - מֶטַבּוֹלִיזְם, metaboli=שינוי, חילוף), והן כרוכות בהשקעה ובשחרור של **אנרגיה**.

מאפיין בולט נוסף של חיים הוא **תנועה**: הסוס דוהר, עלי הכותרת בפרחים נסגרים לעת ערב, ומבעד לעדשת המיקרוסקופ ניתן להבחין ביצורים חד-תאיים הנעים בתוך טיפת נוזל.

אפיון אחר הוא **תגובה לסביבה**: יצורים חיים מגיבים לשינויים בסביבה שבה הם חיים. כולנו מכירים תהליכים של תגובה לגירוי: כלב שמירה מגיב בנביחות למראהו ולריחו של אדם זר, וחמנייה ״מפנה את ראשה״ לכיוונה של השמש. תגובה חלה גם לגירויים שמקורם ***בסביבה הפנימית*** של היצור; כך לדוגמה, תינוק רעב פורץ בבכי, וחתול חולה יתכרבל בפינה.

אחד ממאפייני החיים הוא דו-שיח מתמיד בין הסביבה החיצונית ובין הסביבה הפנימית, תוך שמירה על סביבה פנימית יציבה;

הוֹמֵאוֹסְטַזִיס (homos=שווה, דומה; stasis=יציב) הוא מונח המבטא את כושרו של יצור חי לשמור על סביבה פנימית יציבה (בגבולות מוגדרים), השונה מהסביבה החיצונית.

מאפיין בולט נוסף המבדיל יצורים חיים מעצמים שאינם חיים הוא **הרבייה**. היכולת להתרבות מאפיינת את כל היצורים החיים - חיידקים, צמחים ובעלי-חיים. עם זאת, אין פירוש הדבר שיצור שאינו מתרבה הוא חסר חיים. לצורך האפיון די בכך שיצור זה בא לעולם בתהליך רבייה. כך לדוגמה, רוב הנמלים הפועלות בקן הן עקרות, כלומר: אינן יכולות להתרבות, אך ללא ספק הן יצורים חיים.

תופעה נוספת המאפיינת את עולם החי, שלא ניתן להבחין בה מתוך הסתכלות בפרט הבודד, היא ההתפתחות של מינים - או ה**אבולוציה**. לו יכולנו לראות את העולם לפני מאות, אלפי או מיליוני שנים, היינו מגלים יצורים שונים מאלה המוכרים לנו כיום. המידע המצטבר מלמדנו שמיני היצורים בעולם משתנים במהלך הדורות, השתנות אִטית - אך מתמדת, וכל המינים בעולמנו התפתחו ממינים שקדמו להם, בסדרה ארוכה מאוד של שלבים.

המאפיינים שהזכרנו (חוץ מאבולוציה) מתאימים על-פי רוב לכל יצור חי, אך רק "על-פי רוב": אין לחפש את הופעתם של כולם בכל זמן ובכל שלב בחייו של כל יצור חי, שהרי גם הצמח שאינו משנה את מקומו - חי הוא, והחתול שנשאר להתחמם בשמש ולא הגיב לקריאתנו - לא בהכרח מת.

נשוב לשאלת המוצא: האם אפשר להשתמש במאפיינים אלה כדי להבדיל בין חי לשאינו חי?

לפני שתענו על השאלה, בִּדקו כמה מהמאפיינים שדנו בהם קיימים גם באש "חיה"...

לסיכום, לא נוכל לקבוע ש**כל** יצור חי מקיים את כל המאפיינים הללו, ואף לא ש**רק** יצור חי מקיים אותם.

הוא אשר אמרנו - קשה מאוד לאפיין חיים.

דיוננו עד עתה התמקד ב**תפקוד** של היצור השלם. ומה באשר ל**מבנה** של יצורים חיים? ככל הידוע כיום, כל היצורים מורכבים מיחידות מבנה הנקראות **תאים**. כפי שנראה בהמשך, גם בתא הבודד מתקיימים מאפייני החיים שהזכרנו. משמע:

התא הוא הן ***יחידת מבנה*** והן ***יחידת תפקוד***.

בספר זה נערוך היכרות עם המשותף לכל התאים החיים ועם המבדיל ביניהם. נעמוד על מבנם, הרכבם ותפקודיהם, ונכיר כיצד מתבטאים בהם מאפייני החיים שהכרנו. אך לפני-כן נלמד כיצד התגבשה ההכרה בקיומם של תאים כיחידות החיים הבסיסיות.

משימה לסיכום

נסו להשלים את הטבלה הבאה. היעזרו בפרק המבוא וכן בידע אישי.

האמנם מאפייני חיים?

המאפיין	דוגמה מעולם החי שבה נעדר המאפיין	דוגמה מעולם הדומם שבה המאפיין בא לידי ביטוי
גדילה	אדם בגיל העמידה	גידול גבישים
חילוף חומרים		
צריכת אנרגיה		
תנועה		
תגובה לסביבה		
רבייה		
אבולוציה		

האם הצלחתם למלא את כל משבצות הטבלה? מה אפשר להסיק מכך?

חי או דומם?

כוס ואגסים

פול סזאן (1906-1839)

פרק א

מעט היסטוריה- התפתחותה של תאוריית התא*

א1. רוברט הוק מגלה תאים במיקרוסקופ

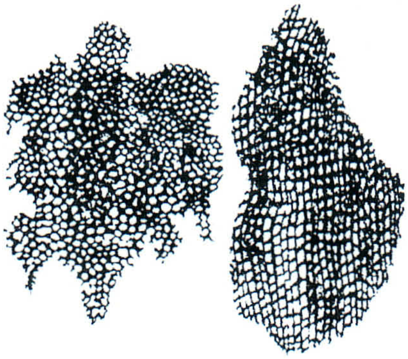
תחילתו של הסיפור לפני יותר מ-300 שנה. רוֹבֶּרְט הוּק (R. Hooke, 1635-1703), אנגלי שחי במאה ה-17, בנה מיקרוסקופ שבו שתי עדשות. מיקרוסקופ זה היה משוכלל מהמיקרוסקופים שבהם השתמשו בתקופתו, שרובם היו בעלי עדשה אחת. בעזרת המיקרוסקופ שבנה בדק הוק עצמים שונים: גבישים, אריגים, צמחים ובעלי-חיים זעירים. אחד הפריטים שבדק היה פקק שעם, שמקורו בקליפת הגזע של העץ אלון השעם. בספרו "מִיקרוֹגְרַפיה", שפורסם בשנת 1665, תיאר וצייר הוק את אשר ראה (איור א1). להלן קטע מדבריו בתרגומם העברי. שימו לב לדרך עבודתו ולניסוחיו הזהירים:

"נטלתי חתיכת שעם נקייה, ובסכין לחידוד קולמוסים, חדה כתער, פרסתי ממנה פרוסה שפניה החיצוניים היו חלקים מאוד. אחר כך בדקתי שעם זה בדייקנות מרובה במיקרוסקופ. נדמה היה לי שראיתיו נקבובי במקצת, אך לא יכולתי להבחין בנקבים בבהירות מספיקה כדי שאוכל לקבוע אם באמת נקבוביות הן אלה ומה צורתן. אך על סמך גמישותו של השעם וקלילותו לא נראה לי מבנה זה מוזר. קיוויתי, שבמאמץ נוסף אוכל להבחין במבנהו במיקרוסקופ. באותה סכין מושחזת פרסתי מאותה חתיכת שעם פרוסה דקיקה ביותר. הואיל והפרוסה הייתה בהירה, הנחתי אותה תחת המיקרוסקופ על זכוכית כהה, וכשהטיתי לעברה את האור בעזרת עדשה שטוחה-קמורה, יכולתי להבחין בבהירות רבה שהפרוסה מנוקבת ומחוררת, בדומה לחלת דבש, אך החורים בה לא היו אחידים".

* פרק זה מבוסס על "התא — אחידות בעולם החי" שנכתב על-ידי עליזה סיוון, ד"ר שלמה כהן, בלהה נחמן ודליה קווה, בהוצאת המרכז לתכניות לימודים - משרד החינוך והתרבות, והמרכז להוראת המדעים באוניברסיטה העברית בירושלים, תשמ"ו.

בכתביו של הוק לא היה כל רמז שלתגליתו תהיה חשיבות כה רבה בביולוגיה. הוק טבע את המונח "תא", אך הוא לא ידע על חשיבותם של תאים כיחידות מבנה ותפקוד המשותפות לכל היצורים. הוק ראה בתאים את צורת המבנה של השעם, שסייעה להסביר את תכונותיו: השעם קל היות שהוא עשוי תאים המלאים באוויר; השעם גמיש, כי התאים הזעירים המכילים אוויר יכולים להילחץ ולצמצם את נפחם, ולחזור לצורתם המקורית עם הרפיית הלחץ.

למעשה, מה שראה הוק בשעם היו רק דפנות של תאים מתים – דפנות שאופייניות לתאי צמחים.



איור א1:
ימין - אחד מהמיקרוסקופים של רוברט הוק
שמאל - שני חתכים ברקמת תאי שעם שצוירו בידי הוק

התיאורים והציורים המפורטים של הוק בספרו "מיקרוגרפיה" המריצו חוקרים שבאו אחריו לבדוק ולהבין את מבנה גופם של יצורים שונים; ההתלהבות מהעולם שנגלה מבעד למיקרוסקופ הייתה גדולה. מבעד לעדשות נתגלו ממצאים מעניינים ומבנים מפתיעים, שלפני-כן לא עלה על הדעת דבר קיומם. התווספו תיאורים רבים של יצורים זעירים, של חלקי צמחים, של איברי בעלי-חיים ועוד.

כשלושים שנה לאחר שפורסמו תגליותיו של הוק, בדק סוחר הבדים ההולנדי א' ואן לֶבֶנהוק (A. van Leeuwenhoek, 1632-1723) דגימות ממי שלולית וממי הנחל שבעירו דלפט; להפתעתו גילה שהמים מכילים בתוכם מגוון של יצורים זעירים. לבנהוק צייר את **המיקרואורגניזמים** שראה (micro=זעיר, organism=יצור חי) ושלח דוח על ממצאיו לחברה המלכותית בלונדון. מעט לאחר פרסום עבודותיו החלו אנשים נוספים לחפש מיקרואורגניזמים במקומות אחרים, כמו בקרקע ובמזון מקולקל.

התיאורים המפורטים - אלה הנוגעים לצמחים, לבעלי-חיים ולמיקרואורגניזמים - נשארו בלתי קשורים זה לזה: לא תוארו קווים משותפים לתצפיות השונות, ולא נעשתה כל הכללה באשר לטיבם של היצורים החיים.

א2. שם המשחק: אחידות

חלפו כמאה וחמישים שנה מאז דיווח הוק על התאים הראשונים שראה. חקירת היצורים החיים נמשכה, והועלתה התאוריה שגופיהם של **כל** הצמחים ושל **כל** בעלי-החיים בנויים תאים. כלומר: התאים הם יחידות החיים הבסיסיות של כל היצורים החיים.

כיצד התפתח רעיון זה?
רעיונות, בדרך-כלל, אינם תלויים בחלל הריק; הם נובעים מהלך רוחות, מתפיסות וממחשבות המקובלות בחברה באותה תקופה, ומושפעים מהם.

בראשית המאה ה-19 הייתה מקובלת הדעה שניתן לפרק עצמים ליחידות קטנות, ואת אלה ליחידות קטנות עוד יותר, עד ליחידות בסיסיות שאינן ניתנות לחלוקה נוספת.

באותה תקופה התגבשה התאוריה לפיה כל החומרים בנויים מיסודות, וכל יסוד בנוי מחלקיקים זעירים שווי גודל וצורה, הנקראים "אטומים". תאוריה זו נוסחה על-ידי ג׳ דָלטון (J. Dalton, 1766-1844) בשנת 1808, אם כי המונח אטום נטבע כבר על-ידי הפילוסוף היווני דמוקריטוס (Democritus, 460-370 לפני הספירה).

כיוון המחשבה בדבר קיומן של יחידות בסיסיות בולט בעבודות מדעיות רבות מאותם ימים. בעבודות אלו נעשה חיפוש אחר הדומה והמשותף, **האחיד**. הרעיון שאפשר להסביר מבנים מורכבים ומסובכים על בסיס חלקיקים יסודיים קסם לחוקרים בתחומי מדע שונים, בכללם הביולוגיה: האם ייתכן שבגופם של יצורים שונים קיימת אותה ***יחידת מבנה בסיסית***?
באותה תקופה שוכללו המיקרוסקופים, וכך גם שיטות הכנת החומר להסתכלות בהם. תיאורים של תצפיות רבות הופיעו בספרות המדעית של אותם ימים. מספר הצמחים שנבדקו הלך וגדל, ובכולם נמצאו תאים. בין הדיווחים היה גם זה של הבוטנאי הסקוטי, רוברט בְּראון (R.Brown, 1773-1858), שבדק צמחי סחלב. בתאי הסחלב ראה בראון אזור עגלגל, שהיה מגורגר ופחות שקוף משאר החלקים שבתאים. בראון כינה אזור זה בשם נוּקְלֵאוּס (nucleus), שמשמעו **גרעין**. בבדיקות נוספות גילה בראון גרעין גם בתאים של צמחים אחרים. בהשוואה לדופנות התאים לא היו הגרעינים כה בולטים לעין, ומכאן מובן מדוע המשיכו לזהות את תאי הצמחים על-פי דופנותיהם.

גם חלקים מגופם של בעלי-חיים נבדקו במיקרוסקופ, אך בהם קשה היה להבחין במבנים ברורים ומוגדרים. לא נראו בהם אותן צורות דמויות תיבה שנתגלו בצמחים.

?

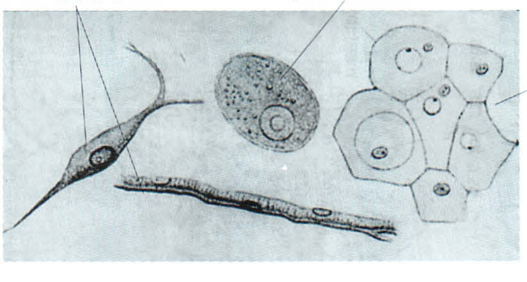
מדוע קשה היה להבחין בתאים של בעלי-חיים?
הסיבה לכך היא שתאי בעלי-חיים אינם מוקפים בדפנות.

א3. ניסוח תאוריית התא

ניסוח תאוריית התא מיוחס לשני חוקרים גרמניים, הבוטנאי מ' שְלַיידֶן (M. Schleiden, 1881-1804) והזואולוג ת' שְוַואן (T. Schwann, 1882-1810), שעבדו במקביל במחצית המאה ה-19.

שליידן יצא מתוך הנחה שיש בטבע חוקים וחוקיות. הוא האמין שהטבע כולו חייב להיות מאורגן על-פי כמה עקרונות יסוד; גישה זו הנחתה אותו בחיפוש אחר המשותף ליצורים החיים. דרך מחשבה זו מנחה גם כיום חוקרים, והיא קידמה לא פעם את המחקר המדעי (מצד אחר, היצמדות מוחלטת לגישה מסוימת עלולה למנוע חשיבה מקורית).
שליידן היה הראשון שייחס חשיבות לגרעין ולנוזל העוטף אותו; הוא ראה גרעינים בכל סוגי התאים שבדק, לפחות בשלבים הראשונים של היווצרות התאים, ולכן סבר שהתאים **נוצרים** מהגרעין - סברה שהסתברה לאחר מכן כמוטעית.

שוואן ושליידן נהגו להיפגש מדי פעם; באחת ההזדמנויות שמע שוואן את דעתו של שליידן על חשיבותו של הגרעין כגופיף פעיל בתאי צמחים. בשעת השיחה נזכר שוואן שגם הוא ראה "שלפוחיות" שבהיקפן קרום דק ובתוכן גרעין, כאשר הסתכל במיקרוסקופ בחתכים דקים של רקמות של בעלי-חיים. באותו רגע, כפי שהוא מעיד על עצמו, הבין שוואן את חשיבותו של הרעיון שתאים של צמחים ושל בעלי-חיים נוצרים באותה דרך, שבכל תא יש גרעין, ושלגרעין אותו תפקיד בצמחים ובבעלי-חיים. כדי לאשש את הרעיון שעלה בדעתו, בדק שוואן רקמות מבעלי-חיים רבים: צפרדע, עגל, חזיר, עובר תרנגולת, דגים, זחלי חרקים ועוד. בכולם ראה תאים בעלי גרעין (חלק ממִמצאיו תוכלו לראות באיור א2).



איור א2: ציורים של תאים שונים כפי שנצפו במיקרוסקופ על-ידי החוקר שוואן

שוואן ושליידן ביססו את מושג התא, והדגישו כי החלק העיקרי בתא הוא תוכנו: הגרעין והחומר המקיף אותו - ולא הדופן העבה, שבולטת בצמחים ואינה קיימת בתאי בעלי-חיים. מכאן קצרה הדרך לניסוח תאוריית התא ב-1838, שזו תמציתה:

היצורים החיים למיניהם, צמחים ובעלי-חיים, על אף היותם שונים בצורתם החיצונית, הם בעלי מבנה בסיסי דומה. כולם בנויים מיחידות יסוד זעירות - תאים - שבהם יש ציטופלסמה וגרעין.

צִיטוֹפְּלַסְמָה (kytos=תא, plasma=בעל צורה) היא כל תכולת התא בלי הגרעין. בראשית חקר התאים נראה החומר התוך-תאי כנוזל צמיג מגורגר. לימים התברר, כפי שנראה בהמשך, שבציטופלסמה כלולים מבנים מדהימים בתחכומם, ומתחוללות בה פעילויות מרשימות, שעד היום טרם התבררו עד תום.

תרומתם של שליידן ושוואן איננה גילוי התאים, שהרי כבר כ-150 שנים קודם לכן הציע הוק את המושג תא ל"תיבות" הזעירות שאת דופנותיהן ראה בשעם. לזכותם של שליידן ושוואן נזקף ניסוח התאוריה, המציגה את התא כ**יחידת יסוד** של כל היצורים החיים ומדגישה את חשיבותו של תוכן התא לעומת הדופן.

חוקרים רבים הבחינו שתאים מתחלקים ונוצרים תאים חדשים. הרופא והביולוג ר' וִירְכוֹב (R. Virchow, 1821-1902) הכליל בשנת 1858 ממצא זה לכל התאים, וניסח זאת בלטינית:

omnis cellula ex cellula

ובתרגום לעברית:

כל התאים מוצאם מתאים

בכך הורחבה תאוריית התא, שעסקה בתיאור המבנה והארגון של היצורים החיים, ונוספו לה גם היבטים של הורשה, התפתחות ואף אבולוציה: שכן אם אמנם כל התאים הקיימים כיום מוצאם מתאים שקדמו להם, וגם לאלה קדמו תאים אחרים, הרי ייתכן שכל התאים בעולמנו אינם אלא תולדה של תא קדמון אחד.

מילים ומונחים - והפעם: **שמות מדעיים**

כמעט כל תחום מתחומי ההתעניינות האנושית מצטיין במונחים ובמושגים המיוחדים לו. במקרים רבים החוקר המתאר לראשונה ממצא או תופעה הוא זה הקובע את השם לתגליתו. הקביעה יכולה להיעשות על סמך שיקולים שונים, ולהיות מושפעת מאופיו, מצב רוחו ודמיונו של החוקר. יש מונחים שהיו טובים לזמנם, ועם הצטברות הידע התברר שהם אינם מתאימים, ויש מונחים שמקומם שריר וקיים מרגע שנטבעו ועד היום. מדי פעם, כשמתעורר הצורך, מתכנסת ועדה מקצועית, לעתים בין-לאומית, "עושה סדר" בקבוצת מונחים זו או אחרת, וקובעת כללים למתן שמות בתחום מסוים.

לעתים, לאותה מילה יש משמעויות שונות.

כדוגמה לכך חִשבו על "פרי": עגבנייה, פלפל ומלפפון הם פירות מובהקים כאשר מדובר בחלקי צמח (נקודת מבט בוטנית), אולם ספק אם תהיו שבעי רצון, כאשר סלט הפירות שהזמנתם לקינוח במסעדה יהיה מורכב משלושת אלה...

ולענייננו: המונח "תא" אינו שמור ליחידה ביולוגית בלבד: תא הוא חדר קטן (ויש טוענים שהתיבות שראה הוק בשעם הזכירו לו את התאים הקטנים שבהם ישבו הנזירים בימי הביניים, וזה מקור המונח), אך קיים גם תא חשמלי, תא מחתרת ועוד.

המשותף לכל הללו? – *יחידה קטנה ותחומה.*

דומה לכך גם המונח "גרעין": מלבד גרעין התא אנו מדברים גם על גרעין בפרי (חרצן, גלעין), על גרעין האטום, על גרעין התיישבות ועוד.

המשותף לכל הללו? – *"לב" העניין.*

המסקנה מהאמור לעיל: *יש חשיבות רבה להקשר שבו מופיע מונח זה או אחר.*

דרך מקובלת למתן שמות או לקביעת מונחים מדעיים היא צירוף של מילים, כשבדרך-כלל מקורן הוא לטיני או יווני. במהלך לימודנו נפגוש דוגמאות רבות לכך.

כך, למשל, עמדנו על מקורה של המילה "ציטופלסמה". וכן: הוק קרא לספרו "מיקרוגרפיה", שהוא צירוף של mikros=קטן, זעיר, ו-graphos=כתוב (שתי המילים - ביוונית).

האם יש במידע זה כדי לעזור בהבנת המקור של: מיקרוסקופ? גרפיקה? גאוגרפיה?

א4. סיכום

- רוברט הוק, שחי במאה ה-17, היה הראשון שתיאר מבנים של **תאים** בצמח.
- שוואן ושליידן ראו בתא גם יחידת מבנה וגם יחידת תפקוד, וב-1838 ניסחו את **תאוריית התא**, לפיה כל היצורים החיים בנויים מתאים, שבהם יש **ציטופלסמה וגרעין**.
- ב-1858 קבע וירכוב ש"כל התאים מוצאם מתאים", ובכך הוסיף לתאוריית התא היבט של קשר בין הדורות.
- כיווני מחקר מדעי והשקפות מדעיות מושפעים מהלכי הרוח של התקופה.

שאלות ומשימות לפרק א

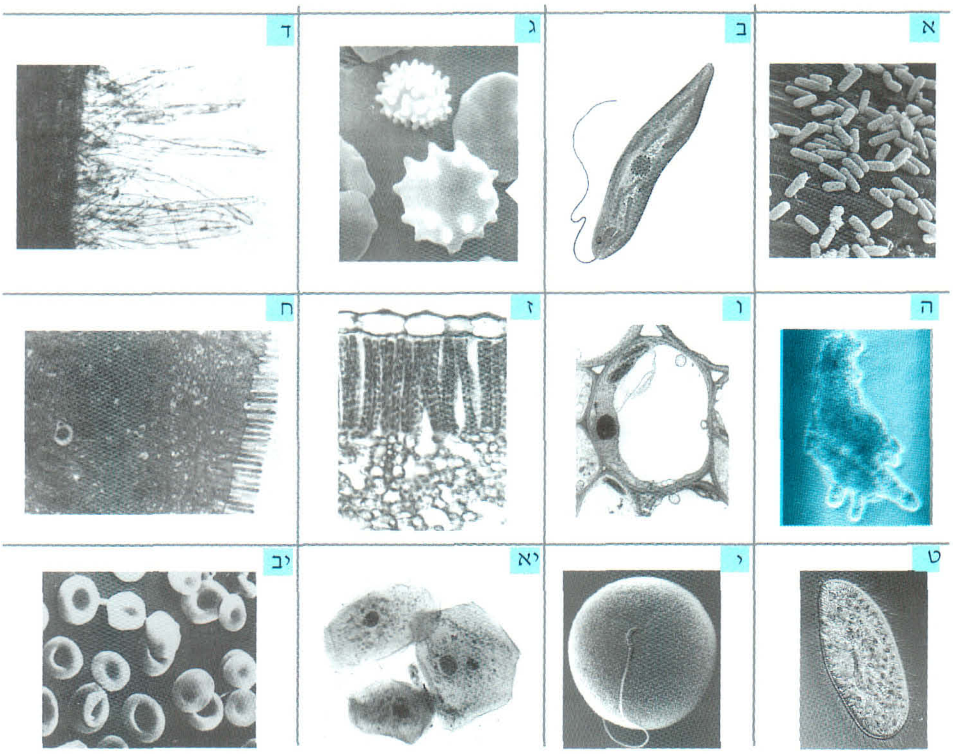
1. תארו את הרקע התרבותי והטכנולוגי להתפתחות תאוריית התא.
2. הסבירו את תרומת הרעיון שבבסיס הביטוי "כל התאים מוצאם מתאים" לתאוריית התא.

פרק ב

לראות תאים - מבט כללי

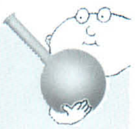
ב1. "תא טיפוסי" - מבנה בסיסי משותף לכל התאים

בטבע קיים מגוון רב של תאים (איור ב1), ואף לא אחד מהם הוא "תא טיפוסי". עם זאת קיימים מרכיבים משותפים אופייניים לתאים השונים. הדבר דומה לפני אדם "טיפוסיים": יש מגוון עצום בפניהם של בני האדם, אך לכולם אותו מבנה בסיסי: בכל אחד מהם זוג עיניים, אף, פה, מצח וגבות.



איור ב1: מגוון תאים

א. חיידקים, הגדלה בערך פי 1,500
ב. החד-תא עינן ירוק, הגדלה בערך פי 70
ג. תאי דם לבנים, הגדלה בערך פי 2,000
ד. יונקות בשורש אפונה, הגדלה בערך פי 35
ה. החד-תא אמבה, הגדלה בערך פי 50
ו. תא מעלה של מלוח, הגדלה בערך פי 2,500
ז. חתך בעלה של ורד (ניתן לראות תאים מסוגים שונים), הגדלה בערך פי 40
ח. חלק מתא במעי של דג, הגדלה בערך פי 3,000
ט. החד-תא סנדלית, הגדלה בערך פי 70
י. תא ביצה (כדורי) ותא זרע (מאורך) של אוגר זהוב, הגדלה בערך פי 200
יא. תאים מרירית הלחי של אדם, הגדלה בערך פי 150
יב. תאי דם אדומים מאדם, הגדלה בערך פי 850



קצת כימיה

חומרים בתא

עובדה מעניינת היא, שבתא נמצאים אלפי חומרים שונים - אך מספר היסודות המרכיבים אותם הוא קטן: בעיקר פחמן (C) מימן (H) וחמצן (O).

מהם אפוא חומרים אלה?

מים (H_2O) מהוים כ-70% ממסת התא (יש אף תאים שבהם המים מהווים 95% ממסתם!), והתגובות בתא מתרחשות בין חומרים המומסים במים.

פרט למים, קבוצת החומרים הגדולה והחשובה היא קבוצת החומרים האורגניים, או התרכובות האורגניות (organon=מכשיר). אלה הן ***תרכובות פחמן***, שבהן הפחמן קשור למימן ועל-פי-רוב גם לחמצן. במקרים רבים תרכובת אורגנית כוללת גם אטומים נוספים, כמו חנקן (N), גפרית (S) וזרחן (P). (רק תרכובות פחמן בודדות, ביניהן פחמן-דו-חמצני CO_2, אינן נכללות בין התרכובות האורגניות.)

מה מקור המונח "תרכובות אורגניות"? מונח זה נטבע כאשר סברו שתרכובות אלה יכולות להיווצר רק בגופם של יצורים (=אורגניזמים) חיים. בינתיים הצליחו לייצר במעבדה מיליוני תרכובות אורגניות, אך המונח נשמר...

אטומי פחמן יוצרים שרשרות ארוכות. שרשרות אלה מהוות את "עמוד השדרה", הנקרא **שלד פחמני**, של מולקולות גדולות ומורכבות. אל שלד זה יכולים להיות קשורים אטומים שונים או מולקולות שונות, כך שמתקבלות מולקולות שונות במבנן - ובהתאם גם בתפקודן.

בין התרכובות האורגניות הרבות מבחינים בארבע קבוצות עקריות: פחמימות, ליפידים, חלבונים וחומצות גרעין. על כל אחת מקבוצות אלה נרחיב במסגרת "קצת כימיה", בפרק הדן בתפקודה בתא: פחמימות - בפרק ז, ליפידים - בפרק ה, חלבונים בפרק ג וחומצות גרעין בפרק ד.

ובכן, מה מאפיין את התאים השונים?

כל תא מוקף **בקרום** (ממברנה=membrane), התוחם אותו ומפריד בינו לבין סביבתו. הודות למבנה המיוחד ולתכונות המיוחדות של הקרום, שעליהם נלמד בהמשך, נשמר התא כיחידת מבנה ותפקוד.

אם נתבונן מבעד למיקרוסקופ בתאים כלשהם מצמח או מבעל-חיים, יתכן שנבחין במה שהבחינו שוואן ושליידן במאה ה-19: **בגרעין**, שעשוי לתפוס חלק ניכר מנפח התא.

התאים בעלי הגרעין שייכים לקבוצת התאים **האֵיקָרְיוֹטִים** (ביוונית: eu=אמיתי, karyon=גרעין, אגוז). לעומת זאת בקבוצת התאים **הפְּרוֹקָרְיוֹטִים** (pro=לפני), שבה נכללים החיידקים, אין גרעין מוקף קרום. זהו אחד ההבדלים הבולטים בין שתי קבוצות התאים.

שימו לב: משתמשים במונח "איקריוט" גם כשמתכוונים ליצור הבנוי מתאים איקריוטים.

הבדלים נוספים בין תא חיידק לתא איקריוט ראו בפרק י. על מיון בעולם החי - ראו בנספח 3.

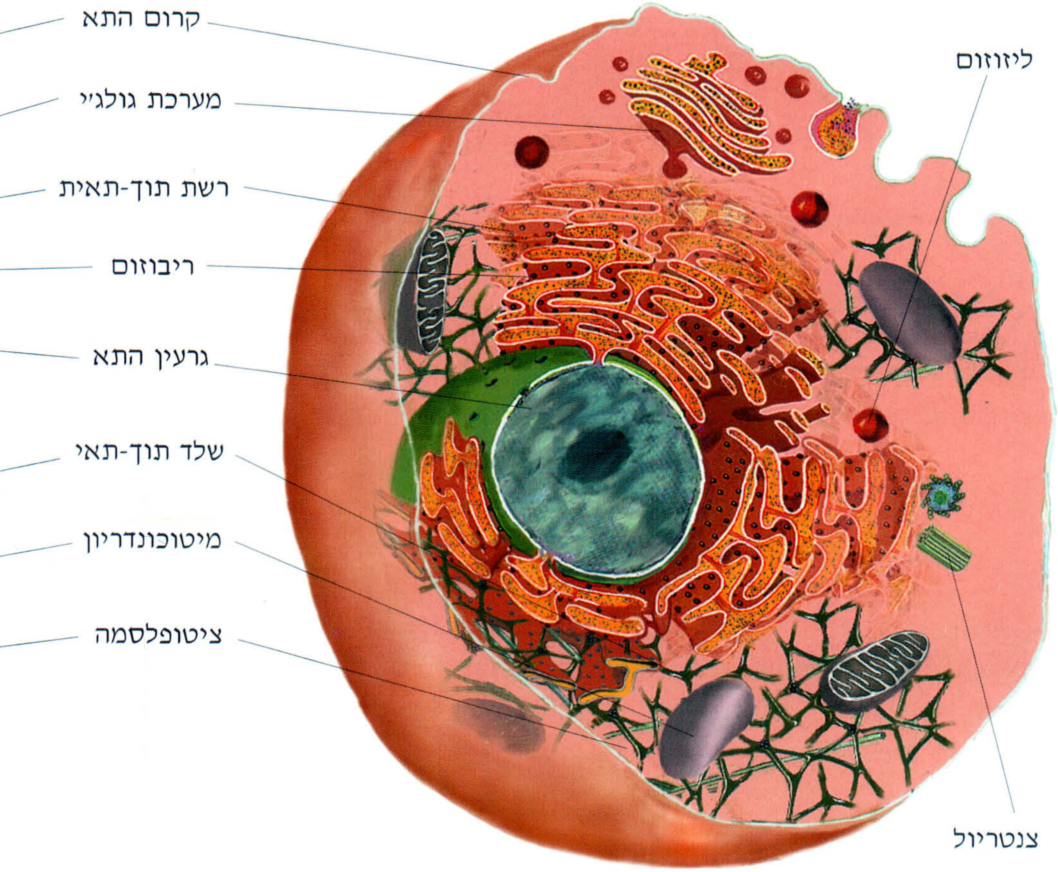
בספר זה נעסוק בעיקר בתא איקריוטי.

איפיון נוסף של תאים הוא **חילוף חומרים** (מטבוליזם) המתרחש בהם: בכל אחד מהתאים מתקיימים באופן רציף ובו בזמן אלפי תהליכים ביוכימיים שונים, כמו נשימה, יצירת חלבונים, פירוק חלבונים ועוד, שבהם חומרים נבנים ומתפרקים.
קיומו של כל אחד מהתהליכים מותנה בקיום תנאים ייחודיים (כמו רמת חומציות, ריכוז חומרים מסוימים), ותנאים אלה לעתים שונים מתהליך אחד למשנהו.

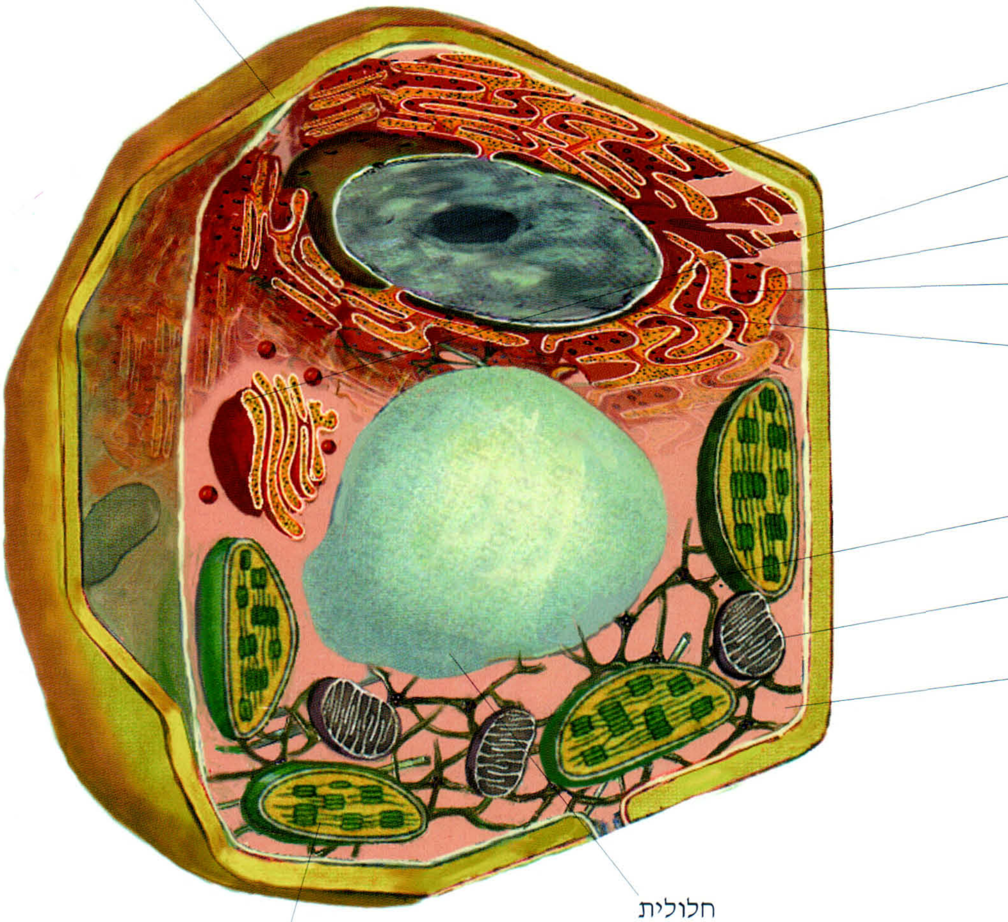
כיצד מתאפשר קיום תנאי סביבה שונים באותו תא עצמו?
תא איקריוטי מתאפיין **במידור** - קיום מדורים שונים בתא. המידור מאפשר חלוקת עבודה בתוך התא, ומשפר את יעילות התהליכים. המידור מושג הודות לקיומם של **אברונים**, שהם מבנים תוך-תאיים בעלי תפקוד ייחודי. האברונים המופרדים משאר התא בקרום התוחם אותם, יוצרים "סביבה בתוך סביבה": סביבה בתוך האברון, ובה תנאים ייחודיים השונים מהתנאים מחוץ לאברון.
התהליכים המתרחשים בתוך האברונים ומחוץ להם מתואמים ביניהם, ותיאום זה חיוני לתפקוד התקין של התא כיחידה אחת.

יש לחזור ולהדגיש, שעל-אף מבנם הבסיסי המשותף, התאים בעולם החי מגוונים בממדיהם, בצורתם ובתכולתם, ומגוון זה נמצא בהתאמה עם מגוון תפקודיהם של התאים.

באיור ב2 מוצגים זה לצד זה שני תאים איקריוטים: תא "טיפוסי" של צמח ותא "טיפוסי" של בעל-חיים, ובהם מצוינים אברונים שונים. בפרקים הבאים נכיר ביתר פירוט את האברונים ואת התהליכים העיקריים המתרחשים בהם.

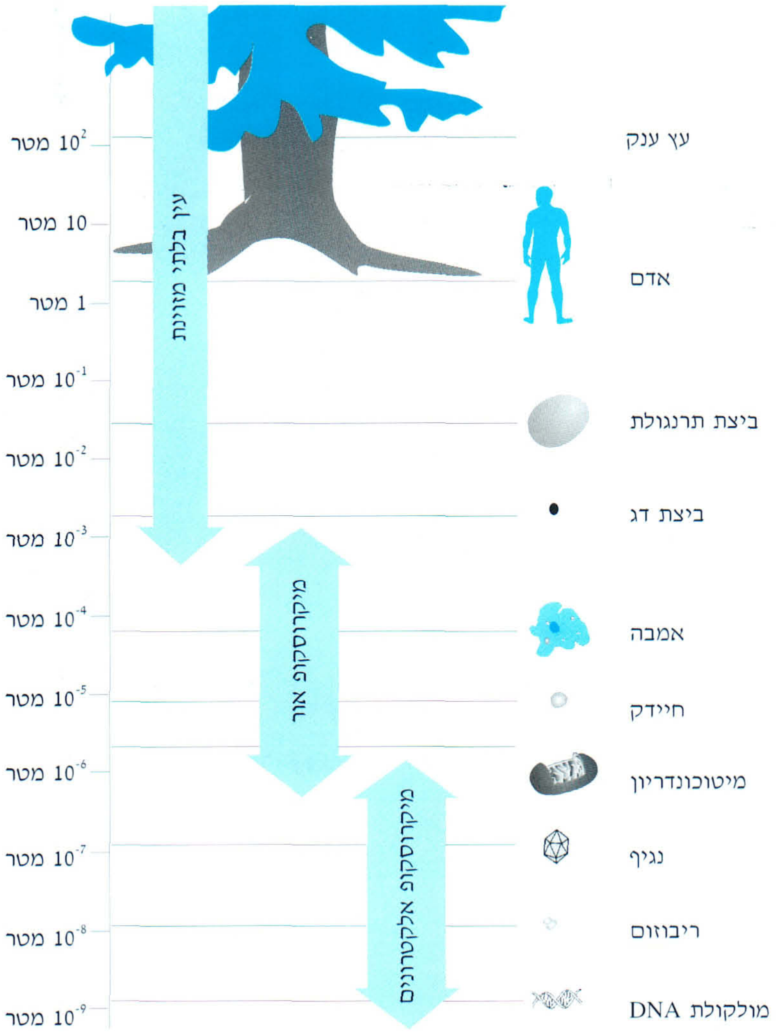


איור ב2: בעמוד זה — תא "טיפוסי" של בעל-חיים. בעמוד ממול — תא "טיפוסי" של צמח
יחסי הגודל בין המבנים באיור אינם מתאימים בדיוק ליחסי הגודל בתא החי.
איור כזה מלווה בהסברים מפורטים — ראו בעמודים 254-255.


דופן
חלולית
כלורופלסט

ב.2 על ממדיהם של תאים

מהו טווח הגדלים בעולם החי הסובב אותנו?
התבוננו באיור ב3 והתרשמו מהאורכים היחסיים של הפריטים המוצגים בו.
שימו לב שב"סרגל הגודל" המצויר יחידת המידה היא מטר, וההבדל בין שתי שנתות סמוכות הוא פי 10.



איור ב3: ממדים בעולם החי

חִשבו: פי כמה "ארוך" אדם, יחסית לאורך אמבה? ואמבה - יחסית לנגיף? וביצת תרנגולת - יחסית לריבוזום?

באילו יחידות מודדים תאים?

ממדיהם של רוב התאים קטנים בהרבה מ-10^{-3} מטר (מילימטר), לפיכך לתיאורם נוח להשתמש ביחידות מידה קטנות יותר. בטבלה ב1 מוצגות יחידות המשמשות למדידת אורכים של גופים קטנים.

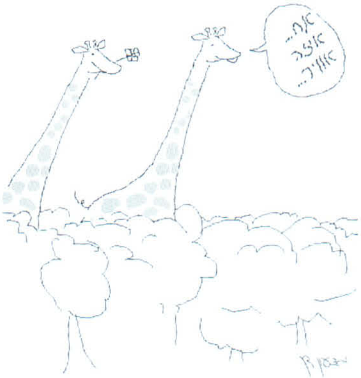
טבלה ב1: יחידות למדידות אורך

יחידה	סימול	קידומת	פירוש	כמה יש במטר?
סנטימטר	cm	סֶנְטִי	מאית	100
מילימטר	mm	מִילִי	אלפית	1,000
מיקרומטר	µm	מִיקְרוֹ	מיליונית	1,000,000
ננומטר	nm	נַנוֹ	ביליונית	1,000,000,000

שימו לב שיחידת הייחוס של מידות אורך היא המטר, גם כאשר עוסקים בסדרי-גודל קטנים ממיליונית המטר.

יחידת המידה המתאימה למדידת תאים היא מיקרומטר. (את המילה היוונית "מיקרו" הכרנו כבר: פירושה "קטן" או "זעיר", והיא משמשת גם לציון מיליונית של יחידות מידה נוספות, כמו מיקרוגרם ומיקרוליטר. סימול מיליונית הוא על-ידי האות היוונית µ, הנקראת מְיוּ.)

ככל הגופים, גם תאים הם **תלת-ממדיים**: בעלי אורך, רוחב וגובה.
אורכם של רוב התאים נע בין 5 ל-20 מיקרומטר. בתאים רבים גודל גרעין התא הוא מחצית או רבע מזה (5-10 מיקרומטר). כדי להמחיש לעצמכם את גודלם (או קוטנם) של תאים, תארו לעצמכם שלאורכו של מילימטר אחד אפשר לסדר כ-50 תאים! בין התאים בני גודל כזה נכללים התאים הירוקים שבעלה ובגבעול, תאי השורש ותאי עלי הכותרת של צמחים, וכן גם תאים בעור, במעיים ובאיברים אחרים בגופם של בעלי-חיים. התאים הקטנים ביותר בגוף האדם הם תאי הדם האדומים (קוטרם כ-7 מיקרומטר).



בגופם של בעלי-חיים, כמו גם בצמחים, אפשר למצוא גם תאים גדולים במיוחד:
תא גדול מאוד המוכר לנו נמצא בביצים המוטלות על-ידי עופות וזוחלים, שרוב נפחו הוא חומר תשמורת - חלמון הביצה. (מעניין, "חלבון" הביצה אינו חלק של תא הביצה.)
בין התאים הארוכים בבעלי-חיים נמנים תאי העצב. לתאי עצב הנמצאים במוח השדרה יש שלוחות דקיקות וארוכות, שמגיעות עד קצות האצבעות; אורכן של השלוחות הארוכות ביותר בגוף האדם יכול להגיע למטר, ואף יותר! תארו לעצמכם מה אורכה של שלוחת עצב כזו בגוף של ג'ירף!

גם בצמחים אפשר למצוא תאים ארוכים: בצמח הכותנה, לדוגמה, יש תאים שאורכם 5-1 סנטימטרים, ויש אף מיני צמחים שבהם יש תאים המגיעים לאורך של חצי מטר! תוכלו להתרשם מטווח הגדלים של תאים כאשר תעיינו בטבלה ב2.

טבלה ב2: ממדים של תאים שונים

סוג התא	מידה ממוצעת, במיקרומטרים
תא מהחלק הפנימי של לחי אדם (אורך)	50-30
תא ביצה של אישה (קוטר)	100
תא זרע של גבר (קוטר הראש)	4
שלוחת תא עצב של אדם (אורך)	1,000,000-1,000
שלוחת תא עצב של אדם (קוטר)	10
החד-תא סנדלית (אורך)	200
חיידק (קוטר)	3-0.1

בין התאים אפשר למצוא צורות שונות. תא עצב הוא דוגמה לתא צר וארוך: שימו לב להבדל בין הקוטר לבין האורך של תא זה!

על-אף מגוון הגדלים המוצג בטבלה ב2, רוב התאים בעולם החי אחידים למדי בגודלם, והתאים בגופו של יתוש דומים בגודלם לתאים שבגופו של פיל!

איך אפשר להסביר אחידות יחסית זו?
אחד ההסברים מבוסס על הקשר שבין **שטח הפנים** של התא לבין **נפחו**.

- דרך **שטח הפנים** של התא - למעשה דרך שטח פני הקרום העוטף אותו - מתבצע מעבר מבוקר של חומרים פנימה והחוצה, ודרכו מתנהלים הקשרים של התא עם סביבתו.
- **בנפח** התא נכלל כל מה שתחום בתוך התא.

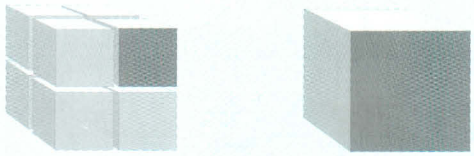
אחד הגורמים החשובים לתפקוד תאים הוא **היחס** שבין שטח הפנים שלהם לנפח שלהם: מאזן תקין בין מעבר חומרים דרך הקרום לבין רמת הפעילות בתא מותנה ביחס מתאים בין שטח פני התא לנפחו.

בדיקת היחס בין שטח לנפח בגופים שונים מגלה שככל שגוף **קטן** יותר - היחס בין שטח הפנים שלו לבין נפחו **גדול** יותר.

פינת הפרוקריוט

החיידקים, שהם יצורים הבנויים מתא אחד, (שמבנהו פשוט — לעומת תאי הצמחים ובעלי-החיים) הם קטנים במיוחד, וקוטרם בדרך-כלל פחות מרבע מקוטרו של תא דם אדום.

נבדוק כיצד **שינוי** בנפח (ללא שינוי בצורה המרחבית) משפיע על **היחס** שבין שטח הפנים לנפח. כדוגמה תשמש צורת קובייה שאורכה, רוחבה וגובהה 2 סנטימטרים. נחלק קובייה זו ל-8 קוביות זהות בעלות אורך, רוחב וגובה של סנטימטר אחד.
מהו היחס שבין שטח הפנים לנפח, בקובייה הגדולה ובכל אחת מהקוביות הקטנות?

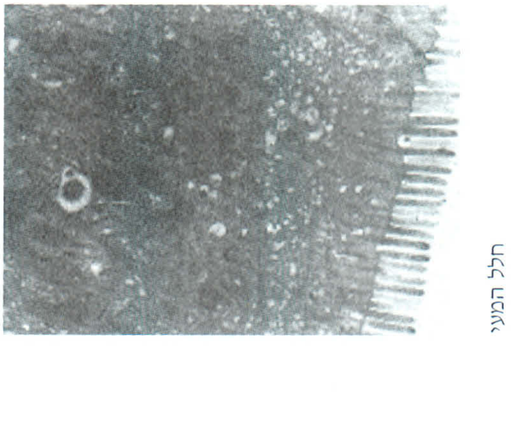


אורך ורוחב פאה של קובייה:	**2** ס"מ	**1** ס"מ
שטח פאה של קובייה:	2^2 = **4** סמ"ר	1^2 = **1** סמ"ר
שטח הפנים של קובייה:	6 x 2^2 (פאות) = **24** סמ"ר	6 x 1^2 = **6** סמ"ר
נפח קובייה:	2^3 = **8** סמ"ק	1^3 = **1** סמ"ק
יחס שטח הפנים לנפח:	24/8 = **3** סמ"ר\סמ"ק	6/1 = **6** סמ"ר\סמ"ק

אפשר לראות שנפח הקובייה הקטנה קטן פי 8 (1/8) מנפח הקובייה הגדולה, אך שטח פני הקובייה הקטנה קטן רק פי 4 (6/24) משטח פני הקובייה הגדולה. בהתאם, היחס בין שטח הפנים לנפח בקובייה הקטנה גדול מיחס זה בקובייה הגדולה פי 2 (6/3).

מהו הקשר בין עובדה זו לבין גודלם של התאים?
בתא גדול מאוד עלול להיווצר מצב שבו שטח הפנים יהיה קטן מכדי לקיים כראוי את מעבר החומרים הנדרש בין התא לבין סביבתו. ייתכן שזה הגורם המגביל את גדילתם של רוב התאים: כאשר תא מגיע לגודל סף מסוים - הוא מתחלק.

על-אף האמור, קיימים בטבע תאים בעלי נפח דומה, שלהם שטח פנים גדול במיוחד או קטן במיוחד, ולפיכך יש בהם יחסי שטח-נפח שונים. דוגמה לכך הם תאים במעי: בצד הפונה אל חלל המעי, יש לתאים שלוחות הנראות כעין אצבעות (איור ב4). שלוחות אלה, שדרכן עוברים חומרי המזון או מיצי העיכול, יוצרות שטח פנים גדול ללא הגדלה משמעותית בנפח התא. שטח הפנים הגדול מייעל את מעבר החומרים.



איור ב4: חלק מתא במעי דג
צילום במיקרוסקופ אלקטרונים. הגדלה בערך פי 6,600.
התרשמו מהתרומה של הבליטות להגדלת שטח הפנים של התא.

ב3. זה הקטן גדול ייראה: מיקרוסקופים

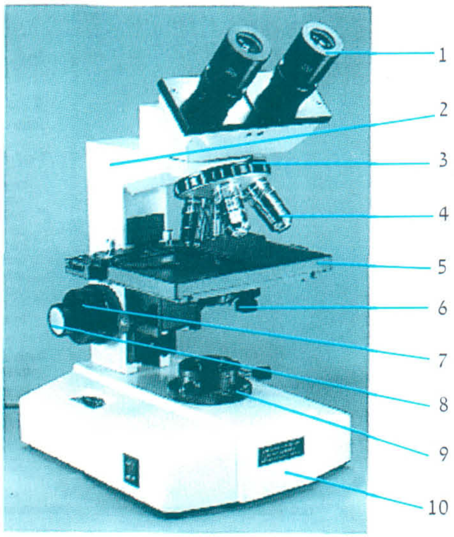
הוק לא היה יכול לגלות את קיומם של תאים בשעם, אלמלא הצליח לבנות מיקרוסקופ. גם הצלחתם של חוקרי התא שבאו אחריו הייתה מותנית במכשור שעמד לרשותם.

ראוי לשים לב לתלות ההדדית ולשילוב ההדוק שבין הטכנולוגיה לבין תגליות וממצאים. קשר זה מוכר לכל אורך התפתחות המחקר: פיתוח טכנולוגיה מביא לתגליות, הללו מעוררות שאלות שתשובה עליהן דורשת טכנולוגיה מפותחת יותר, וחוזר חלילה. זאת ועוד: לא אחת פיתוח טכנולוגיה מסוימת השפיע על כיוון המחקר ואף התווה את כיוונו.

נסו למצוא דוגמאות משטחי מדע שונים, לתלות שבין תגלית לבין הטכנולוגיה הקשורה בה.

דוגמה הדומה להתקדמות חקר התא הודות לפיתוח טכנולוגי מצויה בתחום האסטרונומיה: פיתוחם של טלסקופים משוכללים הביא לגילוי כוכבים שלא היו מוכרים קודם לכן.

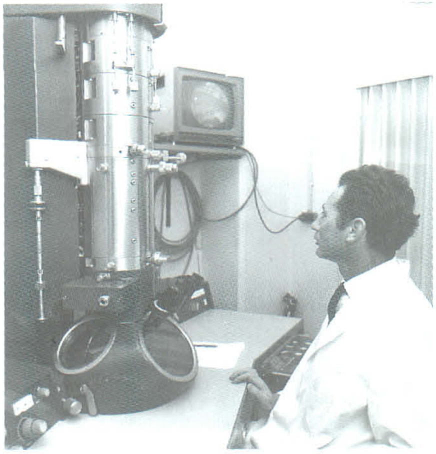
שכלול **מיקרוסקופ האור** כך שיגדיל פי 1,000 ופיתוח מִכשור ושיטות להסתכלות בתאים חיים הביאו לצבירת ידע רב על אודות התא. אולם בגלל מגבלות פיזיקליות הקשורות באורכי הגל של האור הנראה, גם מיקרוסקופ האור המודרני (איור ב5) אינו יכול לחשוף את כל פרטי המבנה העדינים של התאים.



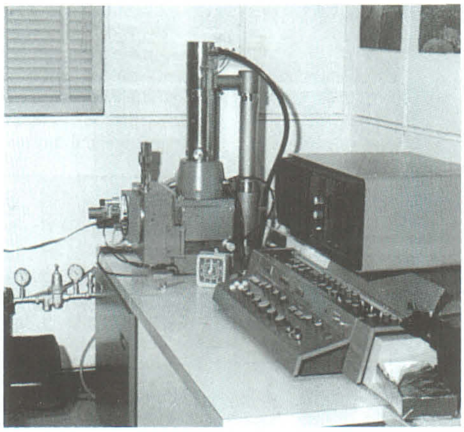
איור ב5: מיקרוסקופ אור
חלקי המיקרוסקופ:

1. עינית (אוקולר)
2. זרוע
3. תוף העדשות
4. עצמית (אובייקטיב)
5. שולחן המיקרוסקופ
6. צמצם
7. בורג כיוונון גס
8. בורג כיוונון עדין
9. מנורה
10. בסיס

בשנות השלושים של המאה ה-20 פותח מיקרוסקופ האלקטרונים (איור ב6). במיקרוסקופ זה קרן אלקטרונים ממלאה את מקום קרן האור במיקרוסקופ האור, והודות לכך כושר ההגדלה מגיע עד פי מיליון!
בעזרת מיקרוסקופ האלקטרונים ניתן לראות מבנים זעירים בתוך התא ואף מולקולות גדולות (בגודל של כ-0.5 נַנוֹמֶטֶר, ראו טבלה ב1).



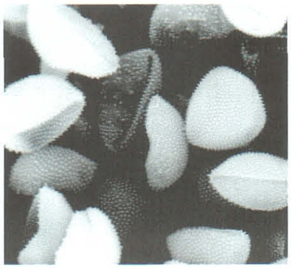
איור ב6: מיקרוסקופ אלקטרונים חודר

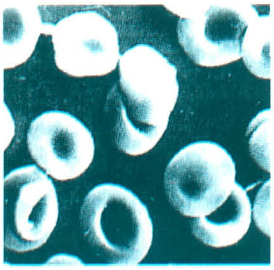


איור ב7: מיקרוסקופ אלקטרונים סורק

ומה באשר למבנה התלת-ממדי של התאים? במיקרוסקופ אלקטרונים "רגיל" אפשר להסתכל רק בפרוסות דקות מאוד, היות שקרן האלקטרונים עוברת ***דרך*** החומר הנבדק. לפיכך הוא נקרא גם מיקרוסקופ אלקטרונים חודר. לעומת זאת במיקרוסקופ אלקטרונים סורק (איור ב7) הקרן "מטיילת" ***על-פני*** החומר הנבדק, וכך אפשר להבחין במבנה התלת-ממדי של שטח הפנים שלו.

התבוננו בתצלומים שלהלן, והבחינו בתלת-ממדיות של התאים:





איור ב8: צילומים של תאים במיקרוסקופ אלקטרונים סורק
ימין - גרגרי אבקה (ממערכת הרבייה הזכרית של צמחים), הגדלה בערך פי 1,500
שמאל - תאי דם אדומים של אדם, הגדלה בערך פי 1,600, התאים נראים כדסקיות עם שקעים במרכזן.

אחת המגבלות בחקר תאים בעזרת מיקרוסקופ היא שעל-פי-רוב הכנת התאים לצורך ההסתכלות במיקרוסקופ גורמת למותם. לכן במקרים רבים אין אפשרות לעקוב אחר תנועת תאים ופעילותם. יתר על-כן קיים גם חשש שבתהליך הכנת התאים להסתכלות ייגזק המבנה העדין שלהם, והתמונה שתיראה תהיה שונה מהקיים בתאים החיים.

עוד שיטות לחקר תאים

כאמור, בעזרת מיקרוסקופים אפשר להכיר את מבנה התא, את מבנם של אברונים שונים בתוך התא ואפילו את צורתן של מולקולות גדולות בתא. אולם לצורך הבנתם של תהליכים בתוך התא ולשם היכרות עם תכונותיהן של מולקולות שונות בתאים, דרושות שיטות מחקר נוספות המאפשרות, כל אחת בנפרד ובשילוב ביניהן, "לחדור לנבכי התא".

כל תא הוא יחידה קטנה ומורכבת מאוד; בעולם החי קיימים טיפוסי תאים רבים ושונים זה מזה. כדי לעקוב אחר תגובות ותהליכים המתרחשים בתא מטיפוס כלשהו, דרוש מספר רב של תאים זהים ונדרשת הפרדה בין מרכיבים שונים בתאים אלה. ואכן, במהלך השנים פותחו שיטות שונות הן ל**ריבוי תאים** והן **להפרדה** בין מרכיבי תא.

גידול תאים בתרבית - אחת מפריצות הדרך במחקר הביולוגי הייתה האפשרות לגדל תאים בתנאי מעבדה: התברר שטיפוסי תאים רבים, הן של בעלי-חיים והן של צמחים, יכולים לחיות, להתרבות ולעתים אף לבטא את תכונותיהם הייחודיות, גם כאשר מגדלים אותם מחוץ לגוף - אם נותנים להם תנאים מתאימים. התנאים הנדרשים לשם גידול **תרבית תאים** משתנים בהתאם לטיפוס התאים: לגידול תרבית של תאי צמחים נדרשים תנאים שונים מהנדרש לגידול תאי בעלי-חיים, ותנאי הגידול של תאי דם שונים מאלה של תאי שריר - אך תמיד התנאים כוללים הספקת חומרי מזון, פיקוח על טמפרטורה, על רמת חומציות ועל ריכוז חמצן ופחמן דו-חמצני בתמיסת הגידול.

כיום משתמשים לצורכי מחקר בתרביות תאים ממקורות שונים, החל מרקמות עובריות וכלה ברקמות של יצור בוגר או ברקמות סרטניות.

כפי שהזכרנו, במקרים רבים תאים בתרבית שומרים על התכונות הייחודיות של רקמת המוצא, עובדה המאפשרת להשתמש בתרביות לחקר תכונות אלה. כך, לדוגמה, תאים הנלקחים משריר עוברי יכולים ליצור בתרבית תאים מתכווצים - בדומה להתכווצות תאי שריר בגוף, ותאי עצב הגדלים בתרבית שולחים שלוחות היוצרות קשרים עם תאי עצב סמוכים - בדומה לקשרים הנוצרים בגוף השלם.

בתרביות כאלה ניתן לעקוב אחרי שלבים של תהליכים, לבצע מדידות כמותיות של מרכיבים שונים וכן לערוך ניסויים, כמו אלה הבודקים כיצד מושפעים התאים מהוספה או מהחסרה של חומרים ייחודיים.

הפרדה בין מרכיבי תא - במהלך השנים פותחו שיטות לפירוק תאים ולהפרדה בין המרכיבים השונים שבהם. בשיטות אלה אפשר לשמור על המבנים והתפקודים התקינים של המרכיבים שהופרדו.

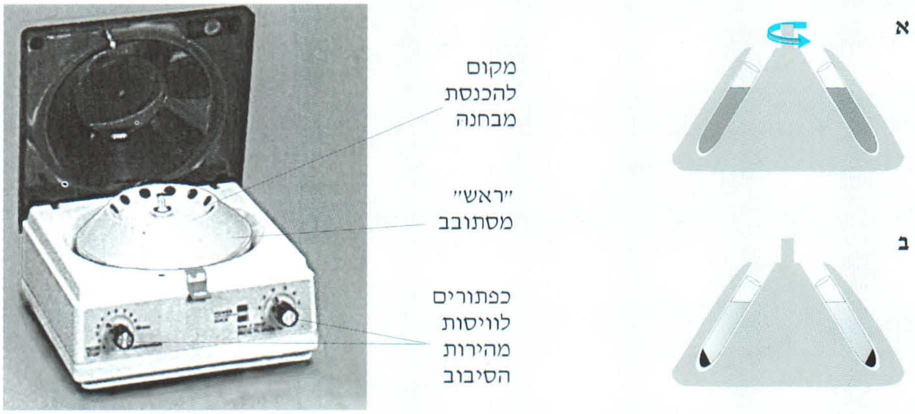
אחת משיטות ההפרדה בין חלקי תא השונים בגודלם, במשקלם ובצפיפותם נעשית בתהליך של **סִרְכּוּז** (או: צנטריפוגציה).

בשיטה זו, מוכנסת מבחנה ובה תערובת תאים מפורקים למכשיר הנקרא **צֶנְטְרִיפוּגָה** (איור ב9). מכשיר זה מסובב את המבחנות סביב ציר מרכזי ובמהלך הסיבוב שוקעים המרכיבים במבחנה. זוהי פעולת הסרכוז.

כדי להכיר את העיקרון של שיטה זו, נסו לבדוק מה יקרה אם תכניסו מים לדלי, ותסובבו את הדלי במהירות רבה בידיים מושטות.

המים "יידחפו" לקרקעית הדלי, הרחק מציר הסיבוב.

על עיקרון זה מבוססת שיטת הסרכוז.



איור ב9: סרכוז בצנטריפוגה
שמאל - צנטריפוגה,
ימין - תרשים המתאר את המתרחש במבחנות:
א. בתחילת הסרכוז - פיזור אחיד של המרכיבים בנוזל שבמבחנה
ב. בתום הסרכוז - המרכיבים הכבדים שקעו לתחתית המבחנה

בצנטריפוגה אפשר לשלוט במהירות הסיבוב של המבחנות ולשנותה לפי הצורך, כך שתכולת המבחנות תיפרד למרכיביה באופן מבוקר, ולא כגוש אחד: מרכיבים גדולים (כמו גרעין התא) שוקעים לתחתית המבחנות כבר במהירת סיבוב שאינה גבוהה במיוחד, ואילו לצורך השקעתם של מרכיבים קטנים נדרשת מהירות סיבוב גבוהה יותר. באמצעות כמה מחזורי סרכוז והפרדה בין המשקע לנוזל, או בדרכים מתוחכמות יותר, ניתן להפריד בין מרכיבי התא השונים ולחקור כל אחד מהם בנפרד.

ב4. ארגון התאים בגוף הרב-תאי

גופנו, כמו גם גופם של יצורים רב-תאיים אחרים, מורכב מטיפוסים שונים של תאים. תאים, אשר דומים במבנם ובתפקודם, מרכיבים **רקמה**. כך יש רקמות תמיכה - כמו עצם, רקמות אגירה - כמו רקמת שומן, ועוד.

רקמות שונות בונות יחד **אֵיבר**; דוגמה לאיבר היא היד, המורכבת מרקמות כמו שרירים, עצבים ועוד. איברים אחרים הם ענף, כנף וכדומה.

רמת ארגון נוספת היא **מערכת** - שיכולה להיות מורכבת מכמה רקמות ומכמה איברים, כמו מערכת הנשימה - הכוללת בגופנו, בין השאר, את קנה הנשימה והריאות, שהם איברים, וכמו מערכת ההובלה בצמחים - הכוללת את רקמת העֵצָה, המובילה מים ומלחים, ואת רקמת השִׁיפָה, המובילה תוצרים שהצמח יוצר.

כדאי לשים לב, שהגדרת רמות הארגון אינה חד-משמעית:
ישנן רקמות המורכבות מכמה טיפוסי תאים, ויש גם איברים שבהם מספר מערכות.

האיברים והמערכות מרכיבים את **גוף היצור - האוֹרְגָנִיזְם** (כאמור, organon=מכשיר).
בהמשך נשתמש הן במונח "יצור" והן במונח "אורגניזם".

בד בבד עם דיוננו באורגניזמים רב-תאיים אל לנו לשכוח כי בטבע מצויים גם המוני יצורים **חד-תאיים** - שגופם בנוי תא אחד בלבד, כדוגמת חיידקים, שמרים, אמבות, סנדליות, אצות מסוימות ועוד.

ציפיה
גוסטב קלימט (1918-1862)

ב5. סיכום

- תא בנוי מ**חומרים אורגניים**. אלה תרכובות פחמן הכוללות גם מימן וחמצן, ובחלקן יש גם חנקן, גפרית וזרחן.
- תא **איקריוטי** מוקף קרום, ובו גרעין וציטופלסמה. בציטופלסמה נמצאים אברונים, שחלקם נמצאים גם בתאי צמחים וגם בתאי בעלי-חיים (מיטוכונדריה, רשת תוך-תאית, שלד תוך-תאי, מערכת גולג'י וריבוזומים) חלקם יחודיים לתאי בעלי חיים (צנטריולים וליזוזומים) וחלקם ייחודיים לתאי צמחים (חלולית וכלורופלסטידות).
- בתאים איקריוטים צמחיים הקרום מוקף בדופן.
- **האברונים** יוצרים בתא **מידור**.
- קוטרם של רוב התאים האיקריוטים נע בין **5 ל- 20 מיקרומטר**.
- תאים אינם אחידים בצורתם; קיימת התאמה בין מבנה התא ובין תפקודו.
- **יחס** מתאים בין **שטח פני התא** לבין **נפחו** חשוב לאיזון בין מעבר חומרים דרך הקרום לבין הפעילות התוך-תאית.
- שיטות שונות משמשות לחקר מבנה התא ותפקודו. ביניהן:
הסתכלות **במיקרוסקופים** שונים (מיקרוסקופ אור, מיקרוסקופ אלקטרונים חודר ומיקרוסקופ אלקטרונים סורק)

- גידול תאים **בתרבית**
- הפרדת מרכיבי-תא באמצעות **סרכוז** בצנטריפוגה.
- בעולם החי יש אורגניזמים **חד-תאיים** ואורגניזמים **רב-תאיים**.
- רמות הארגון באורגניזם רב-תאי הן: תא, רקמה, איבר, מערכת, גוף.

שאלות ומשימות לפרק ב

1. באיור ב1 מוצגות 12 תמונות ובהן תאים שונים.

א. בחרו מביניהם 10 תאים שונים, וציינו לגבי כל אחד מהם תכונה אופיינית אחת שבאה לידי ביטוי באיור, המבדילה בינו לבין התאים האחרים.

ב. העריכו את גודלם האמיתי של התאים שבתמונות א, ב, ו, יא ו-יב (ציינו אם ההערכה היא של אורך או קוטר). בטאו את הגודל במיקרומטרים.

את האורך האמיתי מחשבים על-ידי מדידת אורך התא שבתמונה (במילימטרים או בסנטימטרים), וחלוקת ערך זה במידת ההגדלה. אחר כך אפשר לבטא את הערך שהתקבל ביחידות שונות.

דוגמה: קוטר תא הביצה שבתמונה י הוא 3 ס״מ; התמונה מוגדלת פי 300.
בהתאם לכך, קוטרו האמיתי של תא הביצה הוא 0.01 (=3/300) ס״מ, שהם 0.1 (=10 x 0.01) מילימטר, וגם 100 (=10,000 x 0.01) מיקרומטר.

ג. מיינו את 12 התמונות על-פי: תאים פרוקריוטים; תאים איקריוטים של בעלי חיים; תאים איקריוטים של צמחים. אם יש תאים שאינכם יכולים למיין לקבוצות אלו, ציינו זאת.

2. התבוננו באיור ב2, ערכו רשימה של האברונים המצוינים באיור וציינו: מי מהם קיים גם בתאי צמחים וגם בתאי בעלי-חיים, ומי - רק בתאי צמחים או רק בתאי בעלי-חיים.

3. אורכם של הפריטים באיור ב3 מבוטא במטרים. היעזרו בטבלה ב1, ותארו את אורכו של:

ריבוזום - בננומטרים	חיידק - במיקרומטרים
ביצת דג - במילימטרים	ביצת תרנגולת - בסנטימטרים
אדם - במטרים.	*(אין צורך לדייק.)*

4. התבססו על עיקרון היחס שטח פנים \ נפח כדי לענות על השאלות הבאות:

א. מדוע אדם הישן בקור מתכווץ ומתכרבל?

ב. אם ברצוננו לשמור על חומו של מרק המוגש לשולחן, כיצד עדיף להביאו מן המטבח - בכלי אחד גדול או בקעריות אישיות קטנות?

ג. בחורף הבגדים ארוכים, ובקיץ - קצרים. מדוע חשוב הדבר במיוחד לגבי תינוקות?

5. פי כמה (בערך) מגדיל מיקרוסקופ האלקטרונים, יחסית למיקרוסקופ האור?

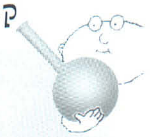
6. לפניכם רשימה של פריטים: גבעול, אוזניים, עלה, תאי שריר, עצם, פרח, כלב, שרירים, יד, תפוח-עץ, כלנית. מיינו אותם על-פי: תא, רקמה, איבר, מערכת וגוף. שימו לב: יש פריטים המתאימים ליותר מקבוצה אחת.

פרק ג

העוסקים במלאכה ותנאי עבודתם- אנזימים

בפרק הקודם הכרנו תאים שונים, על המשותף לכולם והמייחד טיפוסים שונים בהם, והתמקדנו בעיקר ב***מבנם.*** כמו-כן עמדנו על ההתאמה בין מבנה התאים לבין תפקודם, התאמה הבולטת במיוחד בתאים בעלי תפקוד ייחודי.
בפרק זה נעסוק בהיבטים כלליים הנוגעים ל***תהליכים*** המתרחשים בתאים. בין התהליכים יש המשותפים לכל התאים (כמו הפקת אנרגיה), ויש ייחודיים לתאים מסוימים (כמו העברת מסרים עצביים), אך כולם תהליכי חילוף חומרים: בנייה ופירוק של תרכובות.

תהליכי חילוף חומרים הם תהליכים כימיים לכל דבר, ולפיכך חלים עליהם אותם חוקי הכימיה והפיזיקה החלים על כל התגובות הכימיות - גם אלה שאינן קשורות לעולם החי (ראו נספח 1: רקע כימי). המייחד את מרבית התהליכים בתאים הוא פעילותם של זרזים ביולוגיים, הנקראים **אנזימים**.
רוב האנזימים נמנים על קבוצת חומרים מרכזית וחשובה בעולם החי - **חלבונים**.
נכיר קבוצת חומרים זו.

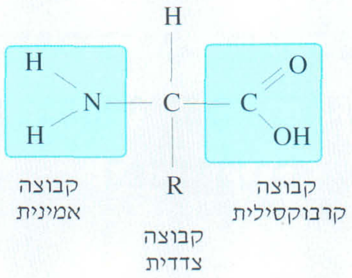


קצת כימיה

חלבונים

החלבונים הם תרכובות אורגניות, המהווים מרכיב מרכזי הן ***במבנים*** תוך - תאיים רבים והן ***בתפקודים*** מגוונים: זירוז תגובות כימיות, ויסות המעבר של חומרים אל התאים ומתוכם, בקרה על תהליכים ועוד.

החלבונים הם שרשרות ארוכות של **חומצות אמיניות**; חומצות אמיניות הן תרכובות שבהן אל אותו אטום פחמן קשורות קבוצה אמינית (NH_2) וקבוצה קרבוקסילית ($COOH$), וכן קבוצה צדדית המסומנת באות R ואטום מימן (H).



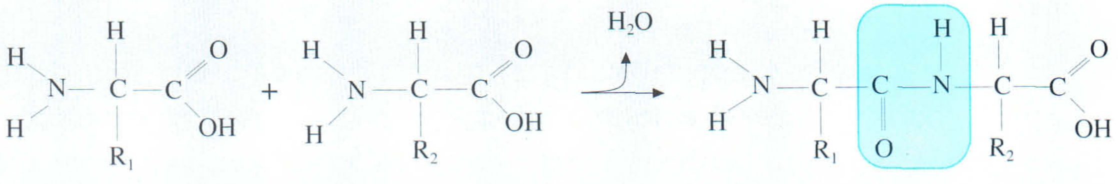
איור ג1: דגם כללי של חומצה אמינית
חומצות אמיניות שונות נבדלות זו מזו בקבוצות הצדדיות שבהן.

התכונות ***המשותפות*** לכל החומצות האמיניות נובעות מהקבוצה האמינית ומהקבוצה הקרבוקסילית, שהן, כאמור, זהות בכל החומצות האמיניות. לעומת זאת הקבוצות הצדדיות - השונות בהרכבן, במבנן, בגודלן ובמטענן החשמלי בין החומצות השונות, הן המקנות לחומצות את תכונותיהן ***הייחודיות***.

בטבע מוכרות חומצות אמיניות רבות - אולם בכל האורגניזמים המוכרים, כל החלבונים מורכבים מצירופים שונים של **עשרים** חומצות אמיניות בלבד.

בחלבון החומצות האמיניות קשורות ביניהן, כך שקבוצה קרבוקסילית של חומצה אמינית אחת נקשרת לקבוצה אמינית של חומצה אמינית שנייה (תוך איבוד מולקולת מים);

קשר זה נקרא **קשר פפטידי**.



איור ג2: קשר פפטידי בין שתי חומצות אמיניות
הקשר הפפטידי מסומן בצבע

בחומצה האמינית **גליצין** הקבוצה הצדדית היא H. בחומצה האמינית **אלנין** הקבוצה הצדדית היא CH_3. שרטטו סכמה של המולקולה המתקבלת מקשר פפטידי בין הקבוצה הקרבוקסילית של גליצין לבין הקבוצה האמינית של אלנין.

מולקולות חלבון עשויות להיות מורכבות מעשרות בודדות ועד יותר מעשרת אלפים חומצות אמיניות, הקשורות זו לזו בקשרים פפטידיים. כל חלבון מתאפיין ברצף החומצות האמיניות המרכיבות אותו, רצף המשפיע על האופן שבו שרשרת החומצות מאורגנת במרחב.

כיצד?

שרשרת החומצות האמיניות בחלבון מקופלת ומפותלת. אופן הקיפול מוכתב על-ידי המטענים של הקבוצות הכימיות שבחומצות האמיניות: משיכה בין מטענים מנוגדים ודחייה בין מטענים דומים; כן יכולים להיווצר בין החומצות קשרי מימן, ואף קשרים קוולנטיים בין שני אטומי גפרית מחומצות אמיניות שאינן סמוכות (ראו נספח 1: רקע כימי – קשרים כימיים). כוחות אלה יוצרים בשרשרת פיתולים וקיפולים, ובכך קובעים את המבנה התלת-ממדי של החלבון. המבנה של חלבונים ניתן לתיאור בארבע רמות (ראו איור ג3).

המבנה הראשוני הוא רצף החומצות האמיניות המרכיבות את החלבון: מספרן, אילו הן, ומה הסדר שבו הן קשורות ביניהן.

המבנה השניוני הוא הסידור המרחבי של ***קטעים בשרשרת*** החומצות האמיניות. שני מבנים נפוצים של קטעי שרשרת הם מבנה סלילי, בדומה לסליל המחובר לשפופרת טלפון (איור ג3) ומבנה המזכיר נייר מקופל ב"זיג-זג" כמו באקורדיון (איננו מתואר באיור).

המבנה השלישוני הוא הארגון המרחבי של ***כל השרשרת*** של החומצות האמיניות.

מבנה רביעוני קיים רק בחלבונים המורכבים ***מכמה שרשרות*** של חומצות אמיניות; רמה זו מתארת את האופן שבו מספר שרשרות קשורות זו לזו במרחב.

איור ג3: רמות המבנה של חלבונים

לתנאי הסביבה שבה מצויה מולקולת החלבון יש השפעה מכרעת על אופן התארגנותה במרחב; כמה גורמים סביבתיים יכולים להשפיע על הקשרים היוצרים את המבנה המרחבי של חלבון. בין גורמים אלה: טמפרטורה, pH (ראו נספח 1: רקע כימי - רמת חומציות, רמת pH) וריכוז של מלחים. מידת ההשפעה של כל אחד מהגורמים שונה מחלבון לחלבון.

הרס המבנה המרחבי ה"טבעי" של מולקולה נקרא **דֶנָטוּרַצְיָה** (de=לא כמו, שונה מקודם. natura=טבע). בדנטורציה של חלבון נפגעים בדרך-כלל הקשרים (החלשים) היוצרים את המבנה השניוני, השלישוני והרביעוני של חלבון, בעוד הקשרים הפפטידיים בין החומצות האמיניות בשרשרת (כלומר, המבנה הראשוני) – נשמרים.

מרבית התהליכים הביולוגיים שבהם מעורבים חלבונים מחייבים התאמה מרחבית ייחודית בין מולקולת חלבון מסוימת למולקולה אחרת (שגם היא יכולה להיות חלבון); כיוון שכך, הרס המבנה המרחבי – דנטורציה – כרוך בדרך-כלל גם באיבוד כושר הפעילות של החלבון. בכך אפשר להסביר את התלות של תהליכים ביולוגיים רבים בתנאי סביבה מתאימים.

ג1. האנזימים - זרזים ביולוגיים

בתאים של יצורים חיים מתרחשות אלפי תגובות כימיות[1]. מרבית התגובות היו מתרחשות לאט מאוד, ואולי לא היו מתרחשות כלל, אילו היתה רק המסה של המגיבים וערבובם. ***במעבדה*** אפשר לזרז תגובות על-ידי העלאת הטמפרטורה או על-ידי העלאת ריכוזי המגיבים (ראו נספח 1: רקע כימי - קצב התגובה הכימית). אולם ***בתא*** המצב שונה; טמפרטורה גבוהה עלולה לגרום להרס המבנה המרחבי של החלבונים בתא, ואשר לריכוזי החומרים – הללו בדרך-כלל משתנים בתאים בטווח צר למדי[2].

אם את האנרגיה הדרושה לביצוע תגובה נְדַמֶה להר שיש לעבור אותו, אזי העלאת הטמפרטורה "דוחפת" את התגובה במעלה ההר.
זרז פועל בצורה אחרת: נוכחותו "מנמיכה" את ההר...

דרך אחרת לזירוז תגובות כימיות מסוימות במעבדה היא על-ידי הוספת **זרזים** (זרז=קטליזטור). חומרים אלה מזרזים תגובות כימיות, שבמהלכן הם עצמם אינם עוברים שינוי כימי קבוע, וגם כמותם אינה משתנה.

[1] לפני קריאת פרק זה מומלץ לעיין בקטע על "תגובות כימיות" שבנספח 1: רקע כימי.
[2] טווח צר זה מבטא את תופעת ההומאוסטזיס, המאפיינת תא חי: שמירה על סביבה פנימית יציבה, על אף שינויים בסביבה החיצונית.

על שיווי-משקל כימי, על מערכות סגורות ופתוחות ועל כיוונן של תגובות

במצב של שיווי-משקל כימי הקצב שבו ***מגיבים*** הופכים ל***תוצרים*** שווה לקצב בו תוצרים הופכים למגיבים (ראו נספח 1: רקע כימי – שיווי-משקל כימי). מכאן, שבמצב של שיווי משקל כימי ריכוזי המגיבים, וכמוהם גם ריכוזי התוצרים, הם קבועים. שיווי-משקל כימי מתואר בסכמה הבאה:

$$\text{מגיבים} \rightleftharpoons \text{תוצרים}$$

שיווי-משקל כימי מתקבל רק במערכת ***סגורה***, כלומר מערכת שחומרים אינם נכנסים אליה ואינם יוצאים מתוכה.

מה עושה זרז?

זרז **אינו משנה** את תוצאות התגובה, אלא **מזרז** אותה לשני הכיוונים, ובכך מזרז את ההגעה לשיווי-משקל כימי.

ומה קורה בתא?

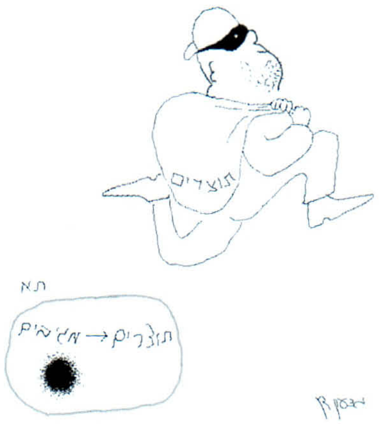
התא הוא מערכת ***פתוחה***.

ריכוזי החומרים בתאים נתונים לשינויים, לא רק בגלל תגובה אחת מסוימת: אל התא נכנסים חומרים, וחומרים יוצאים ממנו. כמו-כן רוב החומרים בתא אינם משתתפים רק בתגובה אחת, אלא בכמה תגובות: בתהליכים רבים תוצר של תגובה אחת הוא המגיב של תגובה אחרת.

היות שהתא הוא מערכת פתוחה, התגובות המתרחשות בו ***אינן*** מגיעות לשיווי משקל: מגיבים הופכים לתוצרים, אך במקרים רבים התוצרים אינם מצטברים ולא, או כמעט שלא, הופכים למגיבים.

והזרזים בתא?

גם בתא – הזרזים אינם משנים את תוצאות התגובה, אלא מזרזים אותה. היות שהתגובות בתא אינן נמצאות בשיווי-משקל, הרי התוצאה של פעולת הזרזים היא זרוז תגובות ***בעיקר*** בכיוון אחד: **מגיבים הופכים לתוצרים.**



הזרזים המשתתפים בתהליכים ביולוגיים נקראים **אֶנְזִימִים** (enzymes, מיוונית: en=בתוך; zyme=לתסוס); המגיב בתגובה אנזימטית נקרא **סוּבְּסְטְרָט** (substrate; בעברית - מצע).

אנזים יכול לזרז תהליכים בשני הכיוונים, אך בפועל בתא

אנזים מזרז את הפיכת הסובסטרט לתוצר

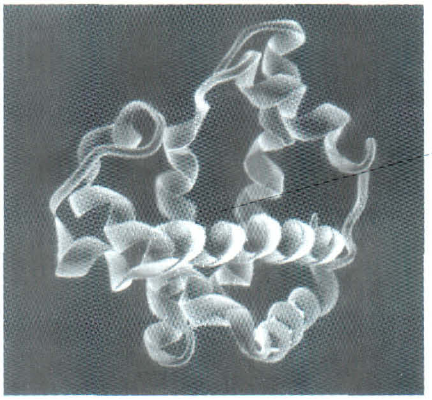
$$\text{סובסטרט} \xrightarrow{\text{אנזים}} \text{תוצר}$$

למעשה, בתנאים השוררים בתאים חיים התגובות לא היו מתרחשות כלל אלמלא היו אנזימים! אנזימים מזרזים תגובות פי מיליון ואף יותר. בכל שנייה, מולקולה אחת של אנזים יכולה לזרז את המעבר של אלפים, ואף של מאות אלפים, מולקולות מגיב למולקולות של תוצר!

ייחודיות האנזימים ומבנם המרחבי

אחד המאפיינים החשובים של האנזימים הוא היותם **ייחודיים** (ספציפיים): לרוב בתא, אנזים מסוים פועל על סוג ***אחד*** של סובסטרט בתגובה ***אחת*** בלבד, כך שבכל תגובה אנזימטית המתרחשת בתא החי, פעיל אנזים ייחודי.
בכל תא קיימים אפוא אלפי אנזימים שונים!

איך אפשר להסביר ייחודיות זו?
כמעט כל האנזימים המוכרים הם מולקולות חלבון. כמו כל חלבון, הם בנויים משרשרת של חומצות אמיניות, המקופלת למבנה מרחבי אופייני לכל חלבון, וכאמור הפעילות הביולוגית של חלבונים (ובכללם אנזימים) מותנית במבנם המרחבי.



איור ג4: דגם של אנזים
שרשרת החומצות האמיניות מקופלת ויוצרת מבנה שבו מעין כיס - זהו האתר הפעיל. חומצות אמיניות ממקומות שונים לאורך השרשרת שותפות למבנה האתר הפעיל.

הפעילות האנזימטית (כלומר: פעילות החלבון כזרז) מרוכזת באזור קטן במולקולת האנזים, הנקרא **אתר פעיל** (ראו איור ג4). אתר זה כולל מספר קטן של חומצות אמיניות סמוכות זו לזו (סמיכות זו יכולה להיות עקב רצף החומצות האמיניות בשרשרת הבלתי מקופלת, או עקב קיפולי השרשרת, קיפולים היוצרים את המבנה המרחבי הייחודי). היכולת של אנזים להתקשר לסובסטרט מסוים, תלויה בסוג החומצות האמיניות המרכיבות את האתר הפעיל ובסידורן במרחב; בכך ניתן להסביר את הפעילות הייחודית של האתר הפעיל באנזים עם הסובסטרט המתאים לו.

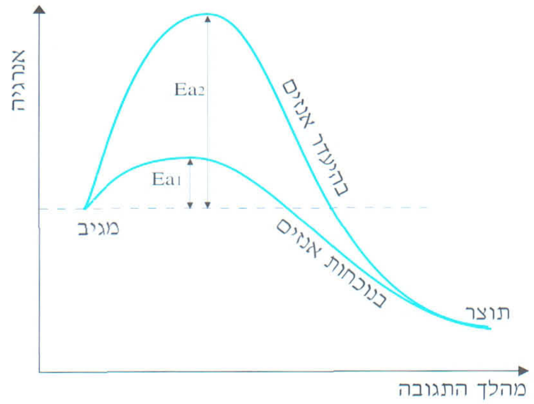
אתרים פעילים של אנזימים רבים כוללים גם מרכיב לא-חלבוני, המכונה **קו-פַקְטור** (cum=יחד, facere=לעשות), בהיעדרו האנזים אינו פעיל. בין הקו-פקטורים נמנים ויטמינים ויוני מתכות.

ויטמינים

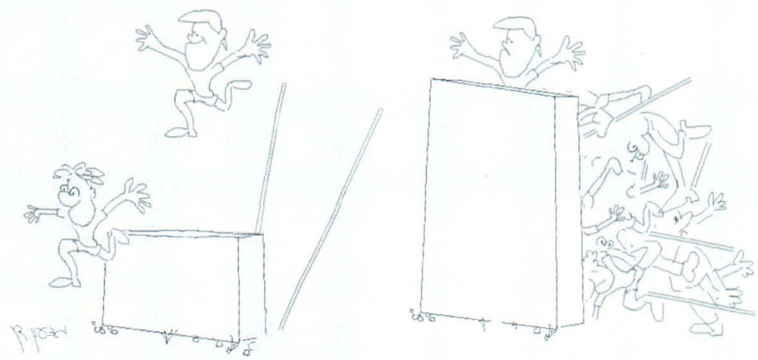
ויטמינים (vita=חיים) הם תרכובות אורגניות שהגוף זקוק להן בכמויות קטנות, ואין ביכולת האדם או בעלי-חיים אחרים לייצר בגופם, ומשום כך עליהם לקבל אותם במזונם. רוב הוויטמינים הם קו-פקטורים או חומרים שמהם הגוף מייצר הורמונים. מוכרים 6 ויטמינים (או קבוצות של ויטמינים), המצוינים באותיות לועזיות (A, B, C, D, E ו-K). לכל ויטמין תפקיד ייחודי. מחסור ממושך באחד מהוויטמינים גורם בדרך כלל להפרעות ייחודיות לוויטמין החסר, ביניהן חולשה, אבדן כושר ההתנגדות למחלות, הפרעות בקרישת הדם ועוד.

מה עושה אנזים?

כאמור, נוכחותו של אנזים אינה משנה את תוצרי התגובה; השפעת האנזים היא בהורדת האנרגיה הדרושה לקיום התגובה (אנרגיית השפעול, ראו נספח 1: הרקע הכימי - מהלך התגובה הכימית). במילים אחרות: בנוכחות אנזים סף האנרגיה הדרוש על-מנת שתגובה מסוימת תצא לפועל נמוך בהרבה מהסף הדרוש לכך בהיעדר אותו אנזים (איור ג5).



איור ג5: השפעת אנזים על תגובה
בנוכחות אנזים האנרגיה הדרושה כדי שתגובה תתרחש (Ea_1) קטנה יותר מהאנרגיה הדרושה להתרחשות אותה תגובה בהיעדר אנזים (Ea_2).



לְמה הדבר דומה?

לאימון בקפיצה מעל קיר, שבו הנמיכו את הקיר. במצב החדש הזה יותר תלמידים יכולים לעבור מעל הקיר במשך האימון.

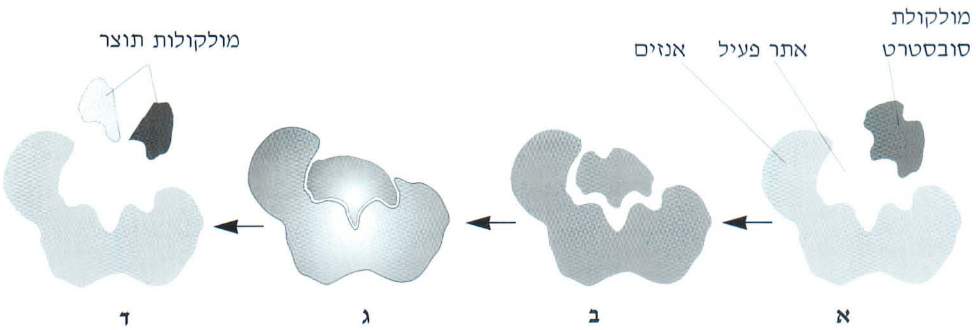
בדוגמה זו:

מה מייצג הקיר? מה מייצג המעבר מעליו? מהו המקביל להנמכת הקיר?

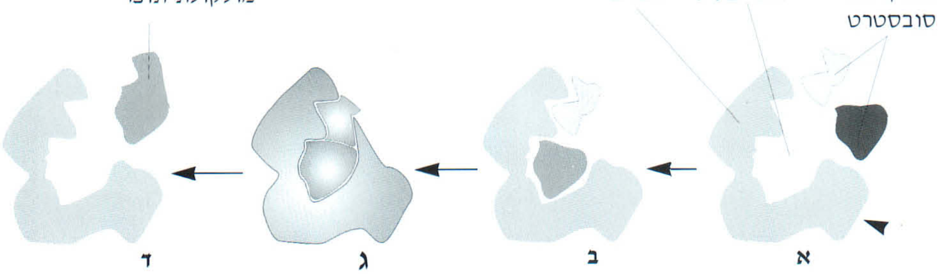
כיצד פועל אנזים?

מולקולת הסובסטרט נקשרת לאתר הפעיל של האנזים, ונוצר **תצמיד** אנזים-סובסטרט. התצמיד מתקבל הודות להתאמה כימית ומרחבית בין מרכיביו.
ההתאמה הכימית מתבטאת בכך שהחומצות האמיניות המרכיבות את האתר הפעיל של האנזים יכולות ליצור קשרים כימיים (חלשים) עם קבוצות מתאימות במולקולת הסובסטרט.
ההתאמה המרחבית מבוססת על כך שהמבנים המרחביים של האתר הפעיל ושל הסובסטרט משלימים זה את זה.

התצמיד אינו יציב; הוא משתנה בתוך פרק זמן קצר ומתקבל תוצר (או שוב סובסטרט), הניתק מהאתר הפעיל של האנזים.
עם הניתוק מולקולת האנזים חוזרת למצבה המקורי, והיא שוב זמינה לקשר עם מולקולת סובסטרט (איורים ג6 ו-ג7).



איור ג6: תגובה אנזימטית של פירוק
א. בין מולקולת הסובסטרט ובין האתר הפעיל שבאנזים קיימת התאמה
ב. נוצר תצמיד אנזים-סובסטרט
ג. במרכיבי התצמיד חלים שינויים
ד. מולקולות תוצר משתחררות, והאתר הפעיל חוזר לצורתו הראשונית

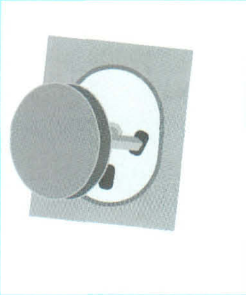


איור ג7: תגובה אנזימטית של הרכבה
א. בין מולקולות הסובסטרט ובין האתר הפעיל שבאנזים קיימת התאמה
ב. נוצר תצמיד אנזים-סובסטרט
ג. במרכיבי התצמיד חלים שינויים
ד. משתחררת מולקולת תוצר, והאתר הפעיל חוזר לצורתו הראשונית

בעבר נהגו לדמות את ההתאמה המרחבית שבין האתר הפעיל באנזים לבין מולקולת הסובסטרט להתאמה שבין מפתח למנעול. דימוי זה יכול לעזור בהבנת הייחודיות של אנזימים: כפי שרק מפתח מתאים יכול לפתוח מנעול מסוים, כך רק אנזים מסוים יכול לפעול על הסובסטרט "שלו". אולם חשוב להבין שלדימוי זה - כמו לכל דימוי - יש מגבלה:
הקשר בין האתר הפעיל למולקולת הסובסטרט אינו נוקשה (בניגוד לקשר שבין מפתח למנעול); הקשר מאפשר חופש תנועה מסוים של מולקולת הסובסטרט, כמו גם שינוי במבנה המרחבי של האתר הפעיל; ניתן לדמות זאת לשינוי החל בכפפה עם הכנסת יד לתוכה.

עיכוב אנזימים

יש מולקולות היכולות להתקשר לאתר הפעיל של אנזימים – אף-על-פי שאינן הסובסטרט המתאים; המולקולות הנקשרות הן בדרך-כלל בעלות מבנה מרחבי דומה לזה של הסובסטרט. מולקולה כזו הנקשרת לאתר הפעיל שבאנזים, "תופסת" אותו ומונעת בכך את התקשרות האתר הפעיל אל הסובסטרט, כלומר מולקולה זו **מעכבת** את הפעילות התקינה של האנזים.



הדבר דומה למתקן בטיחות שמכניסים לשקעים חשמליים שלא בזמן השימוש: נוכחות המתקן אינה מאפשרת את הכנסת התקע לשקע. באופן דומה המעכב מונע את ההתקשרות של סובסטרט לאנזים, בשל היות האתר הפעיל "תפוס" על-ידי המעכב.

בדרך זו פועלות תרופות רבות וגם רעלים רבים. לדוגמה: לתרופה Sulfanilamide יש מבנה דומה לזה של חומר המהווה מרכיב חיוני בחילוף החומרים של חיידקים. התרופה מעכבת פעילות תקינה של אנזים, ובכך מונעת את גדילתם של החיידקים גורמי המחלה. (שימו לב שמ"נקודת מבטו" של החיידק סולפנילאמיד הוא רעל, בעוד שלחולה זוהי תרופה!)

כדאי לציין שכיום הצטמצם מאוד השימוש בסולפנילאמיד בשל תופעות הלוואי של פעולתו.
פעילות אנזימים יכולה להיות מעוכבת גם על-ידי מולקולות הנקשרות לאנזים שלא באתר הפעיל; ההתקשרות משנה את המבנה המרחבי של האנזים ופעילותו נפגעת.

ג.2. קצב התגובה האנזימטית

כיצד אפשר למדוד קצב של תגובה אנזימטית?

כאמור, אפשר להציג תגובה אנזימטית כתגובה שבה סובסטרט הופך לתוצר

סובסטרט $\xrightarrow{\text{אנזים}}$ תוצר

לפיכך ניתן לעקוב אחר התגובה על-פי היעלמות הסובסטרט או על-פי הופעת התוצר.

קצב התגובה ייקבע אם כך על-פי השינוי בריכוז של אחד ממרכיבים אלה (או שניהם) ביחידת זמן. כדוגמה, בתגובה שבה האנזים קָטָלָאזָ[3] מפרק מי-חמצן (H_2O_2) למים (H_2O) ולחמצן (O_2):

$$H_2O_2 \xrightarrow{\text{קטלאז}} H_2O + 1/2\ O_2$$

כיוון התרשים הוא משמאל לימין, כנהוג בהצגת נוסחאות כימיות.

אפשר למדוד את קצב התגובה על-פי הירידה בריכוז מי-החמצן ביחידת זמן (שנייה, דקה וכדו') או על-פי העלייה בריכוז גז החמצן ביחידת זמן.

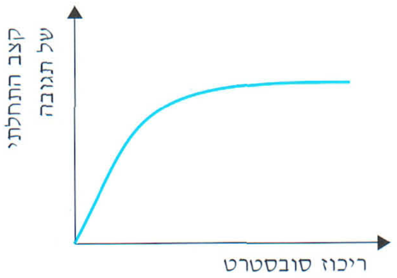
אילו גורמים משפיעים על קצב התגובה האנזימטית?

בהיותה תגובה כימית, קצב התגובה האנזימטית תלוי באותם גורמים שבהם תלוי קצב התגובה הכימית (ראו נספח 1: רקע כימי - קצב התגובה הכימית).

ריכוז הסובסטרט

היות שריכוז הסובסטרט משתנה במהלך התגובה - שכן הסובסטרט הופך לתוצר, נהוג למדוד את השפעת ריכוז הסובסטרט על **הקצב ההתחלתי** של התגובה.

עם העלייה בריכוז הסובסטרט עולה הקצב ההתחלתי של התגובה האנזימטית - (איור ג8) אך שימו לב: זאת רק בטווח מסוים!



איור ג8: קצב התחלתי של תגובה אנזימטית כתלות בריכוז הסובסטרט

[3] השמות של אנזימים רבים מסתיימים בסיומת-אז (-ase)

התבוננו באיור ג8:
כיצד אפשר להסביר שמריכוז סובסטרט מסוים ומעלה, אין עלייה בקצב ההתחלתי של התגובה, על-אף העלייה בריכוז הסובסטרט?

כל עוד עלייה בריכוז הסובסטרט גורמת לעלייה בקצב ההתחלתי של התגובה, משמע שמצויות מולקולות אנזים "חופשיות", היכולות להתקשר עם מולקולות סובסטרט. בריכוזי סובסטרט גבוהים, כל מולקולות האנזים "תפוסות" על-ידי מולקולות הסובסטרט, ולפיכך העלאת ריכוז הסובסטרט אינה גורמת לעלייה בקצב ההתחלתי של התגובה.
במילים אחרות, בחלק העולה של העקום (איור ג8) הסובסטרט מהווה גורם מגביל[4]; התיישרות העקום מלמדת על קיומו של גורם מגביל אחר – מולקולות האנזים.

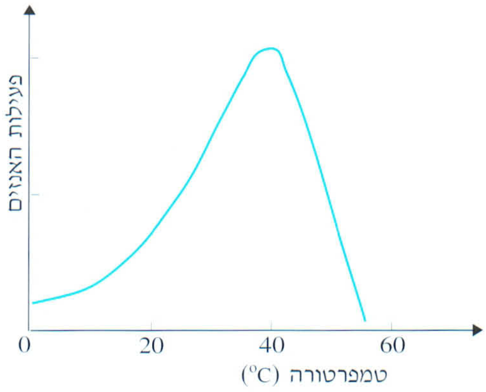
ריכוז האנזים

גם ריכוז האנזים משפיע על קצב התגובה האנזימטית.
כאשר ריכוז הסובסטרט איננו גורם מגביל, המהירות ההתחלתית של התגובה תלויה בריכוז האנזים: ככל שיהיו יותר מולקולות אנזים, הן יפעלו על יותר מולקולות סובסטרט ליצירת תוצר.

בנוסף לריכוז הסובסטרט ולריכוז האנזים, כל גורם המשפיע על מולקולות האנזים ישפיע על מהירות התגובה האנזימטית. הגורמים העיקריים הם הטמפרטורה ורמת החומציות.

טמפרטורה

עלייה בטמפרטורה מזרזת תגובות כימיות (ראו נספח 1: רקע כימי - קצב התגובה הכימית); השפעה זו חלה גם על תגובות אנזימטיות בתאים, אך רק ***בתחום טמפרטורות מסוים***. העקום שבאיור ג9 מתאר את פעילותו של אנזים מסוים כתלות בטמפרטורה:



איור ג9: פעילות אנזים כתלות בטמפרטורה
ניתן לראות שהאנזים שפעילותו מתוארת בעקום פעיל בעיקר בטווח הטמפרטורות שבין 37°C ל-42°C. עד לטווח זה פעילות האנזים עולה בהדרגה; מעבר לטמפרטורות אלה חלה ירידה תלולה בפעילות.

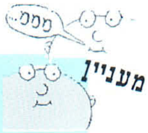
[4] אם המונח אינו מוכר לכם, עיינו בסוף הפרק: גורם מגביל ופלאפל

כפי שניתן לראות בעקום, פעילותו של האנזים עולה עם עליית הטמפרטורה - אולם רק בטווח מסוים. טווח זה הוא ***טווח הטמפרטורה המיטבי*** (=אופטימלי) לפעילות אנזים זה. שלא כמו ברוב התגובות הכימיות, מעבר לטמפרטורה מסוימת הקצב של הפעילות האנזימטית ***יורד*** באופן תלול, עד שהיא נפסקת לגמרי.

איך ניתן להסביר ירידה זו?

כאמור, פעילות אנזימטית מותנית במבנה מרחבי ייחודי של האנזים. כאשר הטמפרטורה עולה מעל סף מסוים, המבנה המרחבי ה"טבעי" של האנזים נהרס (האנזים עובר דנטורציה). אנזים שעבר דנטורציה בדרך-כלל מאבד את כושר הפעילות שלו, מאחר שנפגעת ההתאמה בין האתר הפעיל לסובסטרט.

כלומר: הפגיעה בפעילות אנזים עקב טמפרטורה גבוהה מדי נובעת משינוי במבנה המרחבי שלו.



מעניין

האנזימים בתאי יונקים פעילים בטמפרטורות שבסביבות 37°C (אם כי לא תמיד זוהי הטמפרטורה המיטבית לפעולתם). בטבע מוכרים אנזימים הפעילים בטמפרטורות נמוכות או גבוהות יותר.

דוגמה קיצונית לכך היא האנזימים הפעילים בתאיהם של חיידקים המתקיימים במעיינות חמים תת-קרקעיים, מעיינות שבהם טמפרטורת המים עשויה להגיע אל מעל 90°C! פעילות האנזימים הפעילים בתאי חיידקים אלה היא בטמפרטורות גבוהות מאלה שבהן מתקיימות מרבית התגובות הביולוגיות המוכרות לנו.

חוקרים למדו לנצל תופעה זו, וכיום אנזים שמקורו בחיידקים החיים במעיינות חמים "מככב" באחת משיטות העבודה שבהן נדרשת טמפרטורה גבוהה, בתחום הנקרא **הנדסה גנטית**.

גם זה מעניין

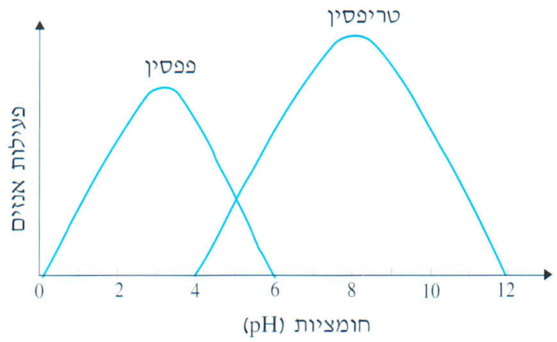
טעמו המתוק של תירס שזה עתה נקטף, מקורו ברמת הסוכר הגבוהה שבגרגרים. תירס שמאחסנים אותו - אפילו לזמן קצר - מתוק הרבה פחות, היות שהסוכר שבו הופך לעמילן (בתוך יום אחד ממועד הקטיף כמחצית מכמות הסוכר הופכת לעמילן). על-מנת לשמר את טעמו המתוק של התירס, נוהגים לטבול את הקלחים במים רותחים לדקות מספר, ואחר-כך להקפיאם. תירס שמטופל בדרך זו שומר על מתיקותו.

התוכלו להסביר תופעה זו?

רמת חומציות

כל אנזים פעיל בטווח מסוים של pH (ראו נספח 1: רקע כימי - רמת חומציות, רמת pH), ולכל אנזים יש pH מיטבי לפעולתו. כאשר רמת החומציות בסביבת האנזים חורגת מהטווח המתאים לפעילותו, הוא עשוי לעבור דנטורציה, ופעילותו תרד באופן ניכר. כלומר: ההשפעה של pH על פעילות אנזימים, בדומה להשפעת טמפרטורה גבוהה, נובעת מפגיעה במבנה המרחבי של המולקולה.

עיינו באיור ג10, המתאר את פעילותם של האנזימים פֶּפְּסִין וטְרִיפְּסִין כתלות ברמת החומציות. פעולתם שני אנזימים אלה דומה - שניהם מפרקים חלבונים במערכת העיכול; עם זאת – כפי שאפשר לראות באיור - טווחי ה-pH של פעילותם כמעט שאינם חופפים!

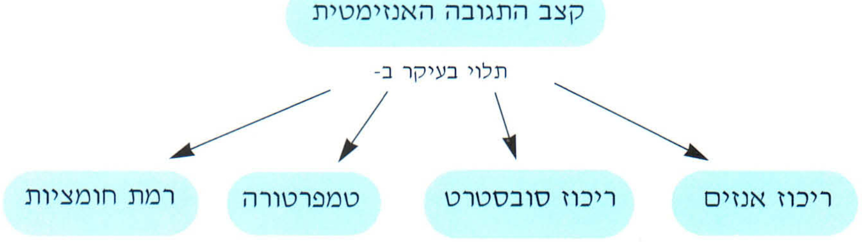


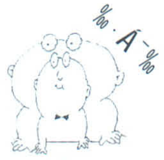
איור ג10: פעילות שני אנזימים בערכי pH שונים
האנזים פפסין פעיל בסביבה חומצית. פעילותו מיטבית סביב pH 3;
האנזים טריפסין פעיל בסביבה בסיסית. פעילותו מיטבית סביב pH 8.

הממצא באשר לטווח פעילותם של אנזימים אלה נמצא בהתאמה עם אתרי הפעילות שלהם: פפסין הוא אנזים הפועל בקיבה, שבה הסביבה חומצית מאוד (pH 2-3), ואילו טריפסין פועל במעי הדק, שם ה-pH ניטרלי ואף בסיסי במקצת.

אנזימים, השונים בטווח ה-pH שבו הם פעילים, נמצאים ופעילים גם באותו תא עצמו: הודות למידור הקיים בתאים איקריוטים, נשמרות רמות חומציות שונות באברוני התא השונים, עובדה המאפשרת פעילות אנזימטית ייחודית לאברון. דוגמה בולטת לכך מהווה הפעילות האנזימטית בליזוזומים, שאותם נכיר בהמשך.

וכסיכום:

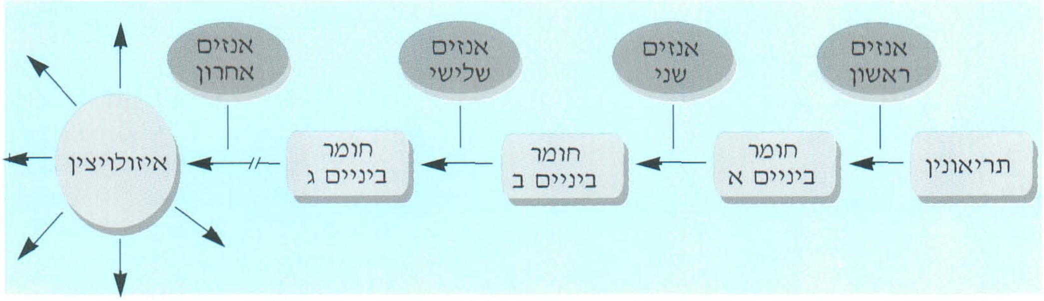




בקרה על הפעילות האנזימטית בתא

תגובות אנזימטיות שונות המתקיימות בתאים, מתרחשות בתיאום מופלא ביניהן. חִשבו על-כך: בכל תא עשויים לפעול בו-זמנית אלפי אנזימים שונים!

תהליכים רבים בתא מתבצעים בשרשרת של תגובות אנזימטיות. כמה שרשרות שונות יכולות להיות משולבות זו בזו, כך שתוצר מסוים יכול להתקבל בכמה מסלולים שונים, וכן תוצר של תגובה אחת יכול להיות סובסטרט של תגובה אחרת.
כדוגמה לשרשרת תגובות תשמש יצירת החומצה האמינית אִיזוֹלוּיצִין. חומצה זו היא אחת מאבני הבניין של חלבונים בתא, והיא מיוצרת בתא בכמה שלבים מהחומצה האמינית תְרֵיאוֹנִין (איור ג11):



איור ג11: שלבים בייצור החומצה האמינית איזולויצין
האיזולויצין מיוצר מתריאונין בכמה שלבים. כל שלב מתבצע על-ידי אנזים ייחודי. תוצר התגובה האנזימטית של שלב אחד ("חומר ביניים") משמש סובסטרט לתגובה האנזימטית הבאה בשרשרת. האיזולויצין שנוצר משתתף בתהליכים שונים בתא.

שרשרת תגובות כזו, כמו כל הפעילות האנזימטית בתא, מחייבת שכל אחד מהאנזימים יפעל בזמן הנכון ובמקום הנכון.

איך "יודע" כל אנזים בתא היכן ומתי להתחיל בפעילות, ומתי והיכן לסיימה? מדוע, לדוגמה, אנזימי עיכול אינם נוצרים בתאי כפות הידיים? ומדוע האנזימים המזרזים את קרישת הדם בגופנו פעילים בזמן פציעה, אך אינם גורמים לקרישת הדם הזורם בעורקינו?

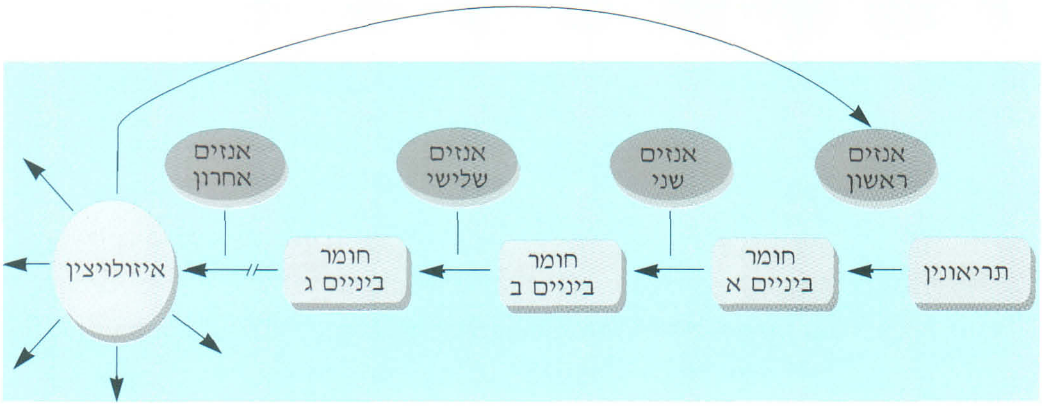
הבקרה על פעילות האנזימים בתא נעשית בכמה רמות ובכמה דרכים. ביניהן: בקרה ברמת **ייצור** האנזימים ובקרה ברמת **פעילות** האנזימים.

- בקרה ברמת **ייצור** האנזימים

הבקרה ברמה זו יכולה להיות על ***מקום*** הייצור של האנזים, על ***מועד*** ייצורו ועל ***כמותו*** (מעט על בקרה זו נלמד בפרק ד, הדן בייצור חלבונים).

- בקרה ברמת **פעילות** האנזימים

מוכרות דרכים מספר לבקרה ברמה זו. אחת מהנפוצות שבהן היא באמצעות **התוצר הסופי**. נחזור לדוגמה של ייצור החומצה האמינית איזולויצין: כאשר נוצרת כמות גדולה של איזולויצין בתא, מולקולות איזולויצין נקשרות למולקולות של האנזים הראשון במסלול, ובכך מעכבות את פעילותן (ראו איור ג12). עם ירידת ריכוז האיזולויצין בתא, ניתקות מולקולות האיזולויצין ממולקולות האנזים, פעילות האנזים מתחדשת, ושוב נוצרות מולקולות איזולויצין.



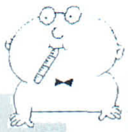
איור ג12: הבקרה על ייצור החומצה האמינית איזולויצין
כאשר רמת האיזולויצין בתא עולה מעל סף מסוים, נקשרות מולקולות איזולויצין למולקולות האנזים הראשון במסלול, ומעכבות את פעילותו.

בקרה על-ידי תוצר המסלול נקראת **משוב** (Feedback).
ב**משוב שלילי** תוצר המסלול ***מעכב*** את התהליך, כפי שהכרנו בבקרה על מסלול ייצור האיזולויצין.
ב**משוב חיובי** תוצר המסלול ***מזרז*** את התהליך.

בין הדרכים הנוספות לבקרה על פעילות האנזימים:

אנזימים שהופכים להיות פעילים רק כאשר נקשרת אליהם קבוצה כימית מסוימת, ולעומתם אנזימים שפעילותם מבוקרת בצורה ההפוכה: כל עוד קשורה אליהם קבוצה כימית, הם ***אינם*** פעילים, ושחרור קבוצה זו מפעיל אותם.

מעניין: אחת מדרכי הבקרה היא עיכוב, בדומה לפעולת המעכב שהכרנו בעמוד 47.



העיקר הבריאות

מחלות רבות באדם, וביצורים אחרים, קשורות בחסר של פעילות אנזימים. להלן שתי דוגמאות:

- יש אנשים המגיבים בכאבי בטן לשתיית חלב ולאכילת מוצריו - משום שאינם מסוגלים לעכל סוכר המצוי בחלב (לַקטוז). התברר שבגופם של אנשים אלה חסר האנזים לַקְטָאז, המפרק את הלקטוז.
  הקלה לאותם אנשים נמצאה בגלולה של לקטאז, שאותה יש לבלוע לפני צריכת מוצרי החלב.

- אכילת פול עלולה לגרום לאנשים מסוימים הרס של תאי דם אדומים. אנשים אלה רגישים גם לקבוצת תרופות מסוימת. הסיבה לתגובות אלה היא חוסר באנזים הנקרא גלוקוז-6-פוספט-דהידרוגנאז.
  מעניין לציין שחוסר זה הוא תורשתי, ונפוץ בין גברים יותר מאשר בין נשים.

אנזימים בשימוש האדם

בתנאים מסוימים (בעיקר בטמפרטורה וב-pH מתאימים), אנזים יכול לפעול על הסובסטרט הייחודי לו גם מחוץ לתא. לאור מגוון התהליכים שאנזימים מזרזים, אין פלא שמולקולות אלו מנוצלות כיום במערכות רבות במחקר ובתעשייה.

אחת הדוגמאות לכך אפשר לפגוש בכל מרכול:

אבקות כביסה רבות מכילות אנזימים המפרקים לכלוך, בעיקר כזה שמקורו בחלבונים ובשומנים. לשמות של חלק מהן מצורפת התוספת "ביו", כדי להדגיש את המקור הביולוגי של החומר הפעיל באבקה.

בהוראות השימוש של חלק מאבקות אלה מצוין שאין להרתיח את הכביסה. התוכלו להסביר מדוע?

ג13. סיכום

- **חלבונים** הם מולקולות המורכבות מ**חומצות אמיניות** הקשורות ביניהן ב**קשר פפטידי**.
- לכל חלבון יש סידור מרחבי אופייני, המוכתב על-ידי רצף החומצות האמיניות המרכיבות אותו, ומושפע מתנאי הסביבה שבו הוא נמצא, בעיקר טמפרטורה ו-pH.
- הפעילות הביולוגית של חלבונים תלויה בסידור המרחבי שלהם.
- הרס המבנה המרחבי נקרא **דנטורציה**.
- תהליכים ביולוגיים פועלים על-פי חוקי הפיזיקה והכימיה.
- **אנזים** הוא זרז ביולוגי, הוא מזרז הפיכת **סובסטרט** ל**תוצר**.
- אנזים, ככל זרז, מאיץ את ההגעה לשיווי-משקל כימי. פעילות הזירוז של אנזימים מוסברת בהפחתת אנרגיית השפעול.
- האנזים עצמו אינו עובר שינוי כימי קבוע, וכמותו אינה משתנה במהלך התגובה.
- מרבית האנזימים הם חלבונים; לפעילות של חלק מהאנזימים נדרש מרכיב לא-חלבוני (בין המרכיבים הלא-חלבוניים נמנים חלק מהוויטמינים). התוספות הלא-חלבוניות נקראות **קו-פקטורים**.
- האנזים יוצר עם הסובסטרט **תצמיד** אנזים-סובסטרט. האזור באנזים המשתתף בתצמיד ופעיל בתגובה האנזימטית נקרא **אתר פעיל**.
- הפעילות האנזימטית היא **ייחודית** (ספציפית): כל אנזים פועל בתגובה ייחודית על סובסטרט ייחודי. הסבר מקובל לייחודיות זו הוא ההתאמה הכימית והמרחבית בין האתר הפעיל שבאנזים למולקולות הסובסטרט.
- מולקולה שאינה סובסטרט, הנקשרת לאתר הפעיל, פועלת כ**מעכב**.
- ניתן לעקוב אחר קצב תגובה אנזימטית על-פי השינויים בריכוז הסובסטרט ו/או התוצר.
- לכל אנזים טווחים אופייניים של **טמפרטורה** ושל **pH** שהם מיטביים לפעילותו.
- האנזים פעיל רק כאשר הוא ב**מבנה מרחבי** מסוים. דנטורציה מפחיתה את פעילות האנזים או מונעת אותה.

- בתא מצויים מנגנונים מגוונים ל**בקרה** על הפעילות האנזימטית. חלקם ברמת ייצור האנזימים, וחלקם ברמת פעילותם.

כדאי לדעת: גורם מגביל ו...פלאפל

להכנת מנת פלאפל נדרשים המרכיבים האלה:

1 פיתה, 5 כדורי פלאפל ו-2 מלפפונים חמוצים (שאר המרכיבים - בהגשה עצמית...).

לרשותכם 1 פיתה, 50 כדורי פלאפל ו-200 מלפפונים חמוצים.

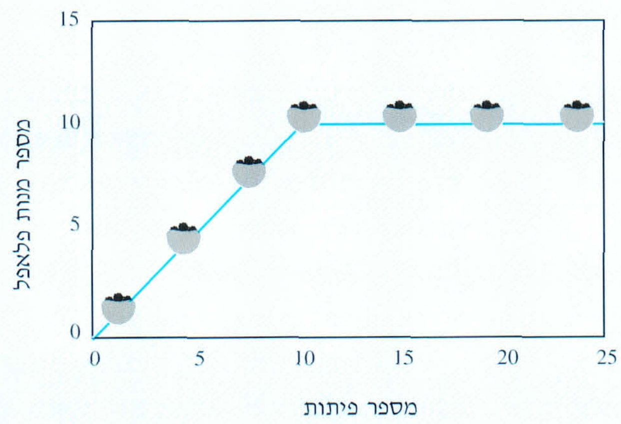
- מהו הגורם המגביל את מספר מנות הפלאפל שתוכלו להכין?

שלחנו אליכם בזו אחר זו עוד 20 פיתות.

- מהו הגורם המגביל עכשיו?

אם נסרטט עקום המתאר את מספר מנות הפלאפל שניתן להכין כתלות במספר הפיתות, הוא ייראה כך:

מספר מנות פלאפל כתלות במספר הפיתות



עד עשר מנות פלאפל, היוו הפיתות **גורם מגביל**: ככל שנוספו פיתות כך עלה מספר מנות הפלאפל שניתן להכין. מעשר פיתות ומעלה העקום מתיישר, שכן הוספת פיתות לא אפשרה תוספת מנות פלאפל, היות ש**מרכיב אחר** היווה גורם מגביל (- כדורי הפלאפל). הוספה של כדורי פלאפל תאפשר להעלות את מספר המנות, עד לשלב שמרכיב אחר יהפוך לגורם מגביל.

בתיאבון!

כאשר שינוי של גורם כלשהו (כמו ריכוז או כמות של מגיב, טמפרטורה, רמת חומציות) מעלה את הריכוז (או הכמות) של התוצר, ניתן להסיק שמגיב זה מהווה גורם מגביל.

שאלות ומשימות לפרק ג

1. להלן מספר מונחים: חלבון, חומצות אמיניות, קשר פפטידי, קבוצה אמינית, קבוצה קרבוקסילית, קבוצה צדדית; הרכיבו משפט(ים) שיקשרו כראוי בין מונחים אלה.

2. מהו הקשר בין המבנה הראשוני לבין המבנה השלישוני של חלבון?

3. איך אפשר להסביר את השינוי שחל בביצה כתוצאה מחימום?

4. להלן מספר מונחים: חלבון, אנזים, אתר פעיל, סובסטרט; איזה מהם יוצא דופן? נמקו. שימו לב: תיתכן יותר מתשובה נכונה אחת.

5. החמצת חלב היא תוצאה של פעילות חיידקים הנמצאים בו. כדי לעכב את קלקול החלב נהוג לשמור את החלב במקרר. מדוע הקירור מעכב את קלקול החלב?

6. יש ירקות ופירות כמו תפוחי-אדמה, חצילים, אגסים ותפוחי-עץ, המשחימים לאחר קילוף או חיתוך. השחמה זו היא תוצאה של פעילות אנזימטית. אפשר למנוע את ההשחמה על-ידי טפטוף מיץ לימון. איך אפשר להסביר את מניעת ההשחמה על-ידי מיץ הלימון?

7. כיצד אפשר לגרום לעלייה בקצב פעילותו של אנזים הנמצא בתנאי pH וטמפרטורה מיטביים?

8. שלושת העקומים, A, B ו-C, מתייחסים לפעולת אנזים-מפרק-חלבון על חלבון (מסוים) במבחנה.

C B A

עקום אחד מתאר את השינוי בריכוז האנזים, השני מתאר את השינוי בריכוז החלבון, והשלישי מתאר את השינוי בריכוז החומצות האמיניות. זהו איזה מהם מתאר כל אחד מהשינויים.

9. להלן מספר משפטים. ציינו איזה מהם נכונים ואיזה שגויים, ואת המשפטים השגויים תקנו. שימו לב: יתכן שחלק מהמשפט נכון, וחלק - שגוי.

א. שינוי במבנה המרחבי (השלישוני) של אנזים עלול לגרום להפסקת פעילותו.

ב. אנזימים מספקים את אנרגיית השפעול הדרושה לקיום התגובה.

ג. כתוצאה מהתאמה מרחבית בין האתר הפעיל באנזים לבין הסובסטרט מתקבל תצמיד אנזים סובסטרט.

ד. כל שינוי ברצף החומצות האמיניות באנזים יגרום להפסקת פעילותו.

ה. אנזימים מתפרקים במהלך התגובה אותה הם מזרזים.

ו. אף-על-פי שאנזימים מזרזים גם הפיכת מגיב לתוצר וגם הפיכת תוצר למגיב, תוצאת פעולתם בתא היא הפיכת מגיבים לתוצרים.

ז. אנזימים פעילים רק בתאים חיים.

ח. בתוך אברונים מוקפי קרום סביר שימצאו אנזימים שפעילותם המיטבית ברמת חומציות שונה מזו שבציטופלסמה.

פרק ד

גרעין התא ויצירת חלבונים

כפי שראינו בפרק ג, החלבונים הם קבוצת חומרים בעלת חשיבות מרכזית במבנה התא ובתפקודו: כל המולקולות הנבנות בתא, גם אלה שאינן חלבונים, קשורות בפעילות חלבונים, שכן שלבי ייצורן בתא מזורזים על-ידי אנזימים שהם חלבונים.
הכרת הדרך שבה נקבע ההרכב של החלבונים בתא והידע כיצד הם נבנים הם בסיס חשוב להבנת תפקוד התא. בפרק זה נכיר את גרעין התא - שבו נמצא המידע על מבנה החלבונים- ונלמד כיצד מיושם מידע זה להרכבת החלבונים ולפעילותם.

ד1. לגרעין מקום מרכזי בחיי התא

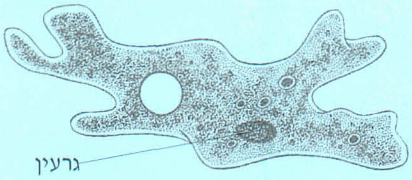
איור ד1: תאים מרירית הלחי של אדם
צילום ממיקרוסקופ אור, הגדלה בערך פי 260
שימו לב שהגרעין הוא המבנה הבולט בתא.

גרעין התא הוא (על-פי-רוב) המבנה הגדול והבולט ביותר בתא (קוטרו בתאים שונים הוא, בדרך-כלל בין שלושה לעשרה מיקרומטר). הגרעין תחום במעטפת בת שני קרומים, שיש בה פתחים המאפשרים מעבר מבוקר של חומרים אל הגרעין וממנו.
הגרעין עורר את סקרנותם של חוקרים רבים, וניסויים רבים נערכו על-מנת להבין את המתרחש בו.

אחד הניסויים שתרמו להכרה בחשיבותו של הגרעין לתפקוד התא נערך בתאי אמבה שגודלו במעבדה.

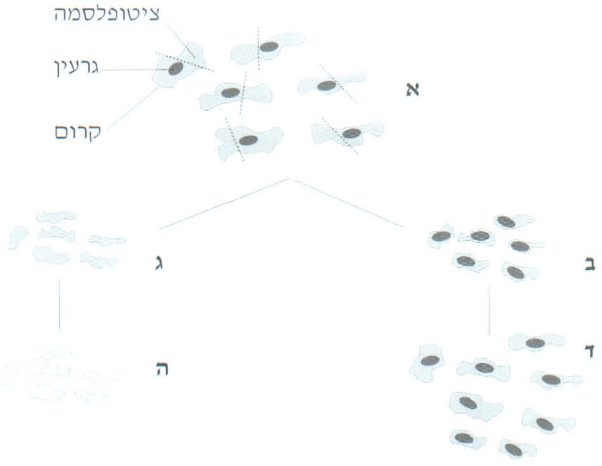
אמבה

אמבה היא יצור חד-תאי, שצורת גופו אינה קבועה. היום ידועים מאות מינים של אמבות, ביניהם כאלה החיים במים מתוקים, במים מלוחים, באדמה, ואף כטפילים בגופם של יצורים אחרים. האמבות הטפיליות במערכת העיכול של האדם (שגודלן יכול להגיע עד 0.6 מ"מ) עלולות לגרום למחלת מעיים.



איור ד2: אמבה. הגדלה בערך פי 65

בניסוי נחתכו תאי אמבה לשני חלקים: בחלק אחד הייתה ציטופלסמה עם גרעין, ובחלק האחר – ציטופלסמה ללא גרעין. כאשר ניסו לגדל את חלקי התאים, התברר לחוקרים שרק החלקים שהכילו את הגרעין המשיכו לחיות, לגדול ולהתרבות, ואילו החלקים ללא הגרעין התנוונו כעבור זמן-מה.



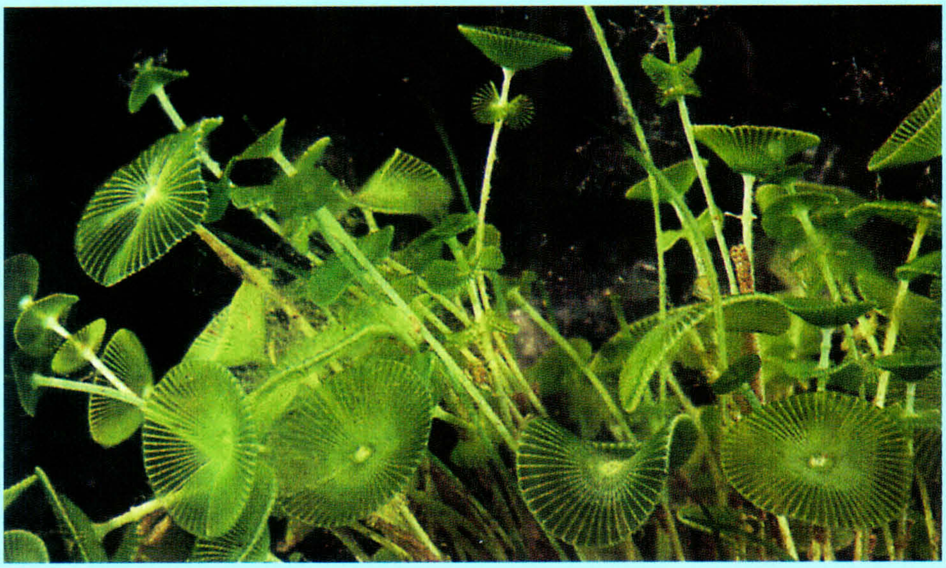
איור ד3: ניסוי בתאי אמבה חתוכים
כל אחת מהאמבות נחתכה לשניים (א), והחלקים הופרדו לחלקים עם גרעין (ב) ולחלקים ללא גרעין (ג). החלקים שבהם היה גרעין גדלו והתרבו (ד), והחלקים ללא הגרעין התנוונו (ה).

ניסוי זה באמבה, וניסויים רבים נוספים, הובילו אל המסקנה שהגרעין חיוני לקיומו, לתפקודו ולהתרבותו של התא.

עוד על תפקודו של הגרעין ניתן ללמוד מסדרת הניסויים שערך החוקר הֶמֶרְלִינְג (Joachim Hammerling) ב-1934 באצה סוככנית (נקראת גם אֲצֶטַבּוּלַרְיָה).

סוככנית

סוככנית היא אצה ירוקה החיה בים. חוץ מצורתה הנאה, ייחודה הוא בכך שכל גופה הוא תא אחד בלבד! זהו תא גדול, שאפשר להבחין בו בשלושה חלקים, המכונים "שמשייה", "גבעול" ו"שורשון" (מובן שחלקים אלה נבדלים מהשורשון והגבעול של הצמחים הרב-תאיים). אורך תא האצה הוא כ-5 ס"מ, וקוטר השמשייה הוא כ-1.5 ס"מ. גרעין התא (שגם הוא גדול לעומת גרעיני תאים אחרים) ממוקם בבסיס ה"גבעול", סמוך ל"שורשון".



איור ד4: "שמשיות" ו"גבעולים" של סוככניות
הגדלה בערך פי 2

להבנת הניסויים שנערכו באצה זו, חשוב לדעת שהסוככנית יכולה להצמיח מחדש חלקים שנחתכו מגופה; לדוגמה, לאחר חיתוך השמשייה, היא חוזרת וצומחת מחדש. גם אם חותכים בתחתית גבעול האצה, מעל לבסיס - יצמח מחדש גבעול עם שמשייה.
גודלו של תא הסוככנית ומיקום הגרעין מאפשרים להוציא גרעין מפרט אחד ולהשתילו בפרט אחר.

באחת מסדרות הניסויים הוחלפו גרעינים בין שני מיני סוככנית, השונים מאוד בצורתם:
מין א – שבו שמשייה שכולה יחידה אחת,
ומין ב – שבו השמשייה בעלת אונות.

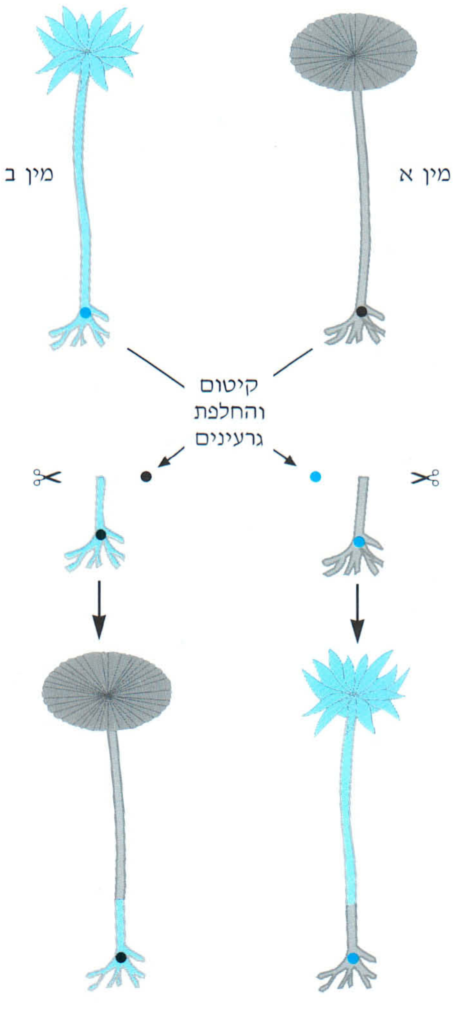
מהלך הניסוי: השמשייה של אצה ממין א הוסרה, והגרעין הוצא מהתא. באותו אופן הוסרה השמשייה מאצה ממין ב, וגרעינה הוצא אף הוא.
לאחר שטיפה של הגרעינים לסילוק שאריות של ציטופלסמה, הושתל הגרעין שהוצא מאצה ממין א בבסיס הגבעול של אצה ממין ב, והגרעין שהוצא ממין ב הושתל בבסיס הגבעול של אצה ממין א.

איור ד57: החלפת גרעינים בסוככניות

למעלה - שני מיני סוככנית:
במין א (ימין) השמשייה כולה יחידה אחת;
במין ב (שמאל) השמשייה בעלת אונות.

אמצע - בבסיס הגבעול של אצה ממין א, שנחתכה ממנה השמשייה, הושתל גרעין שמקורו ממין ב;
בבסיס הגבעול של אצה ממין ב, שנחתכה ממנה השמשייה, הושתל גרעין שמקורו ממין א.

למטה - השמשייה שצמחה באצה שבה הושתל גרעין שמקורו מאצה ממין א - אופיינית למין א;
השמשייה שצמחה באצה שבה הושתל גרעין שמקורו מאצה ממין ב - אופיינית למין ב.



והתוצאות?
מהאצה שבסיסה היה ממין א, והושתל בה **גרעין** שהוצא ממין **ב**, התפתחה (לאחר מספר שלבי ביניים) שמשייה אופיינית למין **ב**; מהאצה שבסיסה היה ממין ב והושתל בה **גרעין** שהוצא ממין **א**, התפתחה (שוב לאחר מספר שלבי ביניים) שמשייה אופיינית למין **א**. כלומר, צורת השמשייה שהתפתחה הייתה תמיד בהתאם למקור הגרעין!

מה אפשר ללמוד מעובדות אלה על תפקוד הגרעין בקביעת צורת התא?

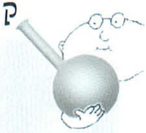
היות שלאחר ההשתלה התפתחו שמשיות בהתאם למקור הגרעין, אפשר להניח שמידע כלשהו המצוי בגרעין, הוא ה"אחראי" לצורת השמשייה המתפתחת.
ניתן לסכם, על-סמך ניסויים אלה (באמבה ובסוככנית) וניסויים נוספים, שבגרעין יש מידע החיוני לתפקודו, להתרבותו ולקביעת צורתו של התא.

מחיי היום-יום מוכר לנו מֵידע הכתוב בספר – ומבוטא במילים, או מידע הצרוב בקלטת או בתקליטור – ומבוטא בקולות ותמונות; אולם איך אצור המידע בגרעין התא, וכיצד מבוטא מידע זה?

מדענים התלבטו רבות בשאלות אלה. בשלבים שונים של המחקר המדעי היו מועמדים שונים ל"תפקיד" של אוצַר המידע בתא והנכבדים שבין המועמדים היו החלבונים, בשל רבגוניותם. אולם עם התקדמות המחקר הביולוגי מסוף המאה ה-19 ועד מחצית המאה ה-20, התברר שהמידע בתאים אצור במולקולות של חומר הנקרא DNA (מבטאים: דִי-אֶן-אֵי), ובא לידי ביטוי בחלבונים.

ד.2 DNA

להבנת תפקוד ה-DNA, נכיר את מבנהו הכימי.



קצת כימיה

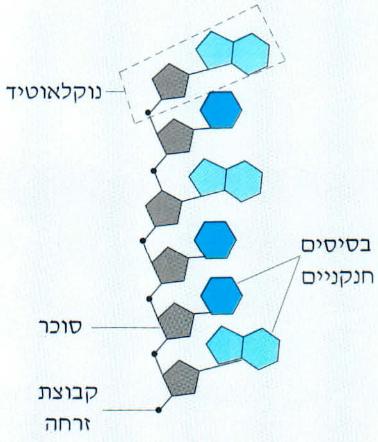
חומצות גרעין

בבדיקות כימיות נמצא שמרכיב מרכזי בגרעין התא הוא DNA. בגרעין (ולא רק בו, כפי שיתברר בהמשך) נמצא גם חומר הדומה ל-DNA, ונקרא RNA (מבטאים: אַר-אֶן-אֵי). בשל תכונותיהן הכימיות ובשל מיקומן, שני טיפוסי תרכובות אורגניות אלה נקראים **חומצות גרעין**.

חומצות הגרעין הן מולקולות ארוכות המורכבות משרשרת של יחידות מבנה הנקראות **נוּקְלֵאוֹטִידִים** (וביחיד נוקלאוטיד; נגזר מהמילה nucleus = גרעין).

בכל נוקלאוטיד משתתפים שלושה מרכיבים:

1. ***קבוצת זרחה*** (קבוצה כימית שבה נמצא אטום זרחן);



איור ד6: חומצת גרעין היא שרשרת של נוקלאוטידים

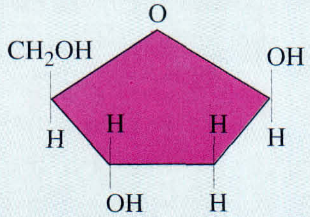
2. **סוכר**;
3. **בסיס חנקני** (מולקולה הבנויה טבעת אחת או שתי טבעות, ובה אטומי חנקן, נוסף לאיזומי פחמן, מימן וחמצן).

בשלב זה נעסוק רק בחומצת הגרעין **DNA** (ראשי תיבות: **D**eoxy-ribo **N**ucleic **A**cid).

שרשרת ה-DNA מורכבת, כאמור, מנוקלאוטידים. בהרכבת ה-DNA משתתפים ארבעה נוקלאוטידים, ובכולם יש שני מרכיבים זהים - קבוצת הזרחה והסוכר;

הסוכר שבנוקלאוטידים המרכיבים מולקולות של DNA הוא דאוקסיריבוז (איור ד7).

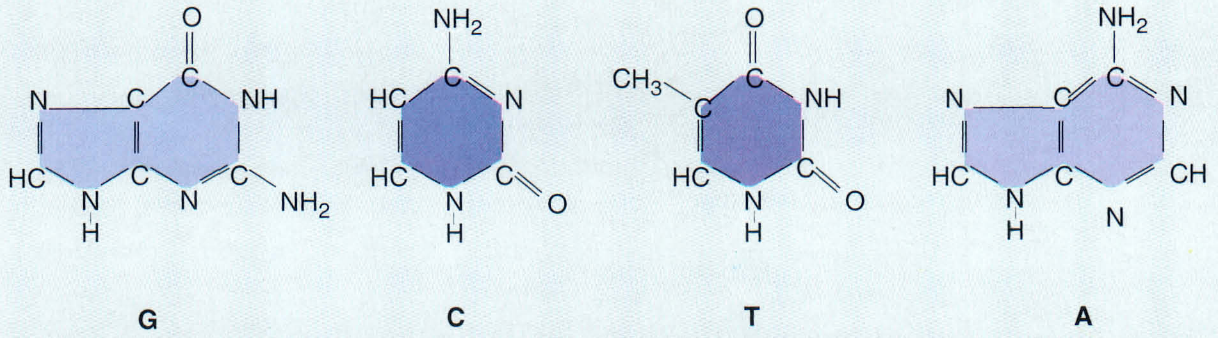
בסוכר המרכיב את ה-DNA יש חמישה אטומי פחמן במבנה טבעתי. זהו סוג של ריבוז, אך יש בו אטום חמצן אחד פחות משיש במולקולות ריבוז אחרות (השוו עם איור ד11 שבהמשך). מכאן שמו: דאוקסיריבוז (deoxy: ללא = de; חמצן = oxygen), וזה גם המקור לאות D שבשם DNA.



איור ד7: נוסחת המבנה של דאוקסיריבוז
הסוכר שבנוקלאוטידים ב-DNA

המרכיב השלישי הוא ***הבסיס החנקני***, והוא המבדיל בין נוקלאוטיד אחד למשנהו. הבסיס החנקני בכל אחד מהנוקלאוטידים שב-DNA הוא אחד מארבעת הבסיסים האלה (איור ד8):

A (אָדֶנִין - **A**denine), **T** (תִּימִין - **T**hymine), **C** (צִיטוֹזִין - **C**ytosine), או **G** (גוּאָנִין - **G**uanine).



איור ד8: נוסחאות המבנה של ארבעת הבסיסים החנקניים שבמולקולות DNA
שימו לב: הבסיסים החנקניים C ו-T בנויים כל אחד מטבעת אחת; A ו-G בנויים כל אחד משתי טבעות.

מאחר שהבסיס החנקני הוא המבדיל בין נוקלאוטידים, שם הנוקלאוטיד נגזר משם הבסיס שבו, לדוגמה: הנוקלאוטיד שבו הבסיס אדנין, נקרא נוקלאוטיד האדנין, או בקיצור **A**.

אם כך, ארבעת הנוקלאוטידים זהים בזרחה ובסוכר, ושונים בבסיס החנקני.

בחומצות הגרעין הנוקלאוטידים מחוברים בשרשרת, שבה סוכר של נוקלאוטיד אחד קשור לזרחה של נוקלאוטיד שכן, במבנה של ...זרחה-סוכר-זרחה..., והבסיסים החנקניים בולטים ממנה.

כל מולקולה של DNA מורכבת מ***שתי*** שרשרות כאלה, המחוברות ביניהן דרך הבסיסים החנקניים. כל שרשרת – המהווה חצי מולקולה – נקראת **גדיל**, ושני הגדילים מחוברים ביניהם בצורת סולם (איור ד9):

"עמודי הסולם" הם שרשרת של ...זרחה-סוכר-זרחה..., ו"שלבי הסולם" הם זוגות של בסיסים חנקניים. בכל זוג כזה - בסיס מגדיל אחד עומד מול בסיס מהגדיל הנגדי. הבסיסים קשורים ביניהם בקשרי מימן (שהם קשרים חלשים באופן יחסי, ראו נספח 1: רקע כימי).

נקודה חשובה להבנת תפקוד ה-DNA היא שקיימת חוקיות בדרך שבה הבסיסים החנקניים שבשני הגדילים קשורים זה לזה: תמיד A קשור אל T, ותמיד G קשור אל C.

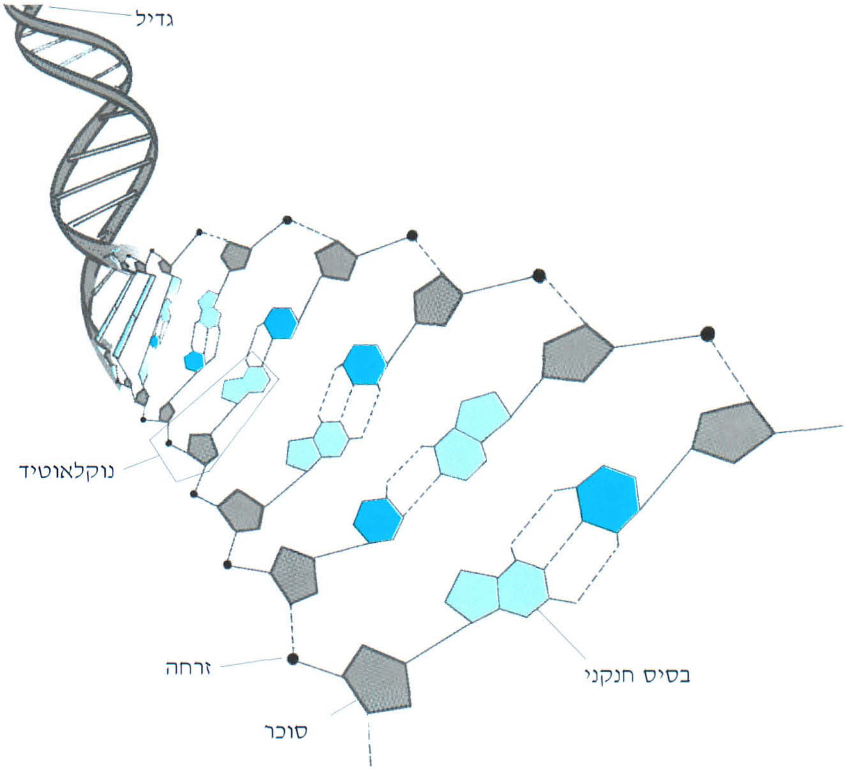
על-פי חוקיות זו ניתן לראות בגדיל אחד מעין "תמונת ראי" של הגדיל המשלים שלו.

אם בגדיל אחד רצף הבסיסים הוא:	A-A-G-C-C-C-T-A-G
אזי בגדיל המשלים שלו הרצף הוא:	T-T-C-G-G-G-A-T-C

A ו-T הם אפוא בסיסים המשלימים זה את זה, וכאלה הם גם G ו-C.

ההבדל בין מולקולות DNA שונות טמון ברצף ה"שלבים" לאורך שני "עמודי הסולם" דהיינו: ברצף הבסיסים החנקניים (שכן "העמודים" עצמם זהים בכל מולקולות ה-DNA).

היבט נוסף של מבנה ה-DNA הוא סידור המולקולה במרחב: שני "עמודי הסולם" מלופפים זה סביב זה בצורה לוליינית, ויוצרים מעין סליל. לפיכך מולקולת ה-DNA מתוארת כ**סליל כפול**.



איור ד9: דגם של מבנה ה-DNA. למולקולת DNA מבנה דמוי סולם. ה"עמודים" הם שרשרת של ...זרחה-סוכר-זרחה..., ואילו השלבים הם הבסיסים החנקניים, ובהם תמיד A מול T ו- G מול C. המולקולה מסודרת במרחב כסליל כפול שבו הגדילים מלופפים זה סביב זה.

אבני הבניין הכימיות של ה-DNA היו ידועות כבר לפני שנת 1900, אולם רק בשנת 1953 הציעו ג'יימס ואטסון ופרנסיס קריק (J.D. Watson, F.H.C. Crick) מודל המתאר את הסידור של אבני בניין אלה בתוך המולקולה, ובנו דגם המתאר את המבנה של מולקולת ה-DNA. הישג זה נחשב לאחד מהחשובים בביולוגיה. על עבודתם זו זכו ב-1962, עם החוקר מוריס ווילקינס (M.H.F. Wilkins), בפרס נובל לרפואה ופזיולוגיה. חוקרת נוספת, רוזלין פרנקלין (R. Franklin), שתרמה רבות לפענוח מבנה ה-DNA, נפטרה לפני מתן הפרס.

ג'יימס ואטסון

פרנסיס קריק

מוריס ווילקינס

רוזלין פרנקלין

איור ד10: מגלי מבנה ה-DNA.

הכרנו את חשיבותו של הגרעין לתפקודו, להתרבותו ולקביעת צורתו של התא, ולמדנו שה-DNA הוא מרכיב חשוב בגרעין. ציינו גם את מקומם המרכזי של החלבונים בתפקוד התא. עתה נותר לנו לקשר בין שני אלה: בין ה-DNA לבין החלבונים.
על-סמך ניסויים רבים התגבשה תמונה, ולפיה:

ב-DNA מוצפן מידע להרכבת החלבונים בתאים.

ייתכן שמוכרים לכם המושגים כרומוזום וגן, כמושגים הקשורים עם הגרעין; לא נעסוק בהם כעת - אך נדון בהם בהמשך.

פינת הפרוקריווט

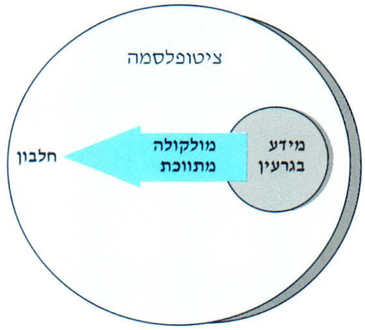
גם בתאי חיידקים מצוי DNA, אולם בעוד שבגרעיני יצורים איקריוטים נמצאות בדרך-כלל כמה מולקולות DNA, בתאים פרוקריוטים נמצאת בדרך-כלל מולקולת DNA עיקרית אחת בתא, וצורתה טבעתית. כמו-כן, שלא כמו בתא איקריוטי, שבו ה-DNA נמצא באברון מוקף קרום (הגרעין), ה-DNA בתא הפרוקריוטי אינו נמצא באברון.

ד3. הרכבת RNA על-פי DNA: תְּעְתּוּק

המידע להרכבת חלבוני התא נמצא בגרעין התא, ואילו החלבונים עצמם נמצאים בכל חלקי התא, והרכבתם נעשית בציטופלסמה.

כיצד מועבר המידע על אודות מבנה החלבונים מה-DNA שבגרעין אל הציטופלסמה?
מעבר זה נעשה בשני שלבים:

1. המידע המוצפן ב-DNA שבגרעין מועתק - עדיין בצופן - למולקולה מתווכת.
   תהליך זה נקרא **תְּעְתּוּק** (באנגלית-Transcription).
   המולקולה המתווכת יוצאת מהגרעין לציטופלסמה.
2. המידע המוצפן במולקולה המתווכת מתורגם לחלבונים.



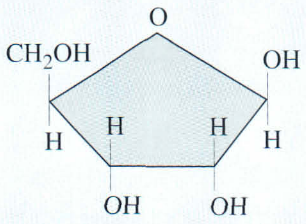
המולקולה המתווכת היא חומצת הגרעין RNA.

קצת כימיה

RNA (ראשי תיבות של: **R**ibo **N**ucleic **A**cid)

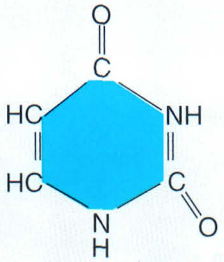
כאמור, מולקולת ה-RNA דומה מאוד למולקולת ה-DNA: שתיהן שרשרות של נוקלאוטידים. ההבדלים ביניהם הם שלושה:

האחד, שאותו כבר הזכרנו, הוא שבנוקלאוטידים המרכיבים את שרשרת ה-RNA הסוכר הוא ריבוז (Ribose). (עיינו באיור ד11, והשוו עם איור ד7).



איור ד11: נוסחת המבנה של ריבוז
הסוכר שבנוקלאוטידים ב-RNA

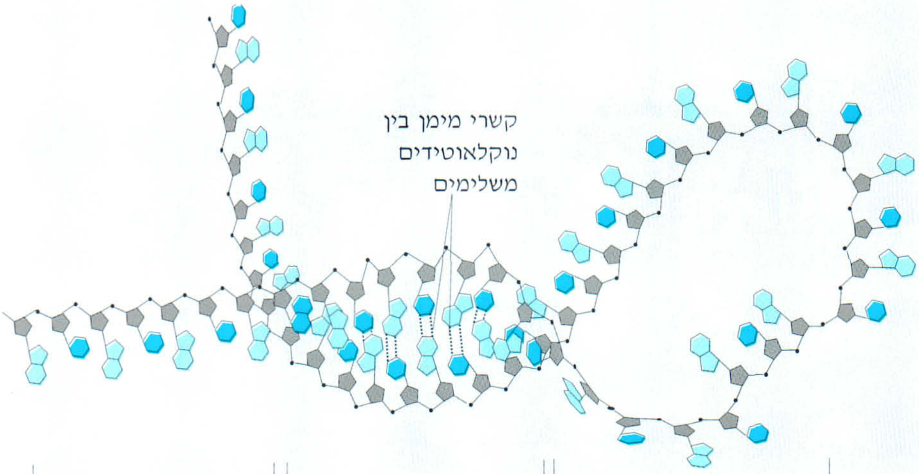
ההבדל ***השני*** קשור לבסיסים החנקניים שבנוקלאוטידים.
מולקולת ה-RNA, כמו מולקולת ה-DNA, מורכבת מרצפים של ארבעה נוקלאוטידים, והמרכיב המבדיל בין נוקלאוטיד אחד למשנהו הוא הבסיס החנקני שבו. שלושה מתוך הבסיסים החנקניים שבנוקלאוטידים של RNA זהים לבסיסים שב-DNA: ציטוזין (C), אדנין (A) וגואנין (G), אך הרביעי – שונה: ב-RNA זהו אורַציל (**Uracil**) במקום תימין (T) ב-DNA.



איור ד12: הבסיס החנקני אורציל
אורציל נמצא בנוקלאוטידים של RNA,
אך איננו ב-DNA.

ההבדל ***השלישי*** בין שני טיפוסי חומצות הגרעין הוא שמולקולת ה-DNA בנויה מזוג גדילים, ואילו מולקולת ה-RNA בנויה מגדיל אחד בלבד.

במולקולות RNA רבות ישנם קטעים דו-גדיליים. מקורם של קטעים אלה הוא בקיפולים של המולקולה החד-גדילית, קיפולים הנוצרים תוך יצירת קשרי מימן (ראו נספח 1: רקע כימי, כוחות בין-מולקולריים) בין בסיסים משלימים (C קשור ל-G, ו-A קשור ל-U) בקטעים המקופלים (ראו איור ד13).



איור ד13: דגם של מולקולת RNA
מולקולת ה-RNA בנויה מגדיל אחד. בקטעים שבהם בסיסים משלימים קשורים זה לזה מתקבל מבנה דו-גדילי.

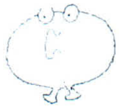
הרכבת מולקולת ה-RNA נעשית בגרעין על-פי אחד משני גדילי ה-DNA. תהליך זה נקרא כאמור תעתוק, והוא המפתח להבנת הקשר שבין מולקולות ה-RNA למולקולות ה-DNA.

כיצד מתרחש התעתוק?

הקשרים שבין שני גדילי ה-DNA מתרופפים בקטע העתיד לעבור תעתוק. מול הנוקלאוטידים של אחד מגדילי ה-DNA שנפרדו נקשרים נוקלאוטידים משלימים - אך הללו הם מטיפוס הנוקלאוטידים שב-RNA.

לדוגמה -

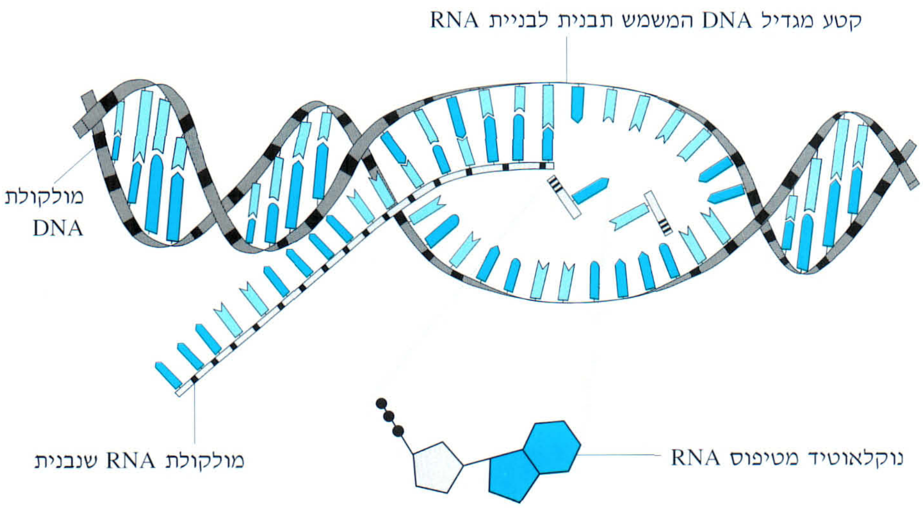
אם בגדיל DNA רצף הבסיסים בקטע מסוים הוא:	A-A-G-C-C-C-T-A-G
אזי רצף הבסיסים ב-RNA המתועתק לפי קטע DNA זה הוא:	U-U-C-G-G-G-A-U-C



פינת הפרוקריוט

גם בתאי פרוקריוטים מתרחש תהליך התעתוק על-פי אותו עיקרון עצמו.

בנוקלאוטידים המשלימים האלה נקשרת זרחה של נוקלאוטיד אחד לסוכר של הנוקלאוטיד השכן, וכך נוצרת שרשרת נוקלאוטידים חדשה הניתקת מגדיל ה-DNA: זוהי מולקולת RNA (איור ד14).



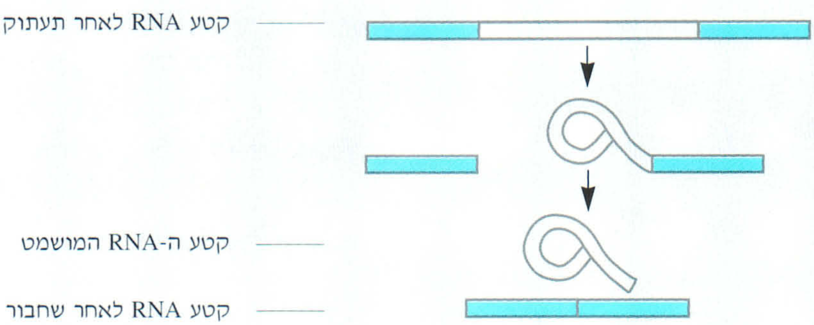
איור ד14: תעתוק – יצירת מולקולת RNA על-פי קטע מגדיל DNA
קטע ממולקולת DNA נפתח, ועל אחד מן הגדילים נבנית מולקולת RNA.

חשוב לזכור:
בתהליך התעתוק, כמו בתהליכים אחרים המתרחשים בתאים, מעורבים חלבוני בקרה ואנזימים: בעזרת חלבוני הבקרה נקבע איזה קטע של ה-DNA יעבור תעתוק, ואנזימים מזרזים שלבים שונים בתעתוק, כמו הפרדת הגדילים של ה-DNA וקשירת הנוקלאוטידים לבניית מולקולות ה-RNA.

מה קורה למולקולת ה-RNA שזה עתה נוצרה? עיבוד RNA

מולקולת RNA (המורכבת על-פי DNA) עוברת בדרך-כלל "עיבוד", הכולל הוספה והשמטה של קטעים. ההוספה היא של מספר קטן של בסיסים בתחילת המולקולה ובסופה, ואילו ההשמטה יכולה להיות של קטעים ארוכים למדי בתוך המולקולה (איור ד15). אפשר לדמות את השמטת הקטעים מה-RNA לפעולת עריכה של סרט:

קטעים מסוימים נחתכים והקצוות החתוכים "מודבקים" זה לזה. רק לאחר "עריכה" כזו, הנקראת שִׁחְבּוּר (באנגלית-splicing), יוצאת מולקולת ה-RNA מהגרעין לציטופלסמה.



איור ד15: שחבור - השמטה של קטע מ-RNA שנוצר בגרעין
בתהליך השחבור מושמטים חלקים ממולקולת ה-RNA, והקטעים שנותרו מתחברים ביניהם.
באיור מתוארת השמטה של קטע אחד, אולם על-פי-רוב מושמטים מספר קטעים מאותה מולקולת RNA.

מושג-מה על אורך הקטעים המושמטים אפשר לקבל מהנתונים הבאים: אורך מולקולה של RNA בגרעין יכול להגיע לעשרות אלפי נוקלאוטידים, ואילו אורך רוב מולקולות RNA בציטופלסמה אינו עולה על אלפים בודדים של נוקלאוטידים.

יש מקרים רבים שבהם יש יותר מצורת שחבור אחת לאותה מולקולת RNA. התוצאה היא שרצף בסיסים יחיד ב-DNA משמש מקור לכמה מולקולות RNA שונות!

נחזור לקשר שבין DNA וחלבונים: אמרנו שב-DNA נמצא מידע להרכבת החלבונים, מידע זה מועבר מהגרעין לציטופלסמה באמצעות מולקולות RNA. מולקולות אלה נקראות **RNA-שליח** (באנגלית: messenger-RNA, ובקיצור mRNA):
RNA - בשל הרכבן, ושליח - בשל תפקודן. (קיימים גם טיפוסים נוספים של RNA, שעליהם נלמד בהמשך.)

חִשבו: מהו הבסיס לתפקודן של מולקולות ה-RNA כמעבירות מידע מ-DNA?

שימו לב שמולקולת ה-RNA המתקבלת בתעתוק בנויה מרצף נוקלאוטידים המשלים לרצף הנוקלאוטידים בקטע ה-DNA ששימש תבנית ליצירתה. זהו הבסיס לתפקוד מולקולת RNA כמעבירת מידע מה-DNA שבגרעין אל הציטופלסמה!

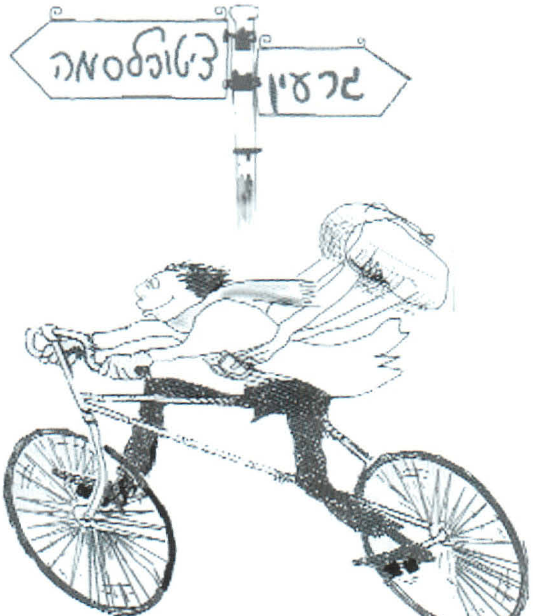
מולקולת ה-RNA-שליח (שעברה עיבוד) יוצאת דרך הפתחים שבמעטפת הגרעין אל הציטופלסמה, מקום ייצור החלבונים. במולקולה זו נמצא מסר, או מידע מסוים, המוצפן **בקוד** (=צופן) של נוקלאוטידים.

כפי שראינו, מקור המידע הוא במולקולת ה-DNA שעל-פיה נבנתה מולקולת ה-RNA.

בציטופלסמה מתורגם מידע זה לחלבון.

כיצד?

נצא מהגרעין לציטופלסמה, ונבדוק זאת.



ד4. הרכבת החלבון: תרגום

המידע לבניית החלבון – הן במולקולת RNA-שליח והן במולקולת ה-DNA שממנה היא תועתקה - מוצפן בקוד של נוקלאוטידים. ה-RNA-שליח עובר מהגרעין אל הציטופלסמה, ושם מפוענח הקוד: רצף הנוקלאוטידים - שהוא "שפת" חומצות הגרעין, מתורגם לרצף חומצות אמיניות - שהוא "שפת" החלבונים. לפיכך נקרא התהליך **תרגום** (באנגלית-Translation).

על הקוד:

אפשר לדמות את ארבעת הנוקלאוטידים השונים לארבע "אותיות", המצפינות מידע לרצף החומצות האמיניות בחלבונים.

מולקולות החלבונים השונות בנויות מצירופים שונים של עשרים חומצות אמיניות;

איך יכולים **ארבעה** נוקלאוטידים להוות צופן ל**עשרים** אבני הבניין של החלבונים?

נבהיר זאת בעזרת תרגיל חשבוני:

אם נניח שנוקלאוטיד **אחד** מייצג חומצה אמינית אחת - אזי הצופן מתאים ל**ארבע** חומצות בלבד.

אך קיימות 20 חומצות אמיניות!

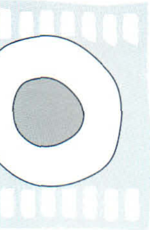
אם נניח שצירוף של **שני** בסיסים מייצג חומצה אמינית, אז יש אפשרות ל-16 (4^2=) צירופים - ואף בכך לא די.

אולם אם צירוף של **שלושה** בסיסים מייצג חומצה אמינית, מתקבלות **64** (4^3=) אפשרויות - שדי בהן (די והותר!) לעשרים חומצות אמיניות.

נדמה את ארבעת הבסיסים החנקניים לארבע אותיות.

מִצאו לפחות עשר מילים - שיש להן מובן - המורכבות משלוש מבין ארבע האותיות ב, ג, ד, ר. (כאמור - אפשריים 64 צירופים שונים, אך לא לכולם יש מובן.)

בדפדוף מהיר תוכלו לצפות ב"סרט".



ואכן נמצא שצירוף של **שלוש** מבין ארבע ה"אותיות" (הנוקלאוטידים) מהווה "מילה" - המייצגת חומצה אמינית (ראו נספח 2: הקוד הגנטי).

שלשה של נוקלאוטידים ב-RNA-שליח, המקודדת חומצה אמינית מסוימת, נקראת **קודון** (=יחידה של הקוד).

קבוצת מולקולות מפתח בתרגום הן מולקולות ה-**RNA-מוביל** (באנגלית transfer-RNA, ובקיצור tRNA, נקראות בעברית גם RNA-מעביר). אלה מולקולות קטנות, יחסית, הנמצאות בציטופלסמה, וייחודן הוא בכך שבכל אחת מהן נמצאים שני אתרים משמעותיים לתרגום: בצד האחד של המולקולה נמצא אתר התקשרות לחומצה אמינית, ובצדה האחר - שלושה נוקלאוטידים המתקשרים לקודון ב-RNA-שליח (איור 16ד). כל שלשת נוקלאוטידים כזו ב-RNA-מוביל, המתקשרת התקשרות משלימה לקודון, נקראת **אנטיקודון** (Anticodon).

איור 16ד: דגם של מולקולת RNA-מוביל (tRNA)
כל נקודה מייצגת נוקלאוטיד.
שימו לב שבמולקולה יש שני אתרי התקשרות: אחד לחומצה אמינית ואחד לשלשה ב-RNA- שליח (אנטיקודון). כמו כן יש במולקולה קטעים חד- ודו-גדיליים.

במבנן הכללי דומות כל מולקולות ה-RNA-מוביל, אולם הן אינן זהות. לכל טיפוס מולקולת RNA-מוביל נקשרת חומצה אמינית מסוימת, ובכל טיפוס RNA-מוביל קיים אנטיקודון ייחודי - המתקשר לקודון המשלים ב-RNA-שליח.

למדנו שבקוד השלשות, המורכב מארבעה נוקלאוטידים שונים, קיימים 64 צירופים שונים. היות שבחלבונים קיימות רק 20 חומצות אמיניות, יש חומצות שלהן מקודד יותר מקודון אחד, ובהתאם – יותר מאנטיקודון אחד (כלומר: יותר מ-RNA-מוביל אחד). כלומר – יש כמה טיפוסי RNA-מוביל הנקשרים לאותה חומצה אמינית. שימו לב – דבר זה אינו סותר את הנאמר לעיל – שלכל RNA-מוביל נקשרת חומצה אמינית מסוימת, ורק היא.

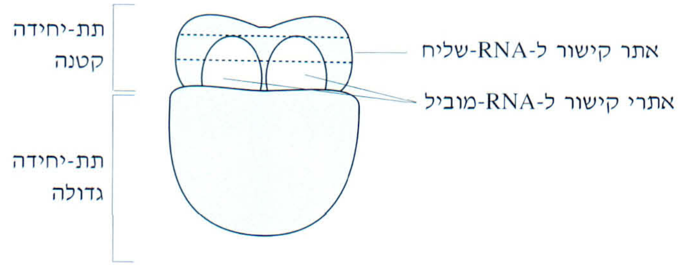
עוד על הקוד – בהמשך.

מכאן, שבמבנה ה-RNA-מוביל טמון בעצם סוד התרגום: צד אחד מתקשר ***לחומצה אמינית מסוימת***, והצד האחר, האנטיקודון - נקשר ***לקודון המתאים ב RNA שליח***. סידור כזה מבטיח, שלרצף מסוים של שלושה נוקלאוטידים ב-RNA-שליח, תיוחד - באמצעות מולקולות ה-RNA-מוביל - חומצה אמינית מסוימת. זו הדרך לתרגום המידע שעל ה-RNA-שליח (שכאמור, מקורו ב-DNA), לחומצות אמיניות!
מסלול מעבר המידע הוא אפוא כזה:

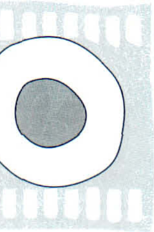
שלשות נוקלאוטידים ב-DNA ← **תעתוק** (בגרעין) ← שלשות נוקלאוטידים ב-RNA-שליח ← **תרגום** (בציטופלסמה) ← שרשרת חומצות אמיניות

הכרנו שלושה טיפוסים של מולקולות RNA: RNA-שליח, RNA-מוביל ו-RNA-ריבוזומי. סכמו: מה התפקוד של כל אחד מהם?

תרגום ה-RNA-שליח לחלבונים נעשה במבנים מיוחדים: **ריבוזומים**. הריבוזומים הם מבנים תוך-תאיים קטנים (קוטרם כ-30 ננומטר) הנמצאים בציטופלסמה. בכל ריבוזום נמצאים חלבונים ייחודיים ו-RNA ייחודי, הנקרא בהתאם RNA-ריבוזומי (באנגלית ribosomal-RNA, ובקיצור rRNA). החלבונים וה-RNA בריבוזום מאורגנים בשתי תת-יחידות שונות גודל; אתרי הקישור ל-RNA-שליח ול-RNA-מוביל נמצאים בתת-יחידה הקטנה (איור ד17).



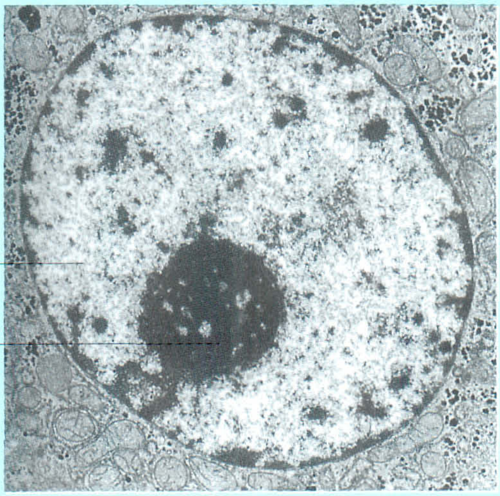
איור ד17: ריבוזום
הריבוזום מורכב משתי תת-יחידות שונות גודל.



פעילותם של הריבוזומים בתרגום ה-RNA-שליח הקנתה להם את הכינוי "בית חרושת לחלבונים".

גרעינון

מולקולות RNA-ריבוזומי מיוצרות גם הן על-פי קטעי DNA שבגרעין. האזור שבו מתועתק ה-RNA-הריבוזומי נקרא **גרעינון**. אף על-פי שהגרעינון איננו תחום בקרום, במקרים רבים אפשר להבחין בו מבעד למיקרוסקופ האור (איור 18ד).



איור 18ד: גרעין ובו גרעינון
גרעין בתא כבד של עכבר,
צילום במיקרוסקופ אלקטרונים, הגדלה בערך פי 4,000

גודל הגרעינון משקף את מידת הפעילות המתרחשת בו, ולפיכך ניתן למצוא גרעינונים בגודל שונה בתאים שונים, ואף באותם תאים במצבים שונים. ישנם גם תאים שבגרעין שלהם יש כמה גרעינונים.

בתאים המייצרים כמויות גדולות של חלבון, הגרעינון יכול להוות כ-25% מנפח הגרעין!

נסכם:

אילו מרכיבים משתתפים בתהליך הרכבת החלבון – התרגום – בציטופלסמה?

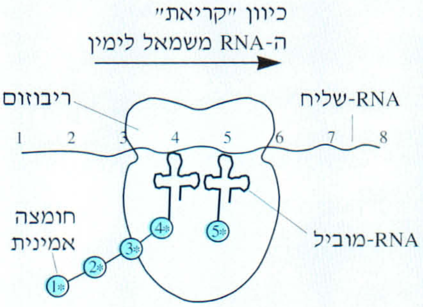
- מולקולות **RNA-שליח** הנושאות מידע שתועתק מ-DNA בגרעין;
- **ריבוזומים**, שעליהם נבנים החלבונים;
- מולקולות **חומצות אמיניות** (אבני הבניין של חלבונים) המצויות בציטופלסמה;
- מולקולות **RNA-מוביל** ה"מנווטות" את החומצות האמיניות;

ובנוסף לכך -

- **אנזימים** מתאימים לזירוז שלבי הבנייה השונים;
- **אנרגיה** זמינה (אנרגיה כימית, אצורה במולקולות ATP. על כך נלמד בהמשך).

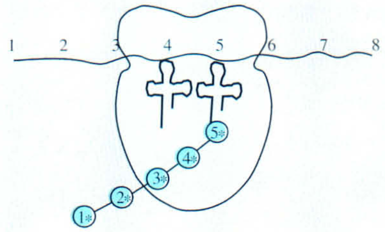
תרגום הקוד

נחזור אל בניית החלבונים בתא, ונעקוב אחר שלבי תהליך התרגום; לשם כך קראו את תיאור השלבים השונים, תוך התבוננות באיורים שמשמאל:

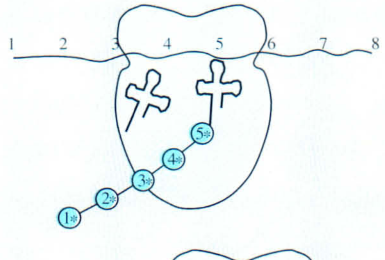


א. לרוחב הריבוזום צמודה מולקולת RNA-שליח, שבה קודונים 3,2,1 תורגמו כבר לחומצות אמיניות *1, *2, *3, ועתה מתורגמים קודונים 5,4.

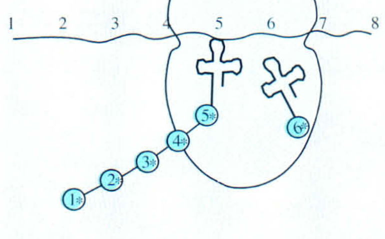
לריבוזומים צמודות גם שתי מולקולות RNA-מוביל, שאליהן מחוברות חומצות אמיניות (*4, *5). האנטיקודונים שבמולקולות ה-RNA-מוביל משלימים לקודונים 4, 5 שב-RNA-שליח. החומצה האמינית *4 קשורה (כבר) גם לחלבון הנבנה.



ב. החומצה האמינית *5 נקשרת (בעזרת אנזים מתאים) לשרשרת החומצות האמיניות (כלומר לחלבון הנבנה), והחומצה האמינית *4 ניתקת מה-RNA-מוביל שלה.

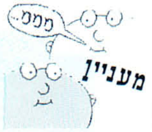


ג. ה-RNA-מוביל של חומצה אמינית *4 ניתק מהריבוזום (RNA-מוביל זה חופשי עתה לקשור מולקולה נוספת של *4).



ד. הריבוזום מתקדם על-פני ה-RNA-שליח, לקודון הבא. ה-RNA-מוביל עם חומצה אמינית *5 משנה את מקומו בריבוזום, ומתפנה מקום ל-RNA-מוביל חדש, שהאנטיקודון שלו מתאים לקודון 6 הנמצא עתה ב"קריאה".

כך נקראים הקודונים – קודון אחר קודון – ובזו אחר זו מתווספות חומצות אמיניות לחלבון הנבנה.



משך הזמן הנדרש לקריאת קודון אחד (כלומר להוספת חומצה אמינית אחת לשרשרת של המולקולה הנבנית) הוא כ-1/20 של שנייה. הווה אומר: הרכבת חלבון שבו 400 חומצות אמיניות (ואורכם של חלבונים רבים הוא אכן בטווח של מאות חומצות אמיניות) נמשכת 20 שניות בלבד!

עוד על הקוד

משנת 1966 מוכר הקוד שעל-פיו רצף החומצות האמיניות מוצפן ב"שפת" הנוקלאוטידים: ידוע איזו חומצה אמינית מקודדת על-ידי כל אחד מ-64 הקודונים ("מילים", כלומר 64 הצירופים השונים של שלושה מבין ארבעת הנוקלאוטידים, נספח 2: הקוד הגנטי).

ידועות עוד כמה עובדות על הקוד, והן:

- כאמור, הקוד הוא בן 64 קודונים, ובחלבונים יש רק 20 חומצות אמיניות. לפיכך מתקבלת שפה שבה לכמה קודונים יש אותה משמעות: הם מקודדים לאותה חומצה אמינית (שוב, ראו נספח 2: הקוד הגנטי).
- בקוד גם סימני פיסוק: לשלושה מבין 64 הקודונים שבקוד אין מולקולת RNA-מוביל בעלת אנטיקודון מתאים, ולפיכך כאשר מגיע הריבוזום לאחד מקודונים אלה - נפסקת "קריאת" ה-RNA-שליח ונפסקת הארכת החלבון. קודונים אלו מכונים קודוני סיום (שוב, ראו נספח 2: הקוד הגנטי).
- נקודה מעניינת במיוחד היא כלליותו של הקוד. הקוד הגנטי זהה לחלוטין כמעט בכל האורגניזמים שנבדקו עד עתה: בחיידקים ובנגיפים, בכל הצמחים ובכל בעלי-החיים, כולל האדם (קוד שונה במקצת נמצא עד כה רק ב-DNA שבמיטוכונדריה, וב-DNA של כמה חד-תאיים). כלליות זו מעידה על האחידות שביצורים השונים, וסביר להניח שההסבר לכך נעוץ במוצאם האבולוציוני המשותף.

פענוח הקוד היווה ללא ספק פריצת דרך בהתקדמות המדעית, והוא היסוד למחקרים החדישים ביותר הנערכים כיום בביולוגיה מולקולרית, ולכל היישומים בהנדסה גנטית - שבהם לא נעסוק בספר זה.

עיבוד חלבונים: משרשרת של חומצות אמיניות לחלבון פעיל

למדנו שהמידע על רצף החומצות האמיניות שבחלבון נמצא ב-DNA, מתועתק בגרעין ל-RNA, ומתורגם בציטופלסמה על-גבי ריבוזומים לשרשרת חומצות אמיניות - המתקפלת לצורה האופיינית לחלבון.

לא תמיד החלבון שתורגם הוא חלבון פעיל: יש חלבונים שאינם פעילים ללא עיבודים שונים (כמו שינויים כימיים בקצות שרשרת החומצות האמיניות, חיבור תת-יחידות שונות, ועוד).

חלק ניכר מהחלבונים בתאי איקריוטים מעובדים באברונים מיוחדים; אלה הם הרשת התוך-תאית ומערכת גולג'י. בעזרת אברונים אלה גם מועברים החלבונים לאתרי פעילותם בתא. על אברונים אלה נלמד בפרק ה.

ד.5 DNA - הגשר בין הדורות

נסכם בסכמה את מסלול מעבר המידע:

תעתוק   תרגום

DNA ← RNA ← חלבון

ובמילים: המידע לבניית חלבוני התא "כתוב" בצופן ב-DNA, מתועתק ל-RNA[1] ומתורגם לחלבוני התא. חלבונים אלה מבטאים - ישירות או בעקיפין - חלק ניכר מתכונות התא, ולכן הורשת תכונות אלה מדור תאים אחד למשנהו (ואף מדור אורגניזם אחד למשנהו) מותנית בהעברה מדויקת של המידע שב-DNA.

ה-DNA הוא אפוא **החומר התורשתי**, או החומר **הגנטי** (גנטי=תורשתי. genos=צאצא וגם גזע). לפיכך נקרא קוד השלשות שב-RNA (שלשות המקבילות לשלשות ה-DNA) **הקוד הגנטי**.

[1] בנגיפים מסוימים קיים אנזים המזרז תעתוק הפוך: *מ-RNA ל-DNA*.

גן וכרומוזום

בראשית הפרק הוזכרו המונחים גן וכרומוזום כקשורים עם הגרעין, אך לא התעכבנו עליהם עד עתה.

מהו אפוא גן?

בטרם נודע תפקודו של DNA כאוצר מידע תורשתי, היה "גן" ***מושג מופשט***, שהתייחס ל**כושר לבטא תכונה תורשתית**. יש מתייחסים גם כיום למונח במשמעות זו, ולעומתם יש רבים השמים את הדגש על הממצאים המולקולריים, ובשבילם גן הוא ***חומר*** - **קטע של DNA**, הקשור עם ביטויה של תכונה תורשתית מסוימת.

מעניין

באורגניזם איקריוטי הגנים מהווים רק אחוז קטן (2% – 3%) מרצפי הבסיסים שב-DNA.

חלק מהרצפים האחרים מתפקדים בבקרה, אך תפקודם של חלק גדול מהרצפים איננו ידוע עדיין.

ומהו כרומוזום?

הכרומוזום האיקריוטי הוא מבנה המורכב ממולקולת DNA אחת ארוכה, המלופפת סביב כדורים חלבוניים (איור 19ד). מקור המונח כרומוזום הוא מראשית חקר התא, כאשר התגלו גופיפים תוך-תאיים שנצבעו על-ידי צבעים ששימשו במחקר (chroma=צבע, soma=גוף).

הכרומוזומים נראים בבירור בזמן חלוקת התא (איור 19ד) – ועל-כך נרחיב בפרק ט שלהלן, הדן בחלוקת התא.

היות שה-DNA בגרעין של אורגניזם איקריוטי מאורגן בכרומוזומים, נכון לומר שהמידע התורשתי של האורגניזם נמצא בכרומוזומים.

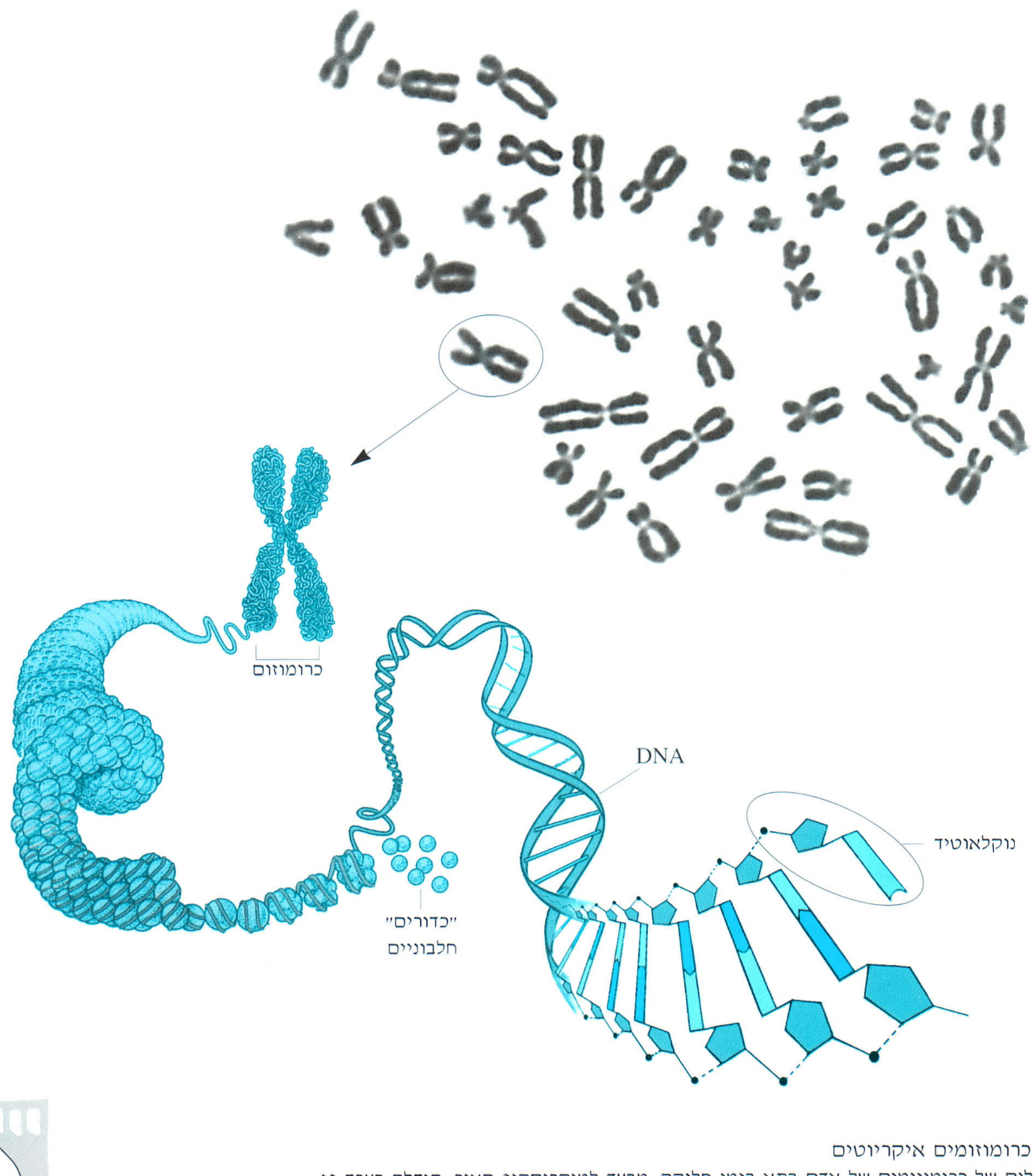
לכל מין[2] (species) בטבע יש מספר כרומוזומים אופייני. לדוגמה: בתאי גוף האדם - 46 כרומוזומים; בתאי דבורה - 32 כרומוזומים ובתאי תפוח-אדמה - 48.

פינת הפרוקריוט

כרומוזומים פרוקריוטים שונים מכרומוזומים איקריוטים:

- במספרם בתא (בתא פרוקריוט נמצא בדרך-כלל רק כרומוזום יחיד),
- בדרך אריזת ה-DNA בהם,
- בסוג ובכמות של החלבונים הקשורים עם ה-DNA שבהם וכאמור -
- במיקומם (בתאי פרוקריוטים הכרומוזום נמצא חפשי בציטופלסמה, ואילו בתאי איקריוטים הכרומוזומים נמצאים בגרעין המוקף קרום).

[2] בעברית למונח "מין" יש שני מובנים: species וגם sex. יש המשתמשים במונח "זוויג" כתרגום ל-sex.



איור ד19: כרומוזומים איקריוטים

למעלה - צילום של כרומוזומים של אדם בתא בזמן חלוקה, מבעד למיקרוסקופ האור. הגדלה בערך פי 5,000. הכרומוזומים שבתמונה טרם התחלקו, לפיכך כל כרומוזום עדיין כפול לכל אורכו. בשלב זה הכרומוזום מסולסל ודחוס, ולכן אפשר להבחין בו במיקרוסקופ האור (עוד על כך - בפרק ט). למטה - מודל של מבנה כרומוזום. הכרומוזום בנוי ממולקולת DNA מלופפת סביב כדורים חלבוניים (הכרומוזום בשלב זה כפול, ולכן יש בו שתי מולקולות DNA, אחת בכל חצי כרומוזום).

מהמעבדה: בידוד גנים

האם ניתן לזהות בכרומוזום את רצף הנוקלאוטידים המקודד לחלבון מסוים, על-פי רצף החומצות האמיניות המרכיבות חלבון זה?

שני קשיים עיקריים עומדים בפני חוקר המנסה לבצע תהליך כזה:

האחד - רוב החומצות האמיניות מקודדות על-ידי כמה קודונים (התבוננו בנספח 2: הקוד הגנטי), ואין כיום אפשרות לדעת איזה מביניהם הוא זה ששימש לבנייתה של חומצה אמינית מסוימת.

השני - RNA איקריוטי עובר עיבוד ועריכה לפני צאתו מהגרעין לציטופלסמה (ראו הרחבה בעמודים 70-71). כלומר, מולקולת RNA-שליח שבציטופלסמה אינה מייצגת את מלוא קטע ה-DNA שלפיו היא נבנתה, ולפיכך גם רצף החומצות האמיניות בחלבון אינו מייצג את כל קטע ה-DNA "המקורי".

למרות קשיים אלה, הצליחו מדענים לפתח שיטות שבאמצעותן ניתן לאתר ולבודד גנים המקודדים לחלבונים מסוימים, על-פי רצף החומצות האמיניות של כל החלבון או אפילו של חלקו.

הכרת גנים ובידודם הם הבסיס להתקדמות בשטח ההנדסה הגנטית – אך דיון מפורט בכך חורג מגבולות ספר זה.

ד6. בקרה על ביטוי גנים[3]

כפי שראינו - בגרעין נמצא מידע ליצירת אלפי חלבונים שונים; האם התא מייצר את ***כל*** החלבונים במשך ***כל*** הזמן, ללא הבחנה?

אם נבדוק תאים של **יצורים רב-תאיים**, ניווכח כי מתקיימת "חלוקת עבודה", כלומר: תאים שונים מייצרים חלבונים שונים. כך, לדוגמה, תאים בעין מייצרים חלבונים הרגישים לאור, אך לא נמצא בהם את ההורמון (החלבוני) אינסולין, ואילו בתאי בלוטת הלבלב של אותו יצור לא יהיו אותם החלבונים הרגישים לאור, אך נמצא בהם את ההורמון אינסולין. זאת אף-על-פי ***שהמידע*** ליצירת שני חלבונים אלה מצוי ב-DNA שבכל גרעיני התאים שבגוף, כולל שני טיפוסי תאים אלה.

גם אם נבדוק את החלבונים במהלך החיים של **תא אחד**, ניווכח כי מכלול החלבונים שלו שונה מאוד בתנאים שונים: יש חלבונים הנמצאים בו ***בכל הזמן***, יש חלבונים הנוצרים ***בשלבים שונים*** במשך חיי התא, ויש גם חלבונים הנוצרים או לא נוצרים בהתאם ***לשינויים בסביבה*** של התא.

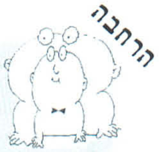
[3] ראו גם פרק ג הרחבה: שמירת סדר ובקרה בפעילות האנזימטית בתא

מהאמור לעיל אפשר להסיק שייצור החלבונים בתא נעשה תחת פיקוח, בהתאם לנדרש בזמן ובמקום.

על-סמך הידוע לכם על יצירת חלבונים בתא, חִשבו:
באילו שלבים לאורך מסלול זה יכולות להימצא נקודות בקרה?

הבקרה על הזהות, הכמות והפעילות של החלבונים בתא יכולה להיות בשלבים שונים:

- ב**תעתוק**;
- ב**עיבוד ה-RNA** לאחר התעתוק;
- ב**תרגום ה-RNA** לחלבון;
- ב**עיבוד החלבון**.



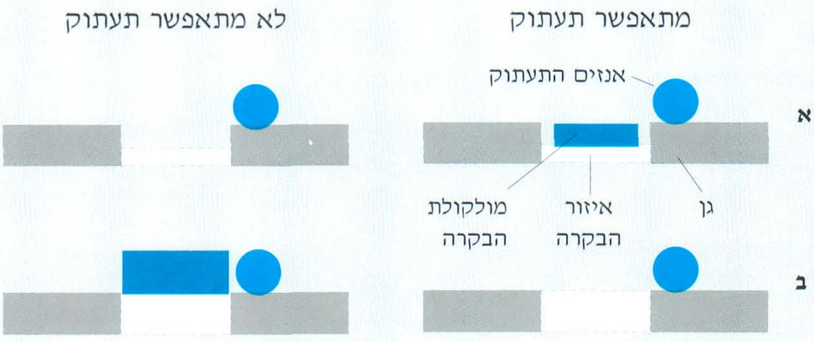
בקרה בשלב התעתוק

לא כל ה-DNA הקשור עם יצירת חלבון מסוים מתועתק: בסמיכות לקטע ה-DNA המכיל מידע לרצף החומצות האמיניות של חלבון, מצויים קטעי DNA שאינם מתועתקים בעצמם, אך הם מבקרים את התעתוק. קטעים אלה הם אזור הבקרה של הגן.

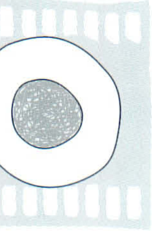
כיצד נעשית הבקרה?

נתאר שני מודלים (איור ד20): על-פי המודל הראשון (מודל א באיור), אנזים התעתוק יכול לפעול רק אם מתקשרת מולקולה ייחודית לאזור הבקרה. ללא נוכחות מולקולה זו, לא מתאפשר תעתוק DNA ל-RNA.

על-פי המודל השני (מודל ב באיור), אנזים התעתוק יכול לפעול רק כאשר אזור הבקרה חשוף. כאשר נקשרת לאזור הבקרה מולקולה מיוחדת, נחסמת דרכו של האנזים, ולא מתרחש תעתוק.



איור ד 20: שני מודלים לבקרת התעתוק
מודל א - התעתוק מותנה ***בהתקשרות*** מולקולה ייחודית לאזור הבקרה
מודל ב - התעתוק מותנה ***בהרחקת*** מולקולה ייחודית מאזור הבקרה
(כיוון התעתוק מימין לשמאל)



שימו לב: על-פי המודל הראשון, המולקולה הנקשרת לאזור הבקרה ***מעוררת*** תעתוק, ואילו על-פי המודל השני, הימצאות של מולקולה באזור הבקרה ***מונעת*** תעתוק.

ומה קורה בתא?
יש גנים שבקרת התעתוק בהם נעשית על-פי מודל א, ויש כאלה שהבקרה נעשית בהם על-פי מודל ב.

הגנים המגיבים להורמוני מין באדם הם דוגמה לגנים המבוקרים על-פי מודל א.

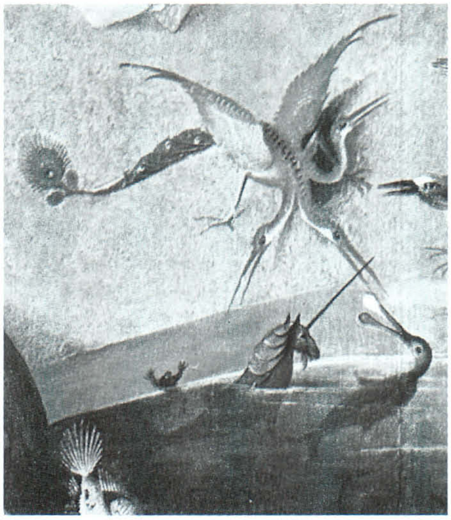
הורמוני המין טסטוסטרון ואסטרוגן, המופרשים מבלוטות המין (אשכים ושחלות), גורמים לשינויים רבים בנער ובנערה המתבגרים. שינויים אלה הם תוצאה של הפעלת גנים ייחודיים בתאי גוף מסוימים. ההפעלה מתרחשת כאשר מולקולות ההורמון מגיעות לתא, נקשרות אל חלבון מיוחד (קולטן תוך-תאי של ההורמון. על קולטנים ראו בפרק ה סעיף ה6), וצירוף זה של הורמון + קולטן חודר לגרעין התא, נקשר אל גנים ייחודיים ובכך מאפשר את תעתוקם - ממש כפי שמתואר במודל א.

גנים הקשורים לניצול סוכר הלקטוז בפרוקריוטים הם הדוגמה המוכרת ביותר לגנים המבוקרים על-פי מודל ב. תיאור מערכת בקרה זו, שהיווה פריצת דרך בהבנת הבקרה על פעילות גנים, זיכה את החוקרים זיקוב ומונו (F. Jacob; J. Monod) בפרס נובל לרפואה ולפיזיולוגיה בשנת 1965.

חיידקים מהסוג אשריכיה קולי (E. Coli) יכולים לגדול על מצע המכיל את הסוכר גלוקוז. כאשר מגדלים אותם על מצע המכיל את הסוכר לקטוז, הם מפרקים אותו בעזרת אנזים ייחודי, הנוצר בחיידק רק כאשר קיים לקטוז במצע הגידול.
כיצד "יודע" החיידק מתי נדרש האנזים?
סדרת ניסויים הביאה לפענוח המנגנון, שעיקרו: בהיעדר לקטוז במצע, קשורה אל אזור הבקרה של הגן המקודד לאנזים מולקולה אשר מונעת את התעתוק שלו. כאשר חודר אל התא לקטוז, הוא נקשר אל המולקולה חוסמת התעתוק, ובכך נמנעת קשירתה לאזור הבקרה, והגן מתועתק - כפי שמתואר במודל ב.

כיום מוכרות מולקולות בקרה רבות, בפרוקריוטים ובאיקריוטים, ומחקרים רבים בביולוגיה מולקולרית עוסקים בגילוין של מולקולות נוספות והבנת דרך פעולתן.

ד7. מוטציות

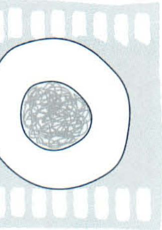


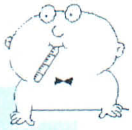
גן התענוגות הארציים (פרט)
הירונימוס בוש (1516-1450)

למדנו שהמידע ליצירת חלבוני התא אצור ב-DNA, ושה-DNA הוא החומר התורשתי, המועבר מתא אם לתאי הבת, ומהורה לצאצאיו.
בתא מצויים מנגנונים השומרים שהמידע האצור ב-DNA יעבור באופן מדויק מדור לדור (על חלקם נלמד בפרק ט, הדן במחזור התא); אף-על-פי-כן, חל מדי פעם שינוי אקראי ברצף הנוקלאוטידים ב-DNA. שינוי כזה נקרא **מוטציה**.
מוטציה היא אירוע נדיר - מעריכים שמוטציה מופיעה באופן מקרי באחד מבין 100,000 תאי רבייה של אדם (תאי זרע או ביציות). עם זאת יש גורמי סביבה לא מעטים המעלים את שכיחות המוטציות. גורמים כאלה, הנקראים **מוטָגֶנִים** (=גורמי מוטציות) הם לדוגמה חומרים הנמצאים בעשן סיגריות ובעשן מכוניות, וכן קרינה על-סגולה וקרני-X (=קרני רנטגן).
רוב המוטציות הבאות לידי ביטוי מזיקות לתא או לפרט הנושא אותן, ויש אף מוטציות הגורמות למוות.

נסו להסביר מדוע רוב המוטציות מזיקות.

ההסבר לנזק נעוץ בשיבוש שגורמת מוטציה:
שינוי ברצף הנוקלאוטידים (כלומר, מוטציה) עשוי לגרום לשינוי ברצף החומצות האמיניות שבחלבון המקודד על-ידי רצף נוקלאוטידים זה. השינוי ברצף החומצות האמיניות עשוי להתבטא בדרכים מספר: שינוי במבנה - ולפיכך בתפקוד - של חלבון כלשהו, שינוי בכמות החלבון, או אף שינוי פעילות או כמות של כמה חלבונים. שינוי כזה עלול לגרום לערעור האיזון שבין אותו חלבון (או חלבונים) למרכיבים אחרים בתא, וקיים סיכוי גבוה שערעור זה יפריע לפעולה המתואמת של המרכיבים השונים בתא, או ביצור השלם.
אמנם קיימת אפשרות שהשינוי יביא לשיפור בפעילות הכוללת - אך הסיכוי לכך נמוך ביותר.
הדבר דומה למכונה מסובכת שיש בה גלגלי שיניים מרובים ושונים, הפועלת ביעילות מתוך תיאום בין כל מרכיביה. אם יחול שינוי אקראי בגלגל אחד - סביר להניח שפעולת המכונה תשתבש.





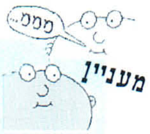
העיקר הבריאות

באדם מוכרות מחלות שונות שהבסיס להן הוא מוטציות: ***החלפה*** של נוקלאוטיד אחד בנוקלאוטיד אחר, ***החסרה*** או ***הוספה*** של נוקלאוטיד או של כמה נוקלאוטידים.

דוגמאות למחלות כאלה הן לַיֶּפֶת כִּסָּתִית (=סִיסְטִיק פִּיבְּרוֹזִיס, מחלה המאופיינת בהפרשה מוגברת של ליחה, המצטברת ופוגעת בריאות ובאיברים נוספים) וטַאי-זַקְס (הפוגעת בתאי עצב וגורמת לפיגור שכלי קשה ומוות בגיל צעיר).

יש גם מוטציות שבהן חל שינוי בקטעי DNA ארוכים מאוד, ואפילו בכרומוזום שלם. דוגמה לפגיעה הכרוכה בעודף של כרומוזום היא תסמונת דאון, שבה יש עודף של אחד הכרומוזומים (כרומוזום הנקרא מספר 21) או של קטע מכרומוזום זה. תסמונת זו מאופיינת בין השאר בפיגור בהתפתחות, פיגור שכלי ורגישות למחלות זיהומיות.

היבט אחר של מוטציות הוא מקומן באבולוציה: היות שבמהלך הדורות התרחשו מוטציות, אנו עדים למגוון עצום הן בין הצמחים והן בין בעלי-החיים; הודות להתרחשותן של מוטציות יש כלניות לבנות, אדומות וכחולות, ובשל מוטציות כלב אחד שונה ממשנהו. דהיינו: המוטציות הן מקור הרב-גוניות הקיימת בטבע. רב-גוניות זו היא הבסיס לשינויים האבולוציוניים, היות שעליה פועלת הברירה הטבעית (על-פי תורת דרווין- פרק י להלן).
אכן, אין רע בלי טוב.



... וכדאי לדעת:

בשנת 1990 הוכרז בארצות הברית על **פרויקט גנום האדם**, שעיקר מטרתו היא זיהוי רצף זוגות הבסיסים שב-DNA בתאי גוף האדם (כ-3 מיליארד* זוגות בסיסים), והכרת הגנים המוצפנים ב-DNA זה (כ-100,000 גנים).

במאמץ המחקרי נטלו חלק מעבדות מחקר בארצות רבות, בכללן ישראל, ועד שנת 2000 זוהה הרצף של רוב (כ-98%) הבסיסים ב-DNA, וכן חלק גדול מהגנים. הישג מרשים זה צוין על-ידי נשיא ארצות הברית ביוני 2000, וזכה לכותרות בכלי התקשורת ברבות ממדינות העולם.

מעניין לדעת שאחת ממטרות הפרויקט הייתה ליבון בעיות חברתיות, מוסריות וחוקיות שההתפתחות המדעית עלולה לגרור, וכן העלאת רעיונות לפתרון בעיות כאלה – עוד בטרם התעוררו.

עם כל ההתפעלות מהשלב המתקדם בהכרת האדם את עצמו, עדיין רבה הדרך לפענוח החידה, כיצד 3 מיליארד זוגות בסיסים מאפשרים את התפקוד של בני-אנוש.

* מיליארד = 10^9

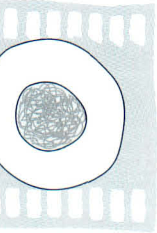
ד 8. סיכום

- ניסויים רבים הראו ש**בגרעין** נמצא מידע החיוני לקיומו של התא, לקביעת צורתו, לתפקודו ולהתרבותו.
- תאים **איקריוטים** הם בעלי גרעין התחום במעטפת דו-קרומית. בגרעין נמצאים **כרומוזומים**: מולקולות ארוכות של **DNA** המלופפות סביב חלבונים. בתאי **פרוקריוטיים**, שהם חסרי גרעין, מצויה בדרך-כלל מולקולה טבעתית אחת של DNA.

קצת כימיה

- **DNA** ו-**RNA** הן מולקולות ארוכות הבנויות מרצפים של ארבעה **נוקלאוטידים**. כל נוקלאוטיד מורכב מ**זרחה**, **סוכר** ו**בסיס חנקני**. הזרחה זהה ב-DNA וב-RNA. הסוכר ב-DNA הוא דה-אוקסי-ריבוז, וב-RNA הוא ריבוז. שלושה מהבסיסים החנקניים (**A**, **C**, ו-**G**) זהים ב-DNA וב-RNA, ואחד – שונה (**T** ב-DNA, **U** ב-RNA).
- מולקולת DNA מורכבת משני **גדילים** הקשורים ביניהם בקשרי מימן דרך הבסיסים החנקניים: A קשור ל-T ו-G קשור ל-C; הגדילים מאורגנים במרחב בצורה לוליינית, כסליל כפול.
- מולקולת RNA מורכבת מגדיל אחד, אך גם בה יכולים להיות קטעים דו-גדיליים.
- מולקולות שונות של DNA נבדלות זו מזו ברצף הנוקלאוטידים שבהן.
- **רצף הנוקלאוטידים** המרכיבים את ה-DNA מהווה **מידע** לבניית חלבונים.

- בתהליך ה**תעתוק** נוצרות בגרעין מולקולות **RNA** על-פי קטע מגדיל ה-DNA.
- מולקולות ה-RNA עוברות עיבוד, הכולל **שחבור**, לפני יציאתן מהגרעין.
- מולקולות **RNA-שליח** מעבירות מידע מ-DNA שבגרעין אל הציטופלסמה.
- המידע ב-RNA-שליח מוצפן ב**קוד** של שלשות: כל שלושה נוקלאוטידים מהווים **קודון**, המתורגם בציטופלסמה לחומצה אמינית. בסך הכול ישנם 64 (4^3) קודונים המקודדים ל-20 חומצות אמיניות ולהפסקת תרגום.
- בתהליך ה**תרגום** נבנית שרשרת חומצות אמיניות על-פי רצף הנוקלאוטידים הקיים ב-RNA-שליח.
- התרגום מתבצע על-גבי הריבוזומים שבציטופלסמה: על הריבוזום נוצר קשר בין קודון ב-RNA-שליח לבין **אנטיקודון** שב-**RNA-מוביל**, והחומצה האמינית הצמודה ל-RNA-מוביל נקשרת לשרשרת החומצות האמיניות הנבנית.



- כל תהליכי התעתוק והתרגום, כמו תהליכים אחרים המתרחשים בתא, מזורזים על-ידי **אנזימים**.
- המידע להרכבת החלבונים, הצפון ב-DNA, עובר ב**תורשה** מדור לדור.

- **גן** הוא קטע של DNA ה"אחראי" לביטויה של תכונה. **כרומוזום** הוא גופיף המורכב ממולקולה אחת של DNA ומחלבונים, והוא כולל גנים רבים.
- הגנים כוללים רק חלק קטן מרצפי ה-DNA שבתאי אדם.
- גנים באים לידי ביטוי בצורה מבוקרת; ה**בקרה** נעשית במנגנונים שונים ובשלבים שונים של יצירת החלבונים ופעילותם.
- **מוטציות** הן שינויים ברצף הנוקלאוטידים שב-DNA. בדרך-כלל מוטציות מזיקות לפרט הנושא אותן. בהיבט אבולוציוני - המוטציות הן מקור הרב-גוניות בטבע.
- ב**פרויקט גנום האדם** מושקע מאמץ מחקרי להכרה ופענוח ה-DNA של האדם.

שאלות ומשימות לפרק ד

1. לפניכם רשימת מונחים. סדרו אותה בסדר עולה מהקטן אל הגדול:
כרומוזום, נוקלאוטיד, מולקולת DNA, בסיס חנקני, גדיל.

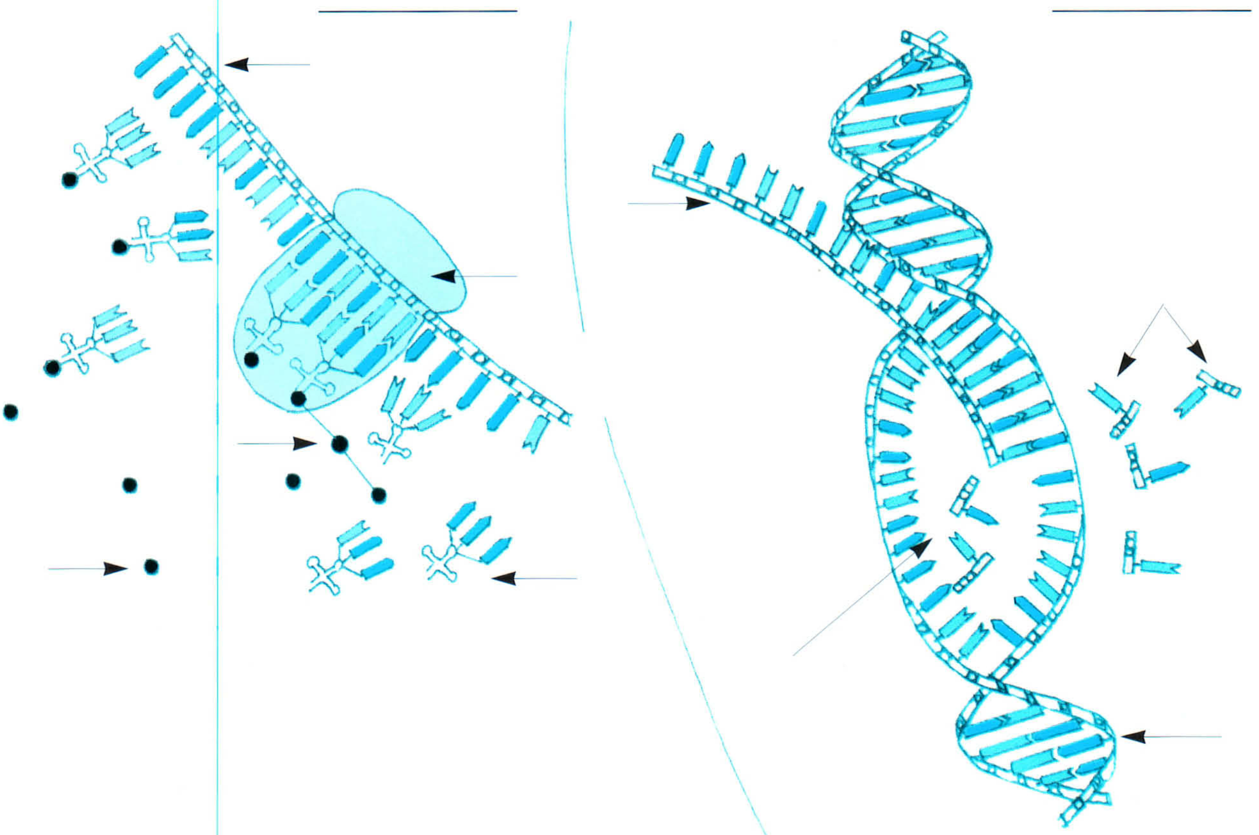
2. בזן מסוים של חיטה, הבסיס החנקני G (גואנין) מהווה כ-23% מכלל הבסיסים החנקניים שב-DNA. מהו אחוז הבסיסים החנקניים האחרים מכלל הבסיסים ב- DNA?

3. לפניכם רצף של 9 בסיסים בקטע מגדיל אחד של DNA: -G-C-C-T-A-G-C-A-T-
א. מהו רצף הבסיסים בקטע המקביל שבגדיל ה-DNA המשלים?
ב. מה יהיה רצף הבסיסים בקטע ה-RNA שיורכב על-פי קטע DNA זה?
ג. כמה חומצות אמיניות יכולות להיות מוצפנות בקטע DNA באורך כזה?

4. מהם טיפוסי מולקולות RNA הפעילים בתא, ומה תפקוד כל אחד מהם?

5. אינסולין היא מולקולה חלבונית המורכבת מ-51 חומצות אמיניות.
א. מה המספר ***המינימלי*** של נוקליאוטידים בקטע ה-DNA שעל-פיו נבנית מולקולת אינסולין? הסבירו.
ב. ***להרחבה***: האם נכון לומר שנוקליאוטידים אלה הם הגן לאינסולין?

6. סמנו על הקווים המתאימים בציור שלפניכם את המונחים: תעתוק; תרגום; וליד החיצים המתאימים סמנו: RNA; DNA; tRNA; חומצה אמינית חופשית; שרשרת חומצות אמיניות; נוקלאוטידים מטיפוס RNA, ריבוזום.



7. עיינו שוב בתיאור הניסויים שנערכו באצה סוככנית (ראשית פרק ד):

א. האם נכון לקבוע, על סמך ניסויים אלה, שאנזימים הקיימים במין אחד של סוככנית יכולים לזרז את תעתוק ה-DNA של מין אחר? נמקו.

תאור הניסויים שנערכו בסוככנית, כפי שהופיע בספר, לא היה מלא. מתברר ש:

I. כאשר חותכים מהאצה גם את השמשייה וגם את הבסיס, ומגדלים רק את הגבעול, מצמיח הגבעול - ללא הבסיס עם הגרעין - שמשייה חדשה! (אולם אצה זו, ללא הבסיס והגרעין, אינה מתקיימת לאורך זמן.)

II. כאשר מרכיבים גבעול (ללא שמשייה) של מין אחד על בסיס של המין האחר

אכן מתפתחת שמשייה חדשה, בעלת הצורה של האצה "תורמת" הגרעין, אך שמשייה כזו לא מתפתחת מיד: השמשייה המתפתחת מיד לאחר הרכבת גבעול ממין אחד על בסיס של המין האחר, היא בעלת ***צורת ביניים***. רק לאחר חיתוך השמשייה בעלת צורת הביניים, מתפתחת שמשייה חדשה שצורתה כמו השמשייה של האצה "תורמת" הגרעין.

ב. הציעו הסבר לתופעות אלה.

8. להלן מספר משפטים. ציינו איזה מהם נכונים ואיזה שגויים, ואת המשפטים השגויים תקנו. שימו לב: ייתכן שחלק מהמשפט נכון, וחלק - שגוי.
א. ב-RNA מופיע הבסיס החנקני אורציל (U), ואילו ב-DNA מופיע תימין (T).
ב. הסוכר בנוקלאוטידים שב-DNA הוא דאוקסיריבוז, ואילו הסוכר בנוקלאוטידים שב-RNA הוא ריבוז.
ג. הנוקלאוטידים ב-DNA הם דו-גדיליים והנוקלאוטידים ב-RNA הם חד-גדיליים.
ד. השוני ברצף החומצות האמיניות בין חלבונים שונים הוא תוצאה של ההבדל ברצף הבסיסים שב-DNA המקודד לחלבונים אלה.
ה. בתהליך התרגום נוצרת מולקולת RNA על-פי דגם של מולקולת DNA.
ו. קודונים ב-RNA-שליח מתורגמים לחומצות אמיניות.
ז. בכל תא יש רק טיפוס אחד של מולקולות RNA-מוביל.
ח. בריבוזומים מתורגם רצף הבסיסים שב-RNA-שליח לרצף חומצות אמיניות.
ט. כל החלבונים נוצרים בכל התאים כל הזמן, אבל לא כל החלבונים פעילים בכל התאים כל הזמן.
י. כל מוטציה גורמת לשינוי בחלבון.

9. המוגלובין הוא חלבון בתאי הדם האדומים. **אנמיה חרמשית** היא מחלה תורשתית שבה שונה המוגלובין של אדם חולה מזה של אדם בריא בחומצה אמינית אחת.
זאת מפני שאדם בריא נבדל מאדם חולה ב - (בחרו את התשובה נכונה ביותר):
א. ב-DNA וב-mRNA
ב. ב-mRNA ובריבוזומים
ג. בשיטת הקשירה של ה-tRNA ל-mRNA
ד. בפעולת הריבוזומים וה-DNA.

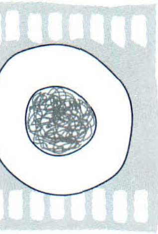
פרק ה

קרומים בתא

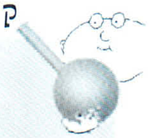
ה1. מבנה הקרום הביולוגי

כל תא חי תחום ב**קרום** (=מֶמְבְּרָנָה) דק ועדין. הקרום מפריד בין פנים התא לבין סביבתו החיצונית, אולם הוא אינו רק מעטפה: הקרום מקיים קשר דו-סטרי בין התא לסביבה. קשר זה כולל מעבר חומרים ומידע אל התא וממנו, ותגובות של התא לשינויים בסביבה החיצונית.

> עוביו של הקרום כ-7.5 ננומטר ($7.5x10^{-9}$ מטר); תארו לעצמכם:
> אילו הייתם מניחים 40,000 קרומים זה על-גבי זה,
> הייתם מקבלים עובי של דף אחד!



בדיקת **ההרכב הכימי** של קרומי תאים מראה, כי כל הקרומים בכל סוגי התאים בנויים משתי משפחות של חומרים: לִיפִּידִים וחלבונים (על חלבונים - ראו בפרק ג).



קצת כימיה

ליפידים

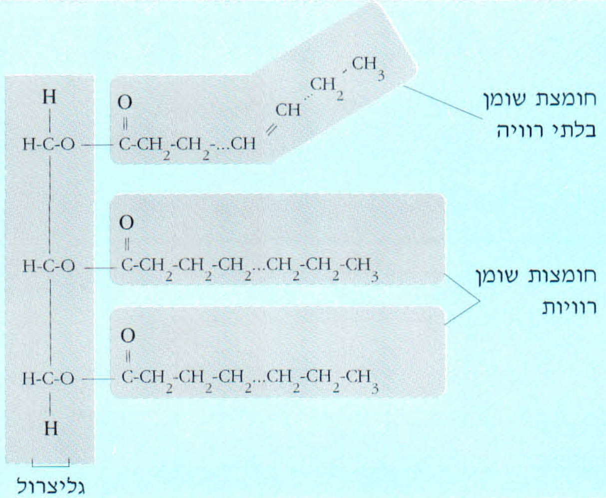
ליפידים הם תרכובות אורגניות, המאופיינים בהיותם הידרופוביים (hydro=מים, phobos=פחד; כלומר אינם מסיסים במים); זאת משום שמולקולות הליפידים אינן קוטביות (ראו נספח 1: רקע כימי – מסיסות).

הליפידים הם מרכיב מרכזי בקרומי תאים; כן הם משמשים בתא מקור למולקולות שמהן נבנות תרכובות פחמן, ולטווח ארוך – גם מקור להפקת אנרגיה.

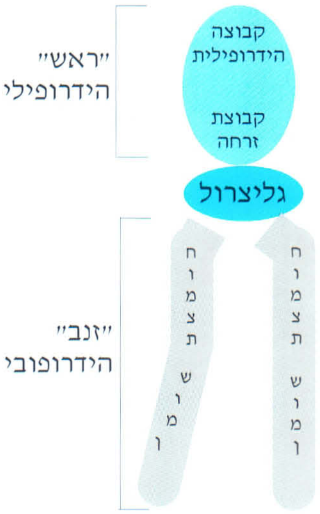
אבן בניין של ליפידים רבים היא מולקולה של **חומצת שומן** (איור ה1); חומצת שומן בנויה משרשרת ארוכה של אטומי פחמן, ובקצה - קבוצה קרבוקסילית (COOH). חומצות שומן שונות נבדלות זו מזו במספר אטומי הפחמן בשרשרת (הנפוצות שבהן מכילות בין 16 ל-18 אטומי פחמן), ובקשרים בין האטומים: חומצות שבהן אטומי הפחמן קשורים ביניהם בקשר יחיד הן חומצות שומן **רוויות**; חומצות שומן שבהן חלק מאטומי הפחמן קשורים ביניהם בקשרים כפולים הן חומצות שומן **בלתי רוויות**. קשרים כפולים אלה גורמים לכיפוף של השרשרת (איור ה1).

ב**שמנים** (oils) נמצאות חומצות שומן בלתי רוויות, והם נוזליים בטמפרטורת החדר. השמנים הם בדרך-כלל ממקור צמחי, כמו שמן הזית, אך לא תמיד: יש גם שמן דגים.
ב**שומנים** (fats) נמצאות חומצות שומן רוויות. השומנים לרוב מוצקים בטמפרטורת החדר ומקורם בדרך-כלל מבעלי-חיים. לדוגמה: שומן בקר.

טריגליצריד (tri=שלוש) הוא תרכובת ליפידית פשוטה, הנוצרת מהתקשרות בין שלוש חומצות שומן ל**גליצרול** (תרכובת תלת-פחמנית).



איור ה1:
מולקולת טריגליצריד
הטריגליצריד שבאיור מורכב מגליצרול, שתי חומצות שומן רוויות, וחומצת שומן אחת בלתי רוויה.



איור ה2:
דגם של מולקולת פוספוליפיד ב"ראש" ההידרופילי קבוצת זרחה. ה"זנב" ההידרופובי מורכב משתי שרשרות של חומצות שומן.

פוֹסְפוֹלִיפִידִים הם מולקולות ליפידיות הדומות למולקולות טריגליצריד, אך בהן קשורות לגליצרול רק ***שתי*** מולקולות של חומצות שומן, ובמקום חומצת השומן השלישית קשורה לגליצרול קבוצת זרחה (באנגלית - פוספט; זרחן=phosphorus). אל קבוצת הזרחה קשורה קבוצה כימית נוספת.

מולקולות שונות של פוספוליפידים נבדלות זו מזו בקבוצה הכימית הנוספת הקשורה לזרחה, ובחומצות השומן הקשורות לגליצרול. בדרך-כלל, אחת מחומצות השומן בפוספוליפיד היא רוויה, ואחת בלתי רוויה.

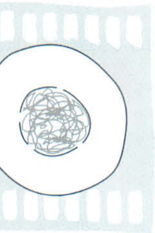
המולקולה מסודרת במרחב כך שקבוצת הזרחה, יחד עם הקבוצה הכימית שאליה היא קשורה, פונות לכיוון אחד, ומהוות את "ראש" הפוספוליפיד, ואילו חומצות השומן פונות אל הכיוון הנגדי ומהוות את "זנב" המולקולה (איור ה2).

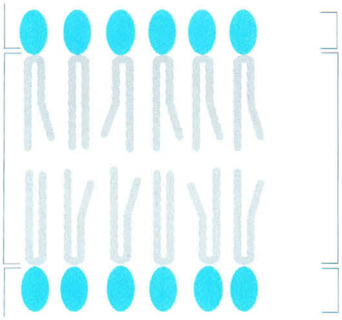
לשני חלקי מולקולת הפוספוליפיד מסיסות שונה במים: ה"ראש" הידרופילי (philein=לאהוב), כלומר מסיס במים, ואילו ה"זנב" הידרופובי, דהיינו אינו מסיס במים.

רוב רובם של הליפידים המרכיבים את הקרומים בתאים הם פוספוליפידים. בין הפוספוליפידים שבקרומים קיים מגוון רב הן בהרכב הראשים ההידרופיליים והן בהרכב הזנבות ההידרופוביים.

כיצד מאורגנים הפוספוליפידים והחלבונים בקרום?

המבנה הבסיסי של קרום התא הוא שתי שכבות חד-מולקולריות של פוספוליפידים (איור ה3). מולקולות הפוספוליפידים מסודרות בשתי השכבות "זנב אל זנב", כך שהזנבות (שהם בלתי מסיסים במים) מרכיבים את פנים הקרום, ואילו הראשים (המסיסים במים) פונים אל סביבה מימית: או כלפי חוץ התא, אל הסביבה המימית החוץ-תאית, או כלפי פנים התא, אל הציטופלסמה. כלומר: שתי השכבות יוצרות מעין כריך (סנדוויץ'), שחלקו הפנימי בלתי מסיס במים, ואילו חלקיו החיצוניים מסיסים במים. מכאן, ששתי השכבות הליפידיות של הקרום מפרידות בין שתי סביבות מימיות, זו שמחוץ לתא וזו שבתוך התא.





איור ה3: סידור דו-שכבתי של פוספוליפידים בקרום
הפוספליפידים מסודרים בקרום התא בשתי שכבות:
הראשים ההידרופיליים פונים אל תמיסות מימיות, זו שמחוץ לתא וזו שבתוכו, ואילו הזנבות ההידרופוביים פונים זה אל זה, ויוצרים סביבה שומנית פנימית בין שתי הסביבות המימיות.

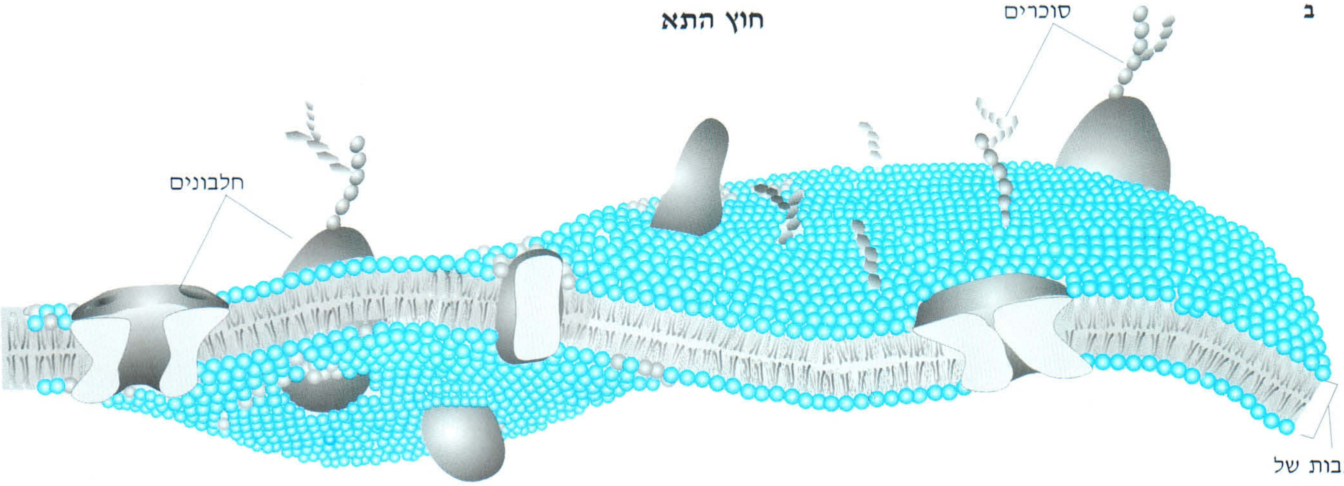
מולקולות החלבונים שבקרום נמצאות במבנה הדו-שכבתי בכמה צורות: משובצות בין מולקולות הפוספוליפידים, קשורות אל הליפידים וקשורות אל חלבונים אחרים בקרום (בצד הפונה אל חוץ התא או בצד הפונה אל פנים התא).
כמו-כן, קשורות מולקולות סוכר אל חלק גדול ממולקולות הליפידים והחלבונים בצד הקרום הפונה אל הסביבה החיצונית.

מהאמור לעיל ברור שהקרום הוא **לא-סימטרי**; שכבת הקרום הפונה כלפי חוץ התא שונה מן השכבה הפונה אל תוך התא, ובכל צד יש מרכיבים ומבנים אופייניים לו: מולקולות החלבון הבולטות מהקרום בצדו החיצוני שונות מאלה שבצד הפנימי, מולקולות סוכר קשורות לצד החיצוני של הקרום, ואף פיזור מולקולות הליפידים בקרום אינו סימטרי - סוגים שונים של פוספוליפידים נמצאים בכמויות שונות בכל אחת משתי השכבות של הקרום.

כפי שנראה בהמשך, חוסר סימטרייה זה חיוני לתפקודו של הקרום.

א

ב



איור ה4: קרום ביולוגי
א. צילום ממיקרוסקופ אלקטרונים של קטע מקרום תא דם אדום של אדם, הגדלה בערך פי 50,000
ב. מודל של מבנה קרום פוספוליפידי דו-שכבתי, שמשולבים בו חלבונים. בין החלבונים יש הקשורים אל הפוספוליפידים (בצדו החוץ-תאי של הקרום או בצדו התוך-תאי), ויש המשולבים בין מולקולות הפוספוליפידים. בחלקו החוץ-תאי של הקרום קשורים סוכרים אל חלק מהפוספוליפידים, וגם אל חלק מהחלבונים.

עוד על הקרום ניתן ללמוד מהניסוי הבא:

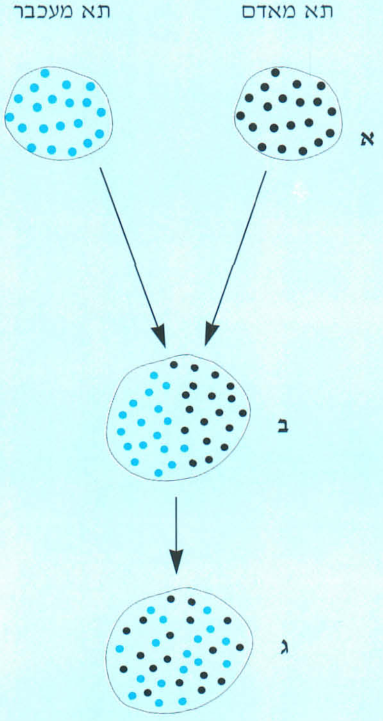
במעבדה גידלו שתי תרביות תאים. אחת מקורה באדם, והאחרת מקורה בעכבר.

א. בתאים שמקורם באדם, סומנו חלבונים ייחודיים לקרומים בחומרים זוהרים באדום; בתאים שמקורם בעכבר, סומנו חלבונים ייחודיים לקרומים בחומרים זוהרים בירוק.

בשיטה מיוחדת גרמו לאיחוי התאים, ובדקו את התאים המאוחים מבעד למיקרוסקופ.

ב. בתחילה, כל החלבונים הצבועים בירוק נמצאו במחצית אחת של קרום התא המאוחה, והחלבונים הצבועים באדום נמצאו במחצית האחרת.

ג. לאחר כארבעים דקות נמצא שהחלבונים השונים היו פזורים באופן אחיד, פחות או יותר, בכל קרום התא.



מה ניתן ללמוד מתוצאות הניסוי?

מהניסוי המתואר עולה, שחלבונים בקרום (או לפחות חלק מהם) אינם קבועים במקומם; מניסויים אחרים עלה שגם מקומם של הפוספוליפידים אינו קבוע, דהיינו: הקרום איננו מבנה קשיח. התברר שהקרום הוא בעל מרקם נוזלי למחצה שמתרחשת בו תנועה מתמדת; ניתן לדמות את הקרום למשקה שבו צפות קוביות קרח - שכבות הליפידים הן המשקה והחלבונים הם קוביות הקרח.

אחת מהתכונות של קרום פוספוליפידי הנמצא בסביבה מימית היא שמירה על רציפות: קרום שנקרע – מתאחה מיד. פיסות קרום קטנות יחסית מתאחות תוך התארגנות לכדורים-שלפוחיות, בדומה להתאחות בועות סבון. תכונה זו חשובה להבנת התפקוד של מערכות הקרומים בתא – כפי שנראה בהמשך.

הקרום הוא גם מעין "תעודת זהות" של התא: על פיו תאים מכירים (או לא מכירים) זה את זה.

חשבתם פעם כיצד תא זרע של צפרדע מזהה ביצית של צפרדע מבין מגוון מיני הביציות שבשלולית?
או על מה מתבססת ההיכרות בין תאי אותו אורגניזם - היכרות המאפשרת הבחנה בין "אני" ל"אחר", ויש לה השלכות מעשיות בהשתלת רקמות ואיברים?

התברר שההיכרות תלוייה בעיקר בסוכרים, הקשורים אל החלבונים ואל הליפידים בצד החיצוני של קרום התא, ומשמשים מעין דגלי סימון.

קרומים קיימים לא רק בהיקפו של התא אלא גם בתוכו: הרשת התוך-תאית, שעליה נלמד בהמשך, היא מערכת קרומים התופסת חלק ניכר מנפח התא. גם בהיקפם של אברונים, כמו הגרעין, המיטוכונדריון והכלורופלסט, יש קרומים.

לקרומים של תאים שונים באותו יצור, וכן לקרומים של אברונים שונים בתוך התא, יש הרכב ייחודי: הייחודיות מתבטאת בסוגי הפוספוליפידים, בסוגי החלבונים והסוכרים ובכמותם.

אולם על-אף השוני –

כל הקרומים הביולוגיים הם בעלי אותו מבנה בסיסי

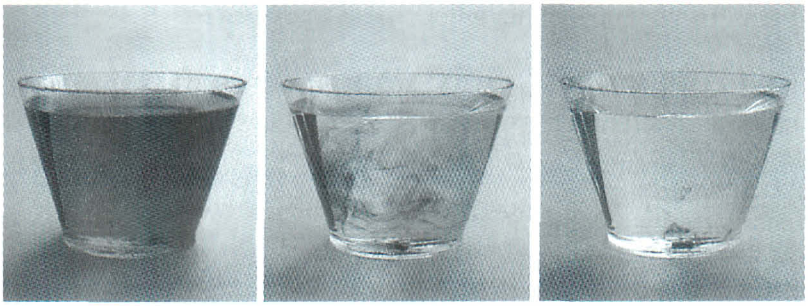
נעמוד עתה על האופן שבו הקרום מעורב בבקרה על תנועת חומרים **אל תוך** התאים והאברונים **ומתוכם** החוצה. כדי להבין פעילות זו נכיר תופעה פיזיקלית נפוצה: דיפוזיה.

ה.2 דיפוזיה ואוסמוזה

גוש סוכר המוכנס לכוס מים מתמוסס וממתיק בסופו של דבר את כל המים שבכוס, גם אם לא מערבבים אותם כלל. תופעה זו היא תוצאה של תהליך **דִיפוּזְיָה** (לטינית: dif=הלאה, הרחק; fus=לשפוך, לצקת. בעברית – פִּעְפּוּעַ). בתהליך זה מולקולות נעות לכל הכיוונים, ותוצאתו היא פיזור אקראי של המולקולות בנפח הנתון. הדיפוזיה היא תהליך ספונטני, כלומר הוא אינו דורש השקעת אנרגיה.

כיצד מתרחשת דיפוזיה?
מולקולות גז ונוזל נמצאות בתנועה מתמדת. המולקולות, הנעות באקראי, מתנגשות זו בזו, והתנגשויות אלה גורמות לשינוי בכיוון תנועתן של המולקולות ולפיזורן במרחב.

נניח מצב התחלתי שבו יש הבדל בריכוז של חומר מסוים בנפח נתון. היות שהמולקולות נעות באקראי כל הזמן לכל הכיוונים, כעבור זמן-מה יהיה פיזור המולקולות אחיד, פחות או יותר, בכל הנפח. בהשוואה למצב המוצא ניתן לתאר את התוצאה כתנועה מאזור שבו יש ריכוז גבוה של החומר לאזורים שבהם ריכוז החומר נמוך.



גבישים של חומר צבע הוכנסו זה עתה לכוס מים. | הצבע מתפזר במים באופן אקראי. | לאחר זמן הצבע מפוזר בכל הנפח באופן אחיד.

איור ה5: דיפוזיה
מולקולות נעות בתנועה אקראית, והתוצאה היא תנועה מאזור שבו ריכוז המולקולות גבוה אל אזור שבו ריכוזן נמוך.

הבדל בריכוז חומר לאורך מרחק נקרא **מפל ריכוזים**. ניתן אפוא לסכם את תהליך הדיפוזיה כתנועה "נטו" בהתאם למפל הריכוזים (או: במורד מפל הריכוזים).

?

הבהירו לעצמכם: האם לאחר שהמולקולות התפזרו באופן אחיד בנפח, תחדל תנועתן?

התשובה על כך היא כמובן שהתנועה תמשיך לכל הכיוונים, אך לא תגרום למפל ריכוזים, כלומר הפיזור יישאר אחיד.
שימו לב שהתנועה בתמיסה היא הן של מולקולות המומס והן של מולקולות הממס.

תהליך ה**אוֹסְמוֹזָה** (osmos=דחף) הוא מקרה פרטי של דיפוזיה, שבו נעות מולקולות **מים** בין שתי תמיסות דרך קרום בעל **חדירות בררנית**. תנועת המים "נטו" היא מתמיסה בה ריכוזם גבוה לתמיסה בה ריכוזם נמוך.
בררנות הקרום, במקרה זה, מתבטאת בכך שמולקולות המים יכולות לעבור דרכו, אך לא המומסים (או לא כל המומסים).
תהליכי אוסמוזה נפוצים בעולם החי; קרום התא, המפריד בין הסביבה התוך-תאית לסביבה החוץ-תאית, הוא קרום בעל חדירות בררנית (שרק חלק מהמומסים עוברים דרכו), וכאלה הם גם קרומי האברונים, המפרידים בין סביבות שונות.

כדאי לשים לב שריכוז המים הוא מעין תמונה משלימה לריכוז המומסים שבו:
כשריכוז המים גבוה - ריכוז המומסים נמוך, ולהפך.

כאשר דנים בריכוזי תמיסות ניתן להתייחס לריכוזו של המים (הממס), אולם בדרך-כלל ההתייחסות היא לריכוז המומסים שבתמיסות. לפיכך ניתן לתאר את תנועת המים, כיוונה ומהירותה, כנקבעת על-פי ריכוזם של המומסים במים, שהקרום אינו מאפשר את מעברם.

שלושה מונחים משמשים לתיאור היחס בין ריכוז מומסים של שתי תמיסות:

- **תמיסה אִיזוֹטוֹנִית** (isos=שווה; tonos=מתח) היא תמיסה שריכוז המומסים בה **שווה** לריכוזם בתמיסה האחרת.
- **תמיסה הִיפֶּרְטוֹנִית** (hyper=מעל) היא תמיסה שריכוז המומסים בה **גבוה** יחסית לריכוזם בתמיסה האחרת.
- **תמיסה הִיפּוֹטוֹנִית** (hypo=מתחת) היא תמיסה שריכוז המומסים בה **נמוך** יחסית לריכוזם בתמיסה האחרת.

אפשר להתייחס אל ריכוז המומסים בתא כאל ריכוז המומסים "בתמיסה האחרת" - ולבצע ניסוי כמתואר להלן.

בניסוי תוכננו שלוש מערכות:

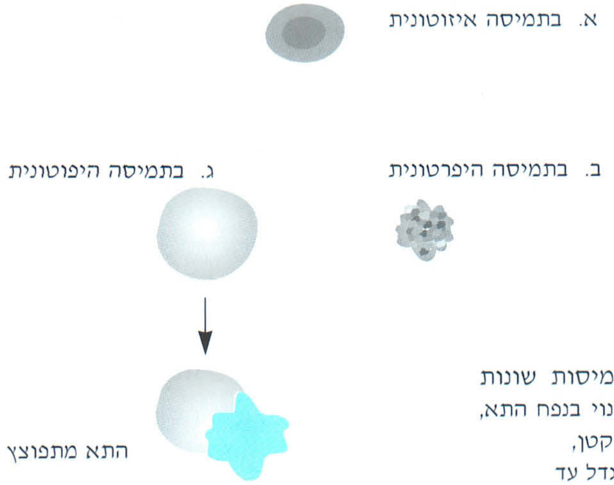
באחת – תאי דם אדומים הוכנסו לתמיסה איזוטונית.

בשנייה – תאי דם אדומים הוכנסו לתמיסה היפרטונית.

בשלישית – תאי דם אדומים הוכנסו לתמיסה היפוטונית.

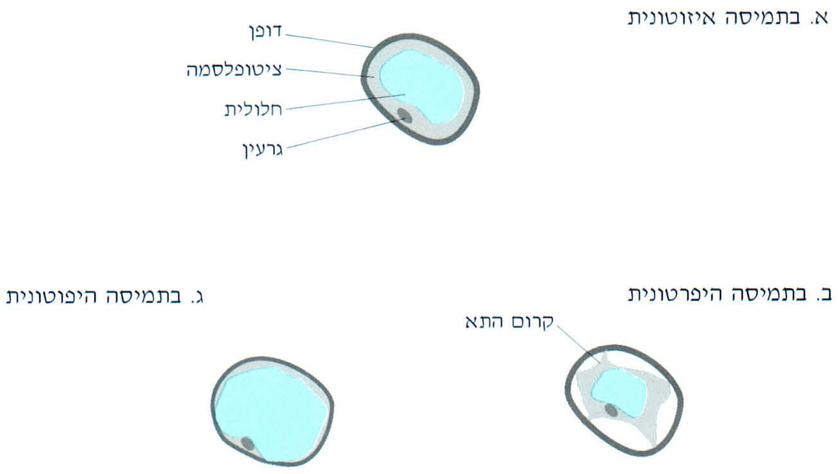
המומסים שבתמיסות אינם עוברים דרך קרום התא.
מה צפוי שיקרה לנפח התאים בכל אחת מהמערכות?

בניסוי המתואר, הקרום אינו חדיר למומסים אך חדיר למים. היות שתנועת המים היא מריכוז הגבוה לריכוז הנמוך צפוי שתתקבלנה התוצאות הבאות (איור ה6):
בתמיסה האיזוטונית כמות המים שתחדור אל התא תהיה שווה לכמות המים שתצא מהתא, ולפיכך לא יחול שינוי בנפח התא.
בתמיסה ההיפרטונית יֵצאו מים מתא הדם אל התמיסה החיצונית בכמות גדולה יותר מהכמות שתחדור מהחוץ אל התא, ולכן נפח התא יקטן.
בתמיסה ההיפוטונית יחדרו מים מהתמיסה החיצונית אל התא בכמות גדולה יותר מזו שתצא מהתא החוצה, ולכן נפח התא יגדל. ההגדלה בנפח יכולה להיות כה רבה, עד כדי התפוצצות התא.



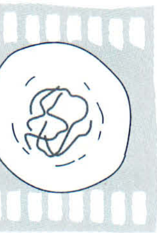
איור ה6: תאי דם אדומים בתמיסות שונות
א. בתמיסה איזוטונית - אין כל שינוי בנפח התא,
ב. בתמיסה היפרטונית - נפח התא קטן,
ג. בתמיסה היפוטונית - נפח התא גדל עד התפוצצות.

באיור ה7 מתוארות תוצאות של ניסוי מקביל, שבו נבדקו תאים שמקורם בשורש.



איור ה7: תאים משורש בתמיסות שונות
א. בתמיסה איזוטונית - אין כל שינוי בנפח התא,
ב. בתמיסה היפרטונית - נפח החלולית[1] והציטופלסמה קטנים, וקרום התא מתרחק מהדופן,
ג. בתמיסה היפוטונית - נפח החלולית והציטופלסמה גדלים עד גבול מתיחת הדופן.

הַשוו בין איור ה6 (המתאר תא מבעל-חיים) לבין איור ה7 (המתאר תא מצמח):
שימו לב: באיור ה6 מוצגים ***פני*** תאי דם אדומים, ואילו באיור ה7 מתואר המתרחש ***בתוך*** תא שורש.
תנועת המים (נטו) אל התאים ומתוכם מתרחשת בהתאם למפל הריכוזים ***בשני*** סוגי התאים;
אולם בתאי צמחים קיימת **דופן** קשיחה (ראו איור ב2) החדירה למים ולמומסים.
לפיכך בתמיסה ***היפוטונית:***
הגדלת נפח תאי בעל-חיים בשל חדירת מים גורמת להתפוצצות התא; בתאי צמח הגדלת נפח כזו איננה גורמת להתפוצצות, משום שהדופן הקשיחה מונעת זאת.



כמו-כן אפשר לראות שבתאי צמח הנמצאים בתמיסה ***היפרטונית,*** הקטנת נפח החלולית והציטופלסמה (בגלל יציאת מים) גורמת להתרחקות קרום התא מהדופן.

[1] חלולית היא אברון ייחודי לתאי צמח. עוד על חלולית ודופן בתאי צמחים – ראו פרק ח.

ה3. הקרום כגבול

כפי שציינו, בתהליכי הדיפוזיה והאוסמוזה חומר עובר ממקום שבו ריכוזו גבוה אל מקום שבו ריכוזו נמוך. דהיינו, תנועתו היא במורד מפל הריכוזים. העברת חומרים במורד מפל הריכוזים נקראת **העברה סבילה**, ולקיומה לא דרושה השקעת אנרגיה.

אולם אחד המאפיינים העיקריים של תא חי הוא **הומאוסטזיס**: שמירה על סביבה פנימית ייחודית השונה מהסביבה החיצונית.

קיום סביבה פנימית ייחודית מותנה במעבר חומרים פנימה והחוצה גם ***בניגוד*** למפל הריכוזים (כלומר: במעלה מפל הריכוזים). תא קולט חומר מן הסביבה אף-על-פי שריכוזו של אותו חומר בתא גבוה מזה שבסביבתו, וכן להפך: לעתים מופרשים חומרים מן התא החוצה, אף-על-פי שריכוזם מחוץ לתא גבוה מזה שבתוך התא. העברה כזו, הנעשית בניגוד למפל הריכוזים, נקראת **העברה פעילה**, ולקיומה ***מושקעת אנרגיה.*** לפיכך רק כאשר מתקיימים בתא תהליכים המספקים אנרגיה, יכולים להתקיים בו תהליכי העברה פעילה.

ידוע, ועוד נלמד על כך בהמשך, שתהליכי הנשימה התאית הם המספקים את האנרגיה לתאים. כאשר נפסקת הנשימה נפסקים, בין היתר, גם תהליכי ההעברה הפעילה, מופרעת קליטת החומרים החיוניים לתאים ונמנעת הוצאת חומרי הפסולת החוצה.

מהאמור לעיל נובע שהעברה פעילה היא **כיוונית**: חומרים מסוימים חודרים לתא, וחומרים אחרים יוצאים ממנו. פעילותו של הקרום בצורה שונה כלפי חוץ וכלפי פנים התא היא תוצאה של מבנהו ה**לא סימטרי**: כפי שהזכרנו קודם, צדו החיצוני של הקרום שונה מצדו הפנימי, והשוני במבנה מתבטא בשוני בתפקוד.

באמצעות הקרומים, שהם בעלי **חדירות בררנית**, נעשה ויסות של תנועת חומרים אל התא ואל האברונים, ומתוכם החוצה.

חשוב לדעת:

הודות לחדירות הבררנית של קרום התא קיים הבדל בין פיזור יונים בסביבה הפנימית לבין פיזורם בסביבה החיצונית של התא. הפיזור השונה של היונים יוצר **מתח חשמלי** בין שני צידי הקרום, עקב הפרש ***במטענים החשמליים*** בין שתי הסביבות.

תהליכים תאיים רבים מבוקרים על-ידי ***שינויים*** החלים במתח חשמלי זה; בין תהליכים אלה נכללות פעילויות מערכת העצבים ומערכת השרירים בבעלי-חיים רב-תאיים.

כיצד מתפקדים הקרומים כגבול בררני?
מעבר חומר בהעברה סבילה בתווך כלשהו תלוי במידת ההתמוססות של החומר בתווך זה; מסיסותו של חומר בתווך מסוים תלויה בהרכבו הכימי (ראו נספח 1: רקע כימי – מסיסות).
כאמור, בתוך התא ומחוצה לו מצויה סביבה מימית, ואילו הקרום הוא בעיקרו תווך ליפידי.
החלק הליפידי (ההידרופובי) של הקרום מאפשר למולקולות קטנות ובלתי טעונות, המסיסות בליפידים, לעבור בדיפוזיה מצדו האחד של הקרום אל צדו האחר. כך, כלומר בהעברה סבילה, עוברים חומרים כמו חמצן ופחמן דו-חמצני.

וכיצד חודרות לתא מולקולות שאינן מסיסות בליפידים?
התברר שלמולקולות רבות יש דרכי מעבר ייחודיות, הקשורות עם חלבוני הקרום.

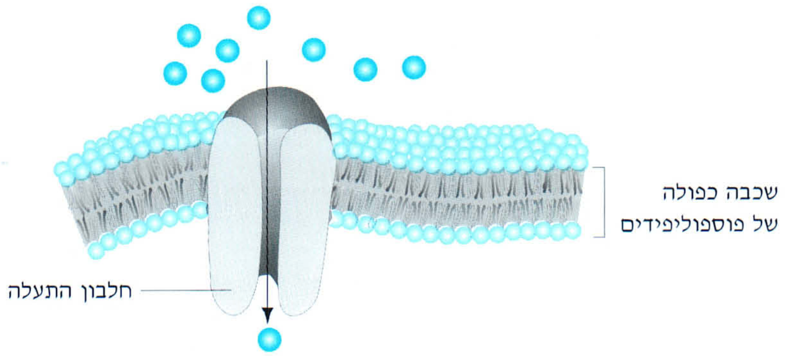
ה4. תעלות, נשאים ומשאבות

חומרים רבים אינם עוברים דרך הפוספוליפידים שבקרום, אך עוברים בדרכים אחרות, הן בהעברה סבילה והן בהעברה פעילה. מעברם של יונים ושל מולקולות קוטביות שונות נעשה באמצעות חלבונים ייחודיים המשובצים בקרום ועוברים לרוחבו. חלבונים אלה נחלקים לשתי קבוצות:

- קבוצת ה**תעלות**,
- קבוצת ה**נשאים**, הכוללת גם **משאבות**.

תעלות הם מבנים חלבוניים היוצרים מעין צינור חלבוני בתווך הפוספוליפידי, מצד אחד של הקרום אל צדו האחר. התעלה יוצרת רצף הידרופילי בין הסביבה החוץ-תאית לסביבה התוך-תאית, ומאפשרת מעבר של חומרים המסיסים במים ללא מגע עם הסביבה הפוספוליפידית השומנית[2] (איור ה8).

[2] התברר שאחת הדרכים שבה יכולים לחדור מים לתאים היא באמצעות תעלות ייחודיות להם, אם כי מים חודרים גם בדיפוזיה דרך התווך השומני.



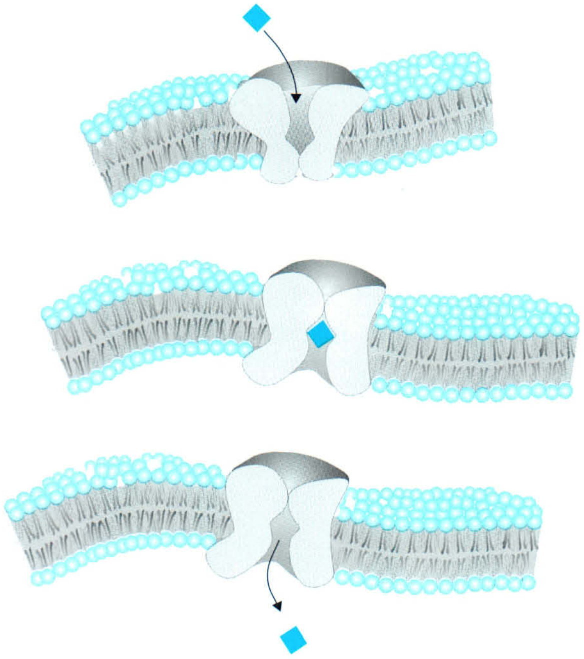
איור ה8: מעבר חומרים דרך תעלה בקרום
מומס המתאים למעבר דרך תעלה (באיור - עיגולים) עובר בה במורד מפל הריכוזים שלו.

יש תעלות שפתחי הכניסה והיציאה שלהן רחבים (בממדים מולקולריים), ויש תעלות שפתחיהן צרים. כמו-כן, תעלות רבות טעונות במטען חשמלי (חיובי או שלילי). מכאן שמעבר של מומס דרך תעלה תלוי בשני גורמים: בגודל פתח התעלה ובמטענה החשמלי. בהתאם לכך, כל תעלה מאפשרת מעבר של מומס אחד, או אפילו של כמה מומסים הדומים ביניהם בגודלם ובמטענם החשמלי.
מומס (יון, או חומר אחר) עובר בתעלה במורד מפל הריכוזים שלו. כלומר, העברת מומסים דרך תעלות היא סבילה - אינה צורכת אנרגיה.

בחלק מהתעלות יש מנגנונים המבקרים את פתיחת התעלה ואת סגירתה. הבקרה נעשית באמצעות שינוי במבנה המרחבי של החלבון הבונה את התעלה, שינוי שיכול לנבוע מקישור מולקולה מסוימת אל חלקה החיצוני של התעלה, או משינוי המתח החשמלי בסביבת התעלה. שינוי כזה קורה, לדוגמה, בתאי עצב: באזור מוגדר בקרום תאי עצב מצויות תעלות ליוני סידן, הנפתחות בתגובה לשינוי במתח החשמלי של קרום תא העצב. עם פתיחת התעלות נכנס אל הציטופלסמה שטף של יוני סידן מהסביבה החוץ-תאית, שבה ריכוז הסידן גבוה.

הנשאים גם הם חלבונים הקשורים בהעברת חומרים. שלא כמו התעלות, כל נשא נקשר למולקולה או ליון מסוימים (יש גם נשאים לשני יונים). עם התקשרות הנשא אל המולקולה המתאימה חלים שינויים במבנהו המרחבי, והודות לשינויים אלה המולקולה עוברת לעברו האחר של הקרום[3]. לאחר השתחררות המולקולה מן הנשא, הנשא חוזר לצורתו המקורית והוא חופשי להתקשר למולקולה נוספת, ו"להעביר" גם אותה דרך הקרום (איור ה9).

[3] להזכירכם: התופעה של שינוי מבני בעקבות התקשרות למולקולה אחרת מוכרת גם בהתקשרות מולקולת סובסטרט לאנזים.



א

ב

ג

איור ה9: מעבר חומרים דרך קרום באמצעות נשאים
יש התאמה מרחבית בין הנשא לבין המולקולה העוברת בעזרתו (באיור – ריבוע) דרך הקרום.
התקשרות המולקולה לנשא (א) גורמת לשינוי מרחבי בנשא (ב), והודות לכך עוברת המולקולה אל העבר האחר של הקרום (ג).

מעבר של חומרים דרך הקרום באמצעות נשאים נעשה באחת משתי דרכים:

א. ***במורד*** מפל הריכוזים; זוהי, כאמור, העברה סבילה שאינה כרוכה בהשקעת אנרגיה.

ב. ***בניגוד*** למפל הריכוזים; זוהי העברה פעילה המצריכה השקעת אנרגיה.

חלק מהנשאים המעבירים חומרים בניגוד למפל הריכוזים - כלומר שלצורך פעילותם נדרשת אנרגיה - נקראים **משאבות**.

דוגמה חשובה ומעניינת להעברה פעילה בתא היא **משאבת נתרן-אשלגן**: ריכוז יוני אשלגן בתוך תאים גבוה בדרך-כלל (פי 10-20) מריכוזם מחוץ לתא, ואילו הריכוז של יוני נתרן גבוה מחוץ לתא (גם כאן, פי 10-20) מריכוזם בתוך התא. הבדלי ריכוזים אלה נשמרים בעזרת נשא מיוחד, המכונה משאבת נתרן-אשלגן. משאבה זו מצויה בקרומיהם של כל תאי בעלי-החיים, והיא מעבירה נתרן מתוך התא החוצה ואשלגן מן הסביבה החיצונית פנימה.

מעניין - אותו נשא מתפקד בהעברת שני יונים שונים, ובשני כיוונים שונים!

שני תהליכי העברה אלה מבוצעים בניגוד למפל הריכוזים, ולשם קיומם מושקע **כשליש** מן האנרגיה המופקת בתאים!

השוואה בין תעלות לנשאים: ייחודיות ומהירות

הבקרה על מעבר חומרים דרך תעלות נעשית, כאמור, גם על-פי הגודל. ככל שפתחי הכניסה והיציאה של התעלות רחבים יותר, יותר מולקולות שונות תוכלנה לעבור דרכן. לדוגמה: בתעלות שעוברות דרכן חומצות אמיניות גדולות, עוברות גם חומצות אמיניות קטנות יותר (בעלות אותו מטען חשמלי). כלומר, התעלות הן ייחודיות - אך טווח הייחודיות שלהן רחב באופן יחסי.

לעומת זאת ייחודיות הנשאים רבה הרבה יותר: נשאים רבים מתאימים להעברת מולקולות מסוג אחד בלבד!

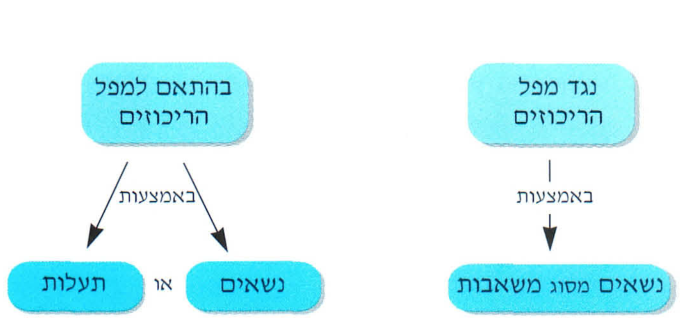
ההבדל בטווח הייחודיות הוא תוצאה של השוני במנגנון ההעברה בין תעלות לנשאים: דרך תעלות עוברים חומרים כמו דרך צינור, בעוד שמעבר באמצעות נשא כרוך בהתקשרות ייחודית בין החומר לנשא ובשינוי במבנה המרחבי של הנשא.

מנגנון ההעברה השונה גורם גם להבדל במהירות המעבר:
מעבר חומרים באמצעות נשאים אִטי ממעבר דרך תעלות; בעוד שדרך תעלה יכולים לעבור יותר ממיליון יונים בשניה, מעבר דרך נשאים אִטי בערך פי אלף!

מעניין לציין כי יש חומרים שבתנאים שונים עוברים דרך הקרום בדרכים שונות ובכיוונים שונים של מפל הריכוזים. כאלה הם, לדוגמה, יוני הנתרן, העוברים מהתא החוצה בהעברה פעילה על-ידי נשא מסוג משאבה (משאבת נתרן-אשלגן, שהוזכרה קודם לכן), אך בתנאים מסוימים הם נכנסים אל התא במורד מפל הריכוזים, באמצעות תעלה ייחודית.

סיכום ביניים:

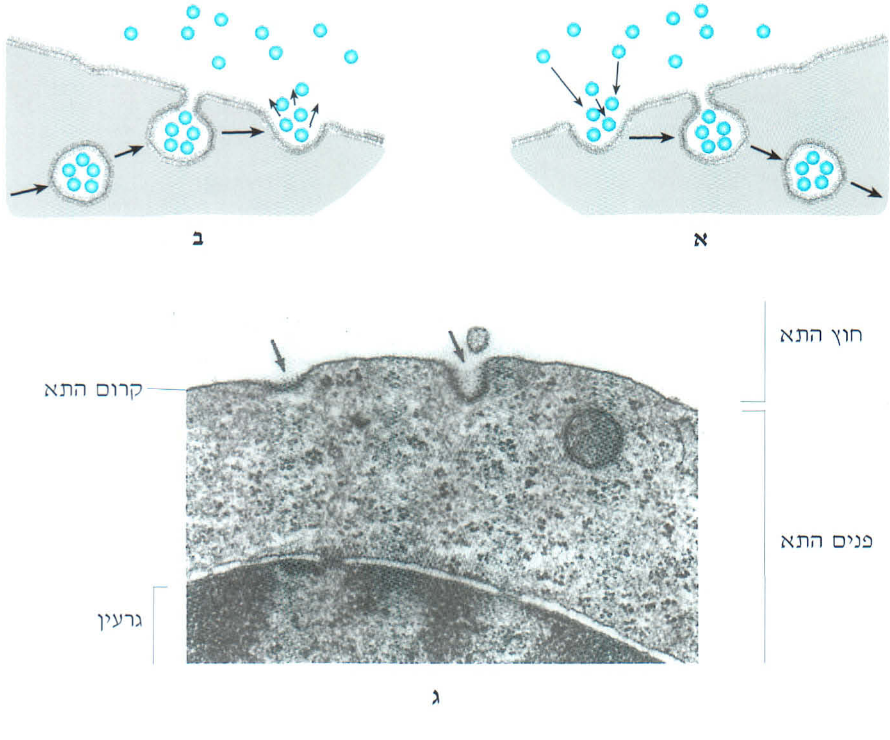
מעבר מולקולות שאינן מסיסות בליפידים דרך קרום התא



ה5. אֶנְדוֹצִיטוֹזָה וְאֶקְסוֹצִיטוֹזָה

מולקולות גדולות, כמו רבות ממולקולות החלבונים, אינן יכולות לעבור דרך קרום התא בדרכים שהכרנו עד עכשיו. אף-על-פי-כן יש חלבונים גדולים, וכן חלקיקים או טיפות נוזל, החודרים בשלמותם לתוך תאים. מעבר זה נעשה בתהליך הנקרא **אֶנְדוֹצִיטוֹזָה** (endon=בתוך, kytos=תא). בתהליך זה נוצרת על-פני התא גומה, ההולכת ומעמיקה לתוך התא, וכולאת בתוכה נוזל וחלקיקים מהסביבה החיצונית של התא. שולי הגומה נסגרים לשלפוחית וניתקים מקרום התא. התוצאה היא שהשלפוחית שבתוך התא מכילה בתוכה נוזל וחומרים שקודם לכן היו מחוצה לו (איור ה10).

פעילות דומה יכולה להתרחש גם בכיוון ההפוך ולהביא להוצאת חומרים אל מחוץ לתא, ואז היא נקראת **אֶקְסוֹצִיטוֹזָה** (exo=בחוץ).



איור ה10: אנדוציטוזה ואקסוציטוזה

א. אנדוציטוזה: בקרום התא נוצרת התקפלות, ובה חומרים מן הסביבה החיצונית. ההתקפלות הופכת לשלפוחית הניתקת מן הקרום. הקרום מתאחה, והשלפוחית ותכולתה נמצאים בתוך התא.

ב. אקסוציטוזה: שלפוחית תוך-תאית מתאחה עם קרום התא, ותכולתה מופרשת אל מחוץ לתא.

ג. צילום במיקרוסקופ אלקטרונים, הגדלה בערך פי 45,000

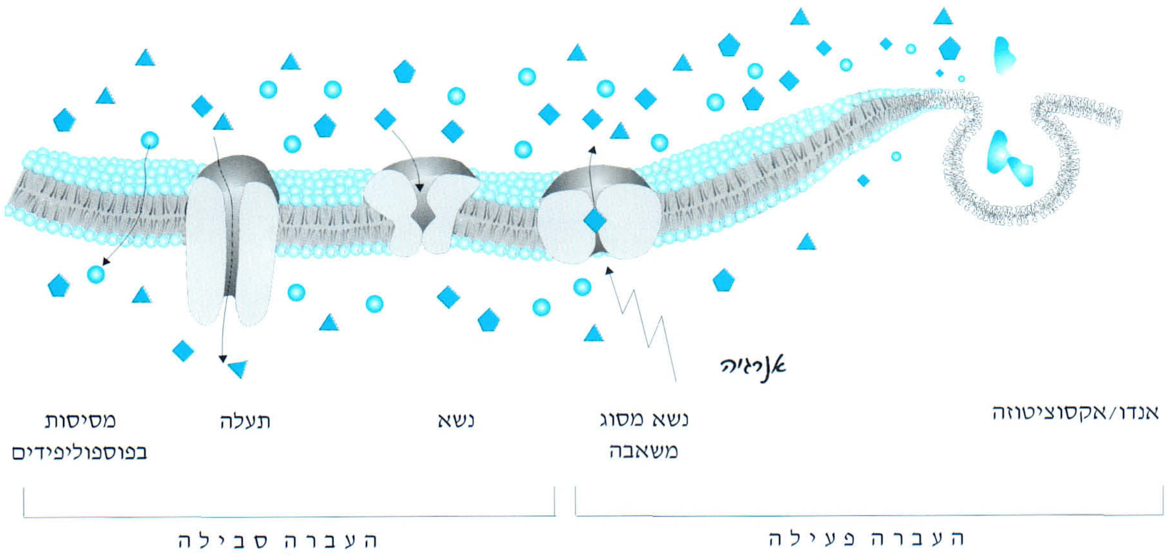
על-סמך תמונה זו לא ניתן לקבוע אם בהתקפלויות קרום התא (המסומנות בחצים) מתרחשת אנדוציטוזה או אקזוציטוזה.

פָּאגוֹצִיטוֹזָה (phago=לאכול) היא צורה של אנדוציטוזה, שבה החלקיק החודר לתא הוא גדול במיוחד. כך נקרא התהליך שבו האמבה ויצורים חד-תאיים אחרים "בולעים" חלקיקי מזון, וכן התהליך שבו תאי דם לבנים "בולעים" תאים מתים או חיידקים שחדרו לגוף (ו"בליעה" זו מונעת את פעולתם המזיקה).

מה קורה לקרום התא בתהליכי האנדו/אקסוציטוזה?
עם סגירת השלפוחית וניתוקה מקרום התא - קרום התא מתאחה מיד. התאחות מידית זו נובעת מאופי הקרום הליפידי, שהוזכר כבר: כאשר הקרום נקרע הוא "מתקן" את עצמו. המנגנון של ניתוק פיסת קרום וסגירתה לשלפוחית המכילה תכולה כלשהי, ואיחוי קרום השלפוחית עם קרום אחר, הוא מנגנון רווח בהעברת חומרים בין אברונים שונים בתוך התא, כפי שנראה בהמשך.
כמו ההעברה הפעילה באמצעות נשאים, גם אנדוציטוזה, אקסוציטוזה ופאגוציטוזה הם תהליכים צורכי אנרגיה.

סיכום ביניים:

דרכי מעבר של חומרים דרך קרומים בתא



איור ה11:
מעבר של חומרים דרך קרומים בתא

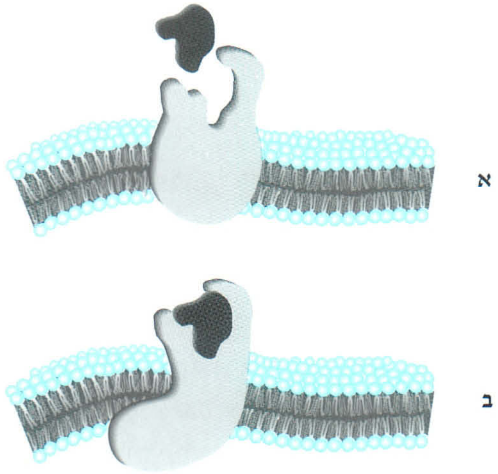
? ציינו באילו מהדרכים המתוארות באיור ה11 עשוי לעבור כל אחד מהחומרים: חמצן, יוני נתרן, חלבון גדול, יוני סידן, פחמן דו-חמצני, יוני אשלגן, חומצות אמיניות.

ה.6 התא מגיב גם לחומרים שאינם חודרים לתוכו

תגובת התא לסביבתו אינה מותנית תמיד בחדירתם של חומרים לתוכו: יש חומרים שתאים מגיבים להם גם אם לא חדרו לתוך התא. די שחומר כזה יבוא במגע עם קרום התא כדי שבתוך התא יתחוללו שינויים.

הבסיס להתנהגות זו הוא חלבונים הנמצאים בקרומי התאים, המתקשרים התקשרות ייחודית למרכיבים בסביבה החוץ-תאית. חלבונים אלה נקראים **קוֹלְטָנִים** (וגם רֶצֶפְּטוֹרִים, recipere=לקבל) (איור ה12). קולטנים בקרומים הם מאפיין חשוב של תאים. כך לדוגמה יש תאים שיש בקרומיהם קולטנים להורמונים שונים.

הקשירה לקולטן, המבוססת על התאמה מבנית בין מולקולת הקולטן לבין מולקולת החומר הנקשר[4], גורמת לשינוי מרחבי בקולטן, שכתוצאה ממנו מתעוררת תגובה בתוך התא.



איור ה12:
התקשרות מולקולה לקולטן
א. מרכיב ייחודי נקשר לחלקו החוץ-תאי של קולטן.
ב. בעקבות הקשירה חלים שינויים בצורתו המרחבית של הקולטן, וכתוצאה מכך מתרחשת תגובה תוך-תאית.

לדוגמה: התקשרותו של ההורמון אַדְרֶנָלִין לחלקם החוץ-תאי של קולטנים בתאי שריר הלב גורמת לשרשרת אירועים תוך-תאיים, בכללם הפעלת אנזימים, והתוצאה היא התכווצותו של תא השריר.

[4] שוב: התאמה מבנית, כפי שהכרנו בהתקשרות אנזים-סובסטרט, ובהתקשרות נשא לחומר המועבר

ה7. רשת תוך-תאית, מערכות גולג'י וליזוזומים

עד עתה התמקדנו בקרום המקיף את התא, אולם כפי שהזכרנו, בתא יש קרומים רבים נוספים. המבנה הכללי של כל קרומי התא הוא אמנם אחיד, אך כאמור יש הבדלים בין הקרומים השונים הן בהרכב הפוספוליפידים והן בהרכב החלבונים.
האחידות מצד אחד, והשוני מהצד האחר, הם הבסיס לתפקוד המתואם של האברונים הקרומיים בתא. ניתן לראות בקרומים בתא מערכת אחת מסועפת של צינוריות-שלפוחיות קרומיות, ועם זאת – לקרום של כל אברון ייחוד משלו.

השלפוחיות השונות - שחלקן הכרנו, חלקן עוד נכיר וחלקן לא יפורטו בספר זה - יכולות להעביר תוכן מהאחת לזולתה על-ידי ניתוק ואיחוי קטעי קרומים (להזכירכם: האיחוי הוא אחת מתכונות הקרום). כך מתקבלים מסלולי הובלה תוך-תאיים (איור ה17).

נתמקד בשלושה מרכיבים של מערכת השלפוחיות הקרומיות: הרשת התוך-תאית, מערכות גולג'י והליזוזומים.

הרשת התוך- תאית

בתוך הציטופלסמה נמצאת מערכת מסועפת של קרומים, היוצרת רשת של צינוריות שטוחות שקוטרן 60-20 ננומטר[5], המקיפה את הגרעין ופרושה בציטופלסמה (איור ה13). מערכת זו נקראת **רשת תוך-תאית** (רֶטִיקוּלוּם אֶנְדוֹפְּלַסְמִי Endoplasmic Reticulum, reticulum=רשת קטנה; endo=בפנים; plasma=בעל צורה).

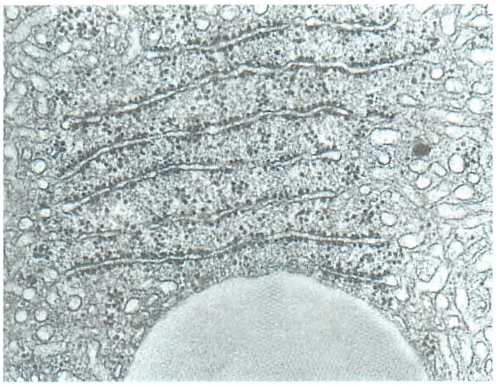
בפרק ד צוין שגרעין התא מוקף בשני קרומים. קרומים אלה הם המשכיים עם הרשת התוך-תאית.

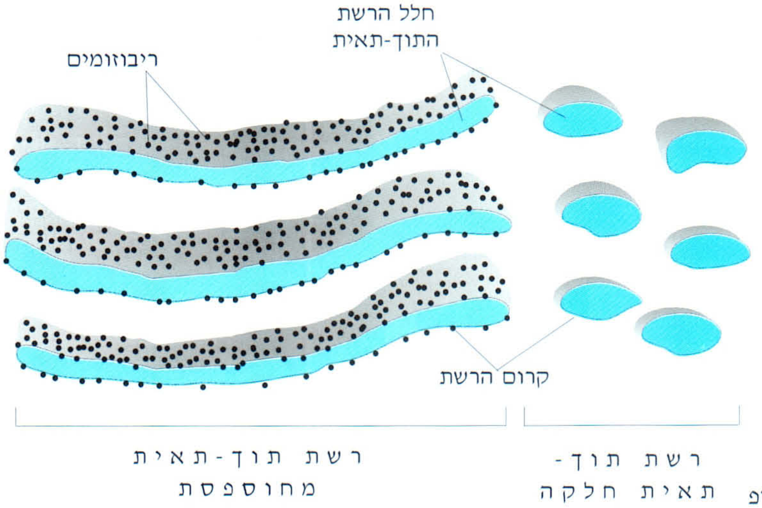
לא ניתן לראות את הרשת התוך-תאית מבעד למיקרוסקופ האור, אך במיקרוסקופ אלקטרונים אפשר להבחין שבחלק מאזורי הרשת מצויים על שטח הפנים שלה מעין כדורים קטנים. בשל כך נקראת הרשת באזורים אלה **רשת תוך-תאית מחוספסת**. כדורים אלה הם ריבוזומים. הצינוריות של הרשת התוך-תאית המחוספסת פחוסות, ונראות כיריעות הפרושות בציטופלסמה. האזורים ברשת התוך-תאית החשופים מריבוזומים נקראים **רשת תוך-תאית חלקה**, ובהם הרשת נראית כצינוריות מסועפות.

פינת הפרוקריוט

קרום התא בפרוקריוטים זהה במבנהו הבסיסי לקרומים שבתאים איקריוטים.
כאמור, בחיידקים אין אברונים תוך-תאיים מוקפי קרום. חלק מהתהליכים המתרחשים בתאים איקריוטים באברונים, מתבצעים בתאים פרוקריוטים בציטופלסמה או במבנים הקשורים לקרום התא.

[5] להזכירכם: ננומטר 10^{-9} המטר. ראו טבלה ב11





איור ה13: רשת תוך-תאית
ימין: חתך בתא מאשך של יונק. צילום במיקרוסקופ אלקטרונים חודר, הגדלה בערך פי 25,000
שמאל: תרשים

על הריבוזומים הצמודים לרשת התוך-תאית המחוספסת (כמו על הריבוזומים ה״חופשיים״ בציטופלסמה) מתורגמות מולקולות של RNA-שליח לשרשרות של חומצות אמיניות – חלבונים (ראו פרק ד). חלבונים אלה (שלא כמו החלבונים הנבנים על הריבוזומים ה״חופשיים״) נבנים אל תוך חלל הרשת התוך-תאית, שם הם עוברים עיבודים (כמו הוספת קבוצות כימיות), ומובלים אל מקום פעילותם בתא.

עוד על הריבוזומים:

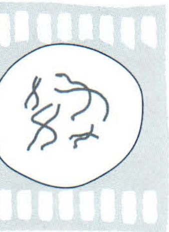
האם יש הבדל בין הריבוזומים הצמודים לרשת תוך-תאית לבין הריבוזומים ה״חופשיים״ בציטופלסמה?

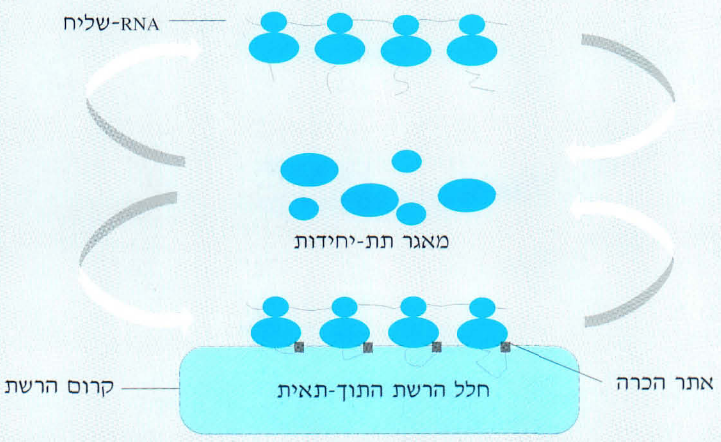
כל ריבוזום יכול לתרגם RNA-שליח בכל אחד משני האתרים.

מיקום הריבוזום נקבע על-ידי החלבון הנבנה:

רצף חומצות אמיניות מסוים מזוהה על-ידי אתר הכרה ייחודי בקרום הרשת התוך-תאית. ריבוזומים הבונים חלבונים המתחילים ברצף מזהה זה, נקשרים באמצעותו אל קרום הרשת; ריבוזומים הבונים חלבונים שאינם מכילים רצף זה אינם נקשרים לרשת התוך-תאית.

עם סיום הרכבת החלבון - בין אם הוא נבנה לחלל הרשת התוך-תאית, ובין אם לציטופלסמה - נפרדות התת-יחידות המרכיבות את הריבוזום, ומצטרפות למאגר התת-יחידות שבציטופלסמה (איור ה14).





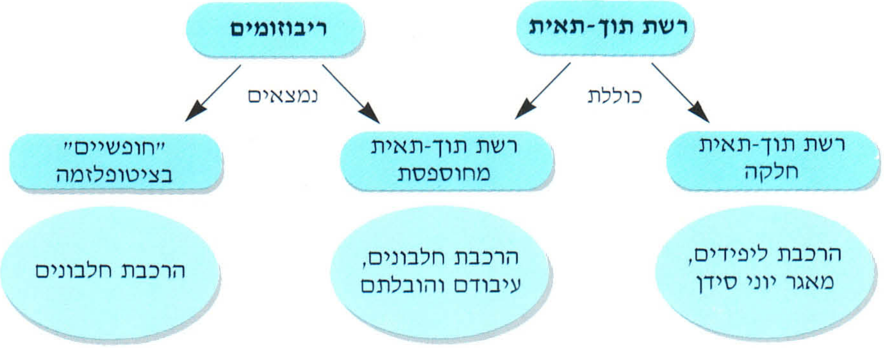
איור ה14: ריבוזומים בתא
מאגר אחד של ריבוזומים משמש לבניית כל החלבונים בתא. ההכוונה של הריבוזומים אל הרשת התוך-תאית נעשית על-ידי רצף ייחודי של חומצות אמיניות בתחילת השרשרת הנבנית.
בתום קריאת ה-RNA-שליח הריבוזומים זמינים שוב במאגר (כתת-יחידות) לבניית חלבונים חדשים.

בין החלבונים המורכבים על-ידי ריבוזומים שאינם קשורים לרשת יש כאלה המגיעים לאברונים, וגם במקרים אלה זיהוי החלבון נעשה על-ידי רצפים ייחודיים של חומצות אמיניות, המוכרים על-ידי אתרי הכרה בקרומים של אברוני היעד.

באזורים של **הרשת התוך-תאית החלקה** מורכבים ליפידים, כמובן באמצעות אנזימים. באזורים אלה של הרשת אפשר למצוא גם מאגר של יוני סידן, יונים הכרחיים לקיום תהליכים רבים בתא.

סיכום ביניים:

תפקודי הרשת התוך-תאית והקשר בינה לבין הריבוזומים



מערכות גולג׳י

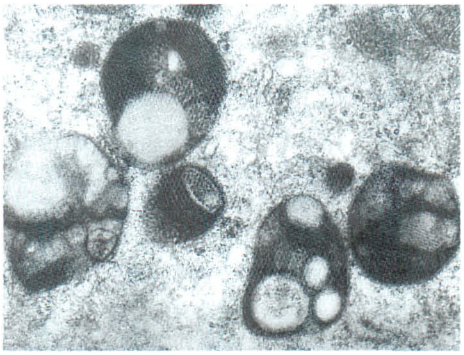
אברון קרומי תוך-תאי נוסף נקרא **מערכת גוֹלְגִ׳י** (Golgi apparatus), על שם החוקר שתיאר אותו לראשונה, Cammillo Golgi, 1926-1843). מערכת גולג׳י היא אוסף של שלפוחיות קרומיות פחוסות (בדרך-כלל בין ארבע לשש), מעין ״פיתות״, שקוטר כל אחת מהן כמיקרומטר אחד ועובייה כ-50 ננומטר, המוקפות בשלפוחיות קטנות יותר. מספר המערכות שונה בתאים שונים: בתאי בעלי-חיים מצויות על-פי-רוב מערכות גולג׳י בודדות, ואילו בתאי צמחים מספרן יכול להגיע לכמה מאות.

איור ה15: מערכת גולג׳י
ימין: מערכת גולג׳י בתא אצה, כפי שהיא נראית במיקרוסקופ אלקטרונים חודר, הגדלה בערך פי 10,000
(שימו לב גם להתקפלויות בקרום התא המעורבות כנראה באנדו/אקסוציטוזה.)
שמאל: תרשים

חלבונים וליפידים מהרשת התוך-תאית מגיעים למערכת גולג׳י, ועוברים בה כמה שינויים כימיים. החלבונים המעובדים יוצאים משקיקי המערכת בשלפוחיות קרומיות, ובאמצעות שלפוחיות אלה הם מגיעים ליעדם. רבים מהחלבונים המעובדים במערכת גולג׳י מופרשים אל מחוץ לתא (באקסוציטוזה), ולפיכך אפשר למצוא מערכות גולג׳י גדולות ומפותחות במיוחד בתאים המפרישים הורמונים או בתאים המפרישים את הריר המצפה את המעיים. בנוסף לפעילות של מערכת גולג׳י בעיבוד חלבונים וליפידים, היא מהווה אתר לבניית סוכרים בתא. במערכת זו, לדוגמה, נוצרים חלק מחומרי הדופן של תא צמח (על דופן זו - ראו בפרק ח).

ליזוזומים

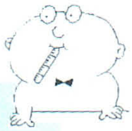
אברונים קרומיים נוספים הנמצאים בתאים איקריוטים הם ה**ליזוזומים** (יחיד - ליזוזום). אלה אברונים דמויי שלפוחיות, שקוטרם בין 0.2 ל-0.5 מיקרומטר. השם ליזוזום מרמז על תפקודו: פירוק=lysis; גוף=soma. בתוך הליזוזומים נמצאים אנזימים מפרקים (מוכרים כ-40 אנזימים כאלה), המזרזים את פירוקן של מולקולות שונות, ביניהן מולקולות זרות לתא.



איור ה16: ליזוזומים בתא כליה של עכבר
צילום במיקרוסקופ אלקטרונים חודר,
הגדלה בערך פי 10,000

מספר הליזוזומים שונה מתא לתא, ותלוי בפעילות התא. לדוגמה, תאי הדם הלבנים בגופנו, המפרקים חיידקים וחומרים מזיקים, עשירים בדרך-כלל בליזוזומים.
ה-pH בחלל הליזוזום נמוך (5.0) לעומת רוב הציטופלסמה, שבה ה-pH ניטרלי או אף בסיסי במקצת (7.2), ואכן, אנזימים שמקורם בליזוזומים פועלים באופן מיטבי בסביבה חומצית. ההבדלים ברמת החומציות בין הסביבות נשמרים הודות לקרום המפריד בין הליזוזום לציטופלסמה ומגדיר את הליזוזום כמדור ייחודי בתא.

בתהליך הפירוק בליזוזום מתקבלים נוקלאוטידים, חומצות אמיניות, סוכרים, וחומרים נוספים. חומרים אלה עוברים לציטופלסמה באמצעות חלבוני העברה המצויים בקרום הליזוזום, וחלקם ממוחזרים בתא, כלומר הם משמשים אבני בניין להרכבת מולקולות חדשות. החומרים הנותרים מתהליכי הפירוק, שאינם מנוצלים בתא (חומרי פסולת), מופרשים מהתא.



העיקר הבריאות

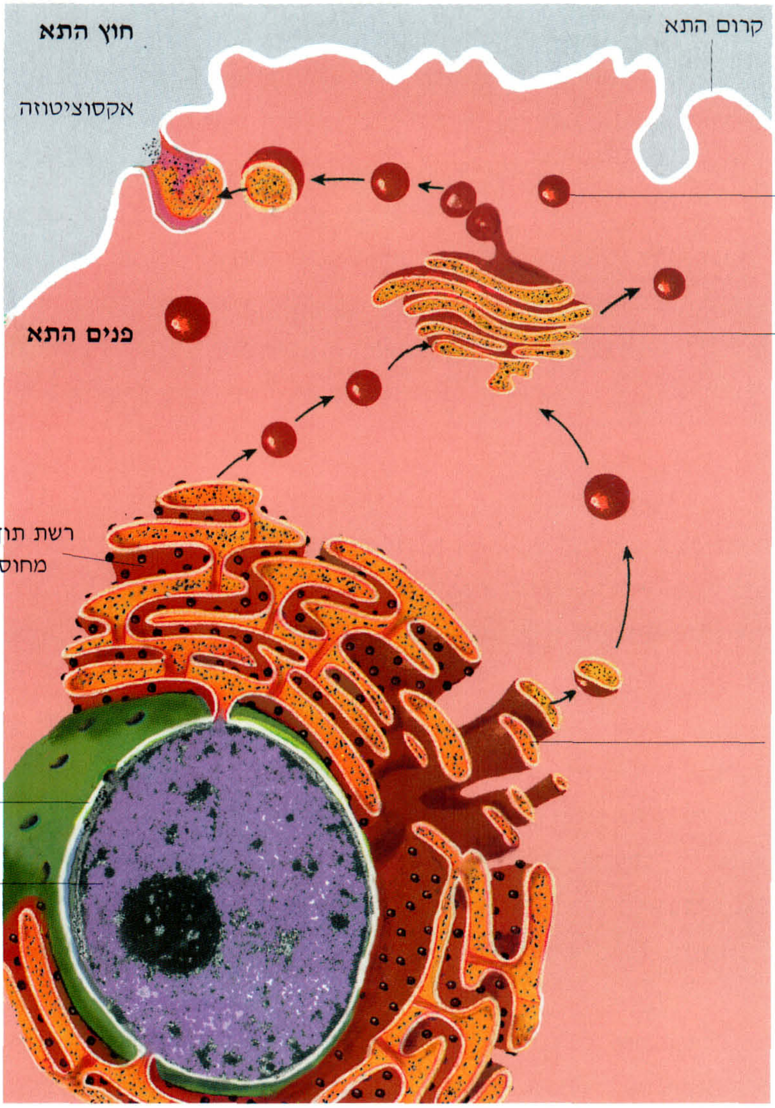
- מחלות מספר באדם קשורות לפעילות הליזוזומים, ביניהן:
המחלה התורשתית טַאי-זַקְס. במחלה זו חסר אנזים ליזוזומי, המזרז פירוק שומן מסוים. הצטברות השומן בליזוזומים של תאי עצב גורמת לפיגור שכלי קשה ומוות בגיל צעיר (עוד על מחלה זו ראו בפרק ד).
- סִלִיקוֹזִיס, מחלה הנובעת מהצטברות של צורן (Silicon) בליזוזומים של תאים בריאות, ופוקדת בעיקר כורים. הצורן הוא חומר אי-אורגני המצוי בחול, וגוף האדם אינו מסוגל לטפל בחומר זה. הצטברות צורן פוגעת בקרומי הליזוזומים, אנזימי הפירוק דולפים מהם, והריאות נפגעות.

בליזוזום מצויים גם אנזימים המופרשים אל מחוץ לתא, ופועלים ***בסביבה החוץ-תאית.*** דוגמה לכך הוא ה***לִיזוֹזִים***, אנזים הנמצא באדם בליזוזומים של תאי צינור הדמעות, מופרש עם הדמעות, ומגן על העיניים מזיהום חיידקי על-ידי הרס דופן תאי החיידקים.

מערכת הקרומים בתא: מבט-על

כאמור הרשת התוך-תאית, מערכות גולגי, הליזוזומים, שלפוחיות נוספות בתא (שלא פרטנו אודותן) ואף קרום התא מרכיבים את מערכת הקרומים בתא. בין מרכיבי המערכת עוברים חומרים באמצעות שלפוחיות קרומיות, במסלולים קבועים.
לדוגמה: יש חלבונים המיוצרים לתוך חלל הרשת התוך-תאית ומעובדים בתוכה, עוברים (באמצעות שלפוחיות קרומיות) אל מערכת גולגי להמשך עיבודם, ומשם אל מחוץ לתא, תוך איחוי שלפוחית עם הקרום שבהיקף התא.
דוגמה נוספת: חומרים החודרים לתא באנדוציטוזה עוברים, שוב באמצעות שלפוחיות, למערכות גולגי. חלק מחומרים אלה עוברים ממערכת גולגי לרשת התוך-תאית.
תוכלו לעקוב אחרי חלק ממסלולים אלה באיור ה17.

שימו לב שבמסלולי העברה אלה עוברים, נוסף לחומרים, גם ***הקרומים*** שמהם מורכבות השלפוחיות. ההתנתקות וההתאחות של שלפוחיות מלוות בשינויים בקרומים, שינויים הקשורים עם הכוונת השלפוחיות ליעדן בתא.



איור ה17: תרשים של חתך בתא מבעל-חיים, המציג את מערכת הקרומים בתא

מעבר חומרים בין אברונים קרומיים בתא מתרחש במסלולים קבועים, באמצעות שלפוחיות קרומיות. שלפוחית הנתקת מאברון אחד ומתלכדת עם אברון אחר מעבירה בתהליך זה את התכולה שהיתה כלואה בשלפוחית, וכן את פיסת הקרום שהרכיבה את השלפוחית.

ה.8 סיכום

- ***הרכב*** קרום התא: **ליפידים** (מקבוצת הפוספוליפידים) **וחלבונים**, וכן גם סוכרים.
- מולקולות של ליפידים מתאפיינות בכך שהן אינן מסיסות במים.
- **פוספוליפידים** הם ליפידים שלהם "ראש" הידרופילי, המורכב מזרחה (וקבוצה כימית נוספת), ו"זנב" הידרופובי, המורכב מחומצות שומן.
- ***מבנה*** הקרום: שתי שכבות של פוספוליפידים המסודרים ו"זנב אל זנב", וביניהם משובצים חלבונים. שתי השכבות אינן סימטריות: יש הבדלים בחלבונים שבשתי השכבות, וכן אל חלק מהפוספוליפידים ואל חלק מהחלבונים שבשכבה הפונה אל חוץ התא מחוברות מולקולות סוכרים.
- הקרום הוא נוזלי למחצה.
- **דיפוזיה** היא תנועה של מולקולות במורד **מפל הריכוזים** שלהן. **אוסמוזה** היא דיפוזיה של מולקולות מים דרך קרום בררני.
- לקרום יש חדירות בררנית:

– מולקולות מסיסות בליפידים עוברות בין מולקולות הפוספוליפידים שבקרום.

– בין המולקולות שאינן מסיסות בליפידים, יש העוברות ב**העברה סבילה** דרך **תעלות ונשאים**, ויש העוברות ב**העברה פעילה**, דרך נשאים הנקראים **משאבות**. העברה פעילה צורכת אנרגיה.

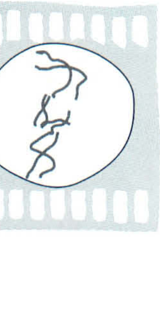
– יש חומרים הנכנסים לתא ב**אנדוציטוזה** ויש היוצאים ממנו ב**אקסוציטוזה**. גם תהליכים אלה צורכים אנרגיה.

- התא מגיב למרכיבים הנקשרים אל **קולטנים** ייחודיים בצדו החיצוני של הקרום.
- בתא מצויים אברונים קרומיים הקשורים בהרכבה, בהובלה ובפירוק של חומרים. בין אברונים אלה קיים קשר רציף, והם מהווים מערכת הובלה תוך-תאית שיש בה מסלולים מוגדרים.

– **הרשת התוך-תאית** היא מערכת צינוריות קרומיות. הצינוריות שאליהן צמודים ריבוזומים נקראות רשת תוך-תאית **מחוספסת**. אל חלל רשת זו נבנים חלבונים, בו הם מעובדים וממנו הם מובלים למקום פעילותם בתא. ברשת התוך-תאית ה**חלקה** מורכבים ליפידים, ונאגרים בה יונים (סידן).

– **מערכות גולג'י** מורכבות משקיקים קרומיים פחוסים. גם בהן נעשה עיבוד חלבונים וליפידים, וכן נבנים בהן סוכרים. מערכות אלה פעילות בהעברת חומרים בתוך התא ובהפרשת חומרים מהתא.

– בתא מצויים גם **ליזוזומים**: אלה שלפוחיות קרומיות המכילות אנזימים מפרקים, שפעילותם המיטבית היא ב-pH נמוך.



שאלות ומשימות לפרק ה

1. א. ציינו לפחות 3 אברונים בתא, שקרום הוא חלק מהמבנה שלהם.
   ב. במה דומים הקרומים של האברונים שציינתם, ובמה הם שונים?

2. החדירות הבררנית של קרומי תאים נפגמת כאשר מחממים תאים לטמפרטורות גבוהות.
   א. הסבירו ממה נובעת תופעת זו.
   ב. הטמפרטורה שבה נפגמת החדירות הבררנית שונה בקרומים שונים. מדוע?

3. להלן מספר משפטים. ציינו איזה מהם נכונים ואיזה שגויים, ואת המשפטים השגויים תקנו. שימו לב: יתכן שחלק מהמשפט נכון, וחלק - שגוי.
   א. כל הקרומים בתא בנויים משתי שכבות של מולקולות פוספופליפידים: שכבה אחת היא תמונת-מראה של השכבה האחרת.
   ב. מולקולת פוספוליפיד בנויה מ"ראש" המסיס בשומן, ו"זנב" המסיס במים.
   ג. בין מולקולות הפוספוליפידים שבקרום משולבות מולקולות חלבונים.
   ד. לחלבונים מקומות קבועים בקרום.
   ה. לכל החלבונים שבקרום ולחלק מהפוספוליפידים קשורים סוכרים.
   ו. לקרומי תאים חדירות בררנית: חומרים מסיסים בליפידים עוברים דרכם, ואילו חומרים שאינם מסיסים בליפידים אינם עוברים.
   ז. פני הקרום חלקים – ללא "בליטות".
   ח. התעלות והנשאים בקרום הם חלבונים.
   ט. מעבר חומרים באנדו- ובאקסוציטוזה דורש השקעת אנרגיה.
   י. אפשר לאפיין תא גם על-פי טיפוסי הקולטנים הנמצאים בקרום שלו.
   יא. מעבר חומרים בדיפוזיה דרך תעלה, כמו גם מעבר חומרים באמצעות נשא, הם תהליכים שאינם דורשים אנרגיה.

4. אם יעבירו חד-תאיים ימיים למים מתוקים, האם ישתנה ריכוז המלחים בהם? והאם יחולו שינויים בנפחם? הסבירו.

5. ההבחנה בין רשת תוך-תאית חלקה לבין רשת תוך-תאית מחוספסת נעשתה על-פי המראה במיקרוסקופ אלקטרונים. האם יש קשר בין המראה לבין התפקוד של שני טיפוסי הרשת? הסבירו תשובתכם.

6. ברצונכם לחקור את הרכבת הליפידים בתא. באיזה מהמבנים התוך-תאיים תמקדו את המחקר? ובאיזה מבנה תתמקדו אם ברצונכם לחקור הפרשת הורמונים מהתאים בהם הם נוצרים?

7. נודע לכם על קיומו של אנזים שפעילותו האופטימלית היא בסביבה חומצית. איפה סביר שימצא אנזים זה בתא? נמקו את תשובתכם.

8. "לכל הקרומים בתא מבנה בסיסי דומה". כיצד מסייע משפט זה להבנת פעילותם של הרשת התוך-תאית, מערכות גולג'י, ליזוזומים והקרום שבהיקף התא, כמערכת אחת?

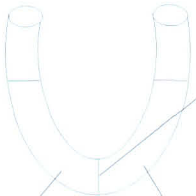
9. מה משותף לדרך פעולתם של אנזימים, משאבות וקולטנים?

בשאלות הבאות יש לבחור את התשובה המתאימה ביותר.

10. אילו מולקולות הן אבני הבנין של מרכיבי קרום התא?
   א. גלוקוז, תאית וחומצות שומן
   ב. סוכרוז, חומצות אמיניות ואנזימים
   ג. חומצות אמיניות, גליצרול וחומצות שומן
   ד. תאית, עמילן וגליצרול

11. בתהליך הדיפוזיה מתרחש/ת:
   א. שחרור אנרגיה על-ידי המולקולות
   ב. תנועת כל המולקולות בכיוון אחד בלבד
   ג. תנועה אקראית של מולקולות
   ד. תגובה כימית בין המולקולות

12. בתהליך של אוסמוזה מולקולות מים עוברות דרך קרום בעל חדירות ברנית:
   א. מתמיסה בעלת ריכוז מומסים נמוך לתמיסה בעלת ריכוז מומסים גבוה, ללא השקעת אנרגיה.
   ב. מתמיסה בעלת ריכוז מומסים גבוה לתמיסה בעלת ריכוז מומסים נמוך, ללא השקעת אנרגיה.
   ג. מתמיסה בעלת ריכוז מומסים נמוך לתמיסה בעלת ריכוז מומסים גבוה, תוך השקעת אנרגיה.
   ד. מתמיסה בעלת ריכוז מומסים גבוה לתמיסה בעלת ריכוז מומסים נמוך, תוך השקעת אנרגיה.



13. לפניך צינור בצורת U , שבין זרועותיו מפריד קרום בעל חדירות בררנית, שמולקולות סוכרוז אינן עוברות דרכו.

בזרוע הימנית תמיסת סוכרוז בריכוז 6%,

ובזרוע השמאלית תמיסת סוכרוז בריכוז 10%.

בתנאים אלה:

א. יעברו מולקולות סוכרוז מהזרוע השמאלית לזרוע הימנית.

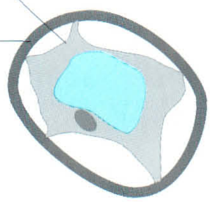
ב. פני הנוזל בזרוע הימנית יעלו.

ג. פני הנוזל בזרוע השמאלית יעלו.

ד. ריכוז מולקולות המים בזרוע הימנית ילך ויגדל.

14. הכניסו קטע מרקמה של צמח מסוים לתמיסת מלח בריכוז 15%. לאחר שהגיע קטע הרקמה לשיווי-משקל עם התמיסה שלתוכה הוכנס, נראו רוב התאים כמתואר בציור.

בציור, הרווח בין דופן התא לבין הקרום מכיל:



א. מים

ב. אוויר

ג. תמיסת מלח

ד. ציטופלסמה

15. ריכוז יוני האשלגן (K^+) בתוך תא אצה הוא 500 mM, וריכוזם במי הים הוא 10 mM (mM – מילימולר. זוהי יחידה המבטאת ריכוז של מומס בתמיסה, והיא מבוססת על המשקל המולקולרי של המומס). מצב זה נשמר הודות ל:

א. דיפוזיה, המאפשרת מעבר אשלגן נגד מפל הריכוזים

ב. אוסמוזה, המאפשרת מעבר אשלגן נגד מפל הריכוזים

ג. משאבת נתרן אשלגן, הצורכת אנרגיה

ד. תעלות פתוחות, המאפשרות מעבר חופשי של יונים קטנים.

16. אדם אכל ארוחה עשירה בחלבונים. במעי שלו נספגות החומצות האמיניות אל הדם, עד שריכוזן במעי הוא אפס.

מכאן נובע שספיגת חומצות אמיניות נעשית:

א. רק בדיפוזיה

ב. בדיפוזיה ובאוסמוזה

ג. רק באוסמוזה

ד. באופן פעיל.

פרק ו

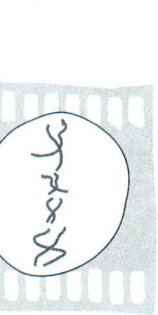
השלד התוך-תאי ותנועה

ו1. הציטופלסמה והשלד התוך תאי

כבר במאה התשע-עשרה תוארה הציטופלסמה כחומר שקוף, צמיג ובעל כושר התכווצות, הממלא את רוב נפחו של התא[1] ומקיף את הגרעין. המחקרים שנערכו מאז העלו שהציטופלסמה עשירה במומסים אורגניים ואי-אורגניים, ביניהם חלבונים שונים, ובכללם אנזימים רבים המשתתפים בפעילויות המטבוליות של התא. כמו-כן התרבו הממצאים על אודות אברוני תא נוספים, חוץ מהגרעין, הנמצאים בציטופלסמה (חלקם נדונו בפרקים ד, ה).

במהלך עבודתם, הבחינו חוקרי התא בתופעה מוזרה: למרות השינויים הרבים החלים בצורת התאים בזמן תנועתם, המיקום היחסי של אברונים שונים בתוך התא כמעט שאינו משתנה!

דמו לפניכם בלון מלא בג'לי דליל, ובו צפים חרוזים קטנים.
כיצד צפוי שיושפע מיקום החרוזים כאשר תמעכו את הבלון?



[1] בחלק מתאי הצמחים תופסת החלולית את רוב נפח התא. (על החלולית ראו להלן בפרק ח)

תצפית זו רמזה שהאברונים בתוך התא אינם צפים באופן חופשי בציטופלסמה. חיזוק לכך היווה הממצא שבהסתכלות מבעד למיקרוסקופ בתאים נעים נראו מבנים סיביים, המקבילים לכיוון התנועה. אולם המשמעות המיוחסת לממצאים מיקרוסקופיים מלווה בדרך-כלל בספק: האם מבנה הנראה במיקרוסקופ אכן קיים בתא החי, או שמא מקורו בשיטת הכנת החומר להסתכלות במיקרוסקופ?

עם פיתוח שיטות הסתכלות עדינות, אשר אינן פוגעות במרכיבים התוך-תאיים, נפתרה הבעיה: ניתן היה לאשר שבציטופלסמה של התאים האיקריוטיים אכן מצויים סיבים רבים, הפרושים בכל נפח התא.

למערכת סיבים זו ניתן השם **שלד תוך-תאי** (באנגלית: cytoskeleton‏ skeleton=שלד, cytos=תא) (איור ו1).

שלא כשלד גופנו, שצורתו קבועה, השלד התוך-תאי הוא מבנה דינמי, שצורתו עשויה להשתנות ללא הרף.

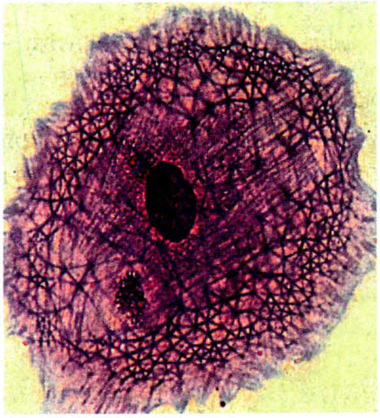
פינת הפרוקריוט

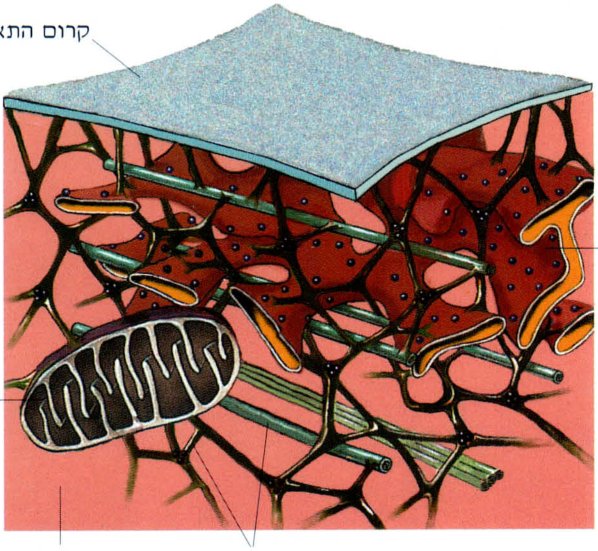
בתאים פרוקריוטיים לא נמצא שלד תוך-תאי.

עם התקדמות המחקר ופיתוח שיטות העבודה במיקרוסקופ אלקטרונים, התברר שהשלד התוך-תאי כולל שלוש מערכות של סיבים חלבוניים, הנבדלות זו מזו בחלבונים הבונים את הסיבים, בתפקודם ובממדיהם (קוטר הסיבים במערכות השונות כ-6, 9 ו-24 ננומטר). יתר-על-כן: בעקבות ממצאים מסוף המאה ה-20 הועלתה אפשרות קיומה של מערכת סיבים רביעית, המתפקדת בעיקר בתיאום בין שלוש המערכות האחרות. כמו-כן נמצאו גם ראיות לקיומו של שלד תוך-גרעיני.

על-אף כל זאת, בהמשך דיוננו נתייחס אל השלד התוך-תאי כאל מערכת אחת.

איור ו1: השלד התוך-תאי
ימין: תא שנצבע בצביעה המאפשרת לראות את השלד התוך-תאי, הגדלה בערך פי 800
שמאל: דגם של חלק מתא.
סיבי השלד התוך-תאי נמצאים בציטופלסמה המקיפה את אברוני התא השונים.





השלד התוך-תאי נמצא בכל סוגי התאים האיקריוטיים: בעלי-חיים וצמחים, חד-תאיים ורב-תאיים. יש הרואים בו חלק מהציטופלסמה, ויש המתייחסים אליו כאל אברון מאברוני התא. סיבי השלד התוך-תאי פרושים מהקרום פנימה לתוך התא, והחלבונים הבונים אותם הם המקנים לציטופלסמה את המרקם הצמיג המאפיין אותה.

21. תפקודי השלד התוך-תאי

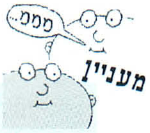
ככל הידוע היום, סיבי השלד התוך-תאי קשורים בעיקר בשלושה תפקודים:

- הקניית מבנה מרחבי לתא, ושינוי מבנה זה בתנאים שונים;
- תנועה בתוך התא;
- תנועה של התא כולו.

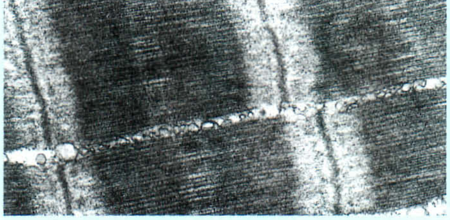
כמו-כן נמצא שביצורים רב-תאיים סיבי השלד חשובים לקיום קשרים ***בין*** התאים, ומניחים שהסיבים משתתפים גם בהעברת גירויים מקרום התא אל גרעין התא.
נרחיב מעט על תפקודי השלד.

הקניית צורה מרחבית לתא

סיבי השלד התוך-תאי יוצרים מעין "פיגום", המעצב את מבנה התא ומייצב את האברונים התוך-תאיים; שינויים בצורת התא (התמתחות, התכווצות והתעגלות) מותנים בארגון סיבי השלד. בצמחים שינויים כאלה מוגבלים, בשל הדופן הקשיחה שבהיקף התאים.

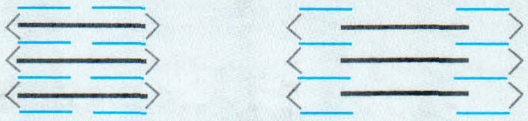


ברקמת שריר יש תאים גדולים מאוד שבכל אחד מהם גרעינים רבים. תאים אלה עשירים במיוחד בסיבי שלד תוך-תאי; סיבי השלד בתאי שריר מסודרים בסידור אופייני, המקנה לרקמה מראה מפוספס (איור ו21).



איור ו21: קטע מרקמת שריר של אדם צילום במיקרוסקופ אלקטרונים הגדלה בערך פי 10,000
הפספוס הנראה בתמונה מקורו בארגון סיבי השלד.

השינוי המתקבל בצורת הזרוע כשאנו "עושים שריר", שהוא תוצאה של מעבר ממצב הרפיה למצב התכווצות, הוא למעשה ביטוי של שינוי בארגון סיבי השלד התוך-תאי בתאים המרכיבים את רקמת השריר (איור 3ו).



א. בשריר רפוי   ב. בשריר מכווץ

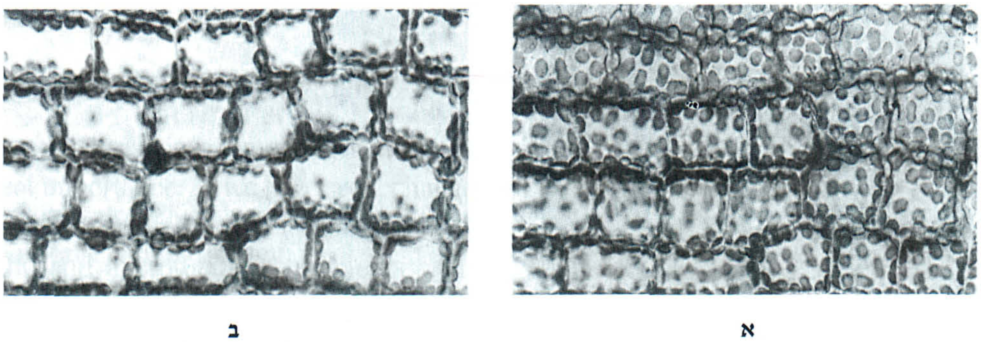
איור 3ו: סכמה של סיבים בשריר

השוו בין סידורי הסיבים המוצגים באיור 3ו:
שימו לב לכך שאורך הקווים המייצגים את הסיבים זהה בשני המצבים, ורק הרווח שביניהם שונה!

תנועה בתוך התא

תנועת מרכיבים בתוך התא נעשית לאורכם של סיבי השלד התוך-תאי, אשר משמשים מעין מסילות.

דוגמה מרשימה לתנועת אברונים בתא אפשר לראות בתאי צמחים: מיקום הכלורופלסטים (אברונים הקולטים אור בתהליך הפוטוסינתזה; נלמד עליהם בפרק ח) משתנה בעלים של צמחים שונים בתגובה לעצמת האור שבסביבה (איור 4ו): בעוצמת אור נמוכה הכלורופלסטים מסודרים קרוב לשטח פני התא, בניצב למקור האור, וכך מתאפשרת קליטת אור מרבית. לעומת זאת, בעצמות אור גבוהות במיוחד, הכלורופלסטים ממוקמים במקביל למקור האור, סידור המקטין את חשיפתם לאור. המעבר של הכלורופלסטים מעמדה אחת לאחרת בתוך התא נעשה באמצעות סיבי השלד התוך-תאי.

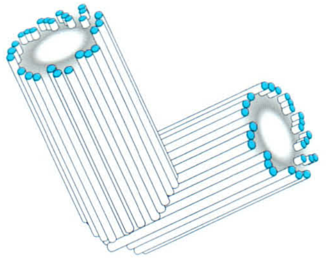


א   ב

איור 4ו: שינוי מיקום הכלורופלסטים בתאי עלה של טחב בתלות בעצמת האור
טחב עלים הואר בעצמות אור שונות. מיקום הכלורופלסטים בתאי העלים נצפה במיקרוסקופ וצולם. בשתי התמונות כיוון ההארה בניצב למישור התמונה.
א. בעצמת אור נמוכה הכלורופלסטים מפוזרים בשטח פני התא הפונה אל האור.
ב. לאחר הארה של כ-30 דקות בעצמת אור גבוהה, כמעט שאין כלורופלסטים בצד הפונה אל האור.

טיפוס אחר של תנועה מתרחש בתא בעת חלוקתו. בשלבי החלוקה יש תנועה נמרצת של מרכיבים בתוך התא, המלווה גם בשינוי צורת התא. האירועים הבולטים ביותר בחלוקה קשורים לתנועת כרומוזומים, תנועה הקשורה לסיבים בשלד התוך-תאי:

סמוך לגרעין נמצא **מרכז התארגנות** של סיבים, וממנו נפרשים סיבים לשאר חלקי התא. במרבית התאים של בעלי-חיים (אך לא בתאי צמחים), יש בכל מרכז התארגנות זוג אברונים גליליים - **צֶנְטְרִיוֹלִים** - הבנויים אף הם מסיבים. אורך כל צנטריול הוא כ-0.4 מיקרומטר, וקוטרו 0.2 מיקרומטר. שני הצנטריולים ניצבים זה לזה בזווית של 90^{o} (איור 51).



איור 51: דגם של צנטריולים

לפני חלוקת התא מוכפלים הצנטריולים, ומתקבלים שני זוגות. לקראת החלוקה הזוגות נודדים בציטופלסמה ומסתדרים בשני צדדים נגדיים של הגרעין, בתוך מרכזי ההתארגנות של הסיבים.

הסיבים היוצאים מכל מרכז התארגנות נפרשים אל מרכז התא, שם הם נפגשים עם הסיבים מהצד הנגדי, ומתקבל מבנה סיבי: ה**כִּישׁוּר**[2].

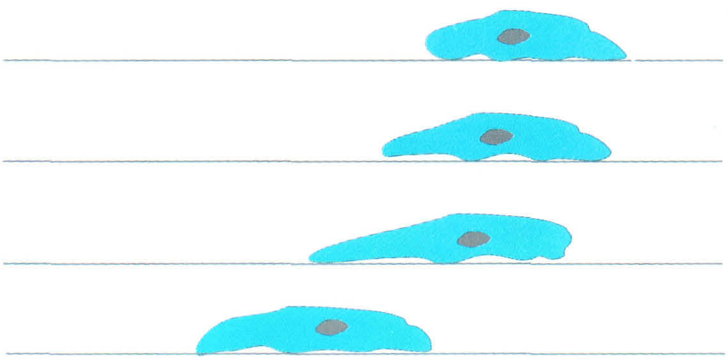
כפי שנראה בפרק ט (העוסק במחזור התא וחלוקתיו), תנועת הכרומוזומים במהלך חלוקת התא נעשית באמצעות סיבי הכישור.

איור 61: כישור בזמן חלוקת תא
ימין: סיבי כישור כפי שהם נראים במיקרוסקופ, בשיטת הסתכלות מיוחדת, הגדלה בערך פי 1,000
שמאל: תרשים (כאמור, צנטריולים נמצאים רק בתאי בעלי-חיים.)

[2] כישור הוא קנה שכורכים עליו את החוטים בזמן שטווים אותם. חוקרי התא בעבר מצאו דמיון בין צורת ארגון הסיבים בתא מתחלק לבין אותו כלי טוויה.

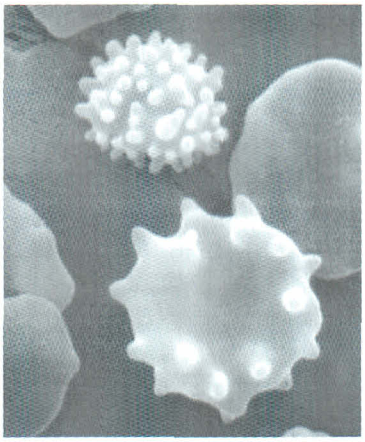
תנועה של התא כולו

קל להבחין בתנועת התא באורגניזמים חד-תאיים, שכן כל גופם נע. אם נתבונן כיצד אמבה נעה ממקום למקום על פני משטח, ניווכח שהתנועה נעשית על-ידי דחיסת הציטופלסמה לתוך שלוחה הנוצרת בכיוון התנועה. צורת תנועה זו, המאפיינת גם תאים מאורגניזם רב-תאי הגדלים בתרבית, מכונה **תנועה אֲמֶבּוֹאִידִית** (איור 71).



איור 71: תרשים של תא נע בתנועה אמבואידית
שלבים בהתקדמות תא הנע בתנועה אמבואידית; התא נע מימין לשמאל.

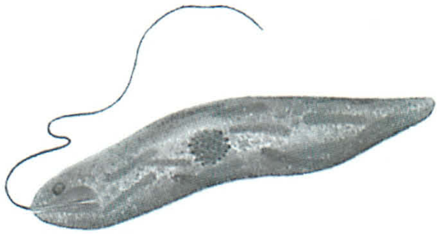
תנועה אמבואידית מתרחשת גם בגופם של יצורים רב-תאיים. לדוגמה, כך נעים בגופנו תאי הדם הלבנים (תאים השייכים למערכת החיסונית איור 81).



איור 81: תאי דם לבנים
הגדלה בערך פי 4,000

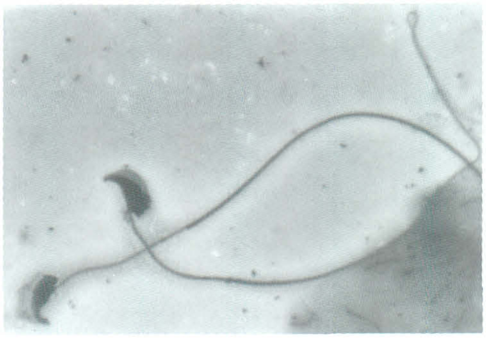
צביעה ייחודית לסיבי שלד תוך-תאי גילתה סיבים מסודרים לאורך ציר התנועה של תא הנע בתנועה אמבואידית. עובדה זו קושרת את התנועה האמבואידית עם סיבי השלד; חיזוק לקשר זה מספק הממצא, שבנוכחות חומר המונע שינויים בארגונם של סיבי השלד– נמנעת התנועה האמבואידית של תאים.

צורת תנועה אחרת היא באמצעות אברוני תנועה מיוחדים. כך נע, לדוגמה, היצור החד-תאי עינן ירוק (Euglena), שאיבר התנועה שלו הוא **שוטון**; שוטון העינן מגיע לאורך של כמילימטר אחד (איור ו9)



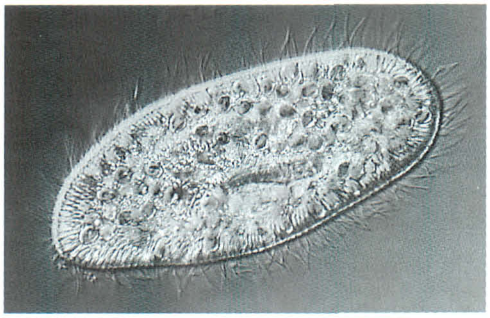
איור ו9: עינן ירוק
הגדלה בערך פי 100

גם באורגניזמים רב-תאיים יש תאים בעלי שוטונים: כאלה הם תאי הזרע של בעלי-חיים רבים, תאים הידועים בכושר התנועה שלהם (איור ו10).



איור ו10: תאי זרע של עכבר הבית
הגדלה בערך פי 1,500

החד-תא סנדלית (איור ו11) נע בעזרת איברי תנועה אחרים: **ריסים**. שלא כשוטון שהכרנו קודם, שהוא ארוך יחסית ויחיד בתא, הריסים קצרים יותר (כ-25 מיקרומטר) ומספרם רב בתאים שבהם הם מופיעים. בחד-תאיים הריסים מתפקדים הן בתנועה והן באיסוף מזון.



איור ו11: סנדלית
הגדלה בערך פי 150

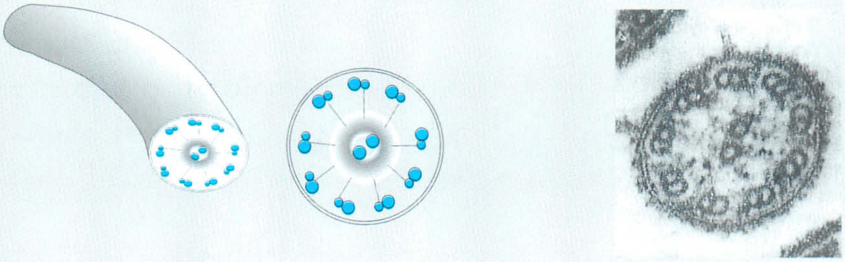
ותאים עם ריסים באורגניזמים רב-תאיים? גם כאלה קיימים. דוגמה לכך הם התאים המצפים את צינורות הנשימה בגופנו. בתאים אלה תנועת הריסים משמשת להרחקת אבק ולכלוך.

על הקשר שבין שוטונים, ריסים, צנטריולים וסיבים תוכלו לקרוא בקטע ההרחבה שלהלן.

מה בין שוטונים, ריסים וצנטריולים?

לשוטונים ולריסים יש מבנה גלילי מוארך. הם שונים באורכם, אך דומים בקוטרם: כ-0.2 מיקרומטר.
מה מקור הדמיון בקוטר?

בהסתכלות בחתך רוחב בשוטון מבעד למיקרוסקופ אלקטרונים אפשר לראות תמונה מרשימה: תשעה זוגות של סיבים עוברים לכל אורך השוטון סמוך להיקפו, ובמרכז - זוג נוסף (איור 12ו).

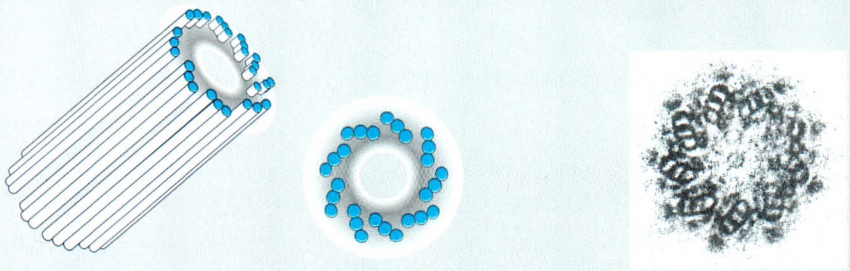


איור 12ו: חתך רוחב בשוטון
ימין: צילום במיקרוסקופ אלקטרונים, הגדלה בערך פי 120,000
שמאל: תרשים

סידור זה של הסיבים (המכונה 2+9) מאפיין את **כל השוטונים והריסים בתאים איקריוטיים**. צורתם והרכבם של סיבים אלה הם כשל סיבי השלד התוך-תאי. אחידות זו במבנה מסבירה את הזהות בקוטר האברונים.

בדיקת חתך רוחב ***בבסיסם*** של אברוני תנועה אלה (ריסים ושוטונים) במיקרוסקופ אלקטרונים מראה מבנה דומה לזה שתואר, אך במקום תשעה זוגות בהיקף האברון נראות תשע ***שלשות***, ואין זוג מרכזי של סיבים.

למרבה ההפתעה - המבנה המופיע בבסיס השוטונים והריסים נראה גם בחתך רוחב באברון אחר בתא (של בעלי-חיים). זהו הצנטריול, שקוטרו גם הוא כ-0.2 מיקרומטר, ואותו הכרנו כקשור הן לסיבי השלד התוך-תאי והן לתנועה בתא (ראו גם איור 5ו). בהסתכלות (במיקרוסקופ אלקטרונים) בחתך רוחב בצנטריול נראית תמונה דומה מאד לזו שבחתך רוחב בשוטון: מעין גלגל שיניים שבו תשע שלשות של "טבעות", המסודרות בהיקף - כל טבעת היא חתך בסיב אורך (איור 13ו).



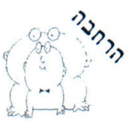
איור 131: חתך רוחב בצנטריול
ימין: צילום במיקרוסקופ אלקטרונים, הגדלה בערך פי 125,000
שמאל: תרשים

נקודה למחשבה: האם הדמיון במבנה של שוטונים, ריסים וצנטריולים, מרמז על מוצאם האבולוציוני?

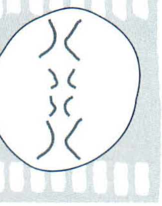
כדאי לציין, שלשוטונים של אורגניזמים פרוקריוטיים יש מבנה אחר לגמרי.

31. סיכום

- בציטופלסמה של תאים איקריוטים מצוי **שלד תוך-תאי**: סיבים חלבוניים הפרושים בכל נפח התא.
- השלד התוך-תאי קשור בהקניית **מבנה מרחבי** לתא ו**בתנועה** בתא: הן תנועת מרכיבים בתא והן תנועת התא כולו.
- **צנטריולים, שוטונים וריסים** הם אברונים בתא האיקריוטי, המורכבים מסיבי שלד תוך- תאי, והם קשורים לתנועה.



- לצנטריולים, לשוטונים ולריסים יש מבנה פנימי דומה: תשע קבוצות של סיבי אורך, המסודרות בהיקף האברון, ובשוטונים ובריסים יש גם זוג סיבים מרכזי.



שאלות ומשימות לפרק 1

1. אילו תנועות תוך-תאיות מוכרות לכם? מנו לפחות שתי דוגמאות, וציינו איזה מרכיב תוך-תאי קשור עם תנועות אלה.

2. להלן מספר משפטים. ציינו איזה מהם נכונים ואיזה שגויים, ואת המשפטים השגויים תקנו. שימו לב: יתכן שחלק מהמשפט נכון, וחלק - שגוי.

א. מיקומם של אברונים כמו מיטוכונדריה (בכל התאים) וכלורופלסטים (בתאי צמחים) מעוגן בתא באמצעות סיבי השלד התוך-תאי.

ב. סיבי השלד התוך-תאי מורכבים מחלבונים ומ-DNA.

ג. בהסתכלות מבעד למיקרוסקופ האור אפשר תמיד להבחין בסיבי השלד התוך-תאי.

ד. מיקומם של סיבי השלד התוך-תאי, כמו מיקום העצמות בשלד החולייתנים, קבוע במשך כל חיי האורגניזם.

ה. סיבי שלד תוך-תאי מקנים צמיגות לציטופלסמה.

ו. החלבונים של סיבי השלד התוך-תאי הם החלבונים היחידים בציטופלסמה.

ז. בכל תא שנע יש אברי תנועה מיוחדים: שוטונים או ריסים.

פרק ז

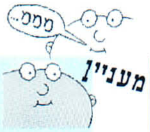
אנרגיה בתא
והמיטוכונדריון

ז1. אנרגיה בתא -לשם מה, ומאין?

במהלך חיי התא מתרחשות בו פעילויות רבות, שלביצוען נדרשת אנרגיה. בין הפעילויות צורכות האנרגיה בתא, שעל חלקן למדנו, ניתן למנות:

- מטבוליזם (=חילוף חומרים): פירוק חומרים מורכבים לחומרים פשוטים והרכבת חומרים מורכבים מחומרים פשוטים.
- העברה פעילה של חומרים ממקום למקום בתוך התא, ובין התא לבין סביבתו.
- תנועה בתוך התא, שינוי צורת התא ותנועת התא כולו.
- העברת מסרים (בצורת אותות כימיים) מתא לתא.

יש לזכור שקיומן של הפעילויות בתא מותנה בשמירה על הארגון התוך-תאי, וגם לשם כך דרושה אספקה שוטפת של חומרים ושל אנרגיה. הדבר דומה לבניין מגורים שדייריו חייבים לדאוג באופן מתמיד ושוטף לתקינות המערכות הקיימות בו (המים, הביוב, דודי השמש וכו') על-מנת שיפעלו כראוי. הזנחה (אי-השקעה של אנרגיה ושל חומרים) תגרור פגיעה בתפקודן של המערכות, עד להתפוררותן.



הפעילויות צורכות האנרגיה שמנינו מתקיימות כמעט בכל תא ותא. נוסף לכך יש תאים שבהם מתרחשות פעילויות ייחודיות, שגם הן צורכות אנרגיה.

דוגמה לכך הם תאים בגופן של גחליליות (איור ז1), שבהם נצרכת אנרגיה ליצירת קרינה של אור.

איור ז1: גחליליות על עלה
הגדלה בערך פי שניים
הגחלילית היא חיפושית המוכרת בעיקר בשל הבזקי האור הבוקעים מפרקי בטנה.

חשוב:

לאנרגיה צורות רבות. פרק זה עוסק באנרגיה **כימית** ובגלגוליה בתא. (ראו נספח 1: רקע כימי – קשרים כימיים).

הכללים התקפים לגבי אנרגיה בכל התהליכים הפיזיקליים והכימיים, שרירים וקיימים גם לגבי אנרגיה בתהליכים ביולוגיים:

1. במערכת סגורה, סך כל האנרגיה נשמר קבוע (חוק שימור האנרגיה).
2. בתהליכים שבהם משתחררת אנרגיה, חלק ממנה נפלט לסביבה בצורת אנרגיית חום.

מהו מקור האנרגיה בתא?

מקור האנרגיה הכימית בתא הוא בפירוק תרכובות אורגניות (כמו פחמימות, שומנים וחלבונים).

מקובל לומר שמקור האנרגיה בתא הוא בפירוק תרכובות אורגניות בתהליך **הנשימה**. ברוב דיונינו לא נשתמש במונח זה היות שבחיי יום-יום המונח מתייחס לחילוף גזים. בהמשך נשתמש לשלב מוגדר במונח **נשימה תאית אווירנית.**

יש לדעת:

בפרוק קשרים כימיים ***נצרכת*** אנרגיה, וכאשר נוצרים קשרים כימיים ***משתחררת*** אנרגיה;

לפיכך - כאשר אנו אומרים שמקור האנרגיה הכימית בתא הוא בפירוק תרכובות אורגניות, (או שאנרגיה מופקת מפירוק תרכובת) משמעות הדבר היא שהאנרגיה **הנצרכת** בפירוק הקשרים של תרכובות אלה ***קטנה*** מהאנרגיה ה**משתחררת** ביצירת הקשרים שבתוצרי הפירוק.

(וההפך: תגובה שלקיומה נדרשת השקעה של אנרגיה משמעה שהאנרגיה הנצרכת בפירוק הקשרים שבמגיבים ***גדולה*** מהאנרגיה המשתחררת ביצירת הקשרים בתוצרים.)

ומהו מקורן של אותן תרכובות, שפירוקן מספק אנרגיה?

- יש אורגניזמים המייצרים בעצמם את התרכובות האורגניות מתרכובות פשוטות שהם קולטים מסביבתם. יצורים אלה נקראים **יצרנים** או **אוטוטרופים** (autos=עצמי, trophein=להזין).

  לקבוצה זו שייכים הצמחים, המייצרים תרכובות אורגניות מ-CO_2 ומים, בעזרת אנרגיית האור.

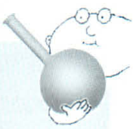
- אורגניזמים אחרים מקבלים את התרכובות האורגניות "מן המוכן", במזון שהם אוכלים. יצורים אלה נקראים **צרכנים** או **הֶטֶרוֹטרוֹפִים** (heteros=שונה). לקבוצה זו שייכים בעלי-החיים.

החומרים שמהם ניזונים בעלי-חיים הם על-פי-רוב מולקולות אורגניות גדולות ומורכבות, שבדרך-כלל אינן חודרות לתא. מולקולות כאלה מפורקות ליחידות המבנה שמהן הן בנויות: החלבונים מפורקים לחומצות אמיניות, השומנים - לחומצות שומן ולגליצרול, והפחמימות - לסוכרים פשוטים. פירוק זה נעשה בתהליכי עיכול, שבהם לא נדון בספר זה.

אמנם דיוננו מתמקד בפירוק תרכובות אורגניות כמקור לאנרגיה, אך חשוב לדעת שתרכובות אלה אינן מנוצלות רק להפקת אנרגיה; תוצרי הפירוק משמשים בתהליכי חילוף חומרים גם כ"שלד" (="שלד פחמני") לבניית כל התרכובות האורגניות בתא.

עוד כדאי לציין שלא בכל תהליכי הפירוק מופקת אנרגיה – יש תהליכי פירוק צורכי אנרגיה.

בתאים רבים האנרגיה מתקבלת בעיקר מפירוק פחמימות. בתהליכי פירוק אלה נדון בהמשך.



קצת כימיה

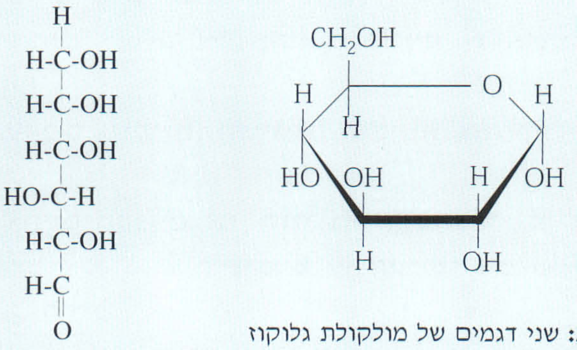
פחמימות

פחמימות הן קבוצת תרכובות אורגניות המורכבות מפחמן, מימן וחמצן, שבהן היחס המספרי שבין אטומי המימן לאטומי החמצן הוא בדרך-כלל 2:1, כמו במים. יחס זה מסביר את שמה של קבוצת הפחמימות (גם באנגלית – carbohydrates: פחמן=carbo; מים=hydrate), ואף את רישום הנוסחה הכללית של פחמימות: $C_x(H_2O)_y$.

חד-סוכרים הם הפחמימות הפשוטות ביותר; הם מכילים בין שלושה לשבעה אטומי פחמן, המסודרים במרחב בשרשרת או בטבעת (איור ז2).

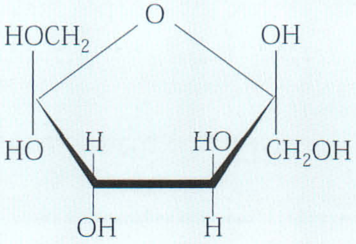
ביניהם נמנים:

גלוקוז (הנקרא גם סוכר ענבים) הוא חד-סוכר שנוסחתו $C_6H_{12}O_6$. פירוק פחמימה זו הוא תהליך נפוץ בהפקת אנרגיה בתאים.



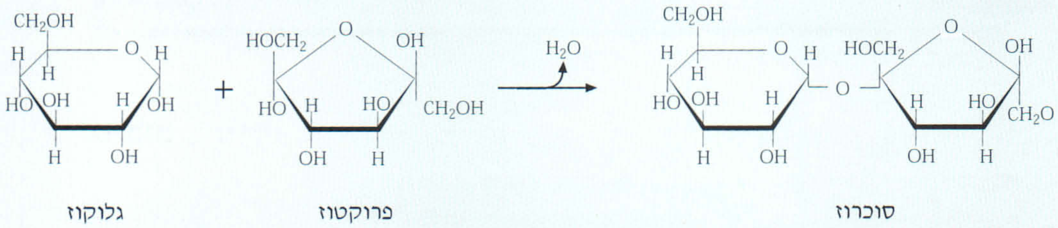
איור ז2: שני דגמים של מולקולת גלוקוז

פרוקטוז - גם הוא חד-סוכר, ונוסחתו גם היא $C_6H_{12}O_6$. אף-על-פי שנוסחת המבנה של מולקולה זו זהה לזו של גלוקוז, חומרים אלה שונים בתכונותיהם בשל הסידור השונה של האטומים במולקולות (איור ז3).



איור ז3: דגם של מולקולת פרוקטוז

דו-סוכרים הם פחמימות הבנויות משתי יחידות של חד-סוכר.
הדו-סוכר המוכר ביותר בחיי היום-יום הוא **סוכרוז** (נקרא גם סוכר קנה): זהו הסוכר המשמש ממתיק בכל בית. מולקולת הסוכרוז מורכבת ממולקולות החד-סוכרים גלוקוז ופרוקטוז (הקישור ביניהן כרוך ביציאת מולקולת מים, איור ז4).

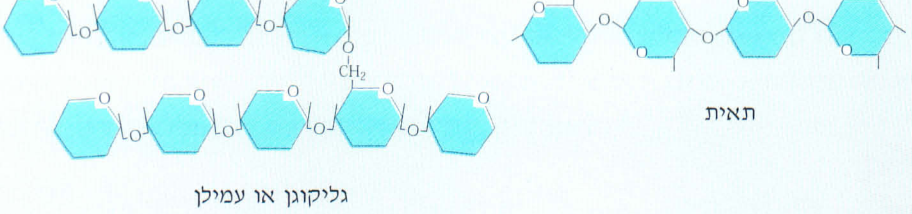


איור ז4: הרכבת מולקולת סוכרוז מחיבור מולקולות גלוקוז ומולקולת פרוקטוז נוצרת מולקולת סוכרוז (ומולקולת מים).

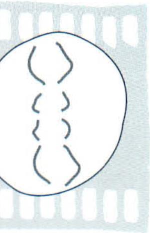
רב-סוכרים הם פחמימות ארוכות-שרשרת, המורכבות מיחידות רבות של חד-סוכר.
רב-סוכרים נפוצים בטבע הם גליקוגן, עמילן ותאית, המורכבים כל אחד מאלפי יחידות טבעתיות של גלוקוז, וגודלם אינו קבוע.

גליקוגן הוא רב-סוכר המשמש בבעלי-חיים חומר תשמורת (חומר הנאגר בגוף ומשמש בעת הצורך מקור לחומרים ולאנרגיה); בצמחים חומר התשמורת הוא הרב-סוכר **עמילן** (starch). שתי תרכובות אלה, גליקוגן ועמילן, בנויות מיחידות רבות של טבעות גלוקוז הקשורות בשרשרת ארוכה ומסועפת (איור ז5), אך מידת ההסתעפויות בהן שונה.

גם **תאית** (cellulose) היא רב-סוכר המורכב מטבעות גלוקוז, אלא ששרשרת התאית היא ישרה וללא הסתעפויות (איור ז5).
התאית מהווה מרכיב מרכזי בדופן של תאי צמחים.



איור ז5: דגמים של מולקולות רב-סוכרים



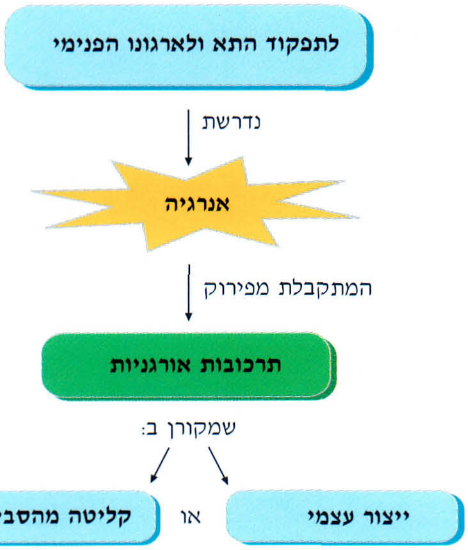
כדאי לדעת,

גליקוגן ועמילן אינם מסיסים במים.

ומדוע עובדה זו חשובה?

כאמור, עמילן וגליקוגן הם חומרי תשמורת. היות שחומרים אלה אינם מסיסים במים – הצטברותם בתא אינה גורמת לעלייה בריכוז המומסים, ולכן אינה גורמת לחדירת מים לתא.

סיכום ביניים:



ובמילים אחרות: מקורה של האנרגיה הנדרשת לקיומם של תהליכים בתא הוא בפירוק תרכובות אורגניות.

נוכחנו שתהליכים רבים בתא צורכים אנרגיה; כמו-כן, ציינו שמקור האנרגיה הוא בפירוק תרכובות אורגניות (ועל כך נרחיב בהמשך). אולם תהליכים צורכי אנרגיה בתא אינם בהכרח צמודים בזמן ובמקום לתהליכים המספקים אנרגיה.

כיצד אפוא נפתרת בעיה זו?

ז2. ATP מתווך במעברי אנרגיה בתא

מעבר האנרגיה הכימית בתא בין תהליכים מספקי אנרגיה לבין תהליכים צורכי אנרגיה, נעשה באמצעות מולקולה **מתווכת**. המולקולה המתווכת הנפוצה ביותר במעברי אנרגיה בתאים נקראת ATP (אֵי-טִי-פִּי, ראשי תיבות של אָדֶנוֹזִין-טְרִי-פוֹסְפָט (**A**denosine- **T**ri- **P**hosphate

מולקולת **ATP** בנויה משלושה מרכיבים:

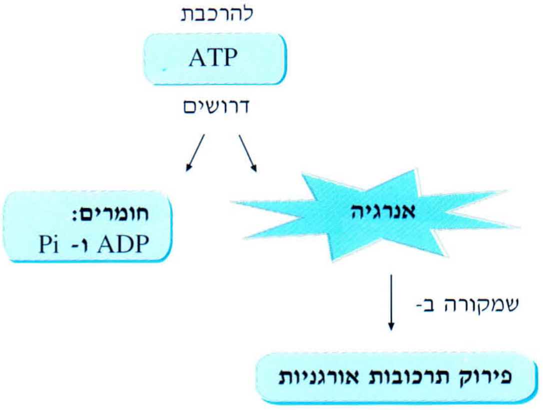
1. אדנין – תרכובת אורגנית המכילה חנקן
2. ריבוז – סוכר
3. שלוש יחידות של זרחה.

להזכירכם, הצירוף של אדנין-סוכר-זרחה מופיע גם בחומצות גרעין (**DNA** ו-**RNA**, שעליהן למדנו בפרק ד). דהיינו: זהו צירוף המתפקד בכמה מערכות חיוניות בתא!

כאשר אל האדנין והריבוז קשורות רק שתי יחידות של זרחה, זוהי מולקולת ADP (אדנוזין-**די-** פוספט).

ATP נבנה על-ידי הוספת קבוצת זרחה[1] (נהוג לסמנה **Pi**, זרחה אי-אורגנית) ל-**ADP**:

ADP + Pi ⟶ ATP

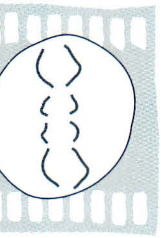


החומרים להרכבת ATP (ADP ו-Pi) נמצאים בתא וממוחזרים בתוכו.

האנרגיה להרכבת ATP מקורה בפירוק תרכובות אורגניות.

שימו לב: החומרים מהם מורכב ATP אינם תוצרים ***ישירים*** של פירוק התרכובות האורגניות.

זרחון ADP הוא תהליך **צורך** אנרגיה, ואילו פירוק ATP ל-ADP וקבוצת זרחה הוא תהליך **משחרר** אנרגיה. בשני תהליכים אלה, כמו במרבית התהליכים בתא, משתתפים אנזימים.



[1] הוספת קבוצת זרחה נקראת גם **זרחון**.

כדאי לדעת:

- בכל אחד מתאי הגוף מצויות כ-10^9 מולקולות ATP.
- בגוף אדם מבוגר נוצרים ומתפרקים מדי יממה בין 40 ל-70 ק"ג של ATP! זוהי כמות הקרובה למשקל הגוף!

במה מתבטא התיווך באמצעות ATP?

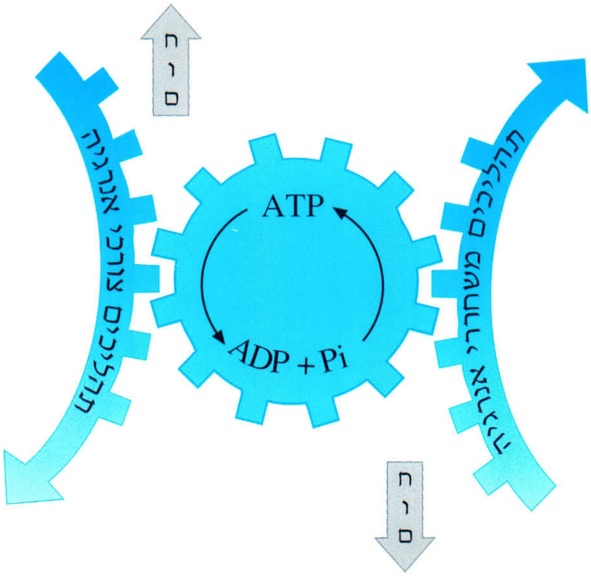
בצמוד לתהליכים בתא שבהם ***משתחררת*** אנרגיה, ***מורכבת*** מולקולת ATP,

כלומר מתרחשת התגובה: **ADP + Pi → ATP** (שהיא כאמור צורכת אנרגיה).

בצמוד לתהליכים בתא שבהם *נצרכת* אנרגיה, מולקולת **ATP** *מתפרקת*,

כלומר מתרחשת התגובה: **ATP → ADP + Pi** (שבה כאמור משתחררת אנרגיה).

איור 6ז מדגים זאת:



איור 6ז: ATP כמתווך בין תהליכים בתא

הרכבת ATP מ-ADP ו-Pi מצומדת לתהליכים משחררי אנרגיה (ימין), ופירוקה מצומד לתהליכים צורכי אנרגיה (שמאל). כאמור, כל התהליכים בהם חלים מעברי אנרגיה מלווים בשחרור חום לסביבה.

יש המדמים את מולקולת ATP ל"מטבע" של אנרגיה. דימוי זה יכול לשמש כאשר מודדים את הערך האנרגטי של תגובות שונות: ה"מחיר" האנרגטי של תגובות בתא נמדד במספר מולקולות ATP הנבנות או המתפרקות כשתגובה כלשהי יוצאת לפועל.

שלא כמו המטבעות המוכרים לנו מחיי היום-יום, הניתנים לאגירה (בכיסנו או בבנק), בתא אין מאגרים של ATP. בכל תא מורכב ATP בכמות המתאימה ובזמן המתאים לביצוע פעילויות התא השונות.

כמות האנרגיה המשתחררת עם התפרקותה של מולקולת ATP (ל-ADP ולזרחה) היא בטווח המתאים לכמות האנרגיה הנצרכת בתגובות רבות בתא.

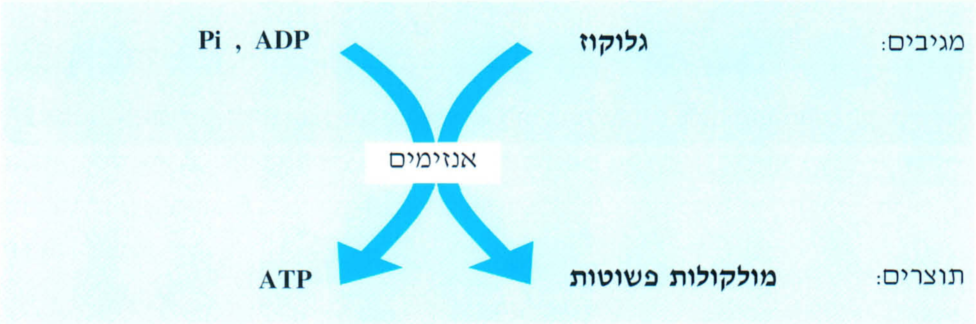
קיומו של "מטבע קטן" מונע בזבוז אנרגיה (כאשר נדרש תשלום קטן ו"לא מחזירים עודף" עדיף לשלם בשטר קטן). יתר-על-כן: היות ש"עודף" מתגלגל לאנרגיית חום, קיומו של "מטבע קטן" מונע התחממות-יתר של התא.

מולקולת ATP נפוצה כ"מתווך אנרגיה" בכל עולם החי: חיידקים, צמחים ובעלי-חיים (קיימות גם מולקולות אחרות המתפקדות באופן דומה, אך שכיחותן בעולם החי קטנה). יש להניח שהצלחה אבולוציונית זו היא תוצאה של התאמה טובה ביותר בין מבנה המולקולה לבין תפקודה.

ז3. פירוק תרכובות אורגניות והרכבת ATP בתא

מקור האנרגיה להרכבת **ATP** בתא הוא כאמור בפירוק תרכובות אורגניות – בעיקר פחמימות. בדיוננו נתמקד בהפקת אנרגיה מפירוק של מולקולת גלוקוז, אף-על-פי שגם תרכובות אורגניות אחרות משמשות מקור אנרגיה בתאים.

התמונה הכללית היא אפוא:



פירוק מלא של גלוקוז למולקולות פשוטות אינו מתרחש בבת אחת. הפירוק מתבצע בשני שלבים: שלב **I** – גְלִיקוֹלִיזָה; שלב **II** - נשימה תאית אווירנית.

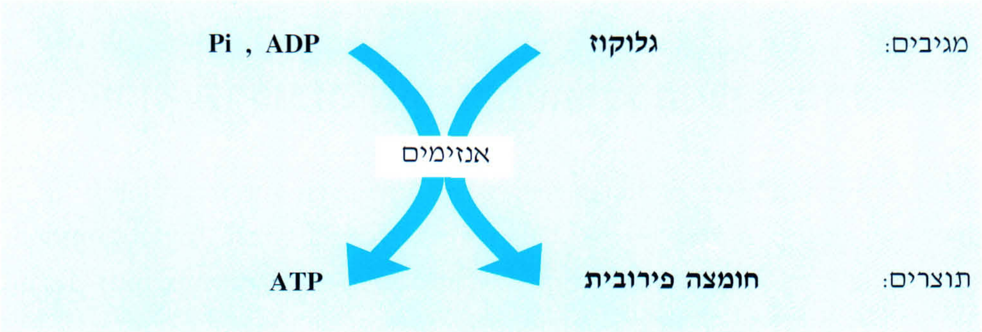
כל אחד מהשלבים כולל כמה תגובות, המזורזות על-ידי אנזימים ייחודיים.

שלב I - פירוק גלוקוז לחומצה פירובית: **גליקוליזה**

ה**גְלִיקוֹלִיזָה** (glycos=מתוק; lysis=פירוק) מתרחשת בציטופלסמה, ובה, כפי שאפשר להבין מהשם, מתפרק גלוקוז. שלב זה כולל כאמור תגובות מספר, כל תגובה מזורזת על-ידי אנזים ייחודי. בסיכום שלב זה, ממולקולה אחת של גלוקוז - שהוא חד-סוכר בן 6 אטומי פחמן ($C_6H_{12}O_6$) - מתקבלות שתי מולקולות של **חומצה פִּירוּבִית** - שהיא בת 3 אטומי פחמן ($C_3H_4O_3$), ובעזרת האנרגיה המשתחררת נבנות שתי מולקולות ATP.

למען הדיוק: בתחילת הגליקוליזה **מתפרקות 2** מולקולות ATP תוך עיבוד ראשוני של מולקולת הגלוקוז, ואילו בסוף הגליקוליזה מתרחשות תגובות כימיות המשחררות אנרגיה שמאפשרת **בניית 4** מולקולות ATP. בחישוב הסופי מתקבלות אפוא בגליקוליזה 2 מולקולות ATP.

סיכום שלב הגליקוליזה:



כאמור, תהליך הגליקוליזה הוא רק שלב אחד בפירוק מלא של הגלוקוז. בשלב זה רק אנרגיה מעטה, יחסית להמשך תהליך הפירוק, מתגלגלת לאנרגיה זמינה לתא (כמולקולות **ATP**). בתנאים מסוימים ובתאים מסוימים הפקת האנרגיה אכן מתרחשת רק בתהליך הגליקוליזה, ונשוב לכך בהמשך; אולם במרבית התאים חל גם שלב נוסף, (שלב II שלהלן) שבו מולקולות החומצה הפירובית מפורקות, ובצמוד לכך מורכבות מולקולות נוספות של **ATP**.

שלב II - פירוק חומצה פירובית: **נשימה תאית אווירנית**

(אווירנית: בנוכחות אוויר, כשהכוונה לנוכחות חמצן. בלועזית אֵירוֹבִּית: חיים=bios; אוויר=aer)

בתאים איקריוטיים הנמצאים בתנאים אווירניים, מולקולות החומצה הפירובית

(התוצרים של שלב הגליקוליזה) עוברות מהציטופלסמה לתוך אברונים מיוחדים, הנקראים **מִיטוֹכוֹנְדְרִיָה** (ביחיד: **מיטוכונדריון**. על אברון זה ראו בהמשך הפרק).

שימו לב: בתא האיקריוטי תהליכי הפקת אנרגיה מתרחשים בשני אתרים, בציטופלסמה ובמיטוכונדריון, והחומצה הפירובית עוברת מאתר אחד למשנהו.

מה קורה למולקולות החומצה הפירובית במיטוכונדריה?

- השלד הפחמני עובר שרשרת של תגובות אנזימטיות שמהן מתקבלות מולקולות פחמן דו-חמצני (CO_2).
- אטומי המימן משתתפים בשרשרת של תגובות שהאחרונה בהן היא התרכבות עם חמצן ויצירת מולקולות מים (H_2O). היות שמקורו של החמצן באוויר, נקרא שם השלב כולו נשימה תאית אווירנית.

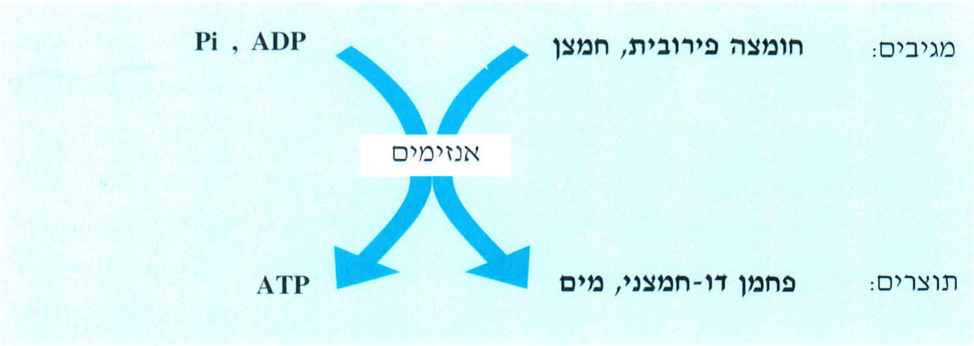
תוצרי פירוק החומצה הפירובית הם אם כן, ***פחמן דו-חמצני ומים***.

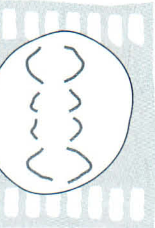
ומה באשר לאנרגיה?

מפירוק 2 מולקולות חומצה פירובית (שהתקבלו ממולקולת גלוקוז אחת), מתקבלת אנרגיה להרכבת **28(!)** מולקולות ATP. להזכירכם, מפירוק מולקולת גלוקוז בשלב הגליקוליזה מתקבלות רק 2 מולקולות ATP. אם כן, רוב האנרגיה המופקת בתא, מקורה בשלב הנשימה התאית האווירנית.

חשוב לציין שמרבית האנרגיה (כ-2/3) המשתחררת בתהליכים השונים בתא נפלטת כאנרגיית חום, ורק 1/3 מהאנרגיה מנוצלת להרכבת מולקולות ATP! (לשם השוואה: במכוניות משוכללות מנוצלים רק כ-25% מהאנרגיה!)

סיכום שלב הנשימה התאית האווירנית:



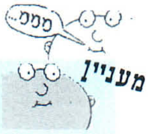


סיכום שני השלבים של פירוק גלוקוז (בנוכחות חמצן):

כאמור, הפחמימות, ובכללן גלוקוז, אינן מקור האנרגיה היחידי בתא; גם שומנים וחלבונים מהווים מקור אנרגיה: בתהליכי הפירוק של שומנים וחלבונים יכולים להתקבל אותם תוצרי ביניים כמו בפירוק פחמימות, ותוצרי ביניים אלה מחומצנים גם הם בנשימה תאית במיטוכונדריה, באותו מסלול של תגובות (בעזרת אותם אנזימים). בתגובות אלה, כמו בפירוק חומצה פירובית, התוצרים הסופיים הם פחמן דו-חמצני ומים, ובעזרת האנרגיה המשתחררת מתגובות אלה מורכבות מולקולות ATP.

פינת הפרוקריוט

בחיידקים הנשימה התאית האווירנית דומה לזו שבאיקריוטים, אף-על-פי שכאמור אין בהם מיטוכונדריה. בתאים אלה חלק מהתהליכים מזורזים על-ידי אנזימים בציטופלסמה, ובחלקם מעורבים חלבונים המשובצים בקרום התא.



מעניין

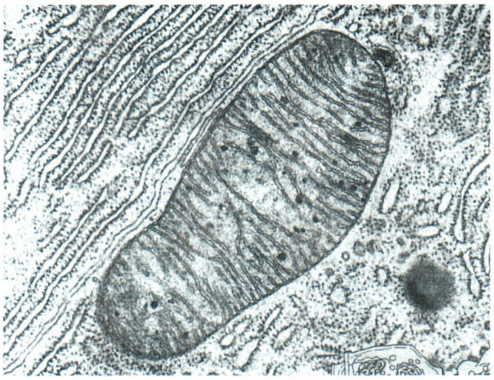
במהלך תרדמת החורף הארוכה של דוב גריזלי, הוא אינו אוכל, אינו שותה ואינו מפריש פסולת. עם זאת, שלא כמו ביצורים אחרים הנכנסים לתרדמת חורף, טמפרטורת גופו נשמרת בטווח גבוה למדי: 32°C - 35°C.

מחקרים הראו שמקור האנרגיה בגופו של הדוב בחודשים אלה הוא שומן הגוף, שומן שנאגר בכמויות גדולות לפני חודשי החורף. השומן מתפרק ומספק אנרגיה לשמירה על טמפרטורת הגוף, וכן לשמירה על רמה בסיסית של חילוף חומרים.

איור 7ז: דוב גריזלי

ז4. על המיטוכונדריון והמתרחש בו

הסתכלות במיטוכונדריון באמצעות מיקרוסקופ אלקטרונים, מראה שזהו אברון גלילי באורך של 3-10 מיקרומטר ובעובי 0.5-1 מיקרומטר, המוקף בשני קרומים: קרום חיצוני התוחם את האברון, וקרום פנימי המחלק את חלל האברון ל"סביבה בתוך סביבה" (איור ז8). בכך נוצרים במיטוכונדריון שני מדורים: האחד - בין שני הקרומים, והאחר - בחלל המוקף על-ידי הקרום הפנימי. בקרום הפנימי יש קיפולים רבים, שהודות להם שטח הפנים של הקרום גדול, יחסית לנפח שהוא ממלא (ביחס שבין שטח פנים לנפח עסקנו בפרק ב).

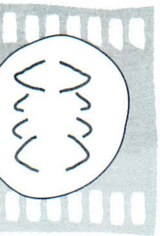


איור ז8: מיטוכונדריון
ימין: חתך במיטוכונדריון, צילום במיקרוסקופ אלקטרונים, הגדלה בערך פי 30,000
שמאל: תרשים

כאמור, תהליכי הנשימה התאית האווירנית מתרחשים במיטוכונדריון, תוך שמירה על "חלוקת עבודה" בין מדוריו השונים:

פירוק השלד הפחמני של החומצה הפירובית נעשה בתמיסה הממלאת את ***החלל הפנימי*** של המיטוכונדריון.

לעומת זאת, הרכבת מולקולות המים וזרחון מולקולות ADP למולקולות ATP נעשים באמצעות אנזימים ומבנים המשובצים ***בקרום הפנימי*** של המיטוכונדריון.



עוד על מיטוכונדריון

במיטוכונדריון מצויות מולקולות DNA ו- RNA, ריבוזומים ואנזימים ייחודיים, המייצרים חלק מחלבוני המיטוכונדריון בלי מעורבות ישירה של מערכות התא. המיטוכונדריה גם מכפילים את עצמם בלי תלות בהכפלת התא בו הם נמצאים.

עצמאות חלקית זו ותכונות נוספות המאפיינות מיטוכונדריה, הביאו להשערה אודות מוצאם של אברונים אלה. על השערה זו נלמד בפרק י.

על הקשר שבין מיטוכונדריה לבין צריכת האנרגיה בתא אפשר ללמוד גם מהנקודות שלהלן:

- יש התאמה בין **מספר** המיטוכונדריה בתא לבין הרמה של צריכת האנרגיה בו. לדוגמה: בתא אוגר שומן באדם יש רק מיטוכונדריה אחדים; בתא כבד, שבו יש חילוף חומרים נמרץ, מספרם נע בסביבות 2,000-1,000 (והם מהווים כחמישית מנפח התא!); בתאי שריר הלב, שבהם מתקיימת פעילות נמרצת עוד יותר, מספרם אף גדול יותר.
- **מיקום** המיטוכונדריה בתא קשור לאזורים שבהם נצרך הרבה **ATP**. לדוגמה: בתאי שריר המיטוכונדריה מרוכזים בשורות בין הסיבים המתכווצים, ובתאי זרע המיטוכונדריה מרוכזים סביב בסיס השוטון, שבאמצעותו התאים נעים.
- **שטח הפנים** של הקרום הפנימי של המיטוכונדריון גדול במיוחד בתא שהוא צרכן גדול של אנרגיה. לדוגמה: שטח הקרום הפנימי של המיטוכונדריון בתאי שריר הלב גדול פי שלושה מזה שבתאי כבד.

ז5. הפקת אנרגיה בהיעדר חמצן

למדנו שבהפקה מרבית של אנרגיה בתהליכי פירוק של תרכובות אורגניות מעורב חמצן חופשי.

כיצד אפוא מופקת אנרגיה בסביבות דלות חמצן, או אף חסרות חמצן?

מתברר שבמצבים של היעדר חמצן חופשי, דהיינו: בתנאים **אל-אווירניים** (נקראים גם: אנאירוביים, an=בלי), מופקת אנרגיה רק בגליקוליזה. בתהליך זה, שבו כאמור גלוקוז מפורק לחומצה פירובית, נבנות שתי מולקולות ATP (נטו; ראו סעיף ז3). החומצה הפירובית נשארת בציטופלסמה, שם היא עוברת שינויים ייחודיים לתנאים ולאורגניזמים (ראו להלן), והתוצרים מופרשים מהתא.

אחת מדרכי הפקת אנרגיה בתנאים אל-אווירניים נקראת **תסיסה**.

בטבע מוכרים כמה תהליכי תסיסה הנבדלים זה מזה בתוצר הסופי, ועל-פי תוצר זה נקבע שמם;

להלן נזכיר שניים מביניהם, בעלי חשיבות בתעשיית המזון: תסיסה כוהלית ותסיסת חומצת החלב.

- ב**תסיסה כוהלית** החומצה הפירובית הופכת לכוהל (=אלכוהול) ופחמן דו-חמצני. (הפחמן הדו-חמצני הנפלט כבועות הוא המקור לשם הכללי - תסיסה.)

תסיסה כוהלית המתרחשת בתאים ***איקריוטיים*** מנוצלת בתעשיית משקאות כוהליים.

הבר בפולי-ברז'ר (פרט)
אדוארד מנה (1883-1832)

תעשיית היין מבוססת על פעילותם של שמרים (השייכים לממלכת הפטריות) החיים על קליפות ענבים: אורגניזמים אלה מפרקים את הסוכר שבפרי העינב ויוצרים את האלכוהול שביין.

פינת הפרוקריוט

יש חיידקים המתקיימים בתנאים אל-אווירניים כמו אלה השוררים בביצות ובמכרות פחם. גם בחיידקים אלה השלב הראשון בהפקת האנרגיה הוא גליקוליזה, אך השלב השני שונה הן מנשימה אווירנית והן מתסיסה.

- **בתסיסת חומצת החלב** החומצה הפירובית הופכת לחומצת חלב (=חומצה לקטית), שיש לה טעם חמוץ וריח אופייני.

בתאים ***איקריוטיים*** כמו תאי השריר בגופנו, מתרחשת תסיסת חומצת החלב בעת מאמץ - כאשר נוצר מצב (זמני) של מחסור בחמצן.

תסיסת חומצת החלב בתאים ***פרוקריוטיים*** מנוצלת בתעשיית המזון זה שנים רבות. טעמו של חלב חמוץ מקורו בחומצת החלב, שיוצרים חיידקי החלב. על בסיס תהליך זה מייצרים (בתנאים מבוקרים) מוצרי חלב מגוונים: גבינות שונות ויוגורט לסוגיו.

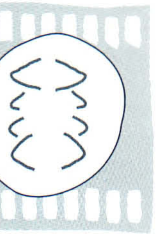
הכנת שימורי ירקות שונים, כמו מלפפונים חמוצים וכרוב חמוץ, מתבססת גם היא על תסיסת חומצת החלב.

נחזור למאזן האנרגיה;

כאמור, האנרגיה המופקת בתסיסה (תנאים אל-אווירניים) מעטה פי כמה מהאנרגיה המופקת בנשימה תאית אווירנית: פירוק גלוקוז בהשתתפות חמצן מסתיים בתרכובות פשוטות - פחמן דו-חמצני ומים. מהאנרגיה המשתחררת בשני שלבי הפירוק של מולקולת גלוקוז אחת (גליקוליזה ונשימה תאית אווירנית) נבנות 30 מולקולות ATP. לעומת זאת מתסיסה מולקולות ה-ATP המתקבלות הן רק שתי המולקולות הנוצרות בגליקוליזה.

טבלה ז1: הפקת אנרגיה (במולקולות ATP ממולקולה אחת של גלוקוז) בתאים

	בתנאים אווירניים	בתנאים אל-אווירניים
שלב I	גליקוליזה	
חומר מוצא:	גלוקוז	
מעורבות חמצן:	אין	
מיקום:	ציטופלסמה	
תוצר:	חומצה פירובית	
רווח אנרגטי:	2 מולק' ATP	
שלב II	נשימה תאית אווירנית	תסיסה
חומר מוצא:	חומצה פירובית	חומצה פירובית
מעורבות חמצן:	יש	אין
מיקום:	מיטוכונדריון	ציטופלסמה
תוצרים:	תרכובות אנאורגניות: CO_2 ו-H_2O	מגוון תרכובות, לדוגמה: חומצת חלב, כוהל + CO_2
רווח אנרגטי:	28 מולק' ATP	אין



ז6. סיכום

- לביצוע **פעילויות** התא ולשמירה על **ארגונו**, נדרשת **אנרגיה**.
- אנרגיה נצרכת ***בפירוק*** קשרים כימיים, ומשתחררת ***ביצירת*** קשרים כימיים.
- מולקולת **ATP**, המתקבלת מ-**ADP** וקבוצת **זרחה**, מהווה **מתווך** במעברי אנרגיה בתא: **בצמוד** לתהליכים ***משחררי*** אנרגיה מתרחש **זרחון** של מולקולות ADP ל-ATP, ובצמוד לתהליכים ***צורכי*** אנרגיה **מפורקות** מולקולות ATP.

קצת כימיה

- **פחמימות** היא קבוצת תרכובות אורגניות.
  גלוקוז הוא דוגמה ל**חד-סוכר; דו-סוכרים ורב-סוכרים** מורכבים מיחידות של חד-סוכרים.
  גלוקוז מהווה מקור חשוב להפקת אנרגיה בתאים, וכן חומר מוצא ל**שלד פחמני** לבניית תרכובות אורגניות אחרות.
  גליקוגן, **עמילן** ו**תאית** הם רב-סוכרים נפוצים בטבע. גודלם אינו קבוע: כל אחד מהם מורכב מאלפי יחידות של גלוקוז. גליקוגן ועמילן הם חומרי תשמורת.
- ב**גליקוליזה** מפורקת מולקולת גלוקוז לשתי מולקולות של **חומצה פירובית**, ומתקבלות שתי מולקולות ATP.

מגיבים — אנזימים — תוצרים

גלוקוז, ADP, Pi ← ← חומצה פירובית, ATP

- בתאים הנמצאים ב**תנאים אווירניים** מתקיים שלב **נשימה תאית אווירנית**: החומצה הפירובית מתפרקת בתהליך שבו משתתף **חמצן**. התוצרים הסופיים הם **פחמן דו-חמצני ומים**. בשלב זה מתקבלות מרבית מולקולות ה-ATP המופקות בתא.

מגיבים — אנזימים — תוצרים

חומצה פירובית, חמצן, ADP, Pi ← ← H_2O, CO_2, ATP

- ושני השלבים יחד –

פירוק גלוקוז בסביבה אווירנית:

מגיבים — אנזימים — תוצרים

גלוקוז, חמצן, ADP, Pi ← ← H_2O, CO_2, ATP

- **המיטוכונדריה** הם "תחנת הכוח" של התא האיקריוטי: בהם נמצאים אנזימים המשתתפים בנשימה התאית האווירנית, ובהם מופקות רוב מולקולות ה-ATP בתא.
- תהליכי **תסיסה** מתקיימים ב**תנאים אל-אווירניים**. בתאים שבהם מתרחשת תסיסה מתקבלת אנרגיה רק מגליקוליזה. באורגניזמים שונים מתקבלים תוצרי תסיסה שונים.
- רק כ- 1/3 מהאנרגיה המשתחררת בתהליכי פירוק מנוצלת להרכבת מולקולות ATP. שאר האנרגיה משתחררת כאנרגיית חום.
- בחיי היום-יום המונח נשימה מתייחס לחילוף-גזים. המונח **נשימה תאית אווירנית** מתייחס לשלב שבו חמצן מעורב בהפקת האנרגיה בתא.

שאלות ומשימות לפרק ז

1. להלן מספר משפטים. ציינו איזה מהם נכונים ואיזה שגויים, ואת המשפטים השגויים תקנו. שימו לב: ייתכן שחלק מהמשפט נכון, וחלק - שגוי.

א. צמחים אינם נעים, ולכן אינם צורכים אנרגיה.

ב. בכל אברוני התא מתרחשים כל הזמן תהליכי בניה ופרוק, תהליכים הצורכים אנרגיה.

ג. הצמחים נקראים יצורים יצרנים (אוטוטרופים), משום שהם מרכיבים תרכובות אורגניות מתרכובות אי-אורגניות (בעזרת אנרגית האור).

ד. בעלי-חיים נקראים יצורים צרכנים (הטרוטרופים), משום שאינם יכולים לנצל את אנרגיית השמש.

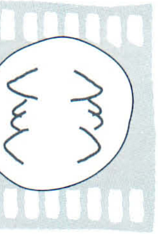
ה. כל התרכובות האורגניות שבגוף יצור צרכן הורכבו על-ידי יצור יצרן.

ו. צרכן אינו מסוגל להתקיים פרקי זמן ממושכים אם מזונו אינו מכיל גלוקוז.

ז. תהליך הגליקוליזה אינו יכול להתרחש בסביבה חסרת חמצן (אל-אווירנית, אנאירובית).

ח. בכל התהליכים של גלגולי אנרגיה בתא מעורבים אנזימים: גם בגליקוליזה, גם בנשימה תאית אווירנית וגם בתהליכי התסיסה.

ט. בגליקוליזה נוצרת חומצה פירובית, המפורקת בשלב הנשימה התאית האוירנית לפחמן דו-חמצני ולמים.



י. בתהליכי הפירוק של חומצה פירובית לפחמן דו-חמצני ולמים משתחררת יותר אנרגיה מאשר בפירוק גלוקוז לפחמן דו-חמצני ולמים.

יא. חלק מתוצרי הביניים המתקבלים מפירוק של פחמימות, שומנים וחלבונים הם זהים, ולכן המשך פירוקם מזורז על-ידי אותם אנזימים.

יב. מספר המיטוכונדריה בתאי הגוף קבוע לכל מין של אורגניזם.

2. כיצד קשורה העובדה שגליקוגן ועמילן אינם מסיסים במים עם תפקודם כחומרי תשמורת?

3. קצב הגידול של שמרים הגדלים בתנאים אווירניים (אירוביים), מהיר יותר מקצב גידולם בתנאים אל-אווירניים (אנאירוביים). הסבירו מדוע.

4. כשכוהל בוער הוא משחרר חום רב. מה ניתן להסיק מכך על היעילות של תסיסה כוהלית?

5. חוסר חמצן בתאי שרירי מתכווצים גורם לשינוי ברמת ה-pH. מהו השינוי (עלייה או ירידה ב-pH), ואיזה חומר אחראי לכך?

בשאלות הבאות יש לבחור את התשובה המתאימה ביותר.

6. איזה מהבאים הוא דוגמה לתהליך של תסיסה?
   א. גלוקוז ⟵ חומצת חלב ואנרגיה
   ב. גלוקוז וחמצן ⟵ פחמן דו-חמצני (CO_2), מים ואנרגיה
   ג. עמילן ומים ⟵ סוכרים פשוטים
   ד. כוהל ופחמן דו-חמצני (CO_2) ⟵ גלוקוז ואנרגיה

7. באיזה מהתהליכים הבאים מפיק האורגניזם את הכמות הגדולה ביותר של אנרגיה לגרם גלוקוז?
   א. נשימה אווירנית בשמרים
   ב. נשימה אל-אווירנית בשמרים
   ג. נשימה אל-אווירנית בתאי שריר
   ד. בכל התהליכים מופקת אותה כמות, כי בגרם גלוקוז יש כמות קבועה של אנרגיה.

8. השוני בין פירוק גלוקוז בתא לבין בעירתו במעבדה הוא בכך שבתא בלבד -
   א. משתחררת אנרגיה
   ב. דרוש חמצן לתהליך
   ג. משתתפים אנזימים בתהליך
   ד. נוצרים פחמן דו-חמצני ומים.

פרק ח

תא הצמח ופוטוסינתזה

כשאנו רואים פרפר מתעופף מעל כלנית, בולט לעינינו ההבדל בין שני האורגניזמים; אולם בבדיקת התאים של שני האורגניזמים נוכל לראות שיש דמיון עצום בין תאי צמחים לבין תאי בעלי-חיים - הן במבנה והן בתפקוד.

להלן כמה דוגמאות:

שני טיפוסי התאים מוקפים ב**קרום** בעל אותו מבנה בסיסי, המווסת כניסת חומרים לתא ויציאתם ממנו.

בשניהם מצוי **גרעין**, ובו אצור המידע התורשתי ב-**DNA**, והוא מוצפן בשניהם באותו **קוד**.

בשניהם נבנים **חלבונים** ב**ריבוזומים** שבציטופלסמה, במנגנון זהה ומאותם חומרי בניין, ובשניהם מורכבות מולקולות **ATP** **במיטוכונדריה** בתהליך **נשימה תאית**.

לצד הדמיון הרב בין שני טיפוסי התאים אפשר להבחין במבנים ותהליכים שהם ייחודיים לתאי צמחים, ובהם נדון בפרק זה.

ח1. הצמחים כאוטוטרופים

בצמחים מתבצע תהליך ה**פוֹטוֹסִינְתֶזָה** (photos=אור; synthesis=הרכבה), שכפי שמעיד עליו שמו, הוא תהליך של ***הרכבה בעזרת אור***. בתהליך זה מנוצלת **אנרגיית אור** לשם בניית חומרים אורגניים.

בפרק הקודם הכרנו את המושג יצורים **אוטוטרופים**, ולמדנו שהם "מסתפקים במועט": הם מייצרים בעצמם את התרכובות האורגניות שבגופם. יצורים פוטוסינתטיים הם אוטוטרופים המשתמשים באנרגיית אור מן השמש ובחומרים פשוטים: פחמן דו-חמצני, מים ומלחים, שאותם הם קולטים מהסביבה. ממרכיבים אלה הצמחים בונים תרכובות אורגניות פשוטות, ותרכובות אלה הן הבסיס לבניית תרכובות אורגניות מורכבות, וכן מקור לאנרגיה בתהליכי הגליקוליזה והנשימה.

"חומרי הבנייה" של הצמחים הם, כאמור, פחמן דו-חמצני, מים ומלחים. כדאי לשים לב לכך שמים ומלחים מקורם בדרך-כלל בקרקע, ואת הפחמן הדו-חמצני קולטים הצמחים מהאוויר.

יצורים **הטרוטרופים**, שעמם נמנים בעלי-החיים, אינם יכולים להתקיים אם אינם מקבלים מסביבתם חומרים אורגניים מוכנים. חומרים אורגניים אלה משמשים בתפקיד כפול: בסיס להרכבת חומרים אורגניים נוספים ומקור לאנרגיה. מקורם של חומרים אלה הוא כאמור ביצורים אוטוטרופים, ולכן אין פלא שיש המעריכים את הפוטוסינתזה כתהליך החשוב ביותר עלי אדמות.

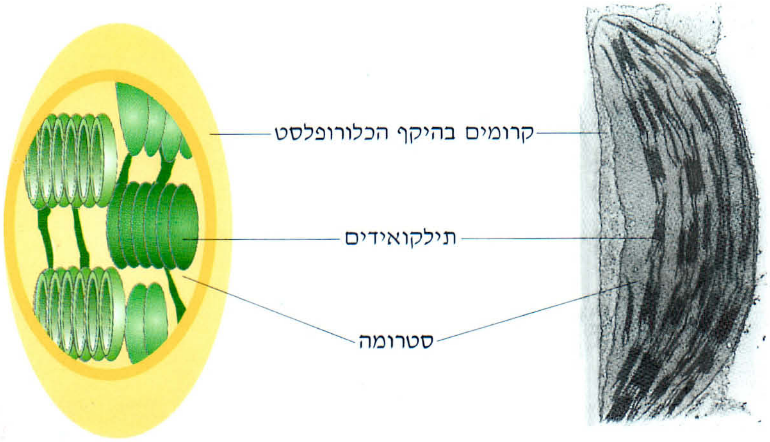
ח2. הכלורופלסט

האברון שבו מתבצעת פוטוסינתזה הוא ה**כְלוֹרוֹפְּלַסְט** (chloros=ירוק; plastos=צורה. ברבים - כלורופלסטים). כלורופלסטים מצויים ברבים מן התאים של רוב הצמחים ואינם נמצאים בתאי בעלי-חיים; אורכו של כלורופלסט הוא כ-5 מיקרומטר ורוחבו כ-1.5 מיקרומטר (אורכו ורוחבו של תא צמחי הוא כמה עשרות מיקרומטרים).

לכלורופלסט יש מבנה מורכב, שנחקר בעזרת מיקרוסקופ האלקטרונים:
בהיקף הכלורופלסט יש שני קרומים; הקרום הפנימי מקיף תמיסה מימית המכילה מרכיבים שונים, ביניהם אנזימים המשתתפים בפוטוסינתזה. תמיסה זו נקראת **סְטְרוֹמָה**. בתוך הסטרומה נמצאות גם "עֲרֵמוֹת" של שקיקים קרומיים שטוחים, דמויי דִסקיות, הנקראים **תִילָקוֹאִידִים** (ביחיד - תילקואיד) הקשורים ביניהם (איור ח1).

פינת הפרוקריוט

כלורופלסטים נמצאים רק באיקריוטים; בחיידקים שמתרחשת בהם פוטוסינתזה, היא מתבצעת באמצעות אנזימים בציטופלסמה ומעורבים בה מבנים בקרום התא.



איור ח1: כלורופלסט
ימין: חתך בכלורופלסט, צילום במיקרוסקופ אלקטרונים, הגדלה בערך פי 10,000
שמאל: תרשים

לפניכם רשימת מבנים: כלורופלסט, תא צמח, תילקואיד, כלורופיל, סטרומה.
הבהירו לעצמכם כיצד הם קשורים זה לזה.

בקרומי התילקואידים ממוקמות מולקולות **כלורופיל**, והן אשר מקנות לכלורופלסטים - ודרכם גם לחלקים שונים של הצמח - את הצבע הירוק.
מולקולות הכלורופיל הן הקולטות את אנרגיית האור, ומהוות בכך תחנה ראשונה בתהליך הפוטוסינתזה.

מעניין

בסטרומה מצויות גם מולקולות DNA ו-RNA, וכן ריבוזומים ואנזימים שבאמצעותם נוצרים חלק מהחלבונים הייחודיים לכלורופלסטים.
כמו-כן, כלורופלסטים מכפילים את עצמם בלי תלות בהכפלת התא שבו הם נמצאים.
במשמעותה של עצמאות חלקית זו, כמו גם בזו של המיטוכונדריה, נעסוק בפרק י, הדן במוצאם של התאים.

ת3. פוטוסינתזה: מחומרים אי-אורגניים לחומרים אורגניים

כאמור, בתהליך הפוטוסינתזה נוצרות תרכובות אורגניות מחומרים פשוטים, בעזרת אנרגיית האור. התרכובות האורגניות תוצרי הפוטוסינתזה הן פחמימות.
אפשר לסכם את התהליך כך:

מגיבים		תוצרים
פחמן דו-חמצני, מים	אנרגיית אור ← ← ← ← כלורופיל, אנזימים	**פחמימה, חמצן**

אחת מנקודות הציון החשובות בחקר הפוטוסינתזה היה הגילוי שיש בתהליך שני שלבים התלויים זה בזה, ואשר כל אחד מהם מתרחש במדור אחר של הכלורופלסט:

- בשלב הראשון נקלט אור, והוא מומר לאנרגיה כימית. שלב זה מתרחש בכלורופיל שבקרומי התילקואידים.
- בשלב השני פחמן דו-חמצני שנקלט מהסביבה נקשר לתרכובת אורגנית. שלב זה מתרחש בסטרומה.

האריה רעב (פרט)
הנרי רוסו (1910-1844)

נפרט מעט מהידוע על כל אחד מהשלבים.

שלב ראשון: **המרת אנרגיה** - **"שלב האור"**

תהליך קליטת אנרגיית אור והמרתה לאנרגיה כימית הוא ללא ספק המייחד את הפוטוסינתזה מתהליכים אחרים בעולם החי.

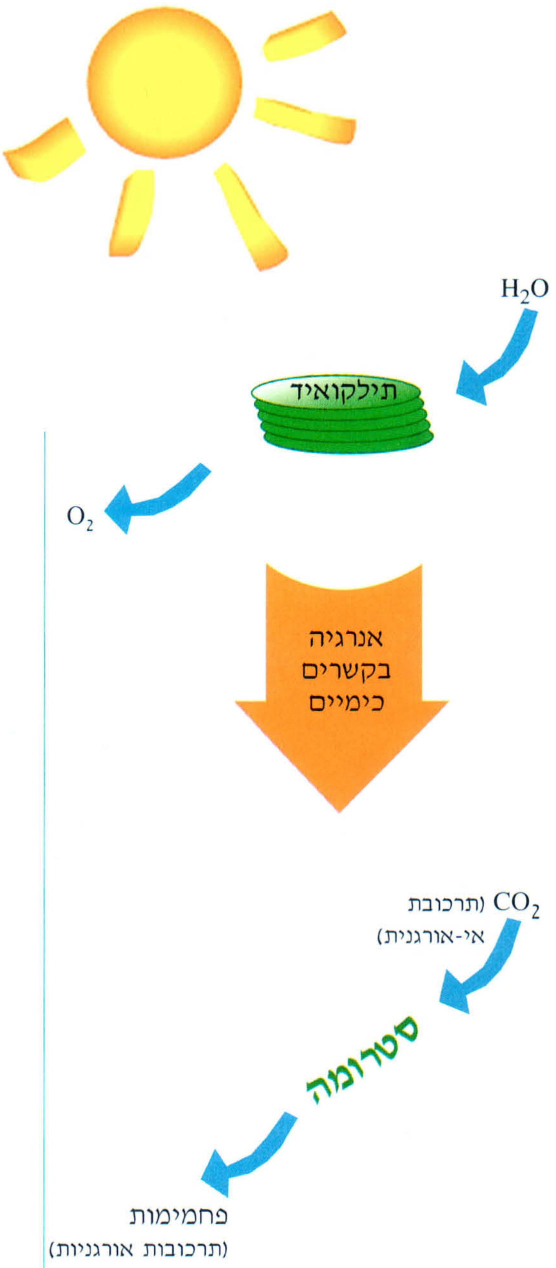
אנרגיית אור נקלטת בכלורופיל שבקרומי התילקואידים, ובאמצעות אנזימים ומרכיבים נוספים היא מומרת לאנרגיה כימית, כלומר: בעזרת אנרגיית אור מתרחשות תגובות שבהן מורכבות מולקולות ATP ומולקולות נוספות הקשורות במעברי אנרגיה. אנרגיה כימית זו מנוצלת בשלב השני של הפוטוסינתזה.

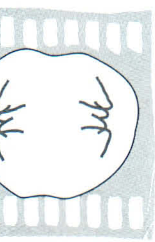
בהמרת אנרגיית האור לאנרגיה כימית, תהליך המתרחש כאמור בתילקואיד, מעורב תהליך חשוב נוסף: פירוק מולקולות מים (H_2O), ושחרור מולקולות חמצן (O_2).

שלב שני: **קיבוע פחמן**

פחמן דו-חמצני (CO_2) הנמצא במצב גזי חודר מהאוויר לחללי אוויר המצויים בצמח, ומשם – כשהוא מומס במים, עובר בדיפוזיה לתוך התאים והכלורופלסטים. בכלורופלסט ה-CO_2 נקשר לתרכובת אורגנית הנמצאת בסטרומה, תוך ניצול האנרגיה הכימית שהתקבלה בשלב האור.

שימו לב: הפחמן, שהיה בתרכובת עם חמצן כחומר **אי-אורגני** (CO_2) "מקובע", כלומר: הופך לחלק ממולקולה **אורגנית**!





קיבוע הפחמן מזורז על-ידי אנזים הנחשב לחלבון הנפוץ ביותר בטבע!

תוצר הפוטוסינתזה הוא פחמימה פשוטה, בת שלושה פחמנים. תוצר זה מהווה שלד פחמני לבניית תרכובות אורגניות רבות הן בתוך הכלורופלסט והן בציטופלסמה.
מבין תרכובות אורגניות אלה נציין את הסוכרוז והעמילן.

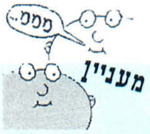
הסוכרוז מורכב בדרך-כלל בתאי העלים, ומהם עובר בצינורות ההובלה של הצמח אל חלקי הצמח שאינם מבצעים פוטוסינתזה, שם הוא משמש לבניית חומרים מורכבים יותר, וכן להפקת אנרגיה בתהליכי גליקוליזה ונשימה תאית. (בדומה לגלוקוז, העובר בבעלי-חיים - באמצעות מחזור הדם - ממערכת העיכול לשאר חלקי הגוף.)

עמילן הוא רב-סוכר המשמש חומר תשמורת בתאי צמח: בשעת הצורך הוא מתפרק למרכיביו - מולקולות של גלוקוז - הזמינות לצמח הן כבסיס לבניית מולקולות אורגניות שונות והן להפקת אנרגיה. כפי שצוין, היות שעמילן אינו מסיס במים, הימצאותו בתא כמעט שאינה משפיעה על ריכוז המומסים.
עמילן מצוי בעלים של צמחים, ומצטבר בעיקר באברי אגירה (כמו פקעות של תפוחי-אדמה) ובזרעים (כמו תירס).

אוכלי תפוחי האדמה (פרט) - **וינסנט ון-גוך** (1853-1890)

בשעות האור עמילן מצטבר בכלורופלסטים שבעלים. חלקו מתפרק בלילה לגלוקוז, ומנוצל בתהליכי הגליקוליזה והנשימה התאית.
תהליכי גליקוליזה ונשימה תאית מתרחשים בתאי הצמח ***כל הזמן*** - ביום ובלילה.

חִשבו: מדוע מתפרקים מאגרי העמילן שבכלורופלסט דווקא בלילה?



נפט, פחם, ואפילו מעשי ידי אדם כמו קמח ומוצריו - הם תוצרים (עקיפים) של פוטוסינתזה!

מבט אקולוגי על פוטוסינתזה

עד כה עסקנו בחשיבות הפוטוסינתזה ליצור שבו היא מתקיימת. נוסף לחיוניות הפוטוסינתזה לתא וליצור, לתהליך זה יש מקום מרכזי ביותר במערכת האקולוגית בכללה. זאת בשל שלוש נקודות:
המרת אנרגיה; הרכבת שלד פחמני; שחרור חמצן חופשי.
נפרט מעט לגבי כל אחד מהשלושה.

- **המרת אנרגיה:**

כאמור, בפוטוסינתזה מומרת אנרגיית אור לאנרגיה כימית. האנרגיה הכימית ניתנת לניצול בזמנים שונים ובמקומות שונים. מכאן שהתוצרים הישירים והעקיפים של תהליך הפוטוסינתזה משחררים את היצורים (ובכללם גם את החברה התעשייתית!) מתלות - הן בזמן והן במרחב - במקור האנרגיה הראשוני של החיים - אור השמש.

- **הרכבת שלד פחמני:**

רוב היצורים החיים בעולמנו, בין שהם חיים במים ובין שהם חיים ביבשה, ניזונים ישירות או בעקיפין מתוצרי תהליך הפוטוסינתזה. תוצרים אלה הם חומרים אורגניים המשמשים שלד פחמני לבניית כל התרכובות האורגניות בגוף, ביניהן פחמימות, חלבונים, שומנים וחומצות גרעין.

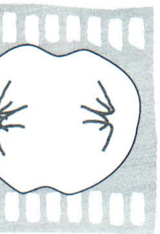
בשל יכולתם של יצורים אוטוטרופים לייצר חומרים אורגניים מחומרים אי-אורגניים, הם מתפקדים כיצרנים עבור המערכת האקולוגית כולה, ונמצאים בראשיתה של **שרשרת המזון**[1] בטבע. אחריהם בשרשרת נמצאים אוכלי צמחים, הניזונים מעלים, פירות, שורשים וזרעים של צמחים, ואוכלי צמחים אלה נאכלים על-ידי טורפים.

שרשרת מזון

- **שחרור חמצן חופשי:**

שיעור החמצן החופשי באטמוספרה כיום הוא כ-20%. רוב-רובו של חמצן זה נוצר במשך העידנים בתהליך הפוטוסינתזה (עוד על כך קראו להלן בפרק י, העוסק בהתפתחות התא הראשון).

חמצן חופשי חיוני לתהליך הנשימה התאית האווירנית (ראו פרק ז); הודות לפליטת חמצן חופשי בתהליך הפוטוסינתזה, נשמר ריכוזו באטמוספרה בטווח קבוע (פחות או יותר), אף שהוא נצרך בנשימה אווירנית הן על-ידי צמחים והן על-ידי בעלי-חיים.



[1] שם כללי לתיאור יחסי הזנה (מעברי חומרים ואנרגיה) בין מיני יצורים בבית גידול.
דוגמה לצורה כללית של שרשרת מזון: צמח ← חרק ← ציפור ← חיידקים

ח4. מבנים בתא הצמח

מעניין

בתאי צמח צעירים, שטרם עברו התמיינות לרקמה כלשהי, לכל הפלסטידים יש צורה ראשונית אחידה. עם התמיינות התאים, הפלסטידים מתפתחים לצורתם המוגדרת (ההפיכה לפעמים!), בהתאם לסוג הרקמה ולתנאי הסביבה.

פלסטידים

הכרנו את הכלורופלסט כאברון שבו מתרחשת פוטוסינתזה. למעשה, הכלורופלסט הוא אחד ממשפחה של אברונים - **פלסטידים** - הנמצאים בתאי צמחים.

נכיר פלסטידים נוספים:

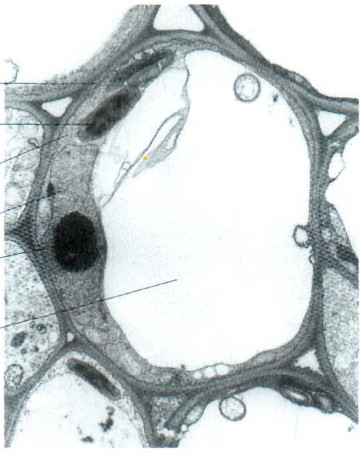
כרומופלסטים (chroma=צבע) הם פלסטידים המכילים צבענים (חומרי צבע) שונים, שאינם כלורופיל. פלסטידים אלה הם המקנים את צבעי האדום-כתום-צהוב לעלי כותרת של פרחים רבים (כמו חרצית) ולפירות שונים (כמו עגבנייה ופלפל).

עמילופלסטים (amylon=עמילן) הם פלסטידים שבהם נאגר עמילן (איור ח2). ישנם צמחים, כמו תפוחי-אדמה, שבהם עמילופלסט יחיד יכול להגיע לגודל תא של בעל-חיים!

איור ח2: תא שורש מצמח שעועית
צילום במיקרוסקופ אלקטרונים,
הגדלה בערך פי 2,000

חלולית

החלולית (וקואולה, vacuus=ריק) גם היא אברון ייחודי לתאי צמחים (איור ח3). זוהי מעין שלפוחית גדולה, תחומה בקרום המפריד בין תוכנה לבין הציטופלסמה. יש תאי צמחים שבהם מספר חלוליות, ויש תאי צמחים (בעיקר תאים בוגרים) שבהם חלולית אחת, הממלאה את מרבית נפח התא, והציטופלסמה עם האברונים שבה נדחקים להיקף.

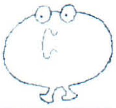


איור ח3: תא עלה מצמח מלוח
צילום במיקרוסקופ אלקטרונים,
הגדלה בערך פי 6,000

בדיקת תוכן החלולית מראה שהיא מכילה ***מים ומומסים*** שונים: מלחים, סוכרים וחלבונים. בחלולית נאגרים חומרי תשמורת, וכן מתרחשים בה תהליכי פירוק אנזימטיים, שאפשר למצוא דמיון ביניהם לבין אלה המתרחשים בליזוזומים שבתאי בעלי-חיים.

חלק מהצמחים מכילים בחלולית ***חומרים ייחודיים,*** כמו אופיום (בפרג) וחומרי טעם (בשום ובתפוז). יש צמחים שבחלוליות של התאים באיברים מסוימים שלהם מצויים צבענים; כך הדבר בשורש הסלק, בעלי הכרוב האדום ובעלי הכותרת של חלק מהפרחים הצבעוניים - כמו גרניום וורדים.

חלולית מלאה מספקת ***תמיכה פנימית*** לתא, ואף לצמח כולו: כאשר החלוליות מלאות במים, דופנות התאים (ראו בהמשך) מתוחות והצמח נראה רענן. כאשר הצמח נמצא בתנאי יובש יש פחות מים בחלולית, נפחה קטן, היא מתכווצת, דופנות התאים אינן מתוחות והצמח נראה כמוש (ראו גם פרק ה, סעיף ה2).



פינת הפרוקריוט

גם תאי חיידקים מוקפים בדופן, אך הרכבה הכימי שונה מהרכב הדופן של תא צמח.

דופן תא הצמח

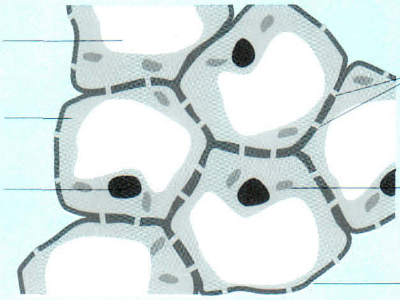
תאי כל הצמחים - אצות, טחבים וצמחים עילאיים - מוקפים בדופן קשיחה, שעובייה 1-0.1 מיקרומטר (איורים ב2, ח2, ח3).

דופנות התאים מקנות הגנה ותמיכה מכנית לתאים הבודדים ולצמח השלם.

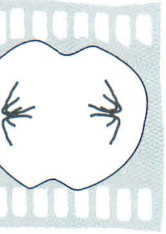
בהסתכלות ראשונית בתא צמח המבנה הבולט ביותר הוא הדופן - ולפיכך אין להתפלא שהתיאור הראשון בהיסטוריה המדעית של תא היה תיאור דופן של תא צמח (ראו פרק א). יש קשר בין המבנה וההרכב של דופן התא הבוגר, לבין תפקוד התא. כך, לדוגמה, לתאי רקמה הפעילה בפוטוסינתזה בעלה יש דופן דקה בלבד, ואילו לתאים של רקמות תמיכה יש דפנות המורכבות נוסף לשכבת הדופן הדקה, גם משכבת דופן עבה.

כדאי לדעת,

בדופנות התאים יש פתחים, שדרכם הציטופלסמה של תא אחד מחוברת עם הציטופלסמה של התאים השכנים. "גשרים" כאלה יוצרים רצף של ציטופלסמה וקרום בין תאים סמוכים.

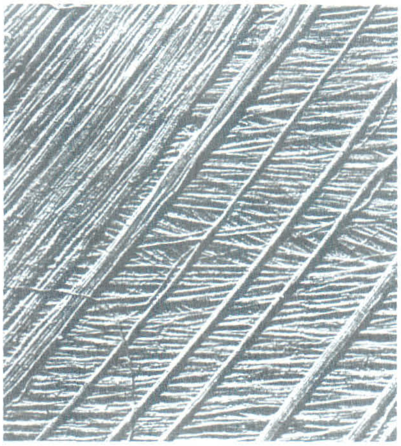


איור ח4: "גשרים" של ציטופלסמה בין תאי צמח שכנים



בפרק ה, שעסק בקרומי התא, הכרנו אחד מתפקודי הדופן: למדנו כי תאי בעלי-חיים המצויים בסביבה שבה ריכוז המים גבוה מריכוזם בתוך התא, מתנפחים ועלולים להגיע להתפוצצות, ואילו בתאי צמח הנמצאים בתנאים כאלה, ההתנפחות אינה מסתיימת בהתפוצצות התא; עלייה בנפח התא (שעיקרה, בתאי צמחים, עלייה בנפח החלולית) גורמת ללחץ על הדופן - הנמתחת מעט, אך בהיותה מעין אריזה נוקשה - היא מפעילה לחץ נגדי, ואינה מאפשרת לקרום התא להימתח עד התפוצצות (ראו איור ה7). קשיחות הדופן מצד אחד והאלסטיות שלה מצד אחר, הן תכונות הנובעות מכך שהיא בנויה מסיבים.

המרכיב העיקרי בדופן תא הצמח הוא הרב-סוכר **תאית** (ראו איור ח5 וגם איור ז5). מולקולות התאית יוצרות סיבים, וסיבים אלה משולבים בדופן עם רב-סוכרים נוספים ועם כמה חלבונים. הודות לעובייה ולקשיחותה של הדופן היא מקנה הגנה מכנית, אך כמו בתאי בעלי-חיים כך גם בתאי צמחים - כניסת חומרים אל התא ויציאתם ממנו מבוקרת על-ידי קרום התא.



איור ח5: סיבי תאית בדופן של תא צמח
צילום במיקרוסקופ אלקטרונים, הגדלה בערך פי 7,500

תאית

תאית היא כאמור מולקולת ענק הבנויה מיחידות של גלוקוז. זוהי המולקולה הנפוצה ביותר עלי אדמות: התאית מהווה את עיקר משקלו של עץ; סיבי הכותנה - מורכבים כמעט על טהרת התאית, והנייר - מקורו בתאית מעובדת. רוב בעלי-החיים הניזונים מצמחים אינם יכולים לנצל את התאית כמקור אנרגיה, היות שבמערכת העיכול שלהם אין אנזים המפרק אותה. יוצאים מהכלל בהקשר זה הם יונקים אוכלי עשב (כמו פרות ועזים) וכן טֶרְמִיטִים (בעלי-חיים ממחלקת החרקים), שיכולים לנצל תאית היות שבמערכת העיכול שלהם חיים חיידקים המפרישים אנזים המפרק תאית.

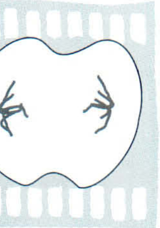
ח.5. סיכום

- **כלורופלסטים** ו**פלסטידים** אחרים, **חלולית** ו**דופן** - מייחדים את תאי הצמח.
- תהליך ה**פוטוסינתזה** מתרחש בכלורופלסטים.
- בתהליך הפוטוסינתזה נוצר **חומר אורגני** מפחמן דו-חמצני ומים, בעזרת **אנרגיית אור**:
בשלב הראשון נקלט האור, והוא מומר לאנרגיה כימית. בתהליך זה מתפרקת מולקולת מים ומשתחרר חמצן. שלב זה מתרחש בקרומי ה**תילקואידים**.
בשלב השני נקשר CO_2 מהסביבה לתרכובת אורגנית בצמח. שלב זה מתרחש בתמיסה שב**סטרומה**.
- **סוכרוז**, שהוא מתוצרי הפוטוסינתזה, מועבר לכל חלקי הצמח, שם הוא משמש הן שלד לבניית חומרים אורגנים מורכבים (בכללם גם חומרי תשמורת) והן מקור לאנרגיה.
- **עמילן** הוא חומר תשמורת נפוץ בצמחים.
- חשיבות הפוטוסינתזה למערכת האקולוגית:
המרת אנרגיית אור ל**אנרגיה כימית**;
הרכבת **שלד פחמני** המשמש בסיס לכל החומרים האורגניים;
מִחְזור **חמצן** באטמוספרה.
- לבד מן הכלורופלסטים, מוכרים פלסטידים נוספים, ביניהם **כרומופלסטים** ו**עמילופלסטים**.
- ב**חלולית** נמצאים מים ומומסים שונים, ומתרחשים בה תהליכים אנזימטיים.
- **דופן תא** צמח בנויה בעיקר מסיבים של **תאית**.
- הדופן והחלולית תורמים לייצוב המכני של התא ושל הצמח כולו.

שאלות ומשימות לפרק ח

1. פוטוסינתזה ונשימה תאית הם תהליכים המשלימים זה את זה ברמה האקולוגית. האם השלמה זו מתייחסת לחומרים, לאנרגיה או לשניהם? הסבירו.

2. להלן מספר משפטים. ציינו איזה מהם נכונים ואיזה שגויים, ואת המשפטים השגויים תקנו. שימו לב: יתכן שחלק מהמשפט נכון, וחלק - שגוי.
א. יצורים אוטוטרופיים מייצרים תרכובות אורגניות מתרכובות אי-אורגניות.
ב. רוב הצמחים הם אוטוטרופיים, בעלי-חיים הם הטרוטרופיים.
ג. פוטוסינתזה מתקיימת רק בצמחים, ונשימה תאית אווירנית - רק בבעלי-חיים.
ד. מולקולות כלורופיל ממוקמות בקרומי התילקואידים שבכלורופלסטים.
ה. הפחמן המקובע לתרכובת אורגנית בשלב האור של פוטוסינתזה, מנוצל בשלב השני של הפוטוסינתזה.



ו. כל אנרגית האור שקולטים הצמחים מומרת לאנרגיה כימית. לפיכך אפשר לראות בצמחים מעין "צינור" המעביר אנרגיה מצורה לצורה, מבלי שכמותה תשתנה.

ז. תוצרי הפוטוסינתזה משמשים שלד פחמני שממנו נבנות בצמח תרכובות אורגניות שונות.

ח. בתאי צמחים עמילן מומס בנוזל החלולית.

ט. תאי בעלי-חיים מוקפים קרום; בתאי צמח יש דופן במקום קרום.

י. אברונים בתאי צמח, שאינם בתאי בעלי-חיים: דופן, חלולית ופלסטידות.

3. אור אינו חיוני לקיום התגובה שבה פחמן מקובע לתרכובת אורגנית. למה אם כן נחוץ שלב האור בפוטוסינתזה?

4. בפוטוסינתזה הורכבה פחמימה. ציינו כמה מסלולים שבהם פחמימה זו עשויה לעבור עד לפרוקה לפחמן דו-חמצני ומים.

5. עינן ירוק (אויגלנה) הוא אצה חד-תאית, בעלת כלורופלסטים. אצה זו נמצאת בטבע בעיקר במקומות מוארים. מדענים הצליחו לגדל עינן ירוק בחושך, במצע המכיל סוכרים. ניתן להסיק מכך ש (בחר במתאים):

א. העינן הירוק הוא צאצא של הורים אוטוטרופיים

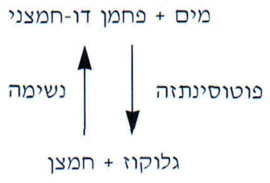
ב. יש כלורופלסטים שאינם זקוקים לאור כדי לתפקד

ג. העינן הירוק יכול להתקיים גם בדרך הטרוטרופית

ד. העינן הירוק אינו יכול לבצע פוטוסינתזה.

6. איזה מהתרשימים מתאר בצורה נכונה את גלגולי ***האנרגיה*** בנשימה ובפוטוסינתזה?

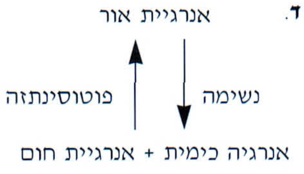
א.



ב.

ג.

ד.



פרק ט

מחזור התא וחלוקותיו

כפי שצוין בפרק א, כל תא נוצר מתא שקדם לו. התא החדש גדל, ובבוא העת הוא מתחלק לשני תאי-בת. מכאן, שרצף ההתרחשויות בחייו של תא מתחיל עם היווצרותו, ונמשך עד להתחלקותו. רצף זה נקרא **מַחְזוֹר התא**.

התייחסו לשאלה (בעלת הגוון הפילוסופי) האם השם "מחזור התא" הולם את הרצף הזה יותר מהשם "חיי התא"? ציינו טיעון התומך בכל אחד מהשמות.

בפרקים קודמים למדנו על תהליכים, כמו ייצור חלבונים (פרק ד) ונשימה תאית (פרק ז), המתרחשים במשך כל מחזור התא. בפרק זה נתמקד בשני אירועים המתרחשים בפרק זמן מוגדר במחזור התא: הכפלה של DNA וחלוקת הגרעין. הדיוק בשני אירועים אלה הכרחי לתקינות ולהמשכיות של דורות תאים, ובהמשך הפרק נלמד כיצד מושג דיוק זה.

ביצורים חד-תאיים (פרוקריוטים ואיקריוטים) חלוקת תא משמעותה הִתרבות, שכן כל תא הוא יצור עצמאי. ביצורים רב-תאיים, לעומת זאת, חלוקה אינה תמיד קשורה ברבייה; חלוקת תאים היא חלק בלתי נפרד מתהליכים רבים, כמו התפתחות עוברית, גדילה, צמיחה, ריפוי פצעים וחידוש רקמות; עם זאת ביצורים רב-תאיים יש גם תאים רבים שאינם מתחלקים.
רבייה ביצורים רב-תאיים רבים כרוכה לרוב בחלוקת תא מיוחדת, שגם אותה נכיר בפרק זה.

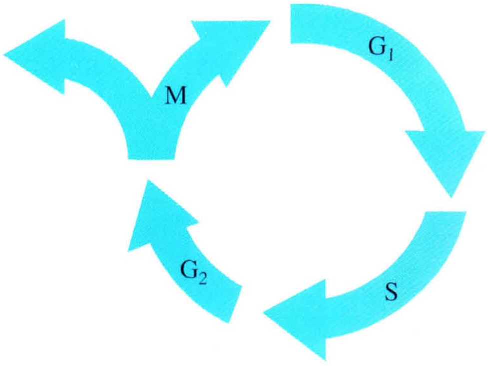
ט.1 שלבי מחזור התא

ניתן לחלק את מחזור התא האיקריוטי לארבעה שלבים עיקריים בהתאם לפעילות העיקרית המתרחשת בתא בכל שלב. ואלה ארבעת השלבים (ראו איורים ט1 ו-ט2):

שלב **G_1** (Growth 1=גידול 1) - בשלב זה מתחיל את דרכו תא שזה עתה נוצר בחלוקה. התא גדל בנפחו, מתבצע בו חילוף חומרים נמרץ, ומיוצרות בו מולקולות רבות של RNA, חלבונים ומרכיבי תא נוספים.
משכו של שלב זה שונה מאד בתאים שונים: בין שעות מספר עד ימים, ויש גם תאים שכל חייהם נמצאים בשלב זה (ראו "מעניין" בעמוד הבא).

שלב **S** (Synthesis=ייצור) - בשלב זה מוכפלות מולקולות החומר התורשתי (ה-DNA) שבגרעין התא. בהמשך נדון בדרך שבה מוכפלות מולקולות אלה, וכאן רק נזכיר שוב שהדיוק של הכפלה זו חשוב ביותר, היות ששיבוש במידע שב-DNA עלול להשפיע על תפקוד התאים הצאצאים בדורות הבאים.
בתום שלב זה יש בגרעין התא כמות כפולה של DNA (איור ט2). שלב זה נמשך בדרך כלל 6-3 שעות.

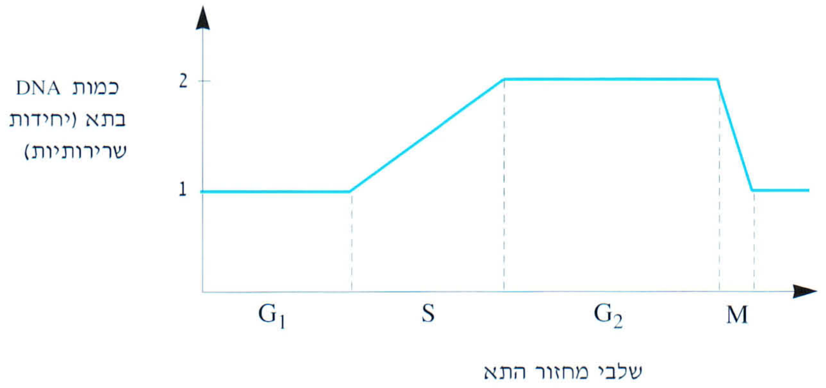
שלב **G_2** (Growth2=גידול 2) - גם הוא שלב של גידול, וגם בו מתרחשים תהליכי ייצור והרכבה של חומרים שונים בתא, ביניהם RNA וחלבונים. היות ששלב זה חל אחרי הכפלת ה-DNA, בשלב זה יש בתא כמות כפולה של DNA.
אורך שלב זה בדרך-כלל 5-2 שעות.



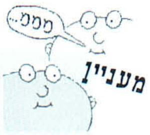
איור ט1: מחזור התא
ארבעה שלבים במחזור התא: תא שהוא תוצר של חלוקה (M), מתחיל את המחזור בשלב גידול (G_1), עובר לשלב הכפלת ה-DNA (S), ודרך שלב גידול שני (G_2) מגיע לשלב החלוקה (M).

שלב **M** (Mitosis=מִיטוֹזָה) - הוא שלב קצר, לעומת השלבים האחרים, ומרשים ביותר למתבונן בו מבעד למיקרוסקופ. גרעין התא, שמכיל כמות כפולה של חומר תורשתי, מתחלק במדויק לשניים (זהו תהליך המיטוזה). לאחר מכן מתחלקת הציטופלסמה, עם האברונים שבה, בין שני התאים המתהווים. כל אחד מתאי-הבת נכנס עתה לשלב G_1 שלו, ומתחיל מחזור חדש.

בפרטי המיטוזה נדון בהמשך.

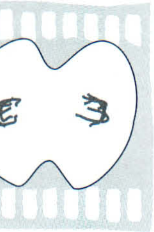


איור ט2: כמות DNA בתא בשלבים השונים של המחזור
שימו לב: בשלב S כמות ה-DNA בתא מוכפלת, והיא נשארת כפולה עד לחלוקה של התא (שלב M).



לצד האחידות בעולם החי באשר ***לרצף*** האירועים במהלך מחזור התא, אפשר למצוא מגוון ***במשך*** מחזור התא ***ובאורך*** של כל אחד משלביו:

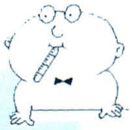
- תאים עובריים מתחלקים בצורה נמרצת ביותר. בתאים אלה חל מעבר ישיר משלב S לשלב M ומשלב M לשלב S, ללא שלבי הגידול G_1 ו-G_2.
  לשם דוגמה: תאים בעובר של זבוב משלימים מחזור אחת לשמונה דקות!
- משך המחזור של תאים בכמה רקמות בגופנו (כמו תאי עור, תאי דופן המעי, תאים במח העצמות) נע בין 8 ל-24 שעות; תא כבד, לעומת זאת, משלים מחזור אחד במשך כשנה!
- יש תאים שלא מתרחשת בהם הכפלה של DNA, והם אינם מתחלקים. הם נמצאים בשלב G_1 ממושך, הנקרא G_0.
  כאלה הם רוב תאי הצמח (חלוקת התאים בצמחים מוגבלת לאזורים מוגדרים, כמו קצות גבעול, קצות ענפים וקצות שורשים), וכן תאי שריר ותאי עצב בבעלי-חיים (זוהי הסיבה שתאי מח שנפגעו אינם מתחדשים).



בעור מתרחשת שחיקה מתמדת של תאים. גם במערכת העיכול מתרחשת שחיקה כתוצאה ממעבר המזון. כיצד עובדות אלה מתאימות לנתונים שהוצגו קודם לכן על אודות משך המחזור של תאים אלה?

במעבדות רבות ברחבי העולם נערכים מחקרים מעמיקים ויסודיים בשאלות כמו: כיצד נקבע איזה תא יתחלק, ואיזה - לא? איך מתרחשים המעברים בין השלבים השונים של מחזור התא?

מחקרים העלו כי חלוקת התא מושפעת מגורמים שונים, כגון גודל התא, יחס בין שטח פני התא לנפחו, מיקומו של התא ברקמה ונוכחות הורמונים בתא. כמו-כן נמצאו חלבונים המתפקדים בתהליכי בקרה על מחזור התא.



העיקר הבריאות

לעיתים חל שיבוש בבקרה על מחזור התא, שכתוצאה ממנו התא מתחלק ללא הרף באופן בלתי מבוקר. התוצאה יכולה להיות **מחלת סרטן**. השיבוש יכול להיגרם בשל מוטציה באחד או ביותר מן הגנים המקודדים לחלבוני הבקרה שהזכרנו. הכרת תהליכי הבקרה על מחזור התא עשויה לסייע בפיתוח הבלתי-פוסק של דרכים בלוחמה בסרטן.

ט.2 שכפול DNA

הכרנו (בפרק ד) את מבנה הסליל הכפול של מולקולת ה-DNA[1]. למדנו כי המידע החיוני ליצירת כל החלבונים המעורבים בכל התהליכים בתא אצור במולקולה זו. מידע זה עובר באותו אורגניזם מתא-אם לתאי-הבת הנוצרים ממנו, וכן מאורגניזם הורה לצאצאיו; זוהי הסיבה, כאמור, שה-DNA נקרא גם החומר התורשתי. העברה אמינה של המידע מדור לדור - דורות תאים או דורות יצורים - מחייבת שביצירת תאים חדשים מתא-אם אחד, יישמרו הכמות והמבנה המדויק של ה-DNA, כלומר ישמר **רצף הנוקלאוטידים**.

פינת הפרוקריוט

עקרון שכפול ה-DNA בתאים פרוקריוטים זהה לזה שבתאים איקריוטים: הסליל הכפול נפתח, ובכל אחד מהגדילים מול כל בסיס נקשר הבסיס המשלים.

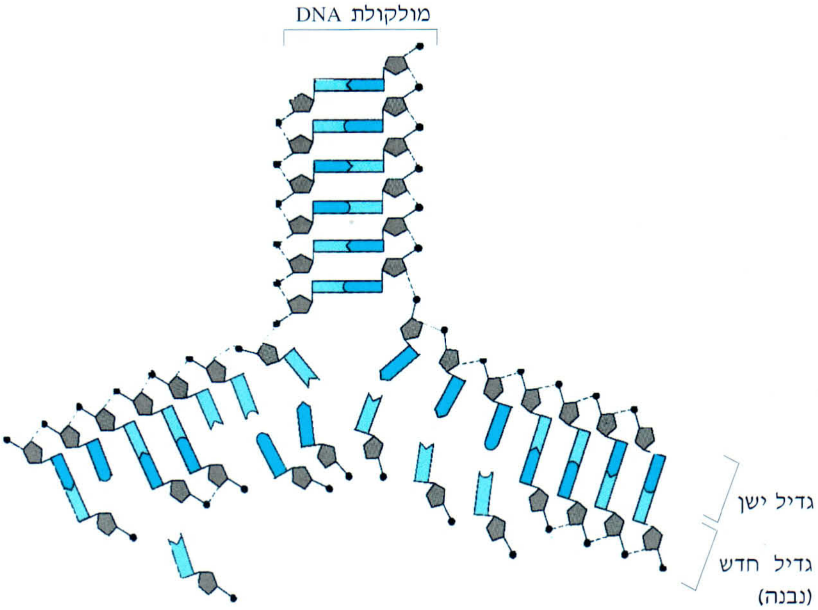
כיצד מתקבלות שתי מולקולות DNA זהות ממולקולת DNA אחת?

מניסויים רבים שנערכו התבררה התמונה הבאה:

בנקודה מסוימת ב-DNA מתרופפים הקשרים שבין שני הגדילים, והם נפרדים זה מזה. ההפרדה נמשכת בהדרגה לאורך המולקולה, בדומה לרוכסן שנפתח: בזה אחר זה נפרד נוקלאוטיד מבן זוגו (T מ-A ו-G מ-C) ומתקבלים רצפים של נוקלאוטידים בלתי מזווגים.

[1] אם לא זכור לכם מבנה ה- DNA עיינו בפרק ד.

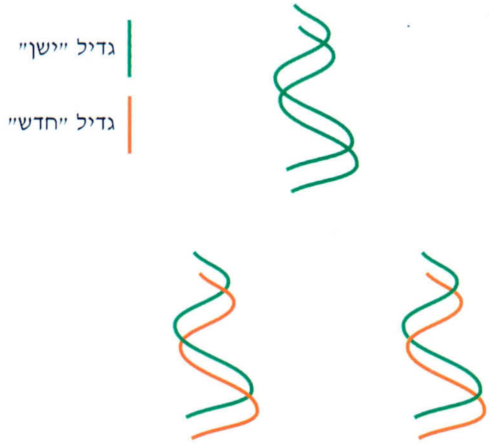
אל נוקלאוטידים אלה נקשרים בני זוג משלימים ממאגר נוקלאוטידים חופשיים בתא, שוב על-פי הכלל שהכרנו: T מול A ו-G מול C. עם התקשרות הזוגות, נקשרים ביניהם גם החלקים האחרים של מולקולות הנוקלאוטידים החדשות, וכך נבנה בכל אחד משני הגדילים "העמוד" המשלים של "סולם" ה-DNA, שה"שלבים" בו הם הזוגות T-A ו C-G (ראו איור ט3).



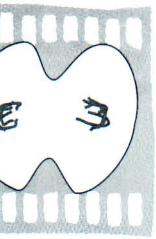
איור ט3: תהליך שכפול DNA
מולקולת ה-DNA "נפתחת", וכל אחד משני הגדילים המקוריים משמש דגם לבניית גדיל משלים, על-פי הכלל של: A מול T ו-C מול G.

מה התוצאה?

מתקבלות **שתי** מולקולות DNA, בכל מולקולה יש גדיל אחד "ישן" (ממולקולת ה-DNA המקורית), ואחד – "חדש" (איור ט4). שתי המולקולות זהות בדיוק למולקולה המקורית. הודות לכך בעת חלוקת התא, כאשר נפרדות מולקולות ה-DNA לשני תאי-בת, מועבר לכל אחד משני התאים העתק מדויק של המידע התורשתי.



איור ט4: תוצאת שכפול DNA
כל מולקולת DNA המתקבלת לאחר השכפול מורכבת מגדיל אחד "ישן", ומגדיל אחד "חדש".

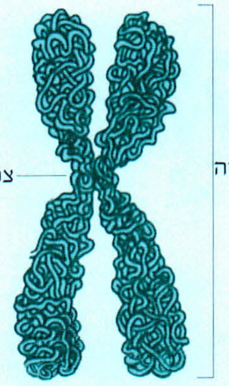


ט3. מיטוזה

חלוקת הגרעין שבסיומה מתקבלים שני גרעיני-בת, שבהם מערכות כרומוזומים זהות לזו שהייתה בגרעין תא-האם, נקראת **מִיטוֹזָה** או **חלוקה מִיטוֹטִית**. "השחקנים הראשיים" בתהליך זה הם הכרומוזומים, שהם המרכיב העיקרי של הגרעין.

DNA, כרומוזום וכרומטידה

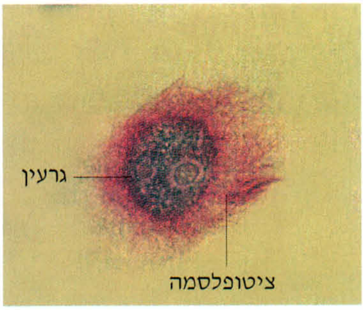
בשלב G_1 כל כרומוזום מורכב ממולקולה ***אחת*** דו-גדילית של DNA, המלופפת סביב חלבונים כדוריים (ראו פרק ד). הכרומוזומים פרושים בגרעין, ובשלב S הם מוכפלים: ה-DNA וגם החלבונים. מכאן, שבשלב G_2 כל כרומוזום מורכב מ***שתי*** מולקולות דו-גדיליות זהות, שכאמור מלופפות סביב חלבונים.



לקראת החלוקה (שלב M, מיטוזה) הכרומוזומים הפרושים בגרעין מסתלסלים, נדחסים ומתארגנים לגופיפים מוגדרים, שניתן לראותם במיקרוסקופ אור. בשלב זה אפשר לראות שכל כרומוזום בנוי משתי **כְרוֹמָטִידוֹת**, וכאמור, בכל אחת מהן מולקולת DNA מלופפת סביב חלבונים, ומאורגנת במרחב בצורה דחוסה ביותר. שתי הכרומטידות מחוברות זו לזו באזור הנקרא **צֶנְטְרוֹמֶר**.

להכרת שלבי המיטוזה, התבוננו בתמונות של איור ט5 בעמוד זה ובעמוד הבא, וקראו את ההסברים שמימין לתמונות.

ברוב שלבי מחזור התא (G_1, S, G_2), הכרומוזומים בגרעין נראים כפקעת סבוכה של חוטים דקיקים; כה דקים — עד שמבעד למיקרוסקופ האור לא ניתן להבחין בין הכרומוזומים השונים.

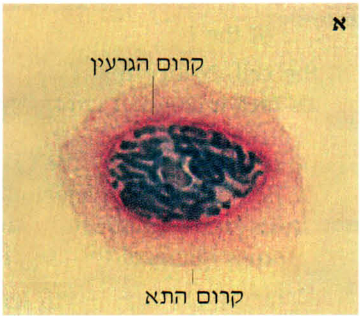


איור ט5: שלבים במחזור התא
תאים מצמח שושן; צולם מבעד למיקרוסקופ אור, הגדלה בערך פי 1,000
(המשך האיור בעמוד הבא)

חלוקת המיטוזה היא תהליך רציף, שנהוג לראות בו שלבים מספר בהתאם להיערכות הכרומוזומים.

א. התגלות הכרומוזומים

בתחילת החלוקה כל כרומוזום מסתלסל ונדחס, ובו בזמן הוא נפרד משאר הכרומוזומים ויוצר גופיף מוגדר. החל משלב זה אפשר להבחין מבעד למיקרוסקופ האור בכרומוזומים בודדים. בשעת התארגנות זו של הכרומוזומים, קרום הגרעין מתפרק לשלפוחיות קרומיות קטנות.



ב. תנועה למרכז

סיבי השלד התוך-תאי מתארגנים ל**כישור**[2], הנפרש בין שני מרכזי התארגנות — מרכז אחד בכל אחד משני הקטבים[3] של התא.

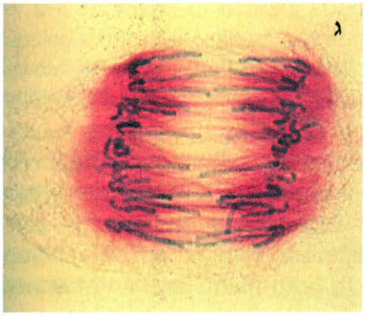
בתאי בעלי-חיים במרכזי ההתארגנות יש **צנטריולים**[2].

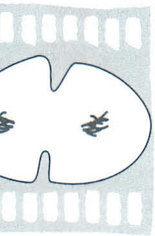
בשלב זה אפשר להבחין שכל כרומוזום בנוי משתי כרומטידות המחוברות בצנטרומר.

הכרומוזומים, הנעים בעזרת סיבי הכישור, מסתדרים במרחק שווה משני הקטבים, באזור הנקרא מישור המשווה[4] של התא.

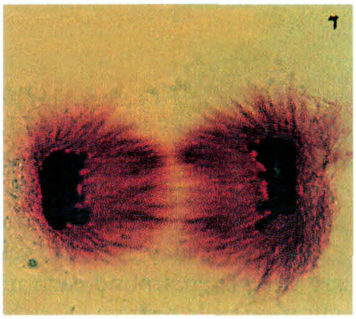
ג. הפרדה והתרחקות

הצנטרומרים מתחלקים, שתי הכרומטידות המרכיבות כל כרומוזום נפרדות זו מזו ונעות, בעזרת סיבי הכישור, לקטבים מנוגדים; (משלב זה כל כרומטידה נקראת כרומוזום). לאחר הפרדה זו, בכל קוטב מתכנסת קבוצת כרומוזומים זהה לזו המתכנסת בקוטב הנגדי.





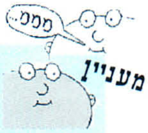
[2] על תנועה בתא, כישור וצנטריולים למדנו בפרק ו.
[3] נוהגים להשתמש במונח "קטבים" לציון שני אזורים נגדיים בתא, בדומה לקטבים של כדור הארץ.
[4] מישור המשווה הוא משטח לרוחב התא המתחלק, בדומה לצלחת החוצה כדור (שלא כמו קו המשווה שבהיקף כדור הארץ).



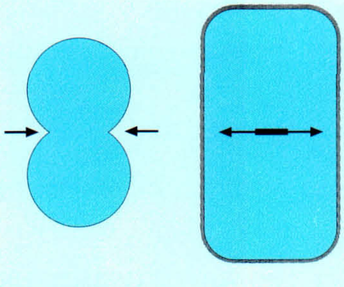
ד. סוף החלוקה

הכרומוזומים בכל קוטב שבים ונפרשים, והופכים שוב לפקעת חוטים, שבה לא ניתן להבחין בין כרומוזום אחד למשנהו. סביב כל אחת משתי קבוצות הכרומוזומים מתארגן קרום גרעין. כישור החלוקה הולך ונעלם, והציטופלסמה על תכולתה מתחלקת בין שני תאי-הבת שנוצרו.

דפדוף מהיר בעמודים 193-73 יאפשר לכם לצפות ב"סרט" המתאר את הכרומוזומים במהלך חלוקה מיטוטית.



חלוקת התא (העוקבת אחר חלוקת הגרעין) בבעלי-חיים נעשית על-ידי היצרות ב**היקף** התא, ההולכת ומעמיקה ל**מרכז** התא, עד להפרדה לשני תאי-בת. לעומת זאת, בחלוקת תא בצמחים נוצר חיץ ב**מרכז** התא, ההולך ומתפשט כלפי ה**היקף**.



ראינו אפוא, שבתום המיטוזה מתקבלים שני תאים, וכל אחד מהם מכיל מערכת כרומוזומים מלאה, כפי שהייתה בתא האם.

חלוקת גרעין אחרת, שתוצאותיה שונות משל המיטוזה, ידועה בשם **מֵיוֹזָה** או **חלוקה מֵיוֹטִית**.

ט4. מיוזה

למדנו שלכל מין (species) בטבע יש מערכת כרומוזומים אופיינית, וראינו כיצד החלוקה המיטוטית מאפשרת שמירה על מערכת זאת במשך כל חיי היצור.

ברוב התאים של רוב היצורים האיקריוטים, מערכת הכרומוזומים היא כפולה: לכל כרומוזום יש בן זוג הדומה לו במבנהו ובסוג המידע שבו[5]. שני הכרומוזומים המרכיבים זוג נקראים כרומוזומים **הוֹמוֹלוֹגִים** (homos=שווה).

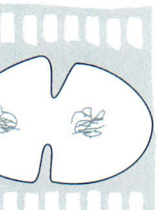
וכאן חשוב מאוד להבהיר:

בשני הכרומוזומים ההומולוגים נמצא אותו ***סוג*** מידע, אך ***טיבו*** עשוי להיות שונה.

לדוגמה: באותו מקום בזוג כרומוזומים הומולוגיים נמצא גן המקודד ***לצבע הפרי***, אולם בכרומוזום אחד עשוי להימצא גן המקודד לצבע אדום, ובכרומוזום ההומולוג – לצבע ירוק; ובדומה לכך, במקום מסוים נמצא גן המקודד ***לצורת הפרי***: בכרומוזום אחד – לפרי מוארך, ובכרומוזום ההומולוג – לפרי עגול.

תאים בעלי מערכת כרומוזומים כפולה נקראים תאים **דִיפְּלוֹאִידִיים** (diploos=כפול; eidos=צורה), ובהתאם - יצורים שרוב תאי גופם דיפלואידים, כמו רוב בעלי-החיים והצמחים שאנו רואים סביבנו, נקראים יצורים דיפלואידים.

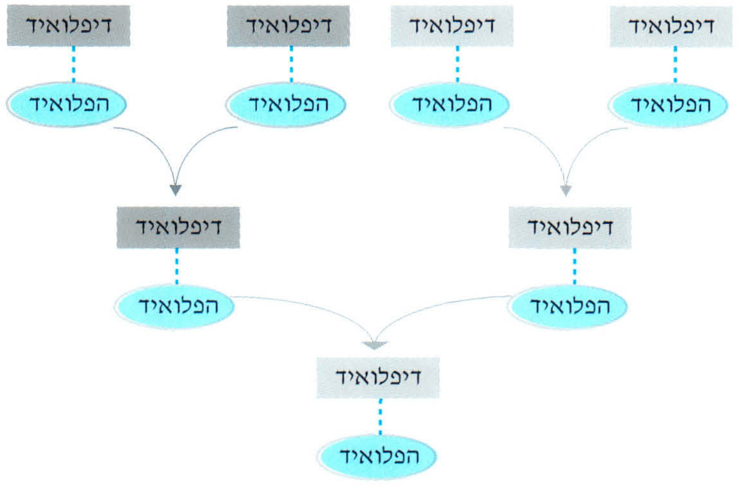
כיצד נשמרת מערכת הכרומוזומים במעבר מהורים לצאצאים?



ביצורים המתרבים ברבייה מינית (פטריות, צמחים ובעלי-חיים), מתקיימת, נוסף למיטוזה, גם חלוקת גרעין מיוחדת הנקראת **מיוֹזָה**. חלוקה זו מתרחשת באיברי הרבייה, ובסופה מתקבלים תאים שבהם נמצא רק אחד מכל זוג כרומוזומים הומולוגים. תאים כאלה

[5] יוצאים מכלל זה הם זוג כרומוזומים הנקראים "כרומוזומי מין" או "כרומוזומי זוויג", הנמצאים בתאים של חלק מהיצורים. לא נרחיב על כך בספר זה.

נקראים **הַפְּלוֹאִידִים** (haploos=יחיד, פשוט). התאים ההפלואידיים עוברים בדרך-כלל כמה שינויים המתאימים אותם לתפקד כתאי רבייה (גָמֶטוֹת, ביחיד: גָמֶטָה) – תאי זרע (בזכר) או תאי ביצה (בנקבה). שני תאי רבייה - אחד מכל הורה - מתלכדים, ומהתלכדות כזו נוצר תא שבו קיים שוב מספר הכרומוזומים הדיפלואידי (איור ט6).



איור ט6: מחזוריות דיפלואידיות - הפלואידיות
ביצורים דיפלואידים המתרבים ברבייה מינית, המעבר מדור אחד למשנהו כרוך תמיד בהתלכדות שני תאי רבייה הפלואידים.

המפתח לשמירה על אותו מספר כרומוזומים במעבר מדור הורים לדור צאצאים נעוץ אפוא ביצירת תאים הפלואידים.

כיצד נוצרים במיוזה תאים בעלי מספר כרומוזומים הפלואידי?

תהליך המיוזה כולל ***שתי*** חלוקות גרעין עוקבות, ***ללא הכפלת כרומוזומים*** ביניהן. התוצאה היא שחלה הפחתה ממערכת כרומוזומים דיפלואידית למערכת הפלואידית (לפיכך יש הקוראים לחלוקה זו ***חלוקת הפחתה***). שתי החלוקות שונות: בראשונה נפרדים **הכרומוזומים ההומולוגים** זה מזה, ואילו בשנייה נפרדות **הכרומטידות** של כל כרומוזום זו מזו (בדומה להיפרדות הכרומטידות בסוף המיטוזה).

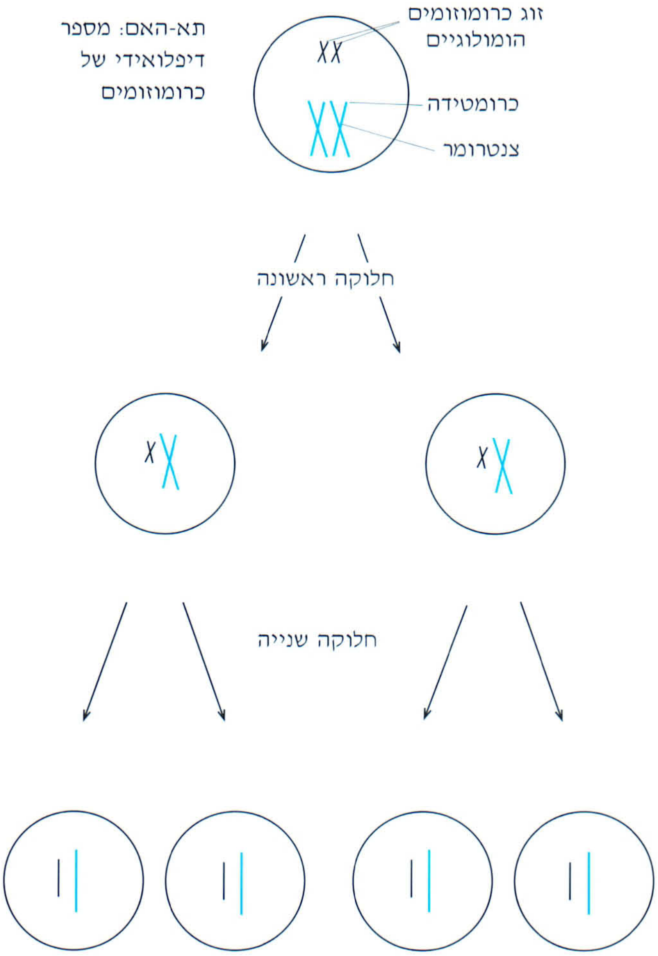
לשם הבהרה נעקוב אחר תא העובר חלוקה מיוטית, שבו רק שני זוגות של כרומוזומים (איור ט7).

התיאור מתמקד באירועים המתרחשים בכרומוזומים, לאחר שהתפרק כבר קרום הגרעין.

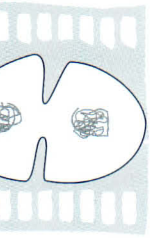
היות שמיוזה מתרחשת בגרעין דיפלואידי, לאחר הכפלת ה-DNA, אזי בתחילת המיוזה לכל כרומוזום בגרעין יש ***בן-זוג*** – כרומוזום הומולוג, וכל אחד מהכרומוזומים ההומולוגים מורכב מ***שתי*** כרומטידות, האחוזות בצנטרומר.

בחלוקה הראשונה של המיוזה נפרדים זוגות הכרומוזומים ההומולוגים, ולכל אחד משני הקטבים נודד אחד מבני הזוג.
בתום החלוקה הראשונה, בכל אחד משני תאי-הבת יש נציג אחד של כל אחד מהכרומוזומים ההומולוגים (כל נציג - מורכב משתי כרומטידות).
שימו לב שלאחר החלוקה הראשונה מספר הכרומוזומים בכל אחד מתאי-הבת הוא המספר ההפלואידי!

החלוקה השנייה של המיוזה עוקבת אחר החלוקה הראשונה, בלי שהייתה ביניהן הכפלת כרומוזומים.
בחלוקה השנייה נפרדות שתי הכרומטידות של כל כרומוזום, אחת לכל תא-בת (וכאמור - בכך הופכת כל כרומטידה לכרומוזום). בתום החלוקה השנייה בכל אחד מתאי-הבת יש כרומטידה אחת מכל אחד מהכרומוזומים ההומולוגים.



איור ט7: מיוזה
מיוזה מאופיינת בשתי חלוקות עוקבות, ללא הכפלת כרומוזומים.

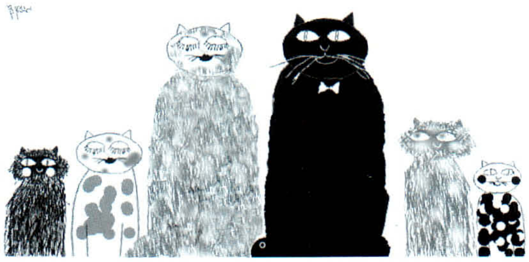


שימו לב שגם בסיום החלוקה השניה של המיוזה מספר הכרומוזומים בכל גרעין הוא המספר ההפלואידי, אך הפעם נמצא בכל גרעין הפלואידי רק "נציג" ***אחד*** מתוך ארבע הכרומטידות, שהיו בכל זוג כרומוזומים הומולוגים בתחילת המיוזה.

לאחר חלוקת הגרעינים מתחלקת גם הציטופלסמה ומהתאים שנוצרים מתפתחים תאי הרבייה.

כדאי לדעת:

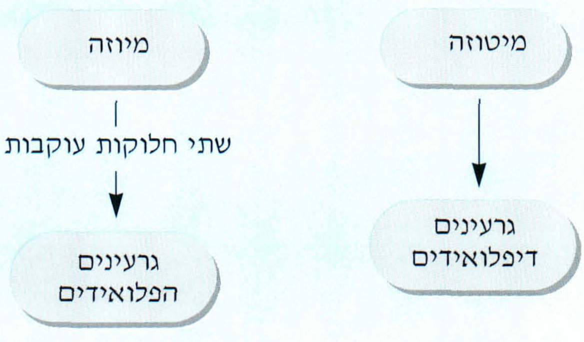
בזכרים, מכל תא המתחלק חלוקה מיוטית יכולים להיווצר ארבעה תאי רבייה. אולם ביצירת תאי מין נקביים, גם בצמחים וגם בבעלי-חיים, מכל תא המתחלק חלוקה מיוטית רק תא ***אחד*** מתפתח לתא רבייה.



אחת העובדות החשובות והמעניינות הקשורות למיוזה היא שבאותו יצור, כל גרעין הפלואידי ***שונה*** ממשנהו בטיב המידע התורשתי האצור בו. בהסבר לכך לא נעסוק בספר זה, אך נציין שהגיוון הרב בתאים ההפלואידיים ובתאי הרבייה המתפתחים מהם, מוביל לכך שהצאצאים המתקבלים ברבייה מינית הם בעלי צירופים חדשים של תכונות.
כך לדוגמה, גורים של חתולה בעלת פרווה ארוכה ומנומרת וחתול קצר פרווה ושחור יכולים להיות בעלי קשת רחבה של טיפוסי פרווה!

סיכום ביניים:

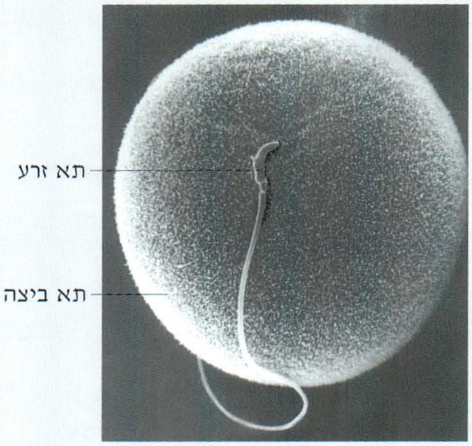
שני טיפוסי חלוקות גרעינים



מעט על הפריה והתמיינות

בתהליך **ההפריה** מתלכדים שני תאי רבייה הפלואידיים ונוצר תא דיפלואידי, הנקרא **זיגוטה** (zygote, zygos=קשור בצמד). תוכן התאים מתמזג, וכך "נפגשים" מטענים תורשתיים שמקורם בשני הורים.

מהזיגוטה מתפתח יצור דיפלואיד חדש.



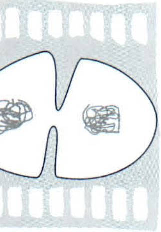
איור ט8: פגישה בין תא זרע לתא ביצה של אוגר זהוב
הגדלה בערך פי 600

הפריה היא תהליך מורכב, המתרחש באופן בסיסי בצורה דומה בכל עולם החי, עם מאפיינים ייחודיים לכל מין (species). נציין שתי תופעות משותפות לכל תהליכי ההפריה:

1. קיימת היכרות ייחודית בין תא הביצה לתא הזרע; תא זרע ממין אחד אינו מפרה תא ביצה של מין אחר. היכרות זאת מבוססת על התאמה בין מרכיבים בקרום תא הזרע לבין מרכיבים במעטפת הביצה.

2. לאחר ההתלכדות של תא הביצה עם תא הזרע נמנעת חדירת תא זרע נוסף. בכך מובטח הרכב כרומוזומים דיפלואידי בזיגוטה ובפרט החדש שמתפתח מזיגוטה זו.

בזיגוטה נמצא כל המידע להיווצרות היצור השלם. אפשר לומר שב-DNA קיימת "תכנית התפתחות" של היצור, ודרך הפעלתה תלויה בתנאי הסביבה. בין תנאי הסביבה נכללת גם תכולת הציטופלסמה בזיגוטה: החלבונים הראשונים ביצור המתפתח נבנים על-פי RNA שהיה אגור בתא הביצה טרם הפריה.



הזיגוטה מתחלקת, וחלוקה זו היא ראשונה בשרשרת של חלוקות מיטוטיות מהירות ועוקבות המאפיינות את התפתחות העובר (ראו "מעניין" בסעיף ט1).

במהלך התפתחות העובר התאים שבו עוברים **התמיינות**: נוצרים תאים השונים זה מזה בתכונותיהם ובתפקודם; תאים אלה בונים את הרקמות השונות.
התמיינות התאים בדרך-כלל אינה הפיכה: תא שריר לא הופך לתא דם, ותא עצב יישאר תא עצב.

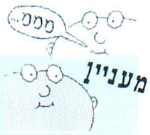
לאור זאת מתעוררת השאלה: האם התמיינות כרוכה באיבוד מידע, או רק ב"שיתוק" של מידע? במילים אחרות - האם בתאי מח מצויים גם גנים המקוֹדדים לאנזימי עיכול, או שגנים אלה אבדו מגרעין התאים האלה במהלך התמיינותם לתאי מח? האם בתאי שורש הצמח מצויים גם גנים המקוֹדדים לצבע האדום של עלי הכותרת?

מחקרים שונים שנערכו הביאו למסקנה שבגרעין של תא שעבר התמיינות נמצא כל המידע הנחוץ להתפתחות יצור בוגר, על כל טיפוסי תאיו.
אף-על-פי שבתא שעבר התמיינות לא בא לידי ביטוי חלק ניכר מן המידע המצוי בגרעין, מידע זה לא אבד ולא נהרס. יתר-על-כן: ניסויים הראו שבתנאים מתאימים מידע זה אף עשוי להתבטא.
דהיינו: למרות ההבדלים בצורתם ובתפקודם, בתאים שונים של אותו יצור מצוי מטען תורשתי זהה.

אם כך, איך אפשר להסביר את העובדה שהתאים שונים זה מזה?

תא מאופיין על-פי מבנהו ותפקודו. שניים אלה מבטאים את צירוף הגנים הפעילים בתא, ואת רמת הפעילות של הגנים. (אפשר להעריך את רמת הפעילות של גן על-פי מידת היותו מתועתק ל-RNA או על-פי כמות החלבון המקודד על-ידו.)
למדנו מעט על בקרת הפעילות של גנים (בפרק ד, סעיף ד6): בתא קיימות מערכות הקובעות באיזו מידה יתבטא הגן, באילו רקמות, באיזה שלב בחייו של התא ובחייו של הייצור.

ניתן לומר אפוא שההתפתחות מתא יחיד ליצור רב-תאי בעל רקמות שונות המתמחות בתפקידים ייחודיים, מותנית בביטוי מבוקר של אלפי הגנים השונים בזמן המתאים ובתאים המתאימים.



מעניין

ב - 1996 זכתה לפרסום "דולי": כבשה שהתפתחה (במעבדה) מביצית שהגרעין הוצא ממנה, ולתוכה הוחדר גרעין שנלקח מתא עטין של כבשה בוגרת!

ט.5 סיכום

- רצף ההתרחשויות מהיווצרותו של תא (מתא שקדם לו) ועד התחלקותו נקרא **מחזור התא**. במחזור התא האיקריוטי ארבעה שלבים עוקבים: גידול 1 (**G_1**), שכפול DNA (**S**), גידול 2 (**G_2**) וחלוקה (**M**).
- בתהליך **שכפול** ה-DNA כל אחד משני הגדילים של מולקולת ה-DNA משמש כתבנית, ונוצרים שני גדילים כפולים, הזהים ברצף הנוקלאוטידים שבהם למולקולת המוצא.
- **מיטוזה** היא חלוקת גרעין שבסיומה בגרעיני שני תאי-הבת קיימת מערכת כרומוזומים הזהה לזו שהייתה בגרעין תא-האם. בדרך-כלל לאחר חלוקת הגרעין מתרחשת גם חלוקת תא.
- בתאים **הפלואידיים** יש מערכת ***אחת*** של כרומוזומים, ואילו תאים **דיפלואידיים** הם בעלי מערכת כרומוזומים ***כפולה***: זוגות **כרומוזומים הומולוגים**.
- **מיוזה** היא חלוקה המתרחשת באברי הרבייה. היא כוללת שתי חלוקות גרעין עוקבות ללא הכפלת כרומוזומים ביניהן. בסיום המיוזה מתקבלים תאים הפלואידיים, המתפתחים לתאי רבייה.
- השוני שבין התאים ההפלואידיים המתקבלים במיוזה תורם לשונות בין פרטים של אותו מין.

- בתהליך **ההפריה** מתלכדים שני תאי רבייה הפלואידיים ונוצרת **זיגוטה** דיפלואידית, וממנה מתפתח יצור חדש.
- **התמיינות** היא תהליך שבו תאים רוכשים מבנה ופעילות ייחודיים.
- על-אף ההבדלים במבנה ובתפקוד, תאים של אותו אורגניזם זהים במטענם התורשתי.
- תא מאופיין על-פי הגנים הפעילים בו ועל-פי רמת פעילותם.

שאלות ומשימות לפרק ט

1. סמוך לקצוות שורשים נמצא אזור של תאים מתחלקים (שלא כמו רוב תאי הצמח, הנמצאים בשלב G_0). האם יש לצפות שבבדיקת תאים אלה במיקרוסקופ, יראו רובם בשלב החלוקה (M)? נמקו.

2. בתאי הגוף של בן-אדם יש 46 כרומוזומים. כמה כרומוזומים יש בתא זרע של אדם? בתא ביצית?

3. תקינות תאי-הבת המתקבלים בתום חלוקת תא, תלויה בחלוקתם המדויקת של הכרומוזומים. הסבירו.

4. להלן מספר משפטים. סמנו את הנכונים ביניהם ותקנו את השגויים, או הסבירו מהי השגיאה. שימו לב: יתכן שחלק מהמשפט יהיה נכון, וחלק - שגוי.
   א. במיקרוסקופ אור לא רואים כרומוזומים בשלב G_1 מפני שה-DNA עדיין לא שוכפל.
   ב. בשלב G_2 מספר הכרומוזומים בתא כפול יחסית לשלב G_1.
   ג. בכל מולקולת DNA יש גדיל אחד ישן וגדיל אחד חדש.
   ד. שגיאה בשכפול DNA יכולה להתבטא באנזים שתפקודו לקוי.
   ה. בכל כרומטידה יש מולקולת DNA דו-גדילית.
   ו. בסוף חלוקת מיטוזה מתקבלים תאים דיפלואידים, שבכרומוזומים שבהם יש מולקולת DNA דו-גדילית.
   ז. מספר הכרומוזומים ההפלואידי של מין מסוים קטן תמיד ממספר הכרומוזומים הדיפלואידי של אותו מין.
   ח. בסוף חלוקת מיוזה מתקבלים תאים הפלואידים, שבכרומוזומים שבהם יש מולקולת DNA חד-גדילית.
   ט. לקראת חלוקת התא, הן במיטוזה והן במיוזה, נעלם קרום התא.
   י. ברוב התאים המרכיבים את היד יש מספר דיפלואידי של כרומוזומים, ורק בחלק קטן מהם מספר הכרומוזומים הוא הפלואידי.
   יא. בכל תאי הזרע הנוצרים בפרט מסוים נמצא אותו מידע תורשתי.
   יב. בכל תאי העור הנוצרים בפרט מסוים נמצא אותו מידע תורשתי.
   יג. זיגוטה היא תא דיפלואידי, שנוצר משני תאים הפלואידים.
   יד. ***לקטע ההרחבה:*** כל הגנים הפעילים בתא עוברי המתפתח לתא בעין שונים מהגנים הפעילים בתא עוברי המתפתח לתא ברגל.

בשאלות הבאות עליכם לבחור את התשובה המתאימה ביותר.

5. כתוצאה מתהליך המיוזה ברבייה זוויגית:
   א. מוכפל מספר הכרומוזומים מדור לדור
   ב. נשמר מספר קבוע של כרומוזומים מדור לדור
   ג. קטן מספר הכרומוזומים מדור לדור
   ד. נמנע עירוב כרומוזומים אבהיים עם אמהיים.

6. רבייה זוויגית (מינית) באורגניזמים מביאה לידי כך ש:
   א. ייווצרו צירופים חדשים של גנים
   ב. ייווצרו גנים חדשים
   ג. תימנע היווצרות תכונות חדשות
   ד. מספר הפרטים הבוגרים יעלה מדור לדור.

7. מהו הרצף של מהלך הרבייה?
   א. גמטה, מיוזה, ביצית מופרית (זיגוטה), מיטוזה
   ב. מיטוזה, מיוזה, ביצית מופרית (זיגוטה), גמטה
   ג. מיוזה, גמטה, ביצית מופרית (זיגוטה), מיטוזה
   ד. ביצית מופרית (זיגוטה), גמטה, מיוזה, מיטוזה.

8. מוטציות עלולות להיווצר בכל תא בגוף ובכל זמן בחיים. סיכוייה של מוטציה שנוצרה לעבור לדורות הבאים גדולים ביותר, אם היא מתרחשת:
   א. בביצית מופרית (זיגוטה)
   ב. ביצירת תא זרע
   ג. ביצירת תא ביצית
   ד. באחד מתאי העובר בראשית התפתחותו.

9. תהליכי המיטוזה והמיוזה מתרחשים:
   א. שניהם גם יחד ביצירת תאי הגוף
   ב. שניהם גם יחד ביצירת תאי המין
   ג. מיטוזה ביצירת תאי המין, ומיוזה ביצירת תאי הגוף
   ד. מיטוזה ביצירת תאי הגוף, ומיוזה ביצירת תאי המין.

10. ***להרחבה:*** מתא בודד של שורש גזר קיבלו בתרבית רקמה צמח גזר שלם. איזה מבין ההיגדים שלהלן אינו תואם תוצאה זו?

א. תהליך ההתמיינות יכול להיות הפיך

ב. במיטוזה חלה חלוקה שווה של המטען התורשתי בין תאי הבת

ג. בכל תאי הגזר מטען תורשתי זהה

ד. סוגי תאים שונים הם בעלי מטען תורשתי שונה.

11. איזה משפט הוא הנכון, מבין ארבעת המשפטים שלהלן?

א. בגרעין התא יש חומצות גרעין וחלבונים, ובציטופלסמה אין חומצות גרעין.

ב. בגרעין התא יש DNA ואין RNA, ובציטופלסמה יש RNA ואין DNA.

ג. בציטופלסמה נוצר DNA לפי מידע מהגרעין.

ד. בציטופלסמה נוצרים חלבונים לפי מידע מהגרעין.

פרק י

תא, מאין באת?
האבולוציה של
התא האיקריוטי

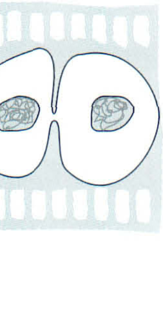
בפרקים הקודמים התרכזנו במבנה ובתפקוד של התא האיקריוטי: הכרנו כמה מבנים בו ותהליכים המתרחשים במבנים אלה.

בפרק זה נעסוק בסוגיית התפתחותו של התא הראשון, ולשם כך נרחיק עד ראשית החיים.

קצת היסטוריה: מחשבות על היווצרות חיים

הפילוסופים היוונים הקדומים הבחינו בכך שבמקווי מים שהתייבשו נעלמו היצורים החיים, ועם רדת הגשמים וההצטברות המחודשת של מים – הופיעו היצורים שוב. מאחר שלא נצפו יצורים חיים בטיפות הגשם, מסקנתם הייתה שמקור היצורים הללו הוא באדמה עצמה. אמנם אותם הוגים הכירו את דרך הרבייה של יצורים חיים, אך ידיעה זו לא עמדה בסתירה לאפשרות שקיימת גם **יצירה ספונטנית** של חיים, דהיינו הופעת חיים שמקורם מדומם.

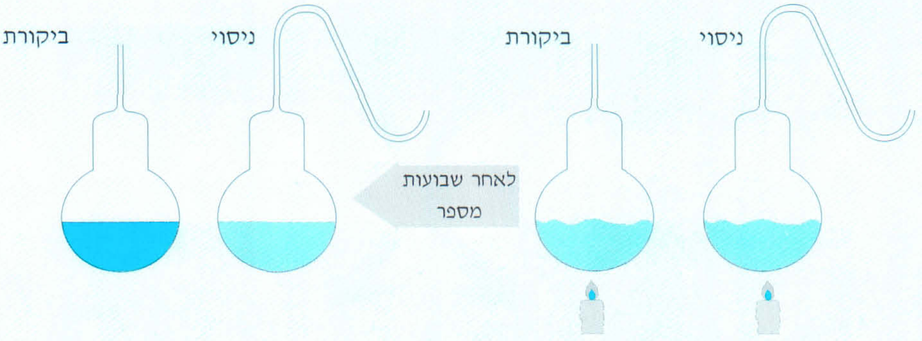
רעיון היצירה הספונטנית רווח במשך תקופה ארוכה מאוד, עד למאה התשע-עשרה.



ב-1859 הכריזה האקדמיה הצרפתית למדעים על מתן פרס למדען שיחקור את שאלת היצירה הספונטנית של יצורים חיים.
בפרס זכה ב-1862 הכימאי הצרפתי פסטר (Louis Pasteur, 1822-1895).
מדוע זכה לואי פסטר בפרס?

פסטר שיער שאין יצירה ספונטנית של חיים; לאישוש השערתו ביצע את הניסוי המוצג באיור י1: הוא מזג לבקבוקי זכוכית מצע מזון עשיר. את צווארם של חלק מהבקבוקים - בקבוקי הניסוי - כופף (בעזרת חימום), ואילו את הבקבוקים האחרים - בקבוקי הביקורת - השאיר כפי שהם. לאחר מכן הרתיח פסטר את המצע שבכלים - על-מנת להמית את היצורים החיים העשויים להימצא בו - והניח את כל הבקבוקים פתוחים באוויר החופשי.
כעבור שבועות מספר, המצע שבבקבוקי הביקורת היה עשיר במיקרואורגניזמים, בעוד המצע בבקבוקי הניסוי נותר ללא שינוי.

איור י1: הניסוי של פסטר



א. תחילת הניסוי - בקבוקים עם מצע מזון מורתח

ב. סוף הניסוי - רק בביקורת נמצאו מיקרואורגניזמים

כיצד אפשר להסביר את תוצאות הניסוי?

מיקרואורגניזמים מהאוויר חדרו לבקבוקי הביקורת, והתרבו במצע המזון, ואילו בבקבוקי הניסוי הצוואר המכופף מנע מהמיקרואורגניזמים שהיו באוויר מלהגיע אל מצע המזון.

לאחר ששבר פסטר את צווארם המכופף של בקבוקי הניסוי, התרבו מיקרואורגניזמים גם בהם.

ניסוייו של פסטר, וניסויים דומים נוספים, הביאו את הקץ על רעיון קיום יצירה ספונטנית של חיים בימינו, ותמכו בסברה שכל חי מוצאו מחי. אולם עדיין נותרה בעינה השאלה: מה מקורו של היצור החי הראשון? או, בניסוח אחר:

כיצד החלו החיים?

על שאלה זו אפשר לנסות לענות מנקודות מבט שונות.

יש גישה שלפיה החיים נבראו על-ידי כוח עליון. זוהי אמונה המשותפת לדתות רבות. אמונה, באשר היא, אינה ניתנת לבחינה בכלים מדעיים; בדיוננו בספר זה ננסה לענות על סוגיית ראשית החיים מנקודת מבט מדעית,ונציג השערות ותסריט אפשרי להתפתחות החיים.

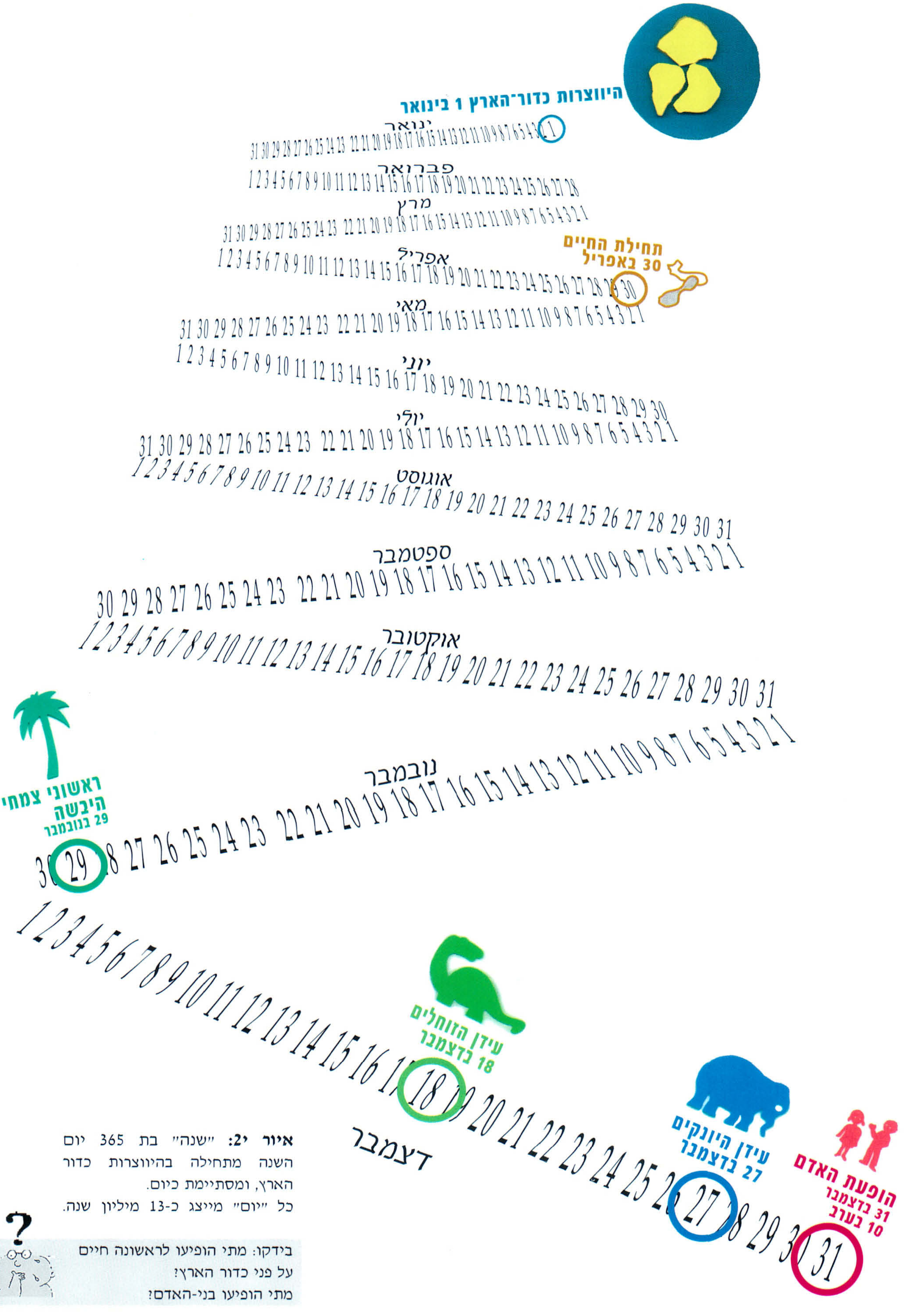
שאלת ראשית החיים נוגעת לתהליך שמשערים שאירע לפני 4-3.5 מיליארד (10^9) שנים. היות ששאלה זו נוגעת לתקופות רחוקות כל-כך, סביר שהתשובה עליה תהיה חלקית ואף שנויה במחלוקת, משום שאין בידי החוקרים ראיות ישירות למה שהתרחש בעידנים קדומים. הניסיונות להשיב על שאלה זו מסתמכים על צורות החיים הקיימות כיום, על עדויות גאולוגיות שמקורן בכדור הארץ, על ממצאים מהחלל החיצון, ואף על ניסויים במעבדה.

מדוע, קשה לבצע ניסויים הנוגעים לראשית החיים?

התפתחות החיים על כדור הארץ אירעה בפרק זמן העולה פי כמה מונים על משך זמן של ניסוי במעבדה; יתר על כן, לא ניתן לדעת בוודאות מה היו התנאים המדויקים ששררו על-פני כדור הארץ לפני מיליארדים של שנים.

העדויות ממאובנים, שכה סייעו בידי חוקרי האבולוציה להבין את ההתפתחות של בעלי-החיים והצמחים, הן דלות ביותר כאשר דנים ביצורים החד-תאיים הראשונים שחיו עלי אדמות. עם זאת, בהמשך נראה שמידע על אודות תחילת החיים אפשר למצוא ממש מתחת לידינו, בתאים החיים כיום: המבנה וההרכב של התאים מספקים רמזים על מקורם הקדום.

תהליך ההיווצרות של התא האיקריוטי ושל המינים השונים של היצורים החיים נמשך פרק זמן העולה לאין שיעור על משכי הזמן שאנו מכירים מחיי היום-יום. כדי להמחיש זאת, נדמה באיור י'2 שבעמוד הבא את זמן קיומו של כדור הארץ לשנה אזרחית אחת, המתחילה ב-1 בינואר ונמשכת עד 31 בדצמבר.



איור י2: "שנה" בת 365 יום
השנה מתחילה בהיווצרות כדור הארץ, ומסתיימת כיום.
כל "יום" מייצג כ-13 מיליון שנה.

בידקו: מתי הופיעו לראשונה חיים על פני כדור הארץ?
מתי הופיעו בני-האדם?

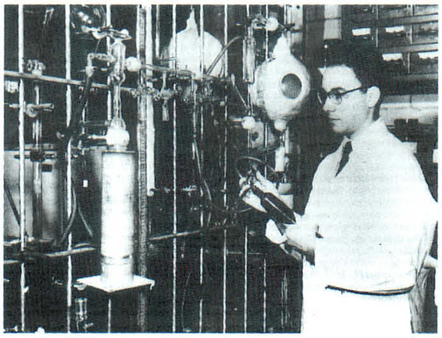
י 1. חומרים אורגניים ראשונים

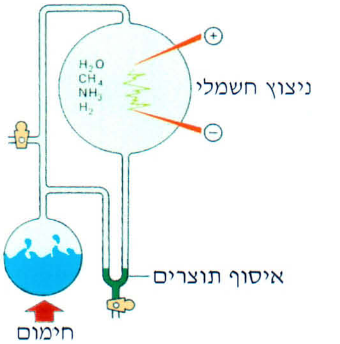
בין המדענים יש תמימות דעים שהאטמוספרה הקדומה הייתה שונה בהרכבה מהאטמוספרה של היום; חוקרים רבים סוברים שהאטמוספרה הקדומה הייתה ללא (או כמעט ללא) חמצן מולקולרי (O_2) וללא שכבת אוזון (O_3), ושהיו בה אדי מים (H_2O), מימן (H_2), פחמן חד-חמצני (CO), פחמן דו-חמצני (CO_2), מתן (CH_4) ואמוניה (NH_3).

קרינה על-סגולה (קרינת UV) מהשמש הגיעה לכדור הארץ הקדמון בעצמה חזקה מאוד[1]. כמו-כן היו ברקים רבים, קרינה חזקה של חומרים רדיואקטיביים, והתפרצויות געשיות תכופות. כתוצאה מכך מקורות האנרגיה על-פני כדור הארץ הקדמון היו רבים יותר מהיום, והטמפרטורה עליו הייתה גבוהה מאוד.

על בסיס האמור לעיל, העלו (באופן בלתי תלוי) שני חוקרים, אופרין (A. I. Oparin, 1980-1894) הרוסי ב-1924 והלדיין (J S. Haldane, 1936-1860) האנגלי ב-1929, השערה בדבר ראשית החיים על-פני כדור הארץ. לפי השערתם, הצירוף של הרכב הגזים באטמוספרה הקדומה עם מקורות האנרגיה הרבים גרם לתהליכים כימיים שבהם נוצרו החומרים האורגניים הראשונים. חומרים אלה התמוססו במימי האוקיינוסים הקדומים: זה היה **המרק האורגני הקדמון**.

ברוח השערה זו, ערך בשנת 1953 החוקר סטנלי מילר (S. L. Miller, — 1930) ניסוי, שבו העביר ניצוץ חשמלי בְּמֵכָל שהייתה בו תערובת של גזים שהכילה מים, מתן, אמוניה ומימן (איור י3). הניצוץ החשמלי (שחיקה את הברקים) גרם להיווצרות תרכובות אורגניות, ובכללן חומצות אמיניות. ניסויו של מילר היה עדות ראשונה לאפשרות שחומרים אורגניים יכולים להיווצר במערכת לא-ביולוגית, הדומה בתנאיה לתנאי הסביבה המשוערים בכדור הארץ הקדום. בניסויים נוספים, שנעשו במתכונת דומה, התקבלו גם חומרים אחרים - סוכרים שונים וכן נוקלאוטידים (שכפי שלמדנו בפרק ד, מהם בנויות חומצות הגרעין).





איור י3: ימין: סטנלי מילר ליד מערכת הניסוי
שמאל: תרשים של מערכת ניסוי הדומה לזו שבה השתמש מילר

[1] כיום שכבת האוזון סביב כדור הארץ מפחיתה את כמות קרינת ה- UV המגיעה אל פני הכדור.

השערתם של אופרין והלדיין, הנתמכת על-ידי הממצאים של מילר, אינה ההשערה היחידה באשר למקור החומרים האורגניים. השערה אחרת היא שמקור החומרים האורגניים הראשונים על-פני כדור הארץ הוא בחלל החיצון. ראיות לכך הם ממצאים ממטאוריטים שהגיעו לכדור הארץ מגרמי שמים אחרים ובהם נמצאו חומרים אורגניים. בעקבות ממצאים אלה העלו חוקרים את האפשרות שגם החומרים האורגניים הראשונים בכדור הארץ הגיעו מהחלל החיצון.

י 2. מחומרים אורגניים לתאים

במרק הקדמון המשוער היו אם כן תרכובות אורגניות מגוונות למדי. כיצד אירע המעבר מ**חומר** (אורגני) ל**חיים**?

לפני כל ניסיון לענות על שאלה זו, מתבקשת התמודדות עם סוגיה קשה לא פחות – והיא:

מה הם חיים?

פגשנו את השאלה הזו במבוא לספר זה; נסו לענות עליה בשנית.

יצורים חיים מבצעים חילוף חומרים, גדלים, מתפתחים, מגיבים לסביבתם ומתרבים. בכל אלה אין משום הגדרה לחיים, אלא רק אפיון שלהם.
מאפיין נוסף של עולם החי הוא השתנותו בתהליך האבולוציה (על-כך נרחיב בהמשך).

קיומם של מאפייני החיים שמנינו כרוך ב**פעילות אנזימטית בסביבה מופרדת** מהסביבה החיצונית, וב**כושר התרבות** המאפשר את המשכיות החיים.
כאשר מתחקים אחר ראשית החיים, סביר לחפש את הופעתם של תפקודים אלה.

יש חוקרים הרואים בהופעת מולקולות בעלות פעילות אנזימטית צעד ראשון בהתהוות החיים. לעומת זאת, חוקרים אחרים רואים את האירוע הראשוני של התהוות החיים בהופעתה של מולקולה המשכפלת את עצמה. בין אם "זכות הראשונים" היא של הפעילות האנזימטית, ובין אם היא של כושר השכפול, בדרך כלשהי שאיננה ברורה, התפתחו יחסי גומלין בין התרכובות בעלות יכולות אלו.

עולם ה-RNA

בעולם החי המוכר לנו כיום קיימת "חלוקת עבודה": תהליכי החיים מזורזים (בדרך-כלל) על-ידי חלבונים, והמידע התורשתי מוצפן (ברוב מיני היצורים) במולקולות DNA.
על-פי אחת ההשערות, בראשית היווצרות החיים היה "עולם RNA": עולם שבו מולקולות RNA תפקדו הן בזירוז תגובות כימיות, והן בהפצת מידע תורשתי.
השערה זו נשענת בעיקר על שני ממצאים מחקריים:

1. קיימות מולקולות RNA המסוגלות לקיים פעילות אנזימטית.

   עד לגילוי מולקולות כאלה רווחה הדעה שכל האנזימים הם חלבונים.

2. בנגיפים רבים המידע התורשתי אצור במולקולות RNA (ולא DNA).

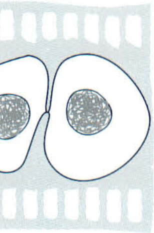
יופייה של השערת "עולם ה-RNA" הוא בפשטותה, אולם נימוקים שונים, שעיקרם כימיים, מורים על סבירות נמוכה לקיומו של שלב כזה בתולדות היווצרות החיים.

בין המולקולות שנוצרו במרק האורגני הקדמון היו גם מולקולות שומניות, שבסביבה מימית נוטות ליצור שלפוחיות קרומיות. ככל הנראה לפני 4-3.5 מיליארד שנים, פיסת קרום שומני עטפה מולקולות של חומצות גרעין וחלבונים שהיו במרק האורגני הקדמון, הפרידה בינם לבין הסביבה החיצונית, ונוצר **תא קדמון**. תא קדמון זה, שהיה דומה לפרוקריוטים של ימינו, יכול היה לקיים תהליכים של חילוף חומרים (ובכלל זה פעילות אנזימטית) והיה בעל כושר שכפול עצמי.
בתא כזה אפשר לראות את ראשית החיים.
סביר שבו-זמנית התפתחו מספר "תאים" קדומים, שונים זה מזה, ושחלקם אף התרבו. אבל רק הצאצאים של **אחת** מצורות אלה היוו את המוצא לחיים בעולמנו.

מעניין

עד כה הניסיונות ליצור תא חי במעבדה - אפילו מחומרים אורגניים מורכבים - לא עלו יפה.

הטיעון שהחיים בעולמנו התפתחו מתא קדמון יחיד מבוסס על קיומם של מבנים ותהליכים המשותפים לרוב התאים.
זאת משום שסביר יותר שמבנים ותהליכים המשותפים לכמה טיפוסי תאים התפתחו פעם אחת, ולא כמה פעמים. סבירות זו עולה ככל שהמבנים והתהליכים מורכבים יותר.



?

ציינו כמה מבנים ותהליכים משותפים לכלל התאים.

י 3. אנרגיה וחומרים בתאים המתפתחים

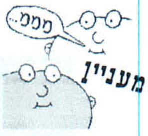
כמו כל יצור חי בימינו, נזקקו גם התאים הראשונים למקור אנרגיה ולמקור תרכובות אורגניות. משערים שאנזימים בתאים פירקו את התרכובות המורכבות שבמרק הקדמון לחומרים פשוטים יותר, ששימשו לתאים הן מקור אנרגיה והן מקור חומרים לבניין התא. כאמור, האטמוספרה באותה תקופה הייתה חסרת חמצן חופשי או דלה בו ביותר. התאים הפיקו את האנרגיה מחומרים אורגניים על-ידי פירוק ללא חמצן, בתהליכים הדומים ככל הנראה לגליקוליזה המוכרת לנו (ראו פרק ז).

כדאי להזכיר, שגם כיום קיימים יצורים אל-אווירניים שהתהליך היחיד שבאמצעותו הם מפיקים אנרגיה הוא גליקוליזה (עיינו בפרק ז, סעיף ז5).

> קביעת הסדר הכרונולוגי של אירועים מתבססת על-פי רוב על כלל זה: ככל שהתופעה (תהליך, נוכחות אברון וכדומה) משותפת ליותר מיני יצורים - הופעתה הייתה קדומה יותר.
> העובדה שגליקוליזה מתקיימת בתאי כל היצורים החיים המוכרים כיום, מרמזת שהתהליך התפתח בשלבים מוקדמים של התפתחות החיים.

בתאים הקדמונים, שהלכו והתרבו, חלו מדי פעם בפעם שינויים (מוטציות - ראו פרק ד). שינויים אלה הביאו להיווצרות תאים שהיו דומים לתא האֵם אך לא זהים לו. בדרך זו הלך והתעשר העולם בתאים שונים במקצת מזולתם, שחיו באותה סביבה אך ניצלו חומרים שונים מתוך המגוון שהיה בשפע יחסי במרק האורגני.

עם הִתרבות התאים החלה הידלדלות של מאגרי החומרים במרק האורגני הקדום. בין התאים שניזונו ממשאבים זהים התפתחה תחרות, ובמרק הקדמון החל להיווצר מחסור במשאבים חיוניים. סביר להניח שבין התאים שחיו במרק האורגני הקדמון היו גם כאלה שבהם התפתחו מנגנונים ליצירה עצמאית של תרכובות אורגניות - כלומר תאים אוטוטרופיים - ולתאים אלה היה יתרון על-פני תאים אחרים.



> כיום, קיומם של יצורים הטרוטרופים מותנה בקיומם של יצורים אוטוטרופים; אולם שימו לב - כנראה שלא כך היה המצב בראשית החיים: היצורים הראשונים עלי אדמות היו ככל הנראה הטרוטרופים. אוטוטרופיות התפתחה רק בשלב מאוחר יותר.

התפתחות אוֹטוֹטְרוֹפִיוּת

יש חוקרים המשערים שהתאים האוטוטרופיים הראשונים שהתפתחו התקיימו בדרך של **כֶמוֹסִינְתֶזָה;** כלומר מקור האנרגיה להרכבת התרכובות האורגניות היה בתרכובות אי-אורגניות (בניגוד לפוטוסינתזה, שבה מקור האנרגיה הוא אור).

חיידקים כמוסינתטיים קיימים גם כיום. עם גילוי קיומן של מערכות אקולוגיות במעמקי הים, זכו לפרסום חיידקים כמוסינתטיים המנצלים תרכובת גפרית (H_2S). במערכות אקולוגיות אלה, שאור השמש אינו מגיע אליהן ולא מתקיימת בהן פוטוסינתזה, החיידקים הכמוסינתטיים הם היצרנים (בדומה לצמחים ברוב המערכות האקולוגיות המוכרות).

יום הזעם הגדול (פרט)
ג'והן מרטין (1789-1854)

מקור האנרגיה של היצורים האוטוטרופים הנפוצים היום (הצמחים) הוא האור, המנוצל בפוטוסינתזה (פרק ח). יש להניח שהתפתחות הפוטוסינתזה, כמו כל תהליך אבולוציוני, הייתה הדרגתית, ושהמערכות הקדומות היו פשוטות הרבה יותר מהמערכות הקיימות היום: משערים שהמבנים שבאמצעותם התקיימה הפוטוסינתזה בתאים הפוטוסינתטיים הראשונים (לפני כ-3 מיליארד - $3X10^9$ - שנה) לא היו מאורגנים בכלורופלסטים, אלא היו משובצים בקרומי התאים - כפי שמוצאים גם בחיידקים פוטוסינתטיים המוכרים לנו היום.

לתאים הפוטוסינתטיים הקדומים היו דרישות מועטות מהסביבה (בדומה לצאצאיהם - הצמחים המוכרים לנו). תאים אלה השתחררו מהתלות בחומרים אורגניים מהמרק הקדמון, ובכך היה להם יתרון ניכר על-פני יצורים אחרים בסביבה, והם התרבו והתפשטו.

התאים הפוטוסינתטיים היוו גם מקור אנרגיה וחומרים אורגניים לתאים הטרוטרופיים: התאים ההטרוטרופיים ניזונו מהפרשותיהם של תאים פוטוסינתטיים, ואף טרפו אותם. כלומר, תאים פוטוסינתטיים היו הבסיס לשרשרת המזון הקדומה, בדומה לצמחים במרבית שרשרות המזון בימינו.

היצורים הפוטוסינתטיים התפשטו וכבשו סביבות חיים חדשות, גם כאלה שהיו עניות בחומר אורגני. הפוטוסינתזה הביאה לשינוי מפליג בתנאים על-פני כדור הארץ: כמות החמצן (O_2) - תוצר הפוטוסינתזה - עלתה עם הזמן (איור י4), והביאה ליצירת שכבת אוזון (O_3) באטמוספרה.

שכבה זו הקטינה את כמות הקרינה העל-סגולה (UV) שחדרה לכדור הארץ, ובכך הצטמצמו מקורות האנרגיה ליצירת תרכובות אורגניות במרק הקדמון. יתר-על-כן, חמצן הוא חומר מְחַמְצֵן: נוכחותו בריכוזים גבוהים גורמת לפירוק תרכובות אורגניות. במונחים של היום אפשר לראות את החמצן כ"מזהם האוויר" הראשון: סביר להניח שהצטברות חמצן באטמוספרה הקדומה חרצה את גורלם של פרוקריוטים קדומים רבים, שבשבילם החמצן היה רעיל.

אך אין רע בלי טוב: לפני היות האוזון התקיימו חיים רק במים, משום שהמים מסננים את הקרינה העל-סגולה, הגורמת נזק למערכות ביולוגיות. הודות לשכבת האוזון התאפשרה התפתחותם של ראשוני היצורים היבשתיים.

התפתחות נשימה תאית אווירנית

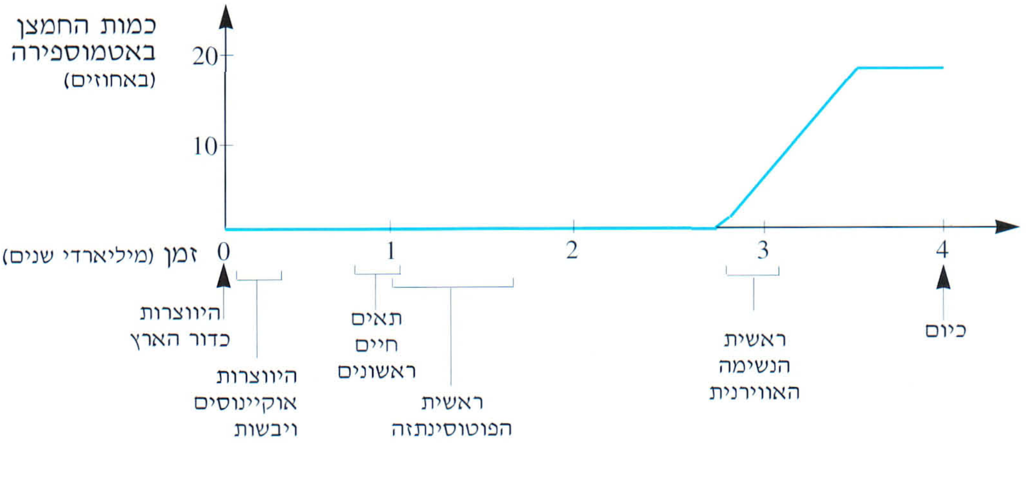
משערים שבתא כלשהו התפתחה היכולת לפרק את תוצרי הגליקוליזה, תוך התרכבות עם חמצן. זה היה ראשיתו של תהליך הנשימה האווירנית, תהליך שבו מפורקים חומרים אורגניים בתהליכי חמצון לפחמן דו-חמצני (CO_2) ולמים (H_2O) (פרק ז).

לתא שבו התפתחה נשימה אווירנית היו שני יתרונות בהשוואה לתאים האחרים:

- כמות האנרגיה המופקת בנשימה אווירנית גדולה בהרבה מזו שהופקה בתהליכים דמויי הגליקוליזה שהיו בתאים הקדמוניים (פרק ז). עקב התמעטות תרכובות שהיו מקורות אנרגיה זמינים במרק הקדמון, לתא בעל יכולת הפקה יעילה יותר של אנרגיה, היה יתרון ניכר.
- היות שכאמור, ריכוז החמצן באטמוספרה הקדומה עלה לממדים מזיקים, היה יתרון לתא שקשר את החמצן החופשי, ובכך מנע את השפעתו הרעילה.

כדאי לדעת -
ויטמין E מגן על קרומי התאים מפני השפעתו המזיקה של החמצן.

איור י4 מציג את הקשר בין השינויים בריכוז החמצן באטמוספירה לבין שלבים משוערים בהתפתחות היצורים החיים על-פני כדור הארץ.



איור י4: העלייה בריכוז החמצן באטמוספרה במהלך האבולוציה של היצורים החיים
משערים שהחמצן שנפלט בראשית הפוטוסינתזה התרכב עם ברזל שהיה על-פני הסלעים ובאוקיינוסים הקדומים, ורק מאוחר יותר הצטבר באטמוספרה.

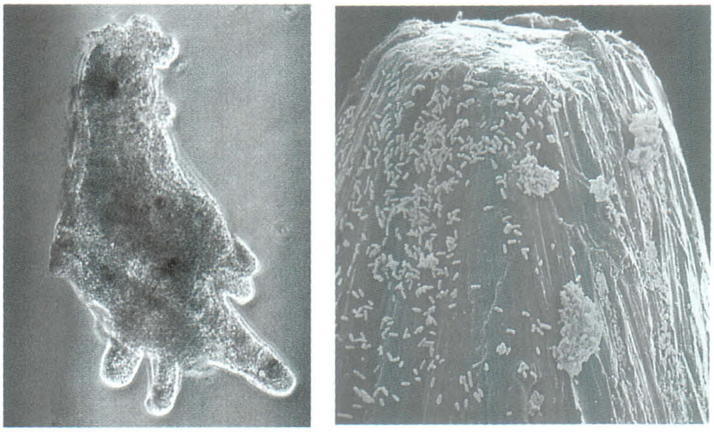
המרכיבים שבאמצעותם התקיימה נשימה אווירנית בפרוקריוטים הראשוניים היו, ככל הנראה, משובצים בקרומי התאים (בדומה למרכיבי המערכת הפוטוסינתטית); גם כיום, בחיידקים אירוביים מרכיבי הנשימה התאית משובצים בקרומי התאים.

סביר שיתרונות הפרוקריוטים האירוביים (הפקה יעילה של אנרגיה ועמידות ברעילות של החמצן) אפשרו להם להתרבות במהירות ולהתפשט לבתי גידול שהיו חסומים קודם לכן בפני היצורים החיים.

י4. תא פרוקריוטי ותא איקריוטי

במשך יותר משני מיליארד שנים, היצורים החיים היחידים על-פני כדור הארץ היו כנראה תאים פרוקריוטיים. הייתה זו קבוצה רבגונית, שהתקיימה במגוון רב של בתי גידול. יש להניח שטיפוסי התאים השונים נבדלו בגודלם, בצורתם ובתכונות רבות נוספות; חלקם היו אוטוטרופים (פוטוסינתטיים או כמוסינתטיים) וחלקם הטרוטרופים; חלקם חיו בתנאים אנאירוביים וחלקם - בתנאים אירוביים.

ראוי לשים לב שגם את הפרוקריוטים החיים בימינו ניתן למצוא בקשת רחבה של בתי גידול, וגם ביניהם קיים מגוון רב בצורתם ובכישוריהם הביוכימיים (כלומר באנזימים שבתאים).



איור י5: תאים פרוקריוטים ותא איקריוטי
ימין - חיידקים על ראש סיכה
תצלום במיקרוסקופ אלקטרונים סורק, הגדלה בערך פי 400
שמאל - חד-תא אמבה. הגדלה בערך פי 100

התאים האיקריוטיים, שהופיעו רק כ-3 מיליארד שנה לאחר היווצרות כדור הארץ, התפתחו, ככל הנראה, מתאים פרוקריוטיים (ראו נספח 3: על מיון בעולם החי).
באיור י5 מוצגת תמונה של תאים פרוקריוטים (חיידקים), לצד תמונה של תא איקריוטי (החד-תא אמבה). שימו לב ליחסי הגודל בין התאים, בהתחשב בהגדלות השונות של שתי התמונות.
כדי להבין את הקשר בין תא פרוקריוטי לתא איקריוטי, נבדוק את הדומה ואת השונה בשני טיפוסי תאים אלה בימינו (טבלה י1) – אם כי התאים הקדמונים, הן הפרוקריוטים והן האיקריוטים, היו שונים מהתאים הקיימים כיום.

טבלה י1: השוואה בין תא פרוקריוטי לתא איקריוטי

תא פרוקריוטי (חיידק)	תא איקריוטי
בנויים בעיקר מתרכובות אורגניות (הקבוצות העיקריות: חלבונים, חומצות גרעין, ליפידים ופחמימות)	
תגובות מזורזות על-ידי אנזימים	
קוטר: 5-0.3 מיקרומטר	קוטר: 50-10 מיקרומטר
יש דופן*	בתאי בעלי-חיים אין דופן; בתאי צמחים ובתאי פטריות יש דופן*
תחום בקרום המורכב מפוספוליפידים ומחלבונים	
אין אברונים המוקפים בקרום	יש אברונים המוקפים בקרום (מידור)
המידע התורשתי מוצפן ב-DNA	
מולקולת DNA טבעתית עיקרית יחידה, בציטופלסמה	כרומוזומים "חוטיים", בדרך-כלל בזוגות, בתוך גרעין תחום במעטפת
ה-DNA מתועתק ל-RNA; ה-RNA-שליח מתורגם, על-פי הקוד הגנטי, לחלבונים	
שכפול ה-DNA ותעתוק ה-RNA - בציטופלסמה	שכפול ה-DNA ותעתוק ה-RNA - בגרעין
ריבוזומים קטנים	ריבוזומים גדולים
תהליכי הפקת אנרגיה: גליקוליזה, נשימה תאית אווירנית, תסיסה ATP מתווך עיקרי במעברי אנרגיה	
תהליכי הפקת אנרגיה מתרחשים בציטופלסנה ובקרומים	חלק מתהליכי הפקת אנרגיה מתרחשים בציטופלסמה וחלק במיטוכונדריה
אם יש פוטוסינתזה היא מתרחשת בציטופלסמה ובקרומים	אם יש פוטוסינתזה היא מתרחשת בכלורופלסטים
לא ידוע על שלד תוך-תאי	שלד תוך-תאי
אם יש שוטונים - מבנם פשוט	אם יש שוטונים - מבנם מורכב
חלוקה פשוטה (לא מיטוזה וכמובן לא מיוזה)	מנגנוני חלוקה – מיטוזה, מיוזה

* הרכב הדופן בפרוקריוטים שונה מהרכבה באיקריוטים; הרכב הדופן בצמחים שונה מזה שבפטריות.

מההשוואה בין שני טיפוסי התאים עולה שלשניהם מבנה בסיסי דומה ובשניהם תפקודים דומים, אך התאים האיקריוטיים גדולים יותר ויש בהם מבנים מורכבים יותר מבתאים הפרוקריוטים.

י 5. האבולוציה של התא האיקריוטי

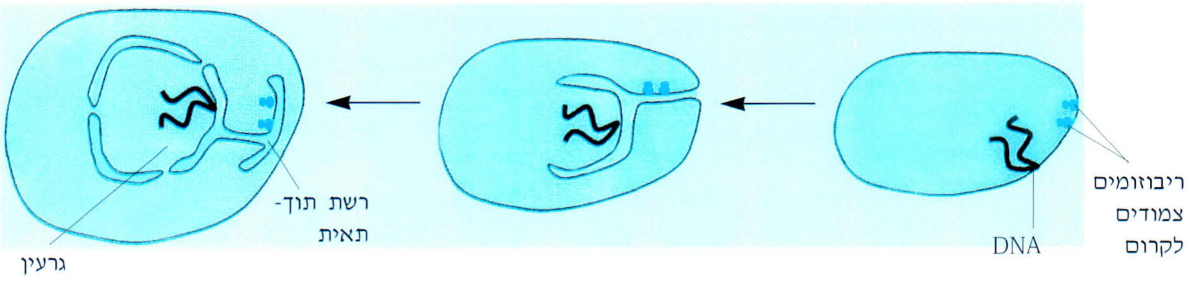
הדמיון בין שני טיפוסי התאים היווה את הבסיס לתאוריה הגורסת שהתאים האיקריוטיים התפתחו מתאים פרוקריוטיים.

יש חוקרים הסוברים שצעד ראשוני וחשוב בהתפתחות התא האיקריוטי היה התפתחות תא **חסר** דופן. איבוד הדופן אִפשר התפתחות אנדוציטוזה (ראו פרק ה) כדרך הזנה. בתאים בעלי דופן העיכול הוא חוץ-תאי, ואילו בתאים חסרי דופן אפשרית "בליעה" של מולקולות גדולות ואף של תאים או חלקי תאים, ועיכולם בתוך התא.

התפתחות אבולוציונית אינה מתבטאת רק בתוספת של מבנים או תהליכים - אלא גם בהתנוונותם ("איבודם").

כדאי לציין שהדופן המצויה בתאי צמחים שונה בהרכבה מהדופן המקיפה תאים פרוקריוטיים (ראו פרק ח וטבלה י1). הסברה היא שדופן תא הצמח היא התפתחות מאוחרת שהתרחשה בתא איקריוטי חסר דופן.

משערים שאברונים הקשורים במערכת קרומי התא, כמו גרעין התא, הרשת התוך-תאית, הליזוזומים ומערכות גולג'י (פרק ה) התפתחו מהתקפלות של אזורים בקרום התא אל תוך פנים התא: חלק מהאזורים שהתקפלו הכילו כנראה ריכוז של אנזימים ומבנים שביצעו במשותף תפקוד מסוים; במהלך הדורות ניתקו התקפלויות אלה מהקרום החיצוני, והתקבלו אברונים תאיים מופרדים ומוגדרים, שתוכנם היה שונה מתוכן הציטופלסמה. בין אברונים אלה התפתחה מערכת הובלה תוך-תאית, שיעילותה בהעברת חומרים הייתה גדולה יותר מיעילות ההעברה בדיפוזיה בלבד.



איור י6: מודל המתאר התפתחות גרעין ורשת תוך-תאית בתא פרוקריוטי קדום
על-פי ההשערה המוצגת באיור, חלקים מקרום תא פרוקריוטי קדום – שאליהם היו צמודים ריבוזומים או מולקולת DNA – התקפלו אל תוך התא, והתפתחו לרשת תוך-תאית ולגרעין, בהתאמה.

בפרק ו למדנו שהשלד התוך-תאי גם הוא מבנה המאפיין את התא האיקריוטי, המצוי ***רק*** בתאים איקריוטיים, ***ובכל*** התאים האיקריוטים. היות ששלד תוך-תאי מייצב את מבנהו ואת צורתו של התא, והוא גם מספק תמיכה לאברונים תוך-תאיים, ככל הנראה התפתחותו בתא קדמון אִפשרה לתאים להגיע לממדים הגדולים המאפיינים תאים איקריוטיים (ראו טבלה י1).

בחינה אחרת של התפתחות התא האיקריוטי מתמקדת במיטוכונדריה ובכלורופלסטים. מורכבות אברונים אלה מציבה אותם בעמדה אחרת מזו של האברונים שנידונו עד עכשיו.

?

עיינו שוב במידע על אודות מיטוכונדריון (פרק ז) וכלורופלסט (פרק ח). ציינו מאפיינים המבדילים בין שניהם לבין אברוני תא אחרים, כמו הרשת התוך-תאית והליזוזום.

מהכרת מיטוכונדריה וכלורופלסטים אפשר להבחין בכמה מספר קווי דמיון בינם לבין תאים פרוקריוטיים:

1. גודלם של אברונים אלה דומה לגודלם של חיידקים (מיקרונים אחדים).
2. במיטוכונדריה ובכלורופלסטים נמצאת מולקולת DNA טבעתית, שאינה מוקפת בקרום - בדומה למולקולת ה-DNA בחיידקים, אך בשונה מה - DNA שבגרעין תא איקריוטי.
3. בכלורופלסטים ובמיטוכונדריה יש ריבוזומים, שעליהם נבנים חלק מהחלבונים המתפקדים באברונים אלה. ריבוזומים אלה דומים בגודלם ובהרכבם לריבוזומים של תא פרוקריוטי (עיינו ב"העיקר הבריאות" שבהמשך).
4. מיטוכונדריה וכלורופלסטים מתרבים באופן עצמאי, כמעט ללא תלות בחלוקת התא שבו הם נמצאים. התרבותם נעשית על-ידי חלוקה הדומה לחלוקת חיידקים.

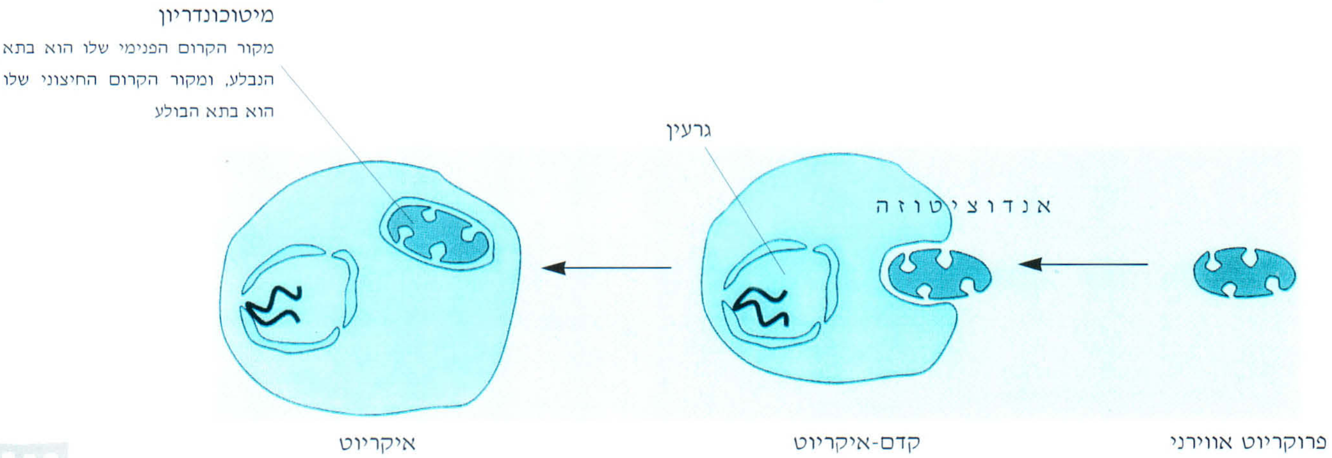
?

על-סמך הדמיון שבין מיטוכונדריה וכלורופלסטים לבין חיידקים, התוכלו לשער כיצד התפתחו אברונים אלה בתא האיקריוטי?

בתחילת שנות ה-60 פיתחה החוקרת לִין מַרְגוּלִיס (L. Margulis, 1938) תאוריה המסבירה את מוצאם של אברונים אלה: תאוריית ה**אֶנְדוֹסִימְבְּיוֹזָה** (endo=פנימי; sym=ביחד; bios=חיים. symbiosis=חיי שיתוף). תאוריה זו זכתה לתמיכה מקבוצות מדענים בכל רחבי העולם.

על-פי התאוריה, לפני כמיליארד וחצי שנים היו בעולמנו תאים קדם-איקריוטיים (תאים גדולים יחסית, בעלי גרעין וחסרי דופן). תאים אלה ניזונו מתאים פרוקריוטיים קטנים, על-ידי בליעתם באנדוציטוזה. אולם, לא כל התאים הקטנים שנבלעו נעכלו על-ידי התא הטורף - חלקם נותרו בתוכו בלי להתפרק.

תא קטן כזה המשיך להתקיים בתוך התא הגדול, ואף התרבה בו ועמו. במהלך הדורות התפתחו יחסי שיתוף בין התאים המאכסנים לבין התאים שבתוכם (איור י7):
תא פרוקריוטי אווירני קטן, שנבלע על-ידי תא קדם-איקריוטי, המשיך לקיים תהליכי נשימה אווירנית - ותהליכים אלה שימשו גם לצורכי האנרגיה של התא הגדול. במהלך הדורות הפסיק התא הבולע לקיים בעצמו נשימה תאית אווירנית, ובמקביל לכך התא הנבלע איבד את עצמאותו: חלק מתפקודיו (כמו הרכבת חלק מהחלבונים) החלו להתבצע על-ידי התא הבולע. יחסי השיתוף בין התא הגדול לתא הקטן הפכו בהדרגה ליחסי תלות בין שני השותפים. כך ככל הנראה הפך התא האווירני הקטן לאברון בתוך התא הגדול - למיטוכונדריון, המוכר לנו בכל התאים האווירניים האיקריוטיים בימינו (ראו נספח 3: על מיון בעולם החי) .



איור י7: מודל המתאר התפתחות מיטוכונדריון בתא איקריוטי
תא קדם-איקריוטי בלע תא פרוקריוטי אווירני קטן. תא קטן זה, שסיפק "שירותי נשימה אווירנית" לתא הגדול, הפך למיטוכונדריון.

משערים שבשלב אבולוציוני מאוחר יותר, תא איקריוטי שהכיל מיטוכונדריה בלע גם תא פרוקריוטי פוטוסינתטי קדום. בין התא הפוטוסינתטי ובין התא הבולע התפתחו יחסי שיתוף, שבעקבותיהם התפתח תא איקריוטי ובו אברון נוסף - הכלורופלסט. התאים מכילי הכלורופלסטים היו, כנראה, אבות הצמחים הראשונים (שוב - נספח 3: על מיון בעולם החי).

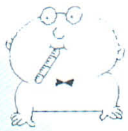
על-פי תאוריית האנדוסימביוזה, תאים קדם-איקריוטיים גדולים בלעו תאים פרוקריוטיים קטנים, ומהם התפתחו המיטוכונדריה והכלורופלסטים.

מדוע משערים שבליעת התא האווירני הקטן (שממנו התפתח מיטוכונדריון) ***קדמה*** לבליעת התא הפוטוסינתטי הקטן (שממנו התפתח כלורופלסט)?

לשם תשובה תוכלו להיעזר בכתוב בתיבה שבעמוד 185.

שלא כמו בחיידקים, בהיקפם של כלורופלסט ומיטוכונדריון יש ***שני*** קרומים: חיצוני - הדומה לקרומי התא האחרים, ופנימי, השונה בתכונותיו מקרומים אחרים בתא האיקריוטי, ודומה יותר לקרומים בתאים פרוקריוטים.

תאוריית האנדוסימביוזה מסבירה גם את מוצאם של שני קרומים אלה: הקרום הפנימי מקורו בקרום התא הפרוקריוט הקטן שנבלע, ומוצא הקרום החיצוני הוא בתא הגדול, הבולע (עיינו שוב באיור י7).



העיקר הבריאות

תמיכה בתאוריית האנדוסימביוזה באה מכיוון בלתי צפוי:

התרופה האנטיביוטית כְלוֹרַמְפֶנִיקוֹל פוגעת בחיידקים, על-ידי פגיעה בריבוזומים שלהם. הריבוזומים בתאים האיקריוטיים שונים מאלה של ריבוזומים בחיידקים, לפיכך בדרך-כלל תאי גוף האדם אינם נפגעים מתרופה זו.

אולם נמצאו אנשים - בעיקר תינוקות - שהראו רגישות לכלורמפניקול. התברר שאנטיביוטיקה זו עלולה לפגוע **במיטוכונדריה** שבתאים איקריוטיים. הפגיעה מורגשת בעיקר ברקמות שבהם מתרחשת חלוקת תאים נמרצת, משום שבתאים אלה גם חלוקות המיטוכונדריה רבות יותר.

ומה לרגישות לכלורמפניקול ולמוצא המיטוכונדריה?

למדנו שבמיטוכונדריה יש ריבוזומים. ריבוזומים אלה, כמו הריבוזומים בתאי חיידקים, רגישים לכלורמפניקול. הדמיון שבין תגובתם של חיידקים לכלורמפניקול לבין תגובת מיטוכונדריה מעיד על דמיון במבנה הריבוזומים, דמיון שתואם את התיאוריה בדבר מוצא המיטוכונדריה מתא פרוקריוטי.

בגלל מקרי הרגישות לכלורמפניקול צומצם באופן ניכר השימוש בתרופה זו.

נראה שהתפתחות מידור (ובכך - שמירה על סביבה פנימית ייחודית באברונים), המאפיין תאים איקריוטיים, אִפשרה ייעול התהליכים המתרחשים בתאים. תאים אלה התרבו, ואפשר שגם התפשטו בבתי גידול שנחסמו מפני תאים אחרים.

י6. מחד-תא לרב-תא: התמחות תאים

הסברה המקובלת גורסת שההתפתחות מיצורים שכל גופם תא אחד ליצורים שגופם מורכב מתאים רבים הייתה הדרגתית: החל בזוג תאי-בת שנשארו צמודים זה לזה לאחר חלוקתם, עבור דרך קבוצה גדולה של תאי-בת החיים יחדיו במושבות בדרגות שונות של שיתוף ו"חלוקת עבודה", ועד להתפתחות של יצור רב-תאי ובו חלוקה לאיברים ולרקמות.

חקר היצורים החד-תאיים (פרוקריוטים ואיקריוטים) החיים היום מראה לא רק שהם נפוצים במגוון עצום של בתי גידול, אלא גם שהם מהווים יותר ממחצית הבִּיוֹמָסָה[2] על-פני כדור הארץ! לאור כל זאת, נשאלת השאלה: איך אפשר להסביר את התפתחותם של יצורים רב-תאיים בעולם החד-תאיים הקדום?

נסו לענות על שאלה זו.

ביצור המורכב מתא אחד כל התפקודים מתבצעים בתא זה. לעומת זאת, ביצורים רב-תאיים קיימת כאמור "חלוקת עבודה" בין תאים ובין רקמות, המאפשרת התמחויות בתפקודים מסוימים.

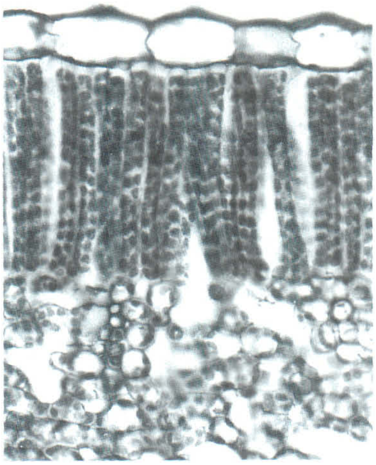
חשוב לזכור שכל אחד מתאי היצור הרב-תאי - גם תאים בעלי תפקודים מיוחדים ובעלי מבנים המתאימים לביצוע תפקודים אלה – מקיים גם את הפעילויות החיוניות ל"תחזוקה השוטפת" של התא כיחידה עצמאית: בכל תא הקרום מווסת כניסה ויציאה של חומרים אל התא וממנו; בכל תא מתקיים תהליך הגליקוליזה, בכל תא אירובי מתקיימת נשימה תאית, בכל תא נבנים חלבונים, ועוד.

[2] המסה של כל החומר היבש שמקורו ביצורים חיים

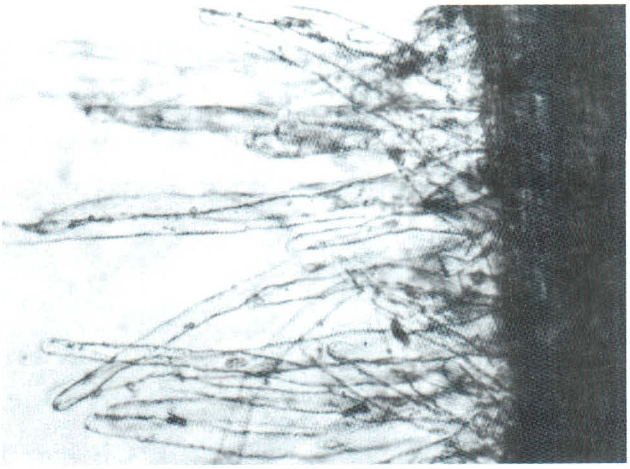
ההתמחות של תאים ביצור רב-תאי באה לידי ביטוי ברקמות ייחודיות, איברים ומערכות (עיינו בפרק ב).

דוגמאות לכך בצמח הרב-תאי -

- תאים מסוימים בצמח, הנמצאים בעיקר בעלים, מכילים כלורופלסטים רבים. תאים אלה "מומחים" בביצוע פוטוסינתזה (איור י8).
- בצמח קיימת מערכת הובלה שבה עוברים מים ומלחים מהשורשים לשאר חלקי הצמח, ומערכת הובלה אחרת, המעבירה תוצרי פוטוסינתזה מהעלים אל חלקי הצמח השונים.
- בתאי השורשים מצויים תאים הקולטים מים ומלחים מהקרקע. לתאים אלה יש בליטות אופייניות, הנקראות יונקות, ושמן מעיד על תפקודן (איור י9).



איור י8: חתך רוחב בעלה של ורד
הגדלה בערך פי 85
שימו לב שבתמונה יש שלושה טיפוסי תאים השונים בצורתם (בשכבה המרכזית כל "עמוד" הוא תא אחד, ובו כלורופלסטים רבים).



איור י9: יונקות בשורש אפונה
הגדלה בערך פי 100

ציינו דוגמאות מספר להתמחות תאים, רקמות או איברים בבעלי-חיים רב-תאיים.

ההתמחות של תאים בתפקוד מסוים מלווה על-פי-רוב במבנה ייחודי המתאים לתפקוד. **התאמה** כזו **בין מבנה לתפקוד** רווחת בכל רמות הארגון: תאים, רקמות, איברים ומערכות.

כדוגמה לכך נתבונן שוב באיור י9: מוצגת בו שכבת תאים חיצונית של השורש. אלה תאים בעלי יונקות, שתפקודם העיקרי הוא בקליטת מים וחומרי מזון מהקרקע. יעילותו של תפקוד כזה מותנית בשטח מגע גדול בין התא לסביבתו (על יחס בין שטח פנים לנפח למדנו בפרק ב) – ואכן ניתן לראות שהיונקות הן צרות וארוכות, מבנה המגדיל את שטח הפנים יחסית לנפח.

התמחות תאים המרכיבים יצור רב-תאי מלווה גם בשיתוף פעולה בין תאים – ובכך מתאפשר ניצול המשאבים שבסביבה בצורה יעילה. שיתוף הפעולה כרוך בתקשורת בין התאים. התקשורת הבין תאית מושגת בעזרת קשרים בין תאיים: "גשרים" ציטופלסמטיים בין תאי צמחים (פרק ח), מבנים מגשרים בין תאים צמודים בבעלי-חיים, קליטת אותות כימיים על-ידי קולטנים בקרומי תאים (פרק ה), ועוד.

סביר להניח שהיעילות בניצול המשאבים הודות להתמחות ולשיתוף הפעולה בין התאים ביצורים הרב-תאיים היא שהקנתה להם יתרון ואִפשרה להם להתפתח בעולם שנשלט עד אז על-ידי יצורים חד-תאיים.

גן התענוגות הארציים (פרט)
הירונימוס בוש (1516-1450)

צ'ארלס דרווין

תורת האבולוציה של דרווין על רגל אחת

צַ'רְלְס דַרְוִוין (Charles Darwin, 1809-1822) זכה לפרסום במחצית השנייה של המאה ה-19, הודות לפיתוח **תאוריית האבולוציה**, המסבירה את תהליך ההיווצרות של מיני היצורים החיים.
תאוריה זו ידועה גם בשם **דַרְוִוינִיזְם**.

במשך השנים שעברו מניסוחה הראשוני של התאוריה, שולבו בה ממצאים מאוחרים יותר מחקר התורשה. לתאוריה המשולבת יש הקוראים **נֵאוֹ-דרוויניזם** (neo=חדש).

להלן כמה נקודות מפתח בתאוריה זו:

- דרכי הורשת תכונות מדור לדור מבטיחות המשכיות של מיני היצורים הקיימים בעולם, ובה בעת שמירה על תכונותיהם.
- עם זאת, חלים שינויים במטען התורשתי של פרטים בטבע (מוטציות). שינויים אלה עשויים לעבור בתורשה. זהו המקור ל**שׁוֹנוּת** הגנטית שבין פרטים שונים של אותו מין.
- בממוצע, דור הצאצאים גדול במספרו מדור ההורים; היות שהמשאבים העומדים לרשות היצורים החיים מוגבלים, קיימת **תחרות** בין הפרטים להשגת המשאבים: כלומר קיימת מלחמת קיום.
- בגלל ההבדלים בין פרטים שונים של אותו מין, יש בין הפרטים כאלה שיש להם צירוף תכונות המקנה להם סיכויים גדולים יותר לשרוד בסביבה נתונה, ולהעמיד יותר צאצאים. היות שצירוף תכונות זה מקורו במטען תורשתי מסוים, גדל מספרם של הפרטים הנושאים מטען תורשתי זה לעומת פרטים שאינם נושאים אותו. בדרך זו נבררים (עוברים סֶלֶקְצְיָה) מטענים תורשתיים "מוצלחים". זהו תהליך **הַבְּרֵרָה הטבעית**.
- תנאי הסביבה משתנים ללא הרף.
- בתנאי סביבה מסוימים יכול להיות לצירוף תכונות מסוים יתרון על-פני צירוף אחר, אולם בתנאי סביבה אחרים אותו צירוף תכונות יכול להוות חיסרון, המקטין את סיכוייהם של הפרטים בעלי צירוף זה להתקיים ו/או להעמיד צאצאים פוריים.
- עקב השונות הקיימת בין פרטים שונים של אותו מין, פעולת הברירה הטבעית בתנאי סביבה שונים עשויה להביא במהלך הדורות ליצירת מינים חדשים.

אף שתאוריית האבולוציה של דרווין אינה עונה על כל השאלות המתעוררות בנושא, היא מקובלת בקרב המדענים כיום.

דרווין לא היה החוקר הראשון שהשתמש במונח אבולוציה לתיאור ההשתנות של מיני היצורים החיים; תרומתו המרכזית של דרווין אינה בהבחנה שיש אבולוציה בעולם החי, אלא בתיאור המנגנון המונח בבסיס תהליך זה: ברירה טבעית.

י 7. סיכום

- כמה תאוריות מסבירות את הופעת **החומרים האורגניים הראשונים** על כדור הארץ. שתיים מהמקובלות שבהן הן:
  – היווצרות על-פני כדור הארץ: הרכב הגזים באטמוספרה הקדומה, בצירוף מקורות אנרגיה רבים, גרמו לתהליכים כימיים שבהם נוצרו חומרים אורגניים פשוטים.
  – חומרים אורגניים הגיעו לכדור הארץ מהחלל החיצון.
- החומרים האורגניים הראשונים היו מומסים בימים שעל-פני כדור הארץ והיוו את ה**מרק** ה**אורגני** ה**קדמון**.
- מעט מאוד ידוע על היווצרות תאים מהחומרים האורגניים הקדומים. משערים שתנאי הסביבה גרמו להתארגנות התרכובות האורגניות לתאים פשוטים, הדומים לתאים ה**פרוקריוטים** של היום.
- התאים הראשוניים היו **הטרוטרופיים**; הפקת האנרגיה בתאים הראשונים הייתה, ככל הנראה, בתהליכים הדומים ל**גליקוליזה**, ובהם פורקו תרכובות אורגניות שהיו במרק האורגני הקדמון.
- בחלק מהתאים התפתחה **אוטוטרופיות;** תאים שביצעו **פוטוסינתזה** סיפקו חומרים אורגניים גם לתאים הלא-פוטוסינתטיים.
- עם התרבות התאים הפוטוסינתטיים חלה עלייה בריכוז החמצן באטמוספירה, ונוצר יתרון לתא שהתפתחה בו **נשימה אווירנית**.
- **שכבת האוזון** (O_3) שנוצרה באטמוספרה הפחיתה את כמות קרינת ה-UV המגיעה לכדור הארץ ואִפשרה התפתחות של יצורים גם על-פני היבשות.
- משערים שה**גרעין**, ה**רשת** ה**תוך-תאית**, ה**ליזוזום**, **מערכות גולג'י** (וייתכן שאברונים נוספים) נוצרו בעקבות **התקפלויות** של קרום התא, שנותקו מהקרום.
- הימצאות ה**מיטוכונדריה** וה**כלורופלסטים** בתא איקריוטי מוסברת כתוצאה של **אנדוסימביוזה**. תאוריית האנדוסימביוזה מבוססת על הדמיון שבין חיידקים לבין מיטוכונדריה וכלורופלסטים.
- ביצורים רב-תאיים התפתחה התמחות של תאים לתפקודים ייחודיים, המלווה ב**התאמה** בין מבנה התא לתפקודו. ביצורים רב-תאיים קיימת גם חלוקת עבודה ותקשורת בין תאים, המאפשרים ביצורים אלה ניצול יעיל של משאבים.

- התבססות צורות חיים מוסברת בגישת **האבולוציה הדרווינית**: מבין כל הצורות הקיימות, יש יתרון לצורה המותאמת ביותר לסביבתה, יתרון המתבטא בהעמדת יותר צאצאים (פוריים).

שאלות ומשימות לפרק י

1. "כל חי מוצאו מחי" כיצד מתיישבת אמירה זו עם תיאור ראשית החיים המוצג בפרק?

2. ***לחובבי הכימיה:*** עיינו שוב בתיאור הניסוי שערך מילר. האם מהתרכובות במערכת יכלו להיווצר חומצות גרעין? (היעזרו בפרק ד "קצת כימיה".)

3. קיומם של יצורים הטרוטרופיים כיום תלוי בקיומם של יצורים אוטוטרופיים.
   א. ממה נובעת תלות זו?
   ב. מדוע סבורים שתלות זו לא הייתה בראשית החיים?

4. מדוע משערים שנשימה תאית אווירנית התפתחה ***אחרי*** פוטוסינתזה, אך בתא האיקריוטי התפתחו מיטוכונדריה ***לפני*** שהתפתחו כלורופלסטים?

5. בפרק ד נטען ש"רוב המוטציות הבאות לידי ביטוי מזיקות לפרט הנושא אותם". בפרק י מתוארת התפתחות פוטוסינתזה, נשימה תאית אווירנית ורב-תאיות כתוצאה ממוטציות. האם יש בכך סתירה? נמקו.

6. להלן תהליכים המתקיימים בתאים. ציינו (רצוי בטבלה) איזה מהתהליכים מתקיימים בכל התאים של אורגניזם רב-תאי, ואיזה מהם מתקיימים רק בחלק מהם: חילוף חומרים (מטבוליזם), פוטוסינתזה (בצמחים), מעבר חומרים דרך קרומים, זירוז תגובות על-ידי אנזימים, הפרשה של הורמונים (בבעלי-חיים), בניית חלבונים, גליקוליזה, חלוקת תא מסוג מיוזה, שמירה על הומאוסטזיס.

7. התמחות תאים ביצורים רב-תאיים מלווה בירידה בכושרם של התאים להתקיים כיחידות עצמאיות. הסבירו.

8. להלן מספר משפטים. ציינו איזה מהם נכונים ואיזה שגויים, ואת המשפטים השגויים תקנו. שימו לב: ייתכן שחלק מהמשפט נכון, וחלק - שגוי.
   א. מדענים משערים שהאטמוספרה הקדומה (לפני התפתחות החיים) הייתה עשירה בתרכובות אורגניות.
   ב. שכבת האוזון (O_3) שבאטמוספרה מקטינה את כמות הקרינה העל-סגולה (UV) שחודרת לכדור הארץ.
   ג. חוקרים משערים שהתאים הראשונים שהתפתחו היו הטרוטרופיים.
   ד. מניחים שהתאים הקדמונים לא נזקקו לתהליך דמוי גליקוליזה להפקת אנרגיה, בגלל שהם התקיימו במרק עשיר בתרכובות אורגניות.

ה. משערים שהיכולת להפיק אנרגיה בתהליך דמוי גליקוליזה התפתחה אחרי שהתפתחה היכולת להיזון בפוטוסינתזה.

ו. עם התרבות התאים הפוטוסינתטיים חלה עלייה בריכוז החמצן באטמוספרה.

ז. עם התפתחות הנשימה התאית האווירנית נכחדו כל התאים שלא יכלו להפיק אנרגיה בתהליך זה.

ח. תיאוריית האנדוסימביוזה מתארת את ההתפתחות של גרעין, מיטוכונדריון, רשת תוך-תאית, ליזוזומים, כלורופלסטים ומערכות גולג'י בתאים איקריוטיים.

ט. האבולוציה היא תהליך שבו חלות מוטציות המגדילות את ההתאמה של אורגניזמים לסביבתם.

9. אילו מהתהליכים הבאים בהתפתחות עולם החי אפשר להסביר על-ידי בררה טבעית? (בחרו את התשובה הנכונה ביותר.)

א. עלייה בתפוצת יצורים אוטוטרופיים;

ב. עלייה בתפוצת יצורים המבצעים נשימה אווירנית;

ג. עלייה בתפוצת יצורים רב-תאיים.

ד. תשובות א ב ו-ג נכונות.

נספחים

נספח 1: רקע כימי 204

מבנה האטום 204

קשרים כימיים 205

קשרים יוניים 205

קשרים קוולנטיים 206

כוחות בין-מולקולריים 207

כוחות ון דר-ולס 207

קשרי מימן 207

מים 208

מסיסות 209

תגובות כימיות 210

מהלך התגובה הכימית 210

קצב התגובה הכימית 210

שיווי משקל כימי 211

חומצות ובסיסים 212

רמת חומציות: רמת pH 213

תמיסות בופר 214

נספח 2: הקוד הגנטי 215

נספח 3: על מיון בעולם החי 216

נספח 1: רקע כימי[1]

מבנה האטום

יסודות, שהם חומרים שלא ניתן לפרקם לחומרים פשוטים יותר, מורכבים מ**אטומים** (atomos ביוונית: שלא ניתן לחלוקה). על-פי המודל המקובל היום, האטום מורכב מחלקיקים שהעיקריים בהם הם: ***פרוטונים*** - בעלי מטען חשמלי חיובי, ***ניוטרונים*** - שהם חסרי מטען, ו***אלקטרונים*** - בעלי מטען שלילי. מבחינה חשמלית האטום ניטרלי, היות שמספר הפרוטונים שווה למספר האלקטרונים. כל היסודות בנויים מאטומים בעלי אותו מבנה בסיסי, אך מספרי הפרוטונים, הניטרונים והאלקטרונים שונים ביסודות השונים.

הפרוטונים והניוטרונים מרכיבים את ה**גרעין** שבמרכז האטום, ומהווים את עיקר המסה של האטום. האלקטרונים נמצאים בתנועה מתמדת סביב הגרעין ויוצרים **ענן אלקטרונים** (איור 1) בעל מטען חשמלי שלילי. בתוך הענן האלקטרונים נעים במסלולים קבועים, המאופיינים על-ידי מרחקם הממוצע מגרעין האטום. מסת האלקטרונים קטנה מאוד בהשוואה למסת הפרוטונים והניוטרונים, אולם ענן האלקטרונים גדול פי כמה מגרעין האטום. תוכלו להתרשם מיחסי הגודל בעזרת הדימוי של נמלה (גרעין האטום) הנמצאת במרכזו של מגרש כדורגל (ענן האלקטרונים).

איור 1: דגם של אטום הליום [He]
גרעין אטום הליום מכיל שני פרוטונים (באיור - אפור בהיר) ושני ניוטרונים (תכלת).
תנועת שני האלקטרונים שבאטום יוצרת סביב הגרעין ענן אלקטרונים.
יחסי הגודל באיור אינם תואמים ליחסי הגודל במציאות.

האלקטרונים נעים בענן האלקטרונים במסלולים השונים זה מזה במרחקם מגרעין האטום. ככל שהמסלול בו נע האלקטרון רחוק יותר מגרעין האטום – רמת האנרגיה שלו גבוהה יותר. רק האלקטרונים הנמצאים ברמת האנרגיה הגבוהה ביותר, דהיינו – שמרחקם מגרעין האטום הוא הגדול ביותר, משתתפים בתגובות כימיות.

[1] לרוצים להרחיב את ידיעותיהם מומלצים שלושת הספרים מסדרת ***כימיה בתהליכי החיים***, שיצאו בהוצאת המרכז להוראת המדעים, תשנ"ט - תש"ס (1999-2000).

קשרים כימיים

רק לעתים נדירות קיימים בטבע אטומים בודדים; בדרך-כלל בין אטומים פועלים כוחות, הנקראים קשרים כימיים. קשרים כימיים בין אטומים הם תוצאה של שינוי במיקום האלקטרונים הרחוקים מהגרעין, בכל אחד מהאטומים המשתתפים בקשר. קשרים כימיים מתקיימים בין אטומים המרכיבים יחד **מולקולה** (היכולה להיות מורכבת משני אטומים או יותר), או "מבנה ענק" רב-אטומי, כדוגמת סריג יוני (ראו בהמשך).

יצירה ושבירה של קשרים כימיים מלווה תמיד בשינויי אנרגיה:
יצירת קשר כימי מלווה ***בשחרור*** אנרגיה, ולשם ***שבירת*** קשר דרושה ***השקעת*** אנרגיה. (חוזק יחסי של קשר כימי מוגדר על-פי כמות האנרגיה המשתחררת ביצירתו או הדרושה לשבירתו.)

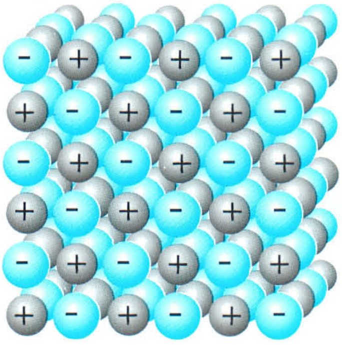
ישנם קשרים כימיים ***בתוך*** המולקולות וישנם קשרים כימיים ***בין*** המולקולות. מבין הקשרים התוך-מולקולריים נציין את הקשר היוני והקשר הקוולנטי. מבין הקשרים הבין-מולקולריים נציין את הקשרים שמקורם בכוחות ון-דר-ולס וקשרי מימן.

- **קשרים יוניים**

אטום או מולקולה בעלי מטען חשמלי נקראים **יוֹנים**. יוֹן יכול להיות חיובי או שלילי, בהתאם למטען שלו.
קשר יוני הוא תוצאה של מעבר אלקטרון (אחד או יותר) מאטום של יסוד אחד לאטום של יסוד אחר. במעבר זה מופר האיזון החשמלי שהיה בכל אחד מהאטומים: האטום שמסר אלקטרון(ים) טעון מטען חיובי, והאטום שקיבל אלקטרון(ים) טעון מטען שלילי; הקשר נובע מהמשיכה החשמלית בין היונים הטעונים במטענים מנוגדים.

היונים יוצרים ***סריג יוני***, שבו היונים החיוביים מוקפים ביונים שליליים, וההפך (איור 2). בטמפרטורות החדר חומרים יוניים הם מוצקים.

דוגמה: במלח בישול (NaCl) יש קשרים יוניים בין יוני נתרן (Na^{+}, בעלי מטען חיובי) לבין יוני כלור (Cl^{-}, בעלי מטען שלילי).


איור 2: סריג יוני

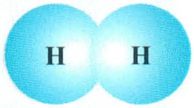
• קשרים קוולנטיים

בקשר קוֹוָלֶנְטִי זוג אלקטרונים (אלקטרון אחד מכל אטום) משותף לשני אטומים, כלומר מקיף את שני האטומים המשתתפים בקשר. המשיכה של כל אחד מגרעיני האטומים לאלקטרוני הקשר יוצרת את הקשר הקוולנטי.
כאשר שנים או שלושה זוגות אלקטרונים משותפים לשני אטומים, מתקבל קשר קוולנטי כפול או קשר קוולנטי משולש, בהתאמה.

בתאור חומר בעזרת נוסחת מבנה, מספר זוגות האלקטרונים המשתתפים בקשר קוולנטי מבוטא על-ידי מספר הקווים שבין סימולי האטומים. לדוגמה, מולקולת מימן (H_2), שבה יש קשר קוולנטי יחיד, מסומלת כך: H—H;
ומולקולת חמצן (O_2), שבה יש קשר קוולנטי כפול, מסומלת כך: O═O.

קשר קוולנטי יכול להיות בין אטומים מאותו יסוד או בין אטומים מיסודות שונים:

– בקשר קוולנטי בין אטומים מאותו יסוד, האלקטרונים המשותפים נמשכים באותה מידה לכל אחד מגרעיני אטומים. כלומר, ההסתברות להימצאות אלקטרוני הקשר סביב גרעין אחד שווה להסתברות להימצאותם סביב הגרעין האחר.
דוגמה: המולקולה מימן (H_2) מורכבת משני אטומי מימן (H), המשתפים ביניהם שני אלקטרונים – אחד מכל אטום.

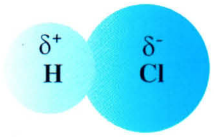


איור 3: דגם של מולקולת מימן
במולקולת המימן שני האלקטרונים (אחד מכל אטום) נמשכים באותה מידה לכל אחד מגרעיני האטומים.

– בקשר קוולנטי בין אטומים שאינם מאותו יסוד, המשיכה של אלקטרוני הקשר לגרעיני האטומים בדרך-כלל אינה שווה: ההסתברות להימצאותם סביב גרעין אחד גדולה יותר מההסתברות להימצאותם סביב הגרעין האחר. קשר כזה מכונה קשר קוולנטי **קוטבי** (קוטביות = polarity). אטום שההסתברות להימצאות אלקטרוני הקשר סביבו גבוהה יותר, נושא מטען חלקי שלילי, ומהווה את הקוטב השלילי של המולקולה;
אטום שההסתברות להימצאות אלקטרוני הקשר סביבו נמוכה יותר, נושא מטען חלקי חיובי ומהווה את הקוטב החיובי של המולקולה.

מסמנים קוטביות באות היוונית δ (דֶלְתָא); הקוטב השלילי מסומן ב- δ^-, החיובי ב- δ^+.

דוגמה: המולקולה מימן כלורי (HCl) מורכבת מאטום אחד של מימן (H) ואטום אחד של כלור (Cl), המשתפים ביניהם שני אלקטרונים – אחד מכל אטום. אלקטרוני הקשר קרובים יותר לאטום הכלור מאשר לאטום המימן, לפיכך הקשר בין האטומים הוא קשר קוולנטי קוטבי, שבו הכלור מהווה את הקוטב השלילי, והמימן את הקוטב החיובי (איור 4).



איור 4: דגם של מולקולת מימן כלורי
סביב אטום המימן יש מטען חלקי חיובי, וסביב אטום הכלור יש מטען חלקי שלילי.

כוחות בין-מולקולריים

תכונות של חומרים נובעות לא רק ממבנה המולקולות המרכיבות אותם, אלא גם מהכוחות שבין מולקולות החומר.

- **כוחות ון-דר-ולס**

כוחות משיכה בין מולקולות ניטרליות (חסרות מטען חשמלי) מכונים "כוחות ון-דר-ולס". עצמתם של כוחות אלה גוברת עם העלייה במספר האלקטרונים (והפרוטונים) במולקולה.

- **קשרי מימן**

לאטום מימן הקשור בקשר קוולנטי (לאטום חמצן - O, חנקן - N או פלואור - F) יש מטען חיובי חלקי (δ^+); כיוון שכך, נוסף לקשר הקוולנטי שבו הוא משתתף, הוא נמשך גם לאטומים הנמצאים במולקולות אחרות בסביבתו, שלהם מטען שלילי חלקי (δ^-). בכך המימן יוצר מעין גשר בין שני אטומים ממולקולות שונות - זהו ***קשר מימן***.

קשרי מימן מצויים גם ***בתוך*** חלקים שונים של אותה מולקולה, כאשר המולקולה גדולה מספיק ומקופלת בצורה המאפשרת זאת. קשרי מימן הם הקובעים את המבנה המרחבי של תרכובות רבות: פחמימות, חלבונים, חומצות גרעין ועוד. בתמיסות מימיות, קשרי מימן נוצרים ונשברים בקלות רבה יחסית, ובכך הם מקנים גמישות - מבנית ותפקודית - למולקולות ביולוגיות.

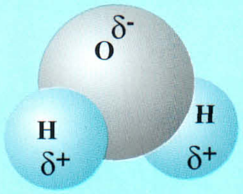
תארנו שני כוחות בין-מולקולריים: כוחות ון-דר-ולס בין מולקולות שאינן טעונות, וקשרי מימן – שהם קוטביים. למעשה קיימים קשרים גם בין מולקולות שבהן יש קשרים ***קוולנטיים קוטביים.*** חוזק הקשרים הללו תלוי במידת הקוטביות של המולקולות: ככל שהמולקולה קוטבית יותר, המשיכה בין המולקולות חזקה יותר.

אפשר לדרג את הקשרים התוך-מולקולריים והקשרים הבין מולקולריים מהחזק ביותר לחלש ביותר:
קשר יוני, קשר קוולנטי, קשר מימן, כוחות ון-דר-ולס.

נא להכיר

מים

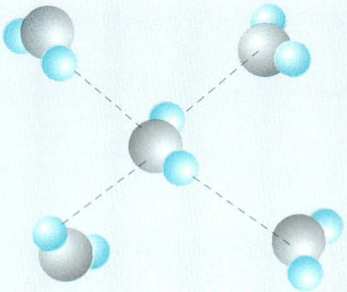
מולקולת מים (H_2O) מורכבת מאטום חמצן הקשור בקשרים קוולנטים קוטביים לשני אטומי מימן. הזווית בין שני אטומי המימן היא כ-104.5^0.



לאטום החמצן מטען שלילי חלקי, ולכל אחד מאטומי המימן מטען חיובי חלקי.

מולקולות המים קשורות ביניהן בקשרי מימן: קיימת משיכה בין אטום החמצן – קוטב שלילי – שבמולקולה אחת, לאטומי המימן – קוטב חיובי – במולקולות סמוכות (איור 5).

אחת התכונות המאפיינות את המים היא כושרם להמיס מגוון רחב של חומרים; כמעט כל התגובות המתרחשות בתאים (שכ-70% ממסתם היא מים) מותנות בהמסת המגיבים במים.



איור 5: קשרי מימן בין מולקולות מים

מסיסות

תמיסה היא תערובת אחידה[2] של שני חומרים או יותר; החומר שמספר המולקולות שלו גדול יותר נקרא **ממס**, והחומר שמספר המולקולות שלו קטן יותר – **מומס**. בתמיסות רבות הממס הוא נוזל.

כאשר חומר מתמוסס בחומר אחר, פירוש הדבר שנוצרו כוחות משיכה בין חלקיקי המומס לחלקיקי הממס.

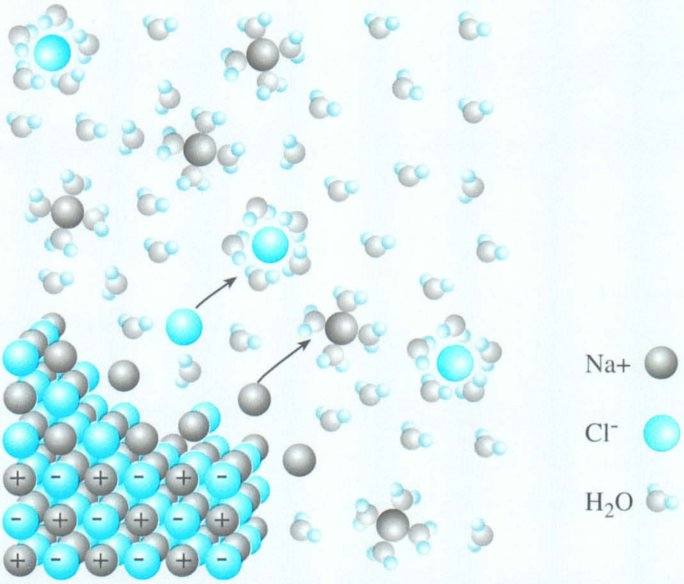
כאשר חומר מתמוסס במים, פירוש הדבר שנוצרו כוחות משיכה בין חלקיקי המומס לבין מולקולות המים.

כאשר החומר המומס במים הוא מולקולרי (=חומר המורכב ממולקולות), נוצרים קשרים בין מולקולות המומס לבין מולקולות המים (קשרי מימן וקשרים קוטביים).

כאשר החומר המומס במים הוא יוני, נוצרת משיכה בין היונים השליליים לקוטב החיובי של מולקולות המים – המימן, ובין היונים החיוביים לקוטב השלילי של מולקולת המים – החמצן, ומתקבלים יונים "עטופים" במולקולת מים (ראו איור 6).

חומרים המתמוססים במים נקראים חומרים ***הידרופילים*** (hydro=מים, philein=לאהוב); חומרים שאינם מתמוססים במים נקראים חומרים ***הידרופובים*** (phobos=פחד).

בתמיסות שבהן הממס לא קוטבי והמומס לא קוטבי פועלים כוחות ון-דר-ולס בין מולקולות הממס למולקולות המומס.



איור 6: המסה של מלח בישול במים
יוני הנתרן (Na^+) - שלהם יש מטען חיובי, נמשכים לאטומי החמצן שבמולקולות המים - שלהם יש מטען חלקי שלילי.
יוני הכלור (Cl^-) - שלהם יש מטען שלילי, נמשכים לאטומי המימן במולקולות המים, שלהם יש מטען חלקי חיובי.

---
[2] שלא ניתן להבחין בין המרכיבים השונים בעין.

תגובות כימיות

- **מהלך התגובה הכימית**

בתגובה כימית (או ריאקציה כימית) חלים שינויים בקשרים הכימיים: קשרים קיימים מתפרקים ונוצרים קשרים חדשים, ובהתאם לכך – חומרים משנים את תכונותיהם. חומר – או חומרי – המוצא נקראים **מגיבים**, והחומר – או חומרים – שנוצרו נקראים **תוצרים**.

שבירת קשרים כימיים, שהיא תנאי ראשון להתרחשותה של תגובה כימית, דורשת אנרגיה. מולקולות נמצאות בתנועה מתמדת[3] ואף מתנגשות זו בזו, ואנרגיית התנועה שלהן היא מקור האנרגיה לשבירת הקשרים. קשרים יישברו רק אם למולקולות המתנגשות תהיה אנרגיה השווה לאנרגיה מינימלית מסוימת או גבוהה ממנה. אנרגיה מינימלית זו נקראת **אנרגיית שפעול** (Activation Energy, Ea). לכל תגובה יש אנרגיית שפעול אופיינית לה, בהתאם לסוג הקשרים הנשברים במהלכה.

תנאי נוסף להתרחשותה של תגובה הוא שבזמן ההתנגשות המולקולות המתנגשות תהיינה בכיוון מתאים האחת כלפי האחרת, כך שיוכלו להיווצר קשרים חדשים. ככל שהמולקולות גדולות ומורכבות יותר – ובתא החי רבות מהתגובות הכימיות המתרחשות הן בין מולקולות גדולות – יש יותר אפשרויות לכיווניות הפגישה ביניהן, ולכן ההסתברות שההתנגשות תתרחש בכיווניות המתאימה קטנה יותר.

כאשר מתקיימים שני התנאים – אנרגיה מספקת וכיווניות מתאימה – ההתנגשות גורמת ליצירת קשרים כימיים חדשים, כלומר ליצירת תוצר.

היות שכל המולקולות נעות ויכולות להתנגש זו בזו, התנגשות שחלה בין מולקולות מגיבים יכולה להביא ליצירת מולקולות תוצרים, וכמו-כן התנגשות בין מולקולות תוצרים יכולה להביא ליצירת מולקולות מגיבים.

מקובל לכנות מגיבים ותוצרים על פי המצב ההתחלתי של המערכת: מגיבים הם חומרים שריכוזם ההתחלתי גבוה יחסית ויורד עם הזמן, ואילו תוצרים הם חומרים שריכוזם[4] ההתחלתי נמוך או אפסי בתחילת תגובה, ועולה עם הזמן.

---

[3] תיאור זה של תגובה כימית, המבוסס על תנועה של מולקולות, פותח לתיאור תגובה בין מולקולות במצב גזי. עם זאת, תיאוריה זו מתאימה בקירוב גם לתיאור תגובות המתרחשות בתמיסה, וכאלה הן התגובות בעולם החי.

[4] ריכוז = מספר חלקיקים ליחידת נפח

- **קצב התגובה הכימית**

קצב התגובה הכימית מבטא את המהירות שבה מגיבים הופכים לתוצרים.

השפעת הטמפרטורה: עלייה בטמפרטורה גורמת לעלייה במהירות הממוצעת של המולקולות, ולכן מעלה את הסיכויים להתנגשות. כמו-כן, עלייה בטמפרטורה גורמת לעלייה במספר המולקולות בעלות אנרגיית תנועה שווה לאנרגית השפעול או גדולה ממנה, ולכן ביחידת זמן יותר קשרים כימיים יישברו בעקבות התנגשות המולקולות.
כלומר, עם עליית הטמפרטורה עולה קצב התגובה הכימית.

השפעת ריכוז המגיבים: העלאת ריכוז המגיבים משמעה שבכל יחידת נפח יש יותר מולקולות מגיבים - ולכן גדל הסיכוי להתנגשות ביניהן. כאשר יש יותר התנגשויות בין מולקולות מגיבים, עולה הסיכוי שהן יהפכו למולקולות תוצרים.
כלומר, עם עליית ריכוז המגיבים עולה קצב התגובה הכימית.

- **שיווי-משקל כימי**

במערכת סגורה[5], עם התקדמות התגובה ריכוז המגיבים פוחת וריכוז התוצרים עולה. זאת - עד המצב שבו מספר ההתנגשויות הגורמות ליצירת תוצרים משתווה למספר ההתנגשויות הגורמות ליצירת מגיבים. במצב זה ריכוזי המגיבים והתוצרים נשארים קבועים; זהו מצב של **שיווי-משקל** כימי.
חשוב להבין שגם במצב של שיווי-משקל כימי המגיבים הופכים לתוצרים והתוצרים הופכים למגיבים - אלא שהמעברים מתרחשים ב***קצב שווה***, ולפיכך אין שינוי בריכוזי החומרים.

נהוג לציין שיווי-משקל כימי בחצים הפוכים, שווים באורכם:

$$A + B \rightleftharpoons AB$$

שיווי-משקל כימי יכול להיות מושג רק במערכת סגורה; מערכת פתוחה, שיש בה זרימה החוצה ופנימה של מגיבים או תוצרים וריכוזם משתנה, לא תגיע לשיווי-משקל. לפיכך, אם החומר המיוצג בנוסחה שלעיל על-ידי האותיות AB יורחק מהמערכת, או שיוספו החומרים A ו-B, כיוון התגובה נֶטו יהיה:

$$A + B \longrightarrow AB$$

כיוון התרשים הוא משמאל לימין, כנהוג בהצגת נוסחאות כימיות.

[5] מערכת סגורה - מערכת שחומרים אינם נכנסים אליה ואינם יוצאים מתוכה.

חומצות ובסיסים

בסיס הוא חומר המסוגל לקלוט יון מימן (פרוטון, H^+) מחומר אחר;
וחומצה היא חומר המסוגל למסור יון מימן לחומר אחר.
תגובת בסיס-חומצה היא תגובה שבה עובר יון מימן מחומצה לבסיס.

תגובות ביולוגיות מתקיימות בסביבה מימית, ומושפעות במידה ניכרת מרמת החומציות של סביבתם; במים טהורים (H_2O) חלק קטן מהמולקולות מקיימות בינן לבין עצמן תגובת בסיס-חומצה, כלומר: יש מולקולות מים המתנהגות כבסיס (=קולטות יוני מימן) ואחרות המתנהגות כחומצה (=מאבדות יוני מימן). מולקולת מים הקולטת יון מימן הופכת להיות **יון הידרוניום** (H_3O^+), וממולקולת מים המאבדת יון מימן - נשאר **יון הידרוקסי** (OH^-). בתגובה זו מתקיים שיווי-משקל כימי, כפי שמתואר בנוסחה הבאה:

$$\underbrace{H_2O + H_2O}_{\text{מולקולות מים}} \rightleftharpoons \underbrace{H_3O^+}_{\text{יון הידרוניום}} + \underbrace{OH^-}_{\text{יון הידרוקסי}}$$

— במים טהורים ריכוז יוני ההידרוניום שווה לריכוז יוני ההידרוקסי; כל תמיסה שבה מתקיים שוויון ריכוזים זה היא **תמיסה ניטרלית**.

— בתגובת בסיס-חומצה בין בסיס למים, הבסיס קולט יוני מימן מהמים, וכתוצאה מכך מופר האיזון שהיה במים בין ריכוזי יוני ההידרוניום ליוני ההידרוקסי, ומתקבלת **תמיסה מימית בסיסית**, שבה ריכוז יוני ההידרוקסי גבוה מריכוז יוני ההידרוניום.

— בתגובת בסיס-חומצה בין חומצה למים, יוני מימן מהחומצה נקשרים למולקולות המים, וכתוצאה מכך יש יותר יוני הידרוניום מיוני הידרוקסיד, והתוצאה היא **תמיסה מימית חומצית**.

ההבחנה בין חומצה חזקה לבין חומצה חלשה מבוססת על ההבדל בריכוז יוני ההידרוניום, הנוצר בתגובה בין החומצה למים: כאשר שתי החומצות נמצאות באותו ריכוז, חומצה חזקה יוצרת יותר יוני הידרוניום בתגובה עם מים משיוצרת חומצה חלשה.

באופן דומה נעשית הבחנה בין בסיס חזק לבסיס חלש: בהיותם באותו ריכוז, בסיס חזק קולט יותר יוני מימן בתגובה עם מים, ולכן יוצר יותר יוני הידרוקסי משיוצר בסיס חלש.

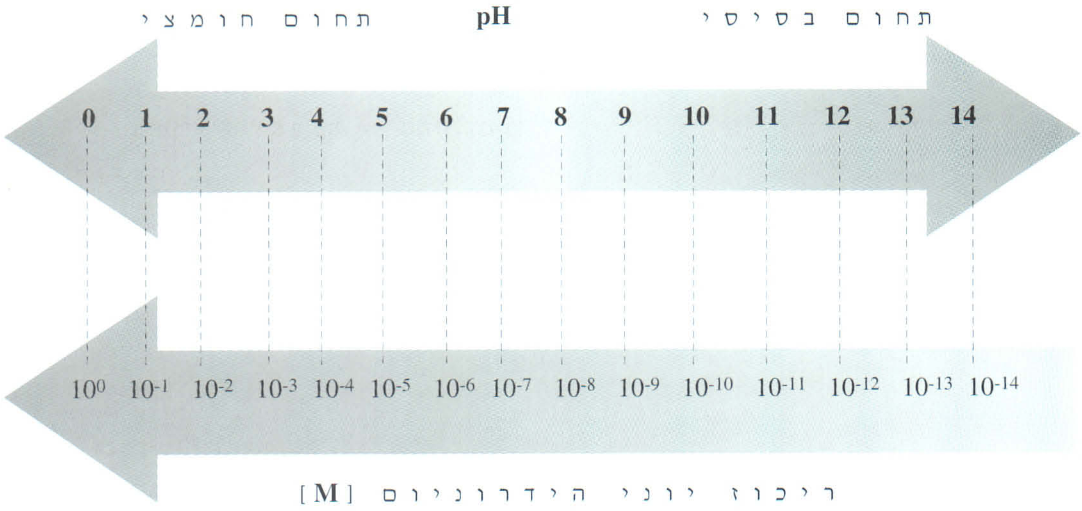
- **רמת חומציות: רמת pH**

ניתן לתאר את חוזקם של בסיסים וחומצות באמצעות **רמת pH** (בעברית: **עֵרֶךְ הַגֵּבָה**). ערכי ה-pH (מבטאים: פֵּי אֵייצ׳) מביעים את ריכוז יוני ההידרוניום[6] בתמיסה נתונה. הערכים בנויים כך שהפרש של יחידת pH אחת מבטא הפרש של ***פי עשרה*** בריכוז יוני ההידרוניום.

ככל שערך ה-pH של תמיסה ***נמוך*** יותר, ריכוז יוני ההידרוניום בה ***גבוה*** יותר – כלומר התמיסה ***חומצית*** יותר. וההפך: ככל שערך ה-pH של תמיסה גבוה יותר, ריכוז יוני ההידרוניום בה נמוך יותר – כלומר התמיסה בסיסית יותר.

ערכי pH נעים בדרך-כלל בין 0 ל-14. נדירות מאוד תמיסות שערך ה-pH שלהם גבוה עד כדי_15 או נמוך כדי 1-.

תמיסה שה-pH שלה גבוה מ-7: בסיסית; שווה ל-7: ניטרלית; נמוך מ-7: חומצית.



איור 7: רמות pH
עלייה ביחידה אחת ברמת ה- pH מייצגת ירידה פי עשרה בריכוז יוני ההידרוניום.

---

[6] בעבר נהוג היה לומר שרמת חומציות (pH) משקפת את ריכוז יוני המימן בתמיסה. כיום נהוג לדבר על ריכוז יוני ההידרוניום, כיון שכאמור, יוני המימן אינם חופשיים בתמיסה, אלא קשורים למולקולות מים.

הוספת בסיס לתמיסה ניטרלית מעלה את ה-pH של התמיסה, ואילו הוספת חומצה לתמיסה ניטרלית מורידה את pH התמיסה; מידת השינוי ב-pH תלויה בחוזק של הבסיס או החומצה, כאשר שאר התנאים (נפח התמיסה, הריכוז והנפח של החומצה או הבסיס שמוסיפים) קבועים.

- **תמיסות מָגֵן (בופֶר)**

תמיסות, שהוספת כמויות קטנות יחסית של בסיס או חומצה אליהם כמעט שאינה משנה את ה-pH שלהם, מכונות תמיסות **מגן** או תמיסות **בופֶר** (בופֶרים). חשוב לציין שבמערכות ביולוגיות נמצאות תמיסות מגן טבעיות; חשיבותן בתא רבה היות ששינויים – אף קטנים ביותר – ברמת החומציות יכולים לגרום לשינויים בקשרים כימיים בתוך המולקולות ובכוחות בין המולקולות, וכתוצאה מכך עלולים לחול שינויים במבנים ובתהליכים המתרחשים בתא.

נספח 2: הקוד הגנטי

	אות שניה								
אות ראשונה	U		C		A		G		אות שלישית
U	UUU	פניל אלנין	UCU	סרין	UAU	טירוזין	UGU	ציסטין	U
	UUC		UCC		UAC		UGC		C
	UUA	לאוצין	UCA		UAA	הפסקת קריאה	UGA	הפסקת קריאה	A
	UUG		UCG		UAG		UGG	טריפטופאן	G
C	CUU	לאוצין	CCU	פרולין	CAU	היסטידין	CGU	ארגינין	U
	CUC		CC C		CAC		CGC		C
	CUA		CCA		CAA	גלוטמין	CGA		A
	CUG		CCG		CAG		CGG		G
A	AUU	איזולואצין	ACU	תריאונין	AAU	אספרגין	AGU	סרין	U
	AUC		ACC		AAC		AGC		C
	AUA		ACA		AAA	ליזין	AGA	ארגינין	A
	AUG	מטיונין ותחילת קריאה	ACG		AAG		AGG		G
G	GUU	ולין	GCU	אלנין	GAU	אספרטית	GGU	גליצין	U
	GUC		GCC		GAC		GGC		C
	GUA		GCA		GAA	גלוטמית	GGA		A
	GUG		GCG		GAG		GGG		G

נספח 3: על מיון בעולם החי

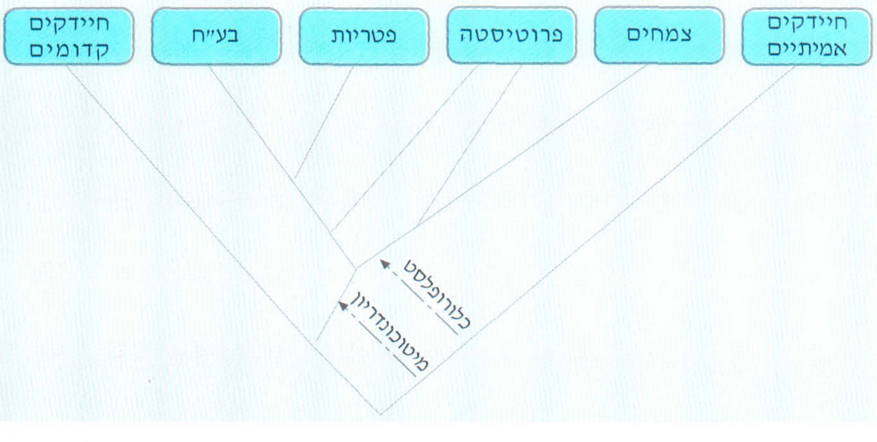
מיון עולם החי נעשה על-ידי חוקרים רבים במהלך ההיסטוריה של הביולוגיה, וזאת - על סמך שיקולים שונים (כמו: צורה חיצונית, דרכי רבייה, כישורים ביוכימיים ועוד). במקרים רבים החפיפה בין צורות המיון השונות לא היתה מלאה. כיום מקובל מיון המבוסס על השוואה בין חומצות גרעין (RNA ריבוזומי) של היצורים השונים, כשהעקרון הוא: ככל שהדמיון רב יותר - הקרבה בין היצורים גדולה יותר. על בסיס זה מחולקים היצורים בעולם החי לשלוש על-ממלכות, ולשש ממלכות.

מיון עולם החי לעל-ממלכות ולממלכות

	על-ממלכות	ממלכות	
פרוקריוטים	ארכיאה (Archaea)	חיידקים קדומים	
	בקטריה (Bacteria)	חיידקים אמיתיים	
איקריוטים	איקריה (Eukarya)	פרוטיסטה	חד-תאיים
		פטריות	רב-תאיים
		צמחים	
		בעלי-חיים	

שתיים מהעל-ממלכות – ארכיאה ובקטריה – כוללות יצורים ***פרוקריוטים***, בעוד השלישית - איקריה - כוללת ארבע ממלכות של יצורים ***איקריוטים***. מבין ממלכות איקריה היצורים בשלוש ממלכות הם רב-תאיים, בעוד שהיצורים בממלכה אחת, פרוטיסטה, הם חד-תאיים.

נהוג לתאר את הקשרים האבולוציוניים בין יצורים בתרשים דמוי אילן, שבו הגזע מתאר את המוצא המשותף, כל ענף מתאר את אחת הקבוצות ומקום הפיצול של הענף מתאר את השלב האבולוציוני בו התפצלה כל קבוצה. הקרבה האבולוציונית בין קבוצות (על-פי נקודת המבט שעמדה בבסיס המיון) מיוצגת על-ידי מקום הפיצול: ככל שנקודת פיצול בין שתי קבוצות "גבוהה" יותר בענף, קרבתן האבולוציונית גדולה יותר.



באיור מימין מתוארים, בקווים כלליים, הקשרים האבולוציוניים בין הממלכות השונות על-פי אחת ההשערות.
החצים המקווקוים מתארים את המקור הפרוקריוטי של האברונים מיטוכונדריון וכלורופלסט ("תיאורית האנדוסימביוזה").
אין הקבלה בין אורך הקווים באיור לבין זמן.

תשובות קצרות לשאלות נבחרות

מבוא

האמנם מאפייני חיים?

המאפיין	העדר המאפיין בעולם החי	ביטוי המאפיין בעולם הדומם
גדילה	אדם בגיל העמידה	גידול גבישים
חילוף חומרים	–	ברזל שמחליד (מתרכב עם חמצן), נר דולק
צריכת אנרגיה	–	שרפת דלק במנוע מכונית
תנועה	(גם אם הדבר אינו ניכר לעין, בכל היצורים החיים קיימת תנועה ברמה התאית)	כלי תחבורה
תגובה לסביבה	בעל-חיים ישן מגיב פחות לגירויים	פעולת חיישנים שונים. דוגמה: הדלקה וכיבוי של חימום/קירור בהתאם לטמפ' הסביבה. תרמוסטט.
רבייה	דבורים פועלות (עקרות)	להבה שמדליקים ממנה עוד להבות
אבולוציה	–	אפנות באמנות, אפנות של ביגוד, פיתוחים טכנולוגיים (מחשבים)

פרק ב

1 ב.

א. 2 מיקרומטר (אורך);
ב. 4.2 מילימטר או 4200 מיקרומטר (אורך);
ו. 8 מיקרומטר (אורך);
יא. 100 מיקרומטר (אורך);
יב. 6 מיקרומטר (אורך).

1 ג.

תאים פרוקריוטים	תאים איקריוטים		
	בעלי-חיים	צמחים	לא ברור כיצד למיין
א	ג, ה, ח, ט, י, יא, יב	ד, ו, ז	ב

3. ריבוזום - קצת יותר מ-10 ננומטר;
ביצת דג - כ-2 מילימטרים;
חיידק - קצת פחות מ-10 מיקרומטר;
ביצת תרנגולת – כ-5 סנטימטר;
אדם - 2-1.5 מטר.

4. ג. בתינוקות היחס שטח פנים / נפח ***גדול*** יותר מאשר בבוגרים, שהם בעלי גוף גדול יותר. כיוון שכך, בהיעדר לבוש מתאים בחורף עלולים תינוקות לאבד חום רב לסביבה דרך שטח הפנים של גופם. באותה דרך הם עלולים לקלוט חום רב מהסביבה בקיץ.

5. מיקרוסקופ אלקטרונים מגדיל פי מיליון, ומיקרוסקופ אור מגדיל פי אלף; לפיכך, מיקרוסקופ אלקטרונים מגדיל פי אלף ממיקרוסקופ האור.

6.

תא	רקמה	איבר	מערכת	גוף
תאי שריר	עצם, שרירים	גבעול, אוזניים, עלה, פרח, יד, תפוח-עץ (פרי)	שרירים	כלב,כלנית וגם: תפוח עץ (עץ)

פרק ג

3. החום גורם לדנטורציה של החלבונים בביצה (הן ב"חלבון" - ה"לבן", והן בחלמון – ה"צהוב"), ולכן הצבע והמרקם משתנים.

4. I. אתר פעיל: הוא איננו מולקולה, אלא חלק ממולקולה.
II. סובסטרט: חלבון, אנזים ואתר פעיל מתייחסים לאנזים, והסובסטרט לא.
III. חלבון: מונח המתאר חומר כימי בעל תכונות מסוימות. השאר – מתארים תפקוד.

5. הקירור מאט את הפעילות האנזימטית בחיידקים.

6. החומציות שבמיץ הלימון גורמת לדנטורציה של האנזימים המזרזים את תגובת ההשחמה.

7. אם ריכוז ה***אנזים*** מהווה גורם מגביל, אז על-ידי הגדלת ריכוזו ניתן להגביר את קצב התגובה; אם ריכוז ה***מגיב*** מהווה גורם מגביל, אז על-ידי הגדלת ריכוזו ניתן להגביר את קצב התגובה.

8. A – חלבון, B – אנזימים, C – חומצות אמיניות.

9. המשפטים א, ג, ו ו-ח נכונים; המשפטים המתוקנים הם:
ב. אנזימים אינם ***מספקים*** אנרגיה, אלא ***מורידים*** את אנרגית השפעול.
ד. שינוי ברצף החומצות האמיניות באנזים ***עלול*** לגרום להפסקת פעילותו.
ה. אנזימים ***אינם*** מתפרקים במהלך התגובה אותה הם מזרזים.
ז. בהינתן תנאים מתאימים, אנזימים יכולים להיות פעילים גם מחוץ לתאים חיים.

פרק ד

1. בסיס חנקני, נוקלאוטיד, גדיל, מולקולת DNA, כרומוזום.

2. C 23%, A 27% ו-T 27%.

3. הרצף הנתון: ‎-G-C-C-T-A-G-C-A-T-‎
   א. הרצף המשלים: ‎-C-G-G-A-T-C-G-T-A-‎
   ב. הרצף ב-RNA על-פי הקטע הנתון: ‎-C-G-G-A-U-C-G-U-A-‎
   ג. בקטע DNA באורך כזה יכולות להיות מוצפנות 3 חומצות אמיניות (9/3).

4. מולקולת **mRNA** (שליח): מעבירה מידע לבניית חלבונים מ-DNA שבגרעין אל הציטופלסמה.
   מולקולת **tRNA** (מוביל): "משדכת" בין חומצה אמינית מסויימת לבין קודון (שלשת בסיסים) ב-RNA-שליח לשרשרת החלבונית הנבנית בריבוזום.
   מולקולת **rRNA** (ריבוזומי): בין מרכיבי הריבוזום.

5. א. המספר ***המינימלי*** של נוקליאוטידים בקטע זה הוא $51 \times 3 = 153$; הסבר: לכל חומצה אמינית מקודדים 3 נוקליאוטידים.
   ב. יש להניח שהגן ה"אחראי" על אינסולין כולל יותר מ-153 נוקליאוטידים: הגן יכול לכלול גם נוקליאוטידים המהווים אזורי בקרה ואינם עוברים תעתוק (וכן נוקליאוטידים המורחקים ממולקולת ה-RNA בתהליך השחבור).

7. א. התפתחות שמשיה מותנית ביצירת מרכיבים שונים, בכללם חלבונים. העובדה שהתפתחה שמשייה בהתאם למין של הגרעין המושתל מעידה שמרכיבים אלה נוצרו על-פי רצף הבסיסים שב-DNA שבגרעין (ב"תיווך" RNA-שליח). השלבים השונים של תהליכי ייצור חומרי הבניין של השמשייה מזורזים על-ידי אנזימים, והיות שהגרעין המושתל נשטף משיירי ציטופלסמה – מקור האנזימים היה באצה "תורמת הגבעול", כלומר: אנזימים הקיימים במין אחד של סוככנית זרזו את תעתוק ה-DNA (ויתכן שגם שלבים אחרים בייצור חלבונים ומרכיבים נוספים) של מין אחר.
   ב. יתכן שבציטופלסמה שבגבעול החתוך נותרו חומרים שמהם יכולה הייתה להיווצר שמשיה, ללא תעתוק ה-DNA שבגרעין. החומרים יכולים להיות אלה המרכיבים את השמשייה, או מולקולות של RNA-שליח שנותרו בציטופלסמה, שעל פיהם נוצרים החלבונים המשתתפים בהרכבת כל חלקי השמשייה.

8. המשפטים הנכונים: א, ב, ד, ו, ח; המשפטים המתוקנים הם:
ג. ***מולקולת*** ה-DNA היא דו-גדילית ***ומולקולת*** ה-RNA היא חד-גדילית, ***ויש בה קטעים דו גדיליים.***
ה. בתהליך ה***תעתוק*** נוצרת מולקולת RNA על-פי דגם של מולקולת DNA.
ז. בכל תא יש ***טיפוסים רבים*** של מולקולות RNA-מוביל (לפחות טיפוס אחד לכל אחת מ-20 החומצות האמיניות).
ט. ***לא*** כל החלבונים נוצרים בכל התאים כל הזמן, ולא כל החלבונים פעילים בכל התאים כל הזמן.
י. ***לא*** כל מוטציה גורמת לשינוי בחלבון (מוטציות יכולות להיות גם באזורי בקרה וגם בקטעי DNA שכלל אינם מתועתקים).

פרק ה

1. ב. הקרומים של כל האברונים דומים בהרכבם ובמבנם הבסיסי: שכבה כפולה של פוספוליפידים המסודרים "זנב אל זנב", בין הליפידים משובצים חלבונים, ובצד הקרום הפונה אל חוץ התא – סוכרים.
הקרומים שבאברונים השונים נבדלים זה מזה בזהות הליפידים, החלבונים והסוכרים המרכיבים אותם.

2. א. בעקבות החימום נפגע המבנה השלישוני של חלבוני הקרום (תעלות, משאבות), ונפגע תפקודם בהעברת חומרים דרך הקרום.
2. ב. ההבדל בין קרומים בתגובתם יכול להגרם מכך שבקרומים שונים נמצאים חלבונים שונים, ובכמויות שונות.

3. המשפטים ג, ח, ט, ו-י נכונים; המשפטים המתוקנים הם:
א. אמנם כל הקרומים בנויים משתי שכבות של מולקולות פוספופליפידים, אך לכל שכבה הרכב משלה.
ב. "ראש" הפוספוליפיד מסיס במים, "זנבו" מסיס בשומן.
ד. חלבוני הקרום אינם קבועים במקומם.
ה. מולקולות סוכר קשורות אל חלק גדול ממולקולות הליפידים והחלבונים, בצד הקרום הפונה אל הסביבה החיצונית של התא.

ו. לקרומי התאים חדירות בררנית; חומרים מסיסים בליפידים עוברים דרכם, וחלק מהחומרים שאינם מסיסים בליפידים יכולים לעבור דרכם באמצעות תעלות או נשאים.

ז. מפני השכבה הפוספוליפידית "בולטים" חלבונים, ובצדו החיצוני גם סוכרים.

יא. מעבר חומרים בדיפוזיה דרך תעלה, כמו גם מעבר חומרים באמצעות חלק מהנשאים, הם תהליכים שאינם דורשים השקעת אנרגיה.
מעבר חומרים באמצעות נשא מסוג משאבה דורש השקעת אנרגיה.

7. מים יכנסו לתוך החד-תאיים, וכתוצאה מכך ירד ריכוז המלחים בהם, ונפחם יעלה.

8. באברונים אלה שלפוחיות קרומיות ניתקות ומתאחות. "זרימה קרומית" זו מאפשרת העברה של תכולת השלפוחית ומתאפשרת הודות לדמיון הבסיסי שבין כל הקרומים שבתא.

9. תפקודם של אנזימים, משאבות וקולטנים תלוי בהתאמה מרחבית בינם לבין חומר אחר/ מולקולה אחרת.

10. ג

11. ג

12. א

13. ג

14. ג

15. ג

16. ד

פרק ו

2. משפטים א ו-ה נכונים; המשפטים המתוקנים הם:
ב. סיבי השלד התוך-תאי מורכבים מחלבונים, ***אך לא*** מ-DNA.
ג. בהסתכלות מבעד למיקרוסקופ האור ***אי אפשר*** להבחין בסיבי השלד התוך תאי.
ד. מיקומם של סיבי השלד התוך-תאי משתנה כל הזמן.
ו. בציטופלסמה מצויים חלבונים רבים, נוסף לחלבוני השלד התוך-תאי.
ז. לא בכל התאים יש אברי תנועה מיוחדים.

פרק ז

1. משפטים ב, ג , ח, ט, יא נכונים; המשפטים המתוקנים הם:
א. כל התאים החיים זקוקים לאנרגיה, ובכלל זה צמחים. (כמו-כן, יש תנועה בצמחים!)
ד. בעלי-חיים נקראים יצורים צרכנים (הטרוטרופים), משום שהם ניזונים מתרכובות אורגניות שמקורן ביצורים יצרנים (אוטוטרופים).
ה. לא כל התרכובות האורגניות שבגוף צרכנים יוצרו על-ידי יצרנים; גם צרכנים מייצרים תרכובות אורגניות – אבל מתרכובות אורגניות קיימות. (רק יצרנים מייצרים תרכובות אורגניות מתרכובות אי-אורגניות.)
ו. I. גם אם גלוקוז עצמו אינו נמצא במזון, הוא נוצר במהלך חילוף החומרים (מטבוליזם) של חומרים שונים בגוף.
II. ניתן להפיק אנרגיה גם מתרכובות אורגניות שונות מגלוקוז.
ז. חמצן אינו משתתף כלל בתהליך הגליקוליזה.
י. בתהליכי הפירוק של חומצה פירובית לפחמן דו-חמצני ולמים משתחררת פחות אנרגיה מאשר בפירוק גלוקוז לפחמן דו-חמצני ולמים; פירוק חומצה פירובית לפחמן דו-חמצני ולמים הוא אחד מהשלבים של פירוק גלוקוז (אחרי גליקוליזה).
יב. מספר המיטוכונדריה בתאי הגוף אינו קבוע.

2. היות שגליקוגן ועמילן אינם מסיסים במים, הצטברותם בתא איננה גורמת לחדירת מים לתא באוסמוזה (שכן הם אינם גורמים לעליה בריכוז המומסים).

3. ההסבר לכך הוא שבתנאים אווירניים מופקת יותר אנרגיה (נבנות יותר מולקולות ATP) מאשר בתנאים אל-אווירניים, ולכן כל הפעילויות בתא (בכללן הרכבת חומרים וחלוקות תאים) נעשות בקצב מהיר יותר. (כשיש יותר כח – אפשר לרוץ מהר יותר; כשיש יותר כסף – אפשר לקנות יותר פריטים).

4. בעירת כוהל פירושה: התרכבות הכוהל עם החמצן שבאוויר (ויצירת פחמן דו-חמצני ואדי מים). החום הרב שנפלט מקורו באנרגיה הכימית שהשתחררה בתהליכים אלה והתגלגלה לאנרגיית חום. מכאן שבתהליכי התסיסה הכוהלית הופק רק חלק (קטן) מהאנרגיה שניתן היה להפיק לו הפירוק באורגניזם היה ממשיך עד לפחמן דו- חמצני ומים.

5. בחוסר חמצן בתאי השריר מתרחשת "תסיסת חומצת החלב": נוצרת חומצת חלב, הגורמת ליצירה של סביבה חומצית – דהיינו: ירידה ב-pH.

6. א

7. א

8. ג

פרק ח

1. אפשר להציג את שני התהליכים בצורה הבאה:

פוטוסינתזה:

מגיבים — תוצרים

פחמן דו-חמצני, מים ← ← ← ← **פחמימה, חמצן**

(אנרגיית אור; כלורופיל, אנזימים)

נשימה:

מגיבים — תוצרים

פחמימה, חמצן ← ← ← ← **פחמן דו חמצני, מים**

בהצגה זו אפשר לראות שלגבי ***חומרים*** תהליכים אלה משלימים זה את זה:
בפוטוסינתזה המגיבים הם פחמן דו-חמצני ומים, והתוצרים הם פחמימה וחמצן;
בנשימה תאית ההפך: המגיבים הם פחמימה (לדוגמה גלוקוז) וחמצן, והתוצרים הם פחמן דו-חמצני ומים.

בפוטוסינתזה יש קיבוע של פחמן אי-אורגני (פחמן דו-חמצני) לתרכובת אורגנית (פחמימה); ובנשימה תאית תרכובת אורגנית מתפרקת לתרכובות אי-אורגניות.
לגבי ***אנרגיה*** תהליכים אלה **אינם** משלימים זה את זה:
בפוטוסינתזה אנרגית אור מומרת לאנרגיה כימית (הרכבת פחמימה); בנשימה תאית אנרגיה כימית מתגלגלת לאנרגיה כימית (גלוקוז ← ATP).
בשני התהליכים מעברי האנרגיה כרוכים בפליטת אנרגיית חום.

2. משפטים א, ב, ד, ז ו-י נכונים; המשפטים המתוקנים הם:

ג. פוטוסינתזה מתקיימת בצמחים, ונשימה תאית אווירנית מתקיימת ***בצמחים ובבעלי-חיים.***

ה. האנרגיה הכימית המתקבלת מהמרת אנרגיית אור בשלב הראשון של הפוטוסינתזה, מנוצלת בשלב השני בקיבוע פחמן אי-אורגני לתרכובת אורגנית.

ו. באמצעות צמחים אכן יש מעבר של אנרגיה מצורה אחת (אנרגית אור) לצורה אחרת (אנרגיה כימית), אולם ***לא כל*** האנרגיה מועברת, שכן חלקה הופך לאנרגיית חום שנפלטת לסביבה.

ח. עמילן אינו מסיס במים. כחומר תשמורת בצמחים עמילן מצטבר ***בעמילופלסטים.***

ט. תאי בעלי-חיים ***וגם תאי צמחים*** מוקפים קרום; בתאי צמח יש דופן ***המקיפה*** את הקרום.

3. בשלב האור מומרת אנרגיית האור לאנרגיה כימית. אנרגיה כימית חיונית לתגובת קיבוע הפחמן.

4. פחמימה שהורכבה בתהליך הפוטוסינתזה ומתפרקת לפחמן דו-חמצני ומים עשויה:
א. להתפרק לפחמן דו-חמצני ומים בנשימה תאית בתא הצמח, תוך שחרור אנרגיה (והרכבת מולקולות ATP).
ב. לשמש שלד פחמני לתרכובת אורגנית כלשהי בתאי הצמח. אם /כאשר הצמח יאכֵל על-ידי צרכן, הצרכן עשוי לפרק את התרכובת ו"להשתמש" בה בתהליך בנשימה התאית, ולפרקה לפחמן דו-חמצני ומים תוך הפקת אנרגיה.
ג. לשמש שלד פחמני לתרכובת אורגנית כלשהי בתאי הצמח, ועם מותו של הצמח – להתפרק על-ידי חיידקים לפחמן דו-חמצני ומים תוך הפקת אנרגיה.
ד. לשמש שלד פחמני לתרכובת אורגנית כלשהי בתאי הצמח. אם /כאשר האדם ישתמש בצמח לשרפה – להתפרק לפחמן דו-חמצני ומים תוך הפקת אנרגיה.

5. ג

6. ב

פרק ט

1. כיוון ששלב M קצר יחסית ליתר שלבי מחזור התא, לא סביר שבזמן ההסתכלות המיקרוסקופית יימצאו רוב התאים בשלב חלוקה.

2. בתאי זרע וכן בביציות של בני-אדם מצויים 23 כרומוזומים.

3. בכרומוזומים נמצא המידע ליצירת כל חלבוני התא. לפיכך, שיבוש כלשהו במידע זה עלול לפגוע במבנה התא ובפעילותו.

4. משפטים ג, ד, ה, ו, ז, יב ו-יג נכונים; המשפטים המתוקנים הם:
א. בשלב G_1 הכרומוזומים אומנם עוד לא שוכפלו, אך הסיבה שאי אפשר להבחין בהם במיקרוסקופ אור היא שצורתם פקעת חוטים ולא גופיפים מוגדרים.
ב. בשלב G_2 מספר הכרומוזומים בתא ***שווה*** למספרם בשלב G_1, אולם כל כרומוזום מוכפל, כלומר מורכב משתי כרומטידות.

ח. בסוף חלוקת מיוזה מתקבלים תאים הפלואידים, שבכרומוזומים שבהם יש מולקולת DNA ***דו-גדילית***.

ט. קרום ***התא*** אינו נעלם במיטוזה ובמיוזה; לעומת זאת, לקראת החלוקות קרום ***הגרעין*** מתפרק לשלפוחיות קרומיות קטנות.

י. לכל תאי הגוף יש מספר דיפלואידי של כרומוזומים, ורק בתאי רבייה (או תאים שמבשילים לתאי רבייה) מספר הכרומוזומים הוא הפלואידי.

יא. תאי הזרע הנוצרים בפרט מסוים נבדלים זה מזה בטיב המידע התורשתי שבהם.

יד. יש גנים שפעילותם ייחודית לתאי עין, ואחרים שפעילותם ייחודית לתאי רגל; אולם יש גנים הפעילים בשני טיפוסי התאים (גנים המקודדים לחלבונים הקשורים עם "האחזקה השוטפת" של תאים, לדוגמה לאנזימי הנשימה התאית).

5. ב

6. א

7. ג

8. א

9. ד

10. ד

11. ד

פרק י

1. על-פי התיאוריה המדעית הרווחת, בראשית החיים אכן התפתח (באופן הדרגתי, בתהליך שארך מיליוני שנים) יצור חי שמוצאו לא היה מיצור חי שקדם לו; חוקרים סוברים שאירוע זה התרחש כתוצאה מהתנאים ששררו באותם זמנים על-פני כדור הארץ. מכאן שבעיקרון, בתנאים מתאימים, תיתכן יצירה ספונטנית של חיים.

מאז התקופה שבמהלכה התפתחו החיים, השתנו התנאים על-פני כדור הארץ

(חלק מהשינויים חלו בהשפעת היצורים החיים בעצמם); המסקנה מניסוייו של פסטר ואחרים, שאין יצירה ספונטנית של חיים ושכל חי מוצאו מחי, תקפה, אם כן, לתנאים השוררים בימינו על-פני כדור הארץ. (ואכן, מדענים מנסים – עד עתה ללא הצלחה – ליצור תנאים סביבתיים מבוקרים שבהם ייווצרו חיים ממקור לא חי.)

2. במערכת הניסויית של מילר לא יכלו להיווצר חומצות גרעין, ולו רק בגלל שבתרכובות שבהן הוא השתמש לא היה היסוד זרחן. (זרחן הוא אחד ממרכיבי חומצות הגרעין.)

3. א. יצורים הטרוטרופיים אינם מסוגלים לייצר בעצמם חומרים אורגניים מחומרים אי-אורגניים, והם תלויים ביצורים האוטוטרופיים כמקור לחומרים אלה. (יצורים הטרוטרופיים וגם יצורים אוטוטרופיים זקוקים לחומרים אורגניים כמקור אנרגיה, וכמקור לשלד פחמני להרכבת לחומרים אורגניים מורכבים.)
   ב. הסברה אומרת שבראשית החיים היצורים ניזונו מחומרים אורגניים שהיו במרק האורגני הקדום.

4. ככל הידוע, בעולם הקדום לא היה חמצן חופשי. משערים שהפוטוסינתזה שהתפתחה ביצורים הפרוקריוטים הקדומים גרמה להצטברות חמצן באטמוספרה, ושהתפתחות נשימה תאית אווירנית אירעה אחרי שינוי אטמוספרי זה. משערים שמקורם של מיטוכונדריה וכלורופלסטים מתאים פרוקריוטים קטנים שנבלעו על-ידי תא פרוקריוט גדול. היות שמיטוכונדריה קיימים הן בצמחים והן בבעלי-חיים, סביר שקודם "נבלע" פרוקריוט שנתן מוצא למיטוכונדריון; התא הפרוקריוטי הגדול שבלע אותו התרבה, אחד מצאצאיו היה אבי-אבות בעלי החיים, ואילו צאצא אחר "בלע" פרוקריוט שנתן מוצא לכלורופלסט (וצאצא בולע זה היה אבי-אבות הצמחים).

5. אין סתירה: רוב המוטציות אכן מזיקות, אך יש גם כאלה שבתנאי סביבה מתאימים יש להן יתרון, והן "נשמרות" במהלך האבולוציה.

.6

תהליכים המתקיימים *בכל* תאי היצור הרב-תאי	**תהליכים המתקיימים *בחלק* מתאי היצור הרב-תאי**
חילוף חומרים (מטבוליזם) מעבר חומרים דרך קרומים זירוז תגובות על-ידי אנזימים בניית חלבונים גליקוליזה שמירה על הומאוסטזיס	פוטוסינתזה (בצמחים) הפרשה של הורמונים (בבעלי-חיים) חלוקת תא מסוג מיוזה

7. התמחות בתפקודים מיוחדים כרוכה (במקרים רבים) גם באבדן תפקודים.

8. משפטים נכונים: ב, ג, ו-ו. המשפטים המתוקנים הם:
   - א. מדענים משערים שהאטמוספרה הקדומה (לפני התפתחות החיים) הייתה שונה מזו של ימינו, ולא הכילה תרכובות אורגניות.
   - ד. מניחים שהתאים הקדמונים הפיקו אנרגיה, בתהליך דמוי גליקוליזה, מתרכובות אורגניות שהיו במרק הקדמון.
   - ה. משערים שהיכולת להפיק אנרגיה בתהליך דמוי גליקוליזה התפתחה ***לפני*** שהתפתחה היכולת להיזון בפוטוסינתזה.
   - ז. עם התפתחות הנשימה התאית האווירנית ***היה יתרון*** לתאים שהפיקו אנרגיה בתהליך זה, אך שרדו גם תאים שבהם לא התפתחה נשימה תאית אווירנית.
   - ח. תיאוריית האנדוסימביוזה מתארת את ההתפתחות של מיטוכונדריון וכלורופלסט בתאים איקריוטיים. התפתחות גרעין, רשת תוך-תאית, ליזוזומים, ומערכות גולג'י מוסברת על-ידי התקפלויות בקרום התא.
   - ט. האבולוציה היא תהליך שבמהלכו ***נבררים*** פרטים הנושאים מוטציות המגדילות את ההתאמה של אורגניזמים לסביבתם.

9. ד

מילון מונחים

מונח **מובלט** בגוף ההסבר של ערך כלשהו מופיע כערך נפרד במילון.

מונחים באותיות לועזיות מרוכזים בסוף מילון המונחים.

אבולוציה (אבולוציה ביולוגית)
(evolvere = לפרוס, להתפתח) תהליך ההשתנות של **מינים**. שינויים תורשתיים המצטברים במהלך הדורות, ומביאים להתפתחותם של מינים חדשים ממינים שקדמו להם.

אברון (organelle)
מבנה תוך-תאי בעל תפקוד ייחודי באחד מהתהליכים המתרחשים בתא. יש המייחדים את המונח אברון רק למבנים המוקפים בקרום. דוגמה לאברון: **כלורופלסט**.

אוזון
גז שנוסחתו הכימית O_3. מרוכז בשכבה הנמצאת 40-20 ק״מ מעל פני כדור הארץ. האוזון בולע חלק ניכר מה**קרינה העל-סגולה** (UV) שמקורה בשמש.

אוטוטרוף ראו: **יצרן**

אוסמוזה
(osmos = דחיפה, לחץ) תנועה של מולקולות מים דרך **קרום** בֵּררני (החדיר למולקולות מים אך אינו חדיר למולקולות מומסים) מרכוזן הגבוה לרכוזן הנמוך. ראו גם: **דיפוזיה**.

אורגני ראו: **תרכובת אורגנית**

אורגניזם
(organon = איבר, מכשיר) יצור חי: בעל-חיים, צמח, פטרייה או **חיידק**.

אט״פ ראו: **ATP**

איקריוט
(eu = טוב, אמיתי; karyon = אגוז, גרעין) יצור (חד-תאי או רב-תאי) שהחומר התורשתי בתאיו נמצא ב**גרעין** עטוף במעטפת. ה-**DNA** בתא איקריוטי קשור ל**חלבונים** מיוחדים ומאורגן ב**כרומוזומים** בעלי מבנה אופייני. תא איקריוטי מאופיין ב**מידור**; נוסף לגרעין נמצאים בו עוד **אברונים** עטופים ב**קרום**, כמו **מיטוכונדריה**, ובתאי צמחים - **כלורופלסטים**. כן נמצאים בתא **רשת תוך-תאית** ומבנים קרומיים נוספים. להשוואה: **פרוקריוט**.

אנדוסימביוזה, תאוריית ה-
(endo = פנימי; sym = ביחד; bios = חיים. symbiosis = חיי שיתוף) תאוריה המסבירה את

מוצא ה**אברונים** התוך-תאיים - **מיטוכונדריון** ו**כלורופלסט**. על-פי תאוריה זו בלע תא קדמון (שהכיל **גרעין**) תאים **פרוקריוטים** קטנים, שהתרבו בתוכו ופיתחו עמו חיי שיתוף שהפכו לחיי תלות. תא פרוקריוטי אווירני שנבלע סיפק גם את צורכי ה**אנרגיה** של התא הבולע, ובמהלך הדורות התפתח ממנו המיטוכונדריון. מתא **פוטוסינתטי** שנבלע התפתח במהלך הדורות כלורופלסט.

אנדוציטוזה

(endon = בתוך, kytos = תא) קליטת חומר אל תוך התא על-ידי כליאתו בהתקפלות של **קרום** התא כלפי פנים, וסגירת ההתקפלות כשלפוחית. ראו גם: **פאגוציטוזה**. להשוואה: **אקסוציטוזה**.

אנזים

(en = בתוך; zyme = לתסוס) **זרז** ביולוגי. **חלבון** (על-פי-רוב) המורכב בתא ומזרז תהליך ביולוגי ייחודי. מוכרים אנזימים רבים, המזרזים את מרבית התהליכים המתרחשים בתאים. פעילות הזירוז מתרכזת באזור קטן של מולקולת האנזים הנקרא **אתר פעיל**.

אנטיקודון

רצף של שלושה **נוקלאוטידים** במולקולת **RNA-מוביל** המשלים ל**קודון** ב-**RNA-שליח**.

אנרגיה

למושג זה אין הגדרה מוסכמת; יש המגדירים אנרגיה כ"כושר לבצע עבודה". אנרגיה משתחררת או מושקעת במהלך שינויים בגוף או במערכת; אנרגיה יכולה להופיע בצורות רבות, כגון: אנרגיית חום, אנרגיה כימית ואנרגיית אור. בתנאים מסוימים צורה אחת של אנרגיה יכולה להפוך לצורה אחרת.

אקולוגיה

(oikos = משק בית; logos = תורה) תחום במדעי החיים העוסק בחקר יחסי-הגומלין בין יצורים ובינם לבין סביבתם.

אקסוציטוזה

(exo = החוצה, kytos = תא) הוצאת חומר הכלוא בשלפוחית אל מחוץ לתא, על-ידי איחוי השלפוחית עם קרום התא. להשוואה: **אנדוציטוזה**.

אתר פעיל

אזור ב**אנזים**, שבו מתרחשת התגובה האנזימטית.

בסיס חנקני

תרכובת אורגנית; מכילה אטומי חנקן בנוסף לאטומי פחמן, מימן וחמצן. בסיסים חנקניים משתתפים בתגובות רבות בתא. ומהווים אחד המרכיבים של חמשת ה**נוקלאוטידים**, שמהם מורכבות **חומצות גרעין** (**DNA** ו-**RNA**).

בְּרֵרָה (סלקציה)
באבולוציה ביולוגית: תהליך הקובע את התרומה היחסית של פרטים שונים באוכלוסייה לדור הבא. פרטים המותאמים יותר מאחרים לתנאי הסביבה - יעמידו יותר צאצאים פוריים שישרדו.

גולג'י ראו: **מערכת גולג'י**

גלוקוז
חד-סוכר שנוסחתו $C_6H_{12}O_6$.
אחד מתוצרי ה**פוטוסינתזה**. שכיח בצמחים ובבעלי-חיים כאבן-בניין של רב-סוכרים (כגון **עמילן**, **גליקוגן** ו**תאית**) וכמקור עיקרי להפקת **אנרגיה** בתא בתהליך ה**נשימה** ה**תאית**. הגלוקוז יכול להתפרק בתהליכי חמצון עד ל-CO_2 ול-H_2O. בתהליך זה משתחררת אנרגיה רבה המנוצלת בתהליכי בניית **ATP**. ראו גם: **גליקוליזה**, **נשימה תאית**.

גליקוליזה
שלב ראשון בפירוק **גלוקוז** בתא: תהליך אל-אווירני שבו מפורק גלוקוז לשתי מולקולות של תרכובת תלת-פחמנית (חומצה פירובית). בגלוקוליזה משתחררת **אנרגיה** שבאמצעותה מורכבות שתי מולקולות **ATP**. ראו גם: **נשימה תאית**.

גליקוגן
רב-סוכר הבנוי משרשרת ארוכה ומסועפת של **גלוקוז**. משמש **חומר תשמורת** בתאי בעלי-חיים.

גמטה ראו: **תא רבייה**

גן
(genos = צאצא, גזע) גורם לתכונה העובר בתורשה מדור לדור. קטע מהחומר התורשתי, הקשור לביטוי תכונה מסוימת.

גרעין התא (nucleus)
אברון בתא **איקריוטי** המכיל את החומר התורשתי (DNA). תחום במעטפת שבה שני קרומים, המפרידה בינו לבין ה**ציטופלסמה**. בגרעין מוכפל ה-**DNA** וכן מתועתק ל-**RNA**.

גרעינון
אזור ב**גרעין** שבו מיוצרות מולקולות **RNA-ריבוזומי**.

דופן תא
מעטה חיצוני קשיח של תאי צמחים, פטריות וחיידקים, המקנה להם יציבות. בתאי צמחים הדופן עשויה בעיקר מ**תאית**, הנוצרת בתוך התא ומופרשת אל מחוץ לקרום התא.

דיפוזיה
(diffundere = לשפוך, לצקת) תנועה של מולקולות מאיזור שבו רכוזם גבוה לאזורים שבהם רכוזם נמוך יותר. כיוון התנועה של כל מולקולה הוא אקראי, אך התנועה של סך כל המולקולות היא במורד מפל הרכוזים. תהליך הדיפוזיה אינו צורך **אנרגיה**.

דיפלואיד
(diploos = כפול; eidos = צורה) מצב שבו **גרעין**, תא או יצור מכיל שני עותקים של כל **כרומוזום** (חוץ מכרומוזום הזוויג). להשוואה: **הפלואיד**.

דיפרנציאציה ראו: **התמיינות**

דנ"א ראו: **DNA**

דנטורציה
(de = לא כמו, שונה מקודם; natura = טבע) שינוי במבנה המרחבי של מולקולות גדולות, כמו **חלבון** ו**חומצות גרעין**. שינוי המבנה חל בדרך-כלל כתוצאה מחימום, שינוי **pH**, שינוי בריכוז מלחים או קרינה, הגורמים לניתוק הקשרים (החלשים) המחזיקים את המולקולה מקופלת במבנה המרחבי האופייני לה. כתוצאה מדנטורציה נפגע בדרך-כלל תפקוד המולקולות.

הומאוסטזיס
(homos = שווה, דומה; stasis = יציב) הכושר לשמור על סביבה פנימית יציבה, השונה מהסביבה החיצונית. ממאפייני חיים.

הורמונים
חומרים המופרשים על-ידי תאים או איברים במקום אחד בגוף, ומשפיעים על פעילותם של תאים או איברים בחלק אחר של הגוף.
הטרוטרוף ראו: **צרכן**

היפוטונית, תמיסה ראו: **תמיסה היפוטונית**

הנדסה גנטית
שינויים בחומר התורשתי הנעשים למטרות שימושיות.

העברה פעילה
מעבר חומרים דרך קרומים מרכוזם הנמוך לרכוזם הגבוה (כלומר: בניגוד למפל הרכוזים). זהו תהליך צורך **אנרגיה**. דוגמה להעברה פעילה: פעילות משאבות ב**קרום** התא. להשוואה: **העברה סבילה**.

העברה סבילה
מעבר חומרים דרך קרומים מרכוזם הגבוה לרכוזם הנמוך (כלומר: בהתאם למפל הרכוזים).

(המשך הערך בעמוד הבא)

תהליך זה אינו צורך **אנרגיה**. דוגמא להעברה סבילה: מעבר חומרים דרך תעלות ב**קרום** התא. להשוואה: **העברה פעילה**.

הפלואיד
(haploos = פשוט; eidos = צורה) מצב שבו **גרעין**, תא או יצור מכיל עותק יחיד של כל **כרומוזום**. **תאי רבייה** הם הפלואידיים. להשוואה: **דיפלואיד**.

הפריה
התלכדות שני **תאי רבייה** (בדרך-כלל תא ביצה ותא זרע) ויצירת **זיגוטה דיפלואידית**.

התמיינות (דיפרנציאציה)
תהליך שבו תאים רוכשים צורה, מבנה ופעילות ייחודיים. דוגמאות: התמיינות תאים עובריים לתאי מערכת העצבים, התמיינות תאים בצמח לתאים המבצעים פוטוסינתזה.

וירוס ראו: **נגיף**

זיגוטה
(zygotos = להיות קשור בעול, בכלי-רתמה לצמד) תא ביצה לאחר ה**הפריה**.

זרז
חומר שנוכחותו מאיצה תגובה כימית. הזרז עצמו אינו עובר שינוי כימי קבוע, וכמותו אינה משתנה במהלך התגובה.

זרחה
שם כללי ליונים HPO_4^{-2} ו- PO_4^{-3} (מסומלים לעתים Pi).

זרחון
הוספת קבוצת **זרחה**.

חדירות בררנית של קרום
תכונה של **קרום** המאפשרת לחומרים מסוימים לעבור דרכו ומונעת מעבר של חומרים אחרים. מעבר או אי מעבר של חומר תלוי בתכונות הקרום ובתכונות החומר.

חד-תאיים
יצורים שכל גופם הוא תא אחד, לדוגמה: אמבה. להשוואה: **רב-תאיים**.

חומצה אמינית
תרכובת אורגנית שבה אל אטום פחמן קשורה קבוצה אמינית (NH_2) וקבוצה קרבוקסילית (COOH), וכן קבוצה צדדית המסומנת באות R ואטום מימן (H).

(המשך הערך בעמוד הבא)

הקבוצות הצדדיות של חומצות אמיניות שונות נבדלות זו מזו בהרכבן, במבנן, בגודלן ובמטענן החשמלי, והן המקנות לחומצות האמיניות השונות את תכונותיהן הייחודיות.
חומצות אמיניות הן אבני הבניין של **חלבונים**.

חומצת גרעין
מולקולה אורגנית ארוכה המורכבת משרשרת של **נוקלאוטידים**. מוכרות שתי חומצות גרעין: **DNA** ו- **RNA**.

חומרי תשמורת
תרכובות הנאגרות ביצורים חיים ומשמשות בעת הצורך מקור לחומרים ול**אנרגיה**. לדוגמה: **שומן**, **גליקוגן**, **עמילן**.

חיידק (בקטריה)
קבוצת יצורים **חד-תאיים פרוקריוטים** קטנים (אורך גופם 2.0-0.5 מיקרומטר). החיידקים רבגוניים הן בצורתם והן בדרישותיהם התזונתיות (יש ביניהם **אוטוטרופים** ו**הטרוטרופים** מטיפוסים שונים). תא החיידק פשוט בהשוואה לתא **איקריוטי**: אין בתאים **אברונים** מוקפי **קרום**. החומר התורשתי הוא מולקולת **DNA** טבעתית - שאינה מוקפת בקרום. כן נמצאים בתא **ריבוזומים**. ה**ציטופלסמה** מוקפת בקרום תא ועל-פי-רוב גם ב**דופן** חיצונית.

חילוף חומרים (מטבוליזם)
(metabole = שינוי, חילוף) כלל התהליכים של שינוי חומרים המתרחשים ביצור החי. תהליכים אלה כוללים הרכבה ופירוק של **תרכובות אורגניות**. תהליכי חילוף החומרים מלווים בהשקעה ובשחרור של **אנרגיה**.

חלבון (protein)
(protein = ראשוני) תרכובת אורגנית הבנויה משרשרת מקופלת של **חומצות אמיניות**. החלבונים השונים נבדלים במספר החומצות שבשרשרת (עד אלפים), בסוגן ובסדר שלהן בשרשרת. רצף החומצות קובע את צורת החלבון ופעילותו, ונקבע על-ידי ה-**DNA**. החלבונים מהווים מרכיב חשוב הן במבנה התא (דוגמה: **שלד תוך-תאי**) והן בפעילותו (דוגמאות: **אנזימים**, **הורמונים**, נוגדנים).

חלולית (vacuole)
אברון מוקף **קרום**, הנמצא בתאי צמחים. מכיל מים ומומסים. בחלולית מתרחשים תהליכי פירוק אנזימטיים שיש דמיון בינם לבין אלה המתרחשים בליזוזומים שבתאי בעלי-חיים. יש תאי צמחים שבהם כמה חלוליות, ויש תאים שבהם חלולית אחת גדולה הממלאת את רוב נפח התא.

חלוקת הפחתה ראו: **מיוזה**

חלוקת תא ראו: **מיטוזה**, **מיוזה**

יצרן (אוטוטרוף)
(autos = עצמי; trophien = להזין) יצור המסוגל לייצר בעצמו את ה**תרכובות** ה**אורגניות** הדרושות לקיומו, תוך ניצול **אנרגיה** מאור השמש (או ממקור לא-ביולוגי אחר). היצרן מייצר את התרכובות האורגניות מתרכובות אי-אורגניות פשוטות כמו H_2O ,CO_2 ומלחים שונים. דוגמה ליצרן: צמח ירוק, המייצר תרכובות אורגניות בתהליך ה**פוטוסינתזה.** להשוואה: **צרכן**.

כישור
מבנה הנראה בתא בזמן חלוקה (**מיוזה ומיטוזה**). מורכב מסיבי **שלד תוך-תאי** הפרושים בין שני קטבי התא. פעיל בהפרדה בין **כרומוזומים** הומולוגים ובין **כרומטידות**, ובחלוקתם לתאי-הבת.

כלורופיל
(chloros = עשב ירוק; phyllon = עלה) צבען (פיגמנט) ירוק המצוי ב**כלורופלסטים** שבתאי רוב הצמחים, ומקנה להם גוון ירוק. קולט את אנרגיית האור בתהליך ה**פוטוסינתזה**.

כלורופלסט (כלורופלסטידה)
(chloros = עשב ירוק; plastos = תבנית, צורה) **אברון** שבו מתבצע תהליך ה**פוטוסינתזה** בתאים **איקריוטיים**. כלורופלסטים נמצאים (במספר בלתי קבוע) בחלק גדול מהתאים של רוב הצמחים. הכלורופלסט מוקף **קרום**, ובו **סטרומה** ו**תילקואידים**. בקרומי התילקואידים נמצא **כלורופיל**. מקורו האבולוציוני של הכלורופלסט מוסבר בתאוריית ה**אנדוסימביוזה**.

כרומטידה
(chroma = צבע) חצי **כרומוזום**, לאחר שהוכפל (בשלבים שבין הכפלת ה-**DNA** לבין חלוקת ה**צנטרומר**). בעת ה**מיטוזה** ובחלוקה השנייה של ה**מיוזה** מתחלק הצנטרומר, כל אחת משתי הכרומטידות המרכיבות כל כרומוזום נפרדת מהכרומטידה השניה ונעה לקוטב אחר, ואז היא נקראת כרומוזום (של תא-הבת).

כרומוזום
(chroma = צבע; soma = גוף) בתאים **איקריוטיים**: גופיף בגרעין התא המורכב מ-**DNA** ו**חלבונים**. צורתו חוטית. הכרומוזומים, הפרושים כחוטים דקיקים בגרעין שאינו בחלוקה, מתארגנים לקראת חלוקת התא, כך שניתן להבחין בהם במיקרוסקופ אור. לכל **מין** יש מספר כרומוזומים אופייני. הכרומוזום ה**פרוקריוטי** שונה מהאיקריוטי.

כרומוזומים הומולוגים
(chroma = צבע; soma = גוף; homologos = הסכמה) **כרומוזומים** בעלי סדר **גנים** זהה הנמצאים בגרעיני תאים **דיפלואידיים**. ביצורים המתרבים ב**רבייה זוויגית** אחד מהכרומוזומים ההומולוגים מוצאו מהאב, והאחר מהאם.

ליפידים
(lipos = שומן) קבוצת **תרכובות אורגניות**, שאינן מסיסות במים. הליפידים מהווים מרכיב חשוב של **קרומים** בתא (פוספוליפידים) וכן נמצאים ב**רקמות** אגירה (שומנים ושמנים).

ליזוזום

אברון בתאי בעלי-חיים המכיל **אנזימי** פירוק. בתאי צמחים תפקודי הליזוזום מבוצעים ב**חלולית**.

מוטציה

(mutare = לשנות) שינוי במידע התורשתי: שינוי ברצף ה**נוקלאוטידים** שב-**DNA**, שעשוי להביא לשינוי בתכונות הצאצאים. על-פי תאוריית ה**אבולוציה**, הצטברות מוטציות היא הבסיס להיווצרות **מינים**.

מוטגנים

חומרים גורמי **מוטציות**.

מחזור התא

רצף ההתרחשויות בחייו של תא המתחיל עם היווצרותו ונמשך עד להתחלקותו לשני תאי בת.

מטבוליזם ראו: **חילוף חומרים**

מידור (בתא)

קיום מדורים בתא האיקריוטי. המדורים שונים בתנאים השוררים בהם (כמו רכוזי חומרים, pH). מידור יוצר הפרדה בין תהליכים מטבוליים שונים בתא, ומתאפשר הודות לקיומם של **אברונים** תוך-תאיים המוקפים ב**קרום** (לדוגמה מיטוכונדריון וליזוזום).

מיוזה (חלוקת הפחתה)

(meion = קטן יותר) חלוקת **גרעין** שבסופה מתקבלים מגרעין **דיפלואידי** גרעינים **הפלואידיים. תאי רבייה** בצמחים ובבעלי-חיים נוצרים לאחר מיוזה.

מיטוזה

(mitos = חוט) חלוקת **גרעין** שבסופה מגרעין אחד מתקבלים שני גרעינים שמערכת ה**כרומוזומים** שבכל אחד מהם זהה לזו שבאחר וזהה לזו שהייתה בגרעין שממנו נוצרו.
בדרך-כלל לאחר חלוקת הגרעין (מיטוזה) מתחלקים שאר מרכיבי התא; תוצאת החלוקה היא שני תאי-בת, הזהים במטענם התורשתי.

מיטוכונדריון ברבים: מיטוכונדריה

(mitos = חוט; chondros = גרגר) **אברון** בתאים **איקריוטיים** הפעיל בתהליכי **נשימה תאית אווירנית**. עיקר ה-**ATP** הנוצר בתאים איקריוטים מקורו בתהליכים המתרחשים במיטוכונדריה.
מספר המיטוכונדריה בתאים איננו קבוע. המקור האבולוציוני של המיטוכונדריון מוסבר בתאוריית ה**אנדוסימביוזה**.

מין (species)

קבוצת פרטים המתרבים בטבע בינם לבין עצמם ומעמידים צאצאים פוריים.

מיקרומטר
מיליונית (10^{-6}) המטר. מסומן באות היוונית (μ).

מערכת גולג'י
אברון תוך-תאי המורכב משקיקים קרומיים פחוסים. במערכת זו מתקיים עיבוד של **חלבונים וליפידים**, וכן נבנים סוכרים. מערכת זו פעילה בהעברת חומרים והפרשתם מהתא.

מצע ראו: **סובסטרט**

מרק אורגני קדמון
כינוי לנוזל שהיה באוקיינוסים הקדומים, שנמצאו על-פני כדור הארץ והיו עשירים ב**תרכובות אורגניות**. משערים שמתרכובות אלה התפתחו התאים הראשונים.

משוב (Feedback)
מנגנון בקרה נפוץ בתהליכים ביולוגיים רבים, שבהם תוצר או תוצאה של תהליך מבקרים את עצמת התהליך: במשוב שלילי תוצר המערכת מעכב את התהליך, ואילו במשוב חיובי תוצר המערכת מזרז / מגביר את התהליך.

נגיף (וירוס)
חלקיק דמוי-חי, הבנוי מחלבון ומ-DNA או מחלבון ו-RNA, ומתרבה רק בתא חי.

נוקלאוטיד
תרכובת אורגנית המורכבת מ**בסיס חנקני** (פורין או פירימידין), סוכר בעל 5 פחמנים וקבוצת **זרחה** (אחת, שתים או שלוש). שם הנוקלאוטיד נגזר משם הבסיס; לדוגמה: נוקלאוטיד האדנין.
נוקלאוטידים משתתפים במרכיבים ובתהליכים מטבוליים שונים בתא, ביניהם: **חומצות הגרעין** (**DNA** ו-**RNA**); נוקלאוטיד האדנין פעיל במעברי **אנרגיה** בתא (**ATP**).

נשימה תאית
סדרת תהליכים אנזימטיים מפיקי **אנרגיה**: במהלכם **תרכובות אורגניות** מתפרקות ומתחמצנות, תוך כדי ניצול האנרגיה המשתחררת לבניית מולקולות **ATP**.
מבחינים בין:

- **נשימה תאית אווירנית** (נשימה אירובית),
  שבה חמצן חופשי משתתף בחמצון. בתהליכים אלה מהתרכובות האורגניות מתקבלים CO_2 ו-H_2O. ממולקולה אחת של **גלוקוז** המתחמצנת בתהליכי נשימה תאית אווירנית מתקבלת אנרגיה שבאמצעותה מורכבות 28 מולקולות ATP. בתאים **איקריוטים** הנשימה התאית האווירנית מתרחשת ב**מיטוכונדריה**.

• **נשימה תאית אל-אווירנית** (אנאירובית),
שבה פירוק התרכובות האורגניות וחמצונן מתרחש ללא נוכחות חמצן חופשי. אחד מטיפוסי הנשימה התאית האל-אווירנית הוא **תסיסה**. לדוגמה - תסיסת חומצת החלב ותסיסה כוהלית.
ממולקולה אחת של גלוקוז המתחמצנת בתהליכי נשימה תאית אל-אווירנית משתחררת אנרגיה שבאמצעותה מורכבות 2 מולקולות ATP. ראו גם: **גליקוליזה**.

סובסטרט (מצע)
החומר המגיב בתגובה **אנזימטית**.

סטרומה
בתא צמח – התמיסה התחומה על-ידי ה**קרום** הפנימי של ה**כלורופלסט**. בה נמצאים ה**תילקואידים**, ובה מתרחש **קיבוע פחמן**.

סלקציה ראו: **בְּרֵרָה**

סרכוז (צנטריפוגציה)
שיטה להשקעת מרכיבים של תערובת נוזלית תוך-כדי סיבוב סביב ציר מרכזי. שיטה זו משמשת להפרדה בין המרכיבים על-פי משקלם, גודלם או צפיפותם. המכשיר שבו נעשה הסרכוז נקרא צנטריפוגה.

עמילן
רב-סוכר הבנוי משרשרת ארוכה ומסועפת של מולקולות טבעתיות של **גלוקוז**. משמש **חומר תשמורת** בצמחים.

ערך הגבה ראו: **רמת pH**

פאגוציטוזה
(phago = לאכול, kytos = תא) צורה של **אנדוציטוזה**, שבה החלקיק החודר לתא הוא גדול במיוחד.

פוטוסינתזה
(photos = אור; synthesis = הרכבה) תהליך שבו **אנרגיית** אור מומרת לאנרגיה כימית, ואנרגיה זו מנוצלת להרכבת פחמימות מפחמן דו-חמצני וממים תוך שחרור חמצן. בכל הצמחים מתרחשת פוטוסינתזה ב**כלורופלסטים**.

פחמימות (carbohydrates)
קבוצה של **תרכובות אורגניות** שנוסחתן הכללית $(CH_2O)_n$. הפחמימות כוללות חד-סוכרים כמו **גלוקוז**, דו-סוכרים כמו סוכרוז ורב-סוכרים כגון **תאית** ו**עמילן**. רוב הפחמימות מקורן בתהליך ה**פוטוסינתזה** והן משמשות מקור **אנרגיה** לתאים.

פלסטידים
קבוצת אברונים בתאי צמחים. מוקפים בקרום כפול. ביניהם **כלורופלסטים** (שבהם מתבצעת **פוטוסינתזה**) כרומופלסטים, עמילופלסטים ועוד.

פרויקט גנום האדם
מבצע בינלאומי שמטרתו מיפוי הגנים של האדם וקביעת רצף הבסיסים של גנום האדם. על המבצע הוכרז בארצות הברית ב- 1990, ועד שנת 2000 זוהה הרצף של כ- 98% מהגנום.

פרוקריוט
(pro = לפני; karyon = אגוז, גרעין) יצור שהחומר התורשתי (**DNA**) שלו אינו עטוף בקרום **גרעין**. בתא פרוקריוטי אין **אברונים** מוקפי **קרום** כמו **מיטוכונדריה וכלורופלסטים**. כל ה**חיידקים** הם פרוקריוטים. להשוואה: **איקריוט**.

ציטופלסמה
(kytos = תא, plasma = בעל צורה) כל תכולת התא בלי הגרעין.

צנטרומר
(kentron = מרכז; meros = חלק) אזור ב**כרומוזום** שבו מחוברות שתי ה**כרומטידות** עד היפרדן בחלוקה. לאזור זה נקשרים סיבי הכישור במהלך ה**מיטוזה** ובחלוקה השניה ב**מיוזה**, ויש לו תפקיד מרכזי בתנועת הכרומוזומים לקטבים.

צנטריפוגה ראו: **סרכוז**

צנטריול
אברון בתאי בעלי-חיים (אך לא בתאי צמחים) המורכב מסיבי **שלד תוך-תאי**; ב**מיטוזה** נמצא זוג צנטריולים בכל אחד מהקטבים.

צרכן (הטרוטרוף)
(heteros = שונה; trophien = להזין) יצור הניזון מ**תרכובות אורגניות** מוכנות, ואינו מסוגל לייצר אותן בעצמו מתרכובות אי-אורגניות. כאלה הם כל בעלי-החיים, הפטריות ורוב **החיידקים**. להשוואה: **יצרן.**

קדם-איקריוטים
תאים שעל-פי השערה התפתחו מ**פרוקריוטים** לפני כמיליארד שנה, ושהיו בהם חלק מהמאפיינים של תאים **איקריוטים**: ממדיהם היו גדולים, היה בהם **גרעין**, והם היו ללא **דופן**. מתאים אלה משערים שהתפתחו תאים איקריוטים.

קוד גנטי
מערך המייחס כל אחד מ-64 ה**קודונים** ב-**RNA** (או ב-**DNA**) ל- 20 ה**חומצות** ה**אמיניות** הבונות את ה**חלבונים**, ולהפסקת הקריאה של ה-RNA (3 קודונים מקדדים להפסקת **תרגום**).

קודון
שלשת **בסיסים חנקניים** ב-**DNA** או ב-**RNA** המהווה קוד ל**חומצה אמינית** (או להפסקת **תרגום**).

קיבוע פחמן
תהליך שבו פחמן אי-אורגני הופך לחלק מ**תרכובת אורגנית**. קיבוע פחמן מתרחש בתהליך ה**פוטוסינתיזה**.

קשרים כימיים
משיכה בין שני אטומים, שמקורה בשותפות או העברה של אלקטרונים חיצוניים בין האטומים.

קרום תא (ממברנה)
קרום המקיף את תוכן התא, מבדיל בין התא לבין סביבתו, מווסת מעבר של חומרים שונים אל התא וממנו ומקבל אותות מסביבתו; מורכב בעיקר מ**ליפידים**, **חלבונים** וסוכרים. קרומים מקיפים גם אזורים ואברונים בתוך התא. לכל הקרומים בתא יש אותו מבנה בסיסי.

קרינה על-סגולה (קרינת Ultra Violet)
קרינה קצרת גל: בין 440 ננומטר (גבול האור הנראה) לבין 10 ננומטר (גבול קרני X). קרינה זו אינה נראית לעין האדם, אך עלולה לגרום נזקים לתאים חיים. חלק גדול מקרינת ה-UV מהשמש נבלע על-ידי שכבת ה**אוזון** המקיפה את כדור הארץ.

רבייה אל-זוויגית (רבייה אל-מינית)
היווצרות יצור חדש מהורה יחיד, ללא יצירת **תאי רבייה**. ההרכב הגנטי של הצאצא(ים) ברבייה אל-זוויגית זהה לזה של ההורה. להשוואה: **רבייה זוויגית**.

רבייה זוויגית (רבייה מינית)
היווצרות יצור חדש בעקבות התלכדות שני **תאי רבייה**, שנוצרו ב**חלוקות הפחתה**. צאצאי הרבייה הזוויגית שונים בדרך-כלל בהרכבם הגנטי הן זה מזה, והן מהוריהם. להשוואה: **רבייה אל-זוויגית**.

רב-תאיים
יצורים **איקריוטיים** שגופם בנוי מתאים רבים. בגופם של יצורים אלה קיים שיתוף פעולה בין תאים רבים השונים בצורתם ובתפקודם. להשוואה: **חד-תאיים**.

רטיקולום אנדופלסמי ראו: **רשת תוך-תאית**

ריבוזום
גופיף תוך-תאי הפעיל בהרכבת ה**חלבונים** בתא: עליו מתורגם ה-**RNA-שליח** לשרשרת **חומצות אמיניות**. כל ריבוזום בנוי משתי תת-יחידות שונות גודל, המורכבות מחלבונים

(המשך הערך בעמוד הבא)

ומ-RNA. ריבוזומים נמצאים במספר רב בכל תא, הן **איקריוטי** והן **פרוקריוטי** (הריבוזום הפרוקריוטי קטן מהאיקריוטי). בתא איקריוטי הריבוזומים נמצאים הן חופשיים ב**ציטופלסמה** והן צמודים ל**רשת** ה**תוך-תאית**.

רמת pH (ערך הגבה)
ערך המבטא את רכוז יוני הידרוניום (H_3O^+) בתמיסה. רמת pH שמתחת ל-7 משמעותה תמיסה חומצית, ורמה שמעל 7 משמעותה תמיסה בסיסית.

רנ"א ראו: **RNA**

רקמה
קבוצת תאים ביצורים **רב-תאיים**, שיש להם בדרך-כלל צורה אופיינית והם פעילים יחד בתפקוד מסוים.

רשת תוך-תאית (**E**ndoplasmic **R**eticulum)
מערכת תוך-תאית של צינורות קרומיים שטוחים. האזורים שאליהם צמודים **ריבוזומים** נקראים ***רשת תוך-תאית מחוספסת***, ובה מעובדים **חלבונים** ומובלים למקום פעילותם בתא. ***ברשת התוך-תאית החלקה*** מורכבים **ליפידים**, ונאגרים בה יונים.

שומנים
חומרים אורגניים המשתייכים לקבוצת ה**ליפידים**. השומן הוא **חומר תשמורת** עיקרי בבעלי-חיים ובחלק מהצמחים.

שונות גנטית
הבדלים תורשתיים בין פרטים באוכלוסייה. להבדלים אלה יכולה להיות משמעות ב**אבולוציה**. (למונח שונות בסטטיסטיקה יש משמעות אחרת.)

שיווי-משקל כימי
מצב בתגובה כימית שבו קצב היווצרות התוצרים שווה לקצב הפיכתם למגיבים, ולפיכך רכוזי המגיבים והתוצרים נשארים קבועים:

מגיבים $\rightleftarrows$ תוצרים.

שכפול DNA
תהליך אנזימטי שבו נבנית מולקולת **DNA** חדשה על-פי סדר ה**נוקלאוטידים** במולקולת DNA קיימת: ממולקולה דו-גדילית אחת של DNA מתקבלות שתי מולקולות (דו-גדיליות), שבכל אחת מהן גדיל אחד חדש וגדיל אחד ישן. בתאים **איקריוטיים** השכפול קודם ל**חלוקת התא**.

שלד פחמני
שרשרת או טבעת של אטומי פחמן, המהוות מעין שלד במולקולות של **תרכובות אורגניות**, ואליהן קשורים אטומים נוספים.

שלד תוך-תאי (cytoskeleton)
רשת סיבים דקיקים ב**ציטופלסמה** של תא **איקריוטי**. השלד התוך-תאי מקנה ייצוב מֶכָנִי לתא, ומשתתף בתנועת מרכיבים בתוך התא ובתנועת התא כולו. לשלד התוך-תאי אין מבנה קבוע – צורתו משתנה בהתאם לפעילות בתא.

שרשרת מזון
שם כללי לתיאור יחסי הזנה (מעברי חומרים ואנרגיה) בין מיני יצורים בבית גידול. בדרך-כלל השרשרת מתחילה ביצרן, שנאכל על-ידי צרכן ראשוני, הנאכל על-ידי צרכן שניוני ומסתיימת במפרקים ההופכים את החומרים האורגניים לחומרים אי-אורגניים.
על-פי-רוב במערכות אקולוגיות יש כמה שרשרות מזון המשולבות ביניהן.
דוגמה לצורה כללית של שרשרת מזון:
צמח ← חרק ← ציפור ← חיידקים

תא רבייה (גמטה)
תא **הפלואידי** הנוצר ביצורים המתרבים ב**רבייה זוויגית**. תא רבייה שנוצר בזכר נקרא תא זרע, ותא רבייה שנוצר בנקבה נקרא ביצה. בהתלכדות שני תאים הפלואידיים נוצרת **זיגוטה**.

תגובה כימית (ריאקציה כימית)
תהליך שבו חומרים בעלי תכונות מסוימות - מגיבים, הופכים לחומרים בעלי תכונות אחרות - תוצרים.

תאית (cellulose)
רב-סוכר הבנוי בעיקר מיחידות של **גלוקוז**. מהווה את המרכיב העיקרי של **דופן** תאי הצמחים. התאית אינה נעכלת על-ידי בעלי-חיים, אך מעלי גירה וטרמיטים יכולים לנצל את תוצרי הפירוק שלה, הודות לפעילות חיידקים בקיבתם.

תילקואידים
שקיקים קרומיים שטוחים הנמצאים בערמות ב**סטרומה** ש**בכלורופלסט**. בקרומיהם ממוקם ה**כלורופיל**.

תמיסה איזוטונית
(isos = שווה; tonus = מתח) תמיסה שרכוז המומסים בה שווה לרכוזם בתמיסה אחרת.

תמיסה היפוטונית
(hypo = פחות; tonus = מתח) תמיסה שרכוז המומסים בה נמוך מרכוזם בתמיסה אחרת.

תמיסה היפרטונית
(hyper = יותר, tonus = מתח) תמיסה שרכוז המומסים בה גבוה מרכוזם בתמיסה אחרת.

תסיסה
אחד מתהליכי הפקת **אנרגיה** ביצורים חיים, המתרחש בתנאים ללא חמצן.

(המשך הערך בעמוד הבא)

ישנם מספר תהליכי תסיסה, שבכולם ה**גליקוליזה** מהווה שלב ראשון, והם נבדלים בתוצר הסופי. ביניהם: יצירת כוהל בתסיסה של שמרים על קליפות ענבים ויצירת חומצת חלב על-ידי חיידקים בתהליך יצירת גבינה.

תעתוק

בניית מולקולת **RNA** על פי רצף הבסיסים באחד מגדילי ה-**DNA**.

תרבית תאים

גידול תאים של אורגניזמים במעבדה, בתנאים מבוקרים.

תרגום

בניית רצף **חומצות אמיניות** על פי ה**קודונים** שב **RNA**-שליח.

תרכובות אורגניות

תרכובות המכילות אטומי פחמן ומימן. לרוב הן מכילות גם אטומי חמצן, ולעתים גם אטומים נוספים, כגון: גפרית, חנקן, זרחן. תרכובות אורגניות נפוצות הן **פחמימות**, **חלבונים**, **שומנים**, **חומצות גרעין** ועוד. מקור התרכובות האורגניות בטבע הוא ביצורים חיים.

ATP (**A**denosine **T**ri**p**hosphate)

תרכובת אורגנית. **נוקלאוטיד** המתווך בין תהליכים משחררי **אנרגיה** לתהליכים צורכי אנרגיה בתא החי. מכונה לעתים "מטבע האנרגיה". ATP נבנה באורגניזם על-ידי קשירה של קבוצת זרחה (Pi) לאדנוזין די-פוספט (ADP).

התגובות: ADP + Pi ⟶ ATP ו- ATP ⟶ ADP + Pi

הן הבסיס לתפקוד ATP כמתווך בגלגולי האנרגיה בתא.

DNA (**D**eoxyribo **N**ucleic **A**cid)

חומצת גרעין האוצרת את המידע התורשתי של היצור, ועל-כן מכונה "החומר התורשתי". מולקולה שרשרתית דו-גדילית ארוכה, המאורגנת בצורה לוליינית. כל גדיל במולקולה מורכב מחזורות רבות של ארבעה **נוקלאוטידים**, שהבסיסים בהם: אָדֶנִין (A), גוּאָנִין (G), צִיטוֹזִין (C), תִּימִין (T). על-פי סדר הנוקלאוטידים בגדיל נקבע מבנה ה**חלבונים** בתא.

pH ראו: **רמת pH**

RNA (**R**ibo **N**ucleic **A**cid)

אחת מ**חומצות הגרעין**. מולקולה שרשרתית חד-גדילית, המורכבת מחזורות רבות של ארבעה טיפוסי **נוקלאוטידים** שהבסיסים בהם: אָדֶנִין (A), גוּאָנִין (G), צִיטוֹזִין (C), אוּרָצִיל (U). על-פי תפקודם, ניתן לחלק את ה-RNA בתא לשלושה טיפוסים עיקריים: RNA-שליח (m-RNA), RNA-מוביל (t-RNA) ו-RNA-ריבוזומי (r-RNA). תרכובות ה-RNA מתפקדות במעבר שבין המידע התורשתי ב-DNA לבין בניית החלבונים בתא.

מפתח

מספרים **מובלטים** מציינים את העמוד שבו הערך מוסבר בהרחבה; מספרים *בהטיה* מציינים איור.

שמות של חוקרים – בגופן שונה.

א

אבולוציה 12, 19, 86, 129, 139, פרק י (179-199), **198**

אברון **25**, *25-26*, 51, 97, 99, 102, 108, 110, 112, 117, 121, 123, 124, 163, 190, 255-254

- והתפתחות התא האיקריוטי 191-195, 199

אדנין (Adenine) 64, *64*, 65, 137

אוזון (O_3) 183, 187-188

אוטוטרוף (יצרן) **133**, 150, 155, 186-187, 189, 199

אוסמוזה 101-**99**, *100-101*, 117

אופרין, א' 184–183

אטום 204

אטמוספרה 183, 186

איזוטונית, תמיסה ***99***, 101-100

אמבה *23*, 28, **60**, *60*, 108, 126, *189*

אצטבולריה ראו: סוככנית

אנדוסימביוזה, תאוריית ה- 194-**193**, *193*, 199

אנדוציטוזה 108-**107**, *107*, 113, 117

- והתפתחות התא האיקריוטי 191, 193

אנזימים פרק ג (55-39), **43**, 59, 70, *76*, 109, 211, 121, 137, 140, 142, 184, 185, 186

- בחלולית 157, 159
- בכלורופלסט 152-151
- בליזוזום 115-114, 117
- במיטוכונדריון 143, 146
- בפרוקריוטים 142, 151, 189

אנטיקודון 78-**74**, *74*, 87

אנרגיה 11, פרק ז (147-131)

- אור (אנרגיית אור) 11, 153-150, 515, 159, 187
- במעבר דרך קרומים 98, 105-102, 108, 117
- והיווצרות החיים על כדור הארץ 186, 199
- וחומרים 132, 186, 188, 199, 205, 210
- אנרגיית שפעול 45, 55, 211-**210**

אסטרוגן 84

אקולוגיה 155, 159

אקסוציטוזה 108-**107**, *108*, 112, 113, 117

אתר פעיל **44**, *44*, 47-46, *46*, 50, 55

ב

בסיס חנקני 66-64, **64**, *64*

בקרה

- על פעילות אנזימטית 47, 53-48, **53-52**, 55
- על ביטוי גנים 84-82, 88

בראון, ר' 17

בְּרֵרה טבעית (סלקציה טבעית) **198**

ג

גדיל **65**, 70-69, 87, 165-164

גואנין (Guanine) 64, *64*

גולג'י, ק' 113

גורם מגביל 49, **56**

גחלילית 132, *132*

גלוקוז 135-**134**, 154

- פירוק 142-**140**, 145, 146
- בהיעדר חמצן **144**, 145

גליצרול 93-92, *92*, 133

גליקוגן **135**, 146

גליקוליזה **140**-139, 145-144, 146, 150, 154

- בראשית התפתחות החיים 186, 188, 199

גמטה ראו: תא רבייה

גן 67, **80**, 82, 88

גרעין התא 19, 25-24, *27-26*, 29, 37, 63-59, *59*, 73-67, 76, *76*, 80, 82, 87, 97, 110, 121, 123, 125, 149, 255-254

- והתפתחות התא האיקריוטי 190, **191**, 193, 199
- והיסטוריה של חקר התא 19-17, 20
- וחלוקת התא 162, **168-166**, *168-166*

גרעינון **76**, *76*, 255-254

ד

דאוקסיריבוז **64**, *64*

דו-סוכר **135**, 146

דוב גריזלי 142, *142*

דופן התא בצמחים 16, 19-17, *27*, 101, 113, 123, 156-**157**, 158, 159, 190, 191

- בפרוקריוטים 115, 157, 190

דיפוזיה **98**, 99, 102, 103, 191

דיפלואיד **169**-172, 175
דלטון, ג' 17
דנטורציה **42**, 50, 51, 55
דמוקריטוס 17
דרווין, צ' **198**, *198*

ה

הומאוסטזיס **12**, 42, 102
הוק, ר' **15**-17, 19, 21
הורמון 82, 84, 109, 164
הטרוטרוף (צרכן) **133**, 150, 187, 189, 199
היפוטונית, תמיסה **99**-101
היפרטונית, תמיסה **99**-101
הלדיין, 183-184
המרלינג, 60
העברה סבילה **102**-105, 117
העברה פעילה **102**, 105-106, 117, 131
הפלואיד **170**-172, 175
הפריה **173**, 175
התמחות 195-197, 199
התמיינות **174**, 175

ו

ואטסון, ג' 66, *66*
ווילקינס, מ' 66, *66*
ויטמין **45**
וירוס ראו: נגיף
וירכוב, ר' 19, 21

ז

זיגוטה **173**-174, 175
זרז 42-43, 55
זרחה (Pi) 63-66, 137-142, 146
ז'קוב, פ' 84

ח

חדירות ברברנית 99, 102
חד-תאים *23*, 30, 36, 37, 78, 123, 126, *127*, 161, 181
חד-סוכר **134**, 140, 146
חומצות אמיניות **40**-41, *40*, 44, 82, 115, 313, 183
- ותהליך התרגום *73-79*, 87, 111
חומצות גרעין **63**, 68, 73, 137, 155, 183, 185
חומצה פירובית **140**-145, 146
חומצות שומן 92-93, *92*, 133
חומציות ראו: pH

חומרי תשמורת ראו: תשמורת, חומרי -
חיידקים (ראו גם: פרוקריוטים) 11, 12, *23*, 30, 36, 78,108, 114, 115, *189*
- בראשית התפתחות החיים 187, 189, 192, 194, 199
חילוף חומרים (מטבוליזם) **11**, 25, 39, 131, 162, 184, 185
חלבון 25, 59, 63, 67, 107, 108, 121, 132, 142, 149, 155, 157, 158, 164, 185
- ייצור חלבונים **פרק ד** (59-88), 111, 161, 162, 164, 901, 192, 193
- בקרומי תאים 91, 93-97, 103-106, 109, 110, 115, 117
- בשלד התוך תאי 122-123, 129
- מבנה חלבונים **40-42**, 208
- עיבוד חלבונים 111-112, 113, 117
חלולית *27*, 37, **156-157**, *156*, 158, 159
חלוקת הפחתה ראו: מיוזה
חמצן 24, 40, 42, 64, 92, 031, 134, 207
- בהפקת אנרגיה 140-142, 144-145, 146-147
- בפוטוסינתזה 152-153, 155, 159
- בראשית התפתחות החיים 183, 187-189, 199

ט

טאי זקס 86, 115
טסטוסטרון 84

י

יחס שטח-פנים / נפח **30-31**, *31*, 37, 143, 164, 196
יונקות *23*, *196*
יצירה ספונטנית 179-180
יצרן (אוטוטרוף) **133**, 150, 155, 186-187, 199

כ

כישור **125**, *125*, 167
כלורופיל 151-153, 156
כלורופלסט (כלורופלסטידה) *27*, 124, **151**, *151*, 152-154, 156, 159, 255
- והתפתחות התא האיקריוטי 187, 192, 194, 196, 199
כלורמפניקול 194
כמוסינתזה 187
כרומוזומים *67*, **80**, *81*, 87, 125, 175
- במיוזה 166-168
- במיטוזה 169-170
- ההומולוגיים **169**-171, 175
כרומופלסטים 156
כרומטידה **166**-167, *167*

ל

ליפידים **93-92**, 112, 113, 117
- בקרומים 91, *93*, 103, 106, 108, 117

ליזוזום *26*, 37, 51, 110, **115-114**, *114*, 117, 157, 255-254
- והתפתחות התא האיקריוטי 191, 199

לקטאז 54
לקטוז 54, 84

מ

מוטגנים 85
מוטציה **86-85**, 88, 164, 186
מונו 84
מחזור התא **פרק ט** (175-161)
מטבוליזם ראו: חילוף חומרים
מידור **25**, 37, 51, 114, 141, 152, 195
מיוזה (חלוקת הפחתה) **172-169**, 175
מיטוזה 163, ***168-166***, 175
מיטוכונדריון *27-26*, 37, 78, 97, 142-141, **144-143**, *143*, 147-146, 255-254
- והתפתחות התא האיקריוטי 194-192, *193*, 199

מילר, ס' 184-183, *183*
מין (species) 12, 80, 169, 175, 181, 198
מיקרומטר **29**
מישור המשווה 167
מעכב (אנזימים) **47**, 55
מערכת גולג'י *27-26*, 37, 110, **113**, *113*, 117, 255-254
- והתפתחות התא האיקריוטי 191, 200

מפל ריכוזים ***99***, 102, 106-105, 117
מרגוליס, ל' 193
מרכז התארגנות **125**, 167
מרק אורגני 184-**183**, 199
משאבות 103, 106-**105**, *108*, 117
משוב **53**

נ

נגיף (וירוס) 28, 185
נוקלאוטיד 66-**63**, *66*, 70-68, 72, 75-73, 78, 165-164, 183
ננומטר 29
נשאים **106-103**, *105*, 108, 117
נשימה תאית (ראו גם: נשימה אוירנית) 25, 102, 146, 149, 154, 161
- והתפתחות התא האיקריוטי **188**, 193, 199

נשימה אל-אוירנית (אנאירובית) **145-144**, 146, 186
נשימה אוירנית (אירובית) **142-140**, 147-146, 155

ס

סובסטרט (מצע) 44-**43**, 49-46, *46*, 52-51, 55
סוככנית (אצטבולריה) 63-**61**, *61*
סטרומה 153-**151**, *151*, 159
סיליקוזיס 115
סיסטיק פיברוזיס 86
סלקציה 198
סנדלית *23*, 127, *127*
סרטן, מחלת ה- 164
סרכוז **35**, *35*, 37

ע

עינן ירוק (Euglena) *23*, 127, *127*
עמילופלסטים **156**, *156*, 159
עצה 36

פ

פאגוציטוזה 108
פוטוסינתזה 155-**149**, *153*, 159
פחמימה 132, 133, **135-134**, *135-134*, 139, 142, 461, 155-152
פחמן דו-חמצני (CO_2) 103, 132, 183
- בנשימה תאית 142-141, 145-144, 146, 188
- בפוטוסינתזה 150, 153, 159

פלסטידים 156, 159
פסטר, ל' 180
פרוקטוז 134
פרויקט גנום האדם 86, 88
פרוקריוט (ראו גם: חיידקים) **25**, 195
- השוואה לאיקריוט 190-189
- ודופן התא 157
- והתפתחות התא האיקריוטי 194-185, 199
- וחלוקת התא 161
- ונשימה תאית 142, 144, 145
- ופוטוסינתזה 151
- ותהליך התעתוק 69
- ו-DNA 80, 87, 164

פרנקלין, ר' 66, *66*

צ

ציטוזין (Cytosine) 64, *64*
ציטופלסמה 19, 21, *27-26*, 37, 60, **123-121**, 125, 129, 154, 157, 190, 255-254
- וחלוקת התא 163, 168
- ונשימה תאית 141-140, 144, 145

- וקרומים ואברונים 93, 104, 110, 114
- מקום שבו מיוצרים חלבונים 67, 76-71, 87, 111, 149, 190

צנטרומר **166**, *166*, 167, 171

צנטריול *62*, 37, **125**, *125*, 129-127, *129*, 167, 254

צרכן ראו: הטרוטרוף

ק

קדם–איקריוט **193**, *193*

קוד גנטי *79*-**72**, 87, 149, **215**

קודון *79*-**73**, 87, 82

קולטנים (רצפטורים) **109**, *109*, 117, 197

קו-פקטור **44**, 55

קטלאז 48

קיבוע פחמן **153**, 154

קרום (התא) 18, 24, *27-26*, 30, 37, **פרק ה (117-91)**, *95*, 122, 149, 190, 197, 255-254

- במיטוכונדריה 143, 194
- בתא הצמחי 101, 149, 156, 158, 194
- בכלורופלסט 151, 153
- והתפתחות התא האיקריוטי 194-185, 199
- קרום הגרעין 59, 167

קרינה 85, 831, 188

קריק, פ' 66, *66*

קשר פפטידי **40**, *40*, 55

קשרי מימן 41, 65, **207**, 209-208

ר

רב-סוכר **135**, 146, 154, 158

רב-תאיים 36, 37, 82, 123, 126, 161, 174

- התפתחות 196-195, 199

רבייה 12, 161

- רבייה מינית 170, 175-172

ריבוז 64, **68**, *68*, 137

ריבוזום *26-27*, 28, 37, **75**, *75*, *76*, 78, 87, 149, 190, 191, 194, 255-254

- והרשת התוך-תאית 112-**111**, *111*, 117

ריס 127, **128**, 129

רמות ארגון (באורגניזם הרב-תאי) **36**, 37, 197

רצף נוקלאוטידים (או: רצף בסיסים) **73**, 75, 85, 87, 164, 175

רצפטורים ראו: קולטנים

רקמה **36**, 37, 197-196

רשת תוך-תאית (ER) *27-26*, 37, 79, **112-110**, *111*, *116*, 117, 255-254

- והתפתחות התא האיקריוטי 191, 199

ש

שוואן, ת' 19-18, 21

שוטון 127, *127*, **128**, *128*, 129

שומנים ראו: ליפידים

שונות (גנטית), רב-גוניות 86, 751, 198

שחבור **71**, *71*

שיווי-משקל כימי 43, **211**

שיפה 36

שלד פחמני 154, 155, 159

שלד תוך-תאי *27-26*, 37, **129-121**, *122*, 167, 190, 255-254

- והתפתחות התא האיקריוטי 192

שליידן, מ' 19-18, 21

שרשרת מזון 155, 187

ת

תא ביצה *23*, 29, 30, 85, 97, 170, 173, *173*

תא דם אדום *23*, 29, *33*, 101-100

תא דם לבן *23*, 108, *126*

תא זרע *23*, 30, 85, *97*, *127*, *173*

תא רבייה 170, 172, 173, 175

תאית (צלולוז) 135, **158**, *158*, 159, 255

תגובה כימית **211-210**

תאוריית האנדוסימביוזה ראו: אנדוסימביוזה, תאוריית ה-

תאוריית התא **19-18**, 21

תימין (Thymine) 64, *64*

תילקואיד **151**, *151*, 152, 159

תמיסה איזוטונית ראו: איזווטונית, תמיסה

תמיסה היפוטונית ראו: היפוטונית, תמיסה

תמיסה היפרטונית ראו: היפרטונית, תמיסה

תנועה אמבואידית **126**, *126*

תסיסה **144**, 145, 146

תסמונת דאון 86

תעלות 106-**103**, *104*, 117

תעתוק **67**, **70-69**, *70*, 75, 83, 87

תצמיד אנזים-סובסטרט **46**, *46*, 55

תרבית תאים **34**

תרגום **77-73**, *77*, 83, 87

תשמורת, חומרי- 29, 135, 154, 157, 159

ATP 76, **146-137**, 149, 153

ADP 143-137, 146

DNA **87-63**, *66*, *81*, 149, 191

- שכפול DNA **165-164**, *165*, 175, 190

pH (רמת חומציות) 25, 114, 117, **213**, *213*
- ופעילות אנזימתית 42, 49, 51, *51*, 55, 117
RNA **67**-79, 83, 87, 162, 173, 185
- בראשית התפתחות החיים 185
- RNA-מוביל (tRNA) **74**-78, *74*, 87
- RNA-ריבוזומי(rRNA) **75-76**
- RNA-שליח (mRNA) **71**-78, 83, 87, 111, 112

בהכנת הספר נעזרנו בעיקר במקורות הבאים:
אטינגר, ל., דולז'נסקי, פ., 1996, **ביולוגיה התפתחותית: תופעות, עקרונות ושאלות פתוחות,** האוניברסיטה הפתוחה

קלמס, י., לוין, ע., 1995, **התא: מבנה ופעילות**, האוניברסיטה הפתוחה

ALBERTS, B., BRAY, D., LEWIS, J., RAFF, M., ROBERTS, K. and WATSON, J.D., 1994, **MOLECULAR BIOLOGY OF THE CELL**, 3rd ed., GARLAND PUBLISHING, Inc., New York & London

BIOLOGICAL SCIENCE A Molecular Approach, 7th ed, BSCS Blue Version, 1996, D.C. Heath and Company

GOULD, J.L and KEETON, W.T., 1996, **BIOLOGICAL SCIENCE**, 6th ed, W.W. NORTON & COMPANY New York London

NELSON, D.L. and COX, M., 2000, **LEHNINGER PRINCIPLES OF BIOCHEMISTRY** ,3rd ed., WORTH PUBLISHERS

RAVEN, P.H.and JOHNSON, G.B., 1999, **BIOLOGY**, 5th ed., WCB/McGraw-Hill

תודה למקורות הבאים, שהעמידו לרשותינו את התמונות:

רשימת התמונות בעמוד 256

I האוניברסיטה העברית בירושלים.

II ארזה סומך-כהן, מתוך: גנטיקה, ד״ר יהודית עתידיה, המרכז הישראלי להוראת המדעים על-שם עמוס דה-שליט, האוניברסיטה העברית בירושלים, מהדורת ניסוי, התש״ן 1990.

III התא אחידות בעולם החי (ופרקי הרחבה), המרכז לתוכניות לימודים - משרד החינוך והתרבות והמרכז הישראלי להוראת המדעים - האוניברסיטה העברית ירושלים, תשמ״ו 1986.

IV פנחס אמתי

V

Biological Science; A Molecular approach, Biological Sciences Curriculum Studies, 7th edition, 1996

VI

Biological Science; An Ecological approach, Biological Sciences Curriculum 6th edition, 1987

VII

Biological Science; Inquiry into Life, Biological Sciences Curriculum Studies, 3rd edition, 1973

VIII

High School Biology, Biological Sciences Curriculum Studies, 1965

IX

Geoperception in primary and lateral roots of Phaseolus Vulgaris (Fabacae). I Structure of columella cells. J.S. Ranson and R. Moore, American Journal of Botany, vol. 70, 1983.

X

The Nanoworld Image Gallery, Centre of Microscopy and Microanalysis, the University of Queensland
www.uq.edu.au/nanoworld/images

XI

Molecular Biology of the Cell, Alberts et. al., Garland Publishing, Inc.; 1994.

XII

Biological Science, Gould and Keeton, 6th edition, WW Norton & company, 1996.

XIII

Biology Fundamentals, John Wiley & sons, 1995.

XIV פרופ׳ ר. שלגי וד״ר ד. פיליפס.

מקורות התמונות

פרק א
אן ימין – V
אן שמאל – III
א2 – V

פרק ב
ב1 א – X
ב1 ב – V
ב1 ג – X
ב1 ד – III
ב1 ה – V
ב1 ו – III
ב1 ח – III
ב1 ט – V
ב1 י – XIV
ב1 יא – III
ב1 יב – III
ב3 – על-פי V
ב4 – III
ב6 – I
ב7 – V
ב8 ימין – X
ב8 שמאל – III

פרק ד
ד1 – III
ד2 – VIII
ד4 – VI
ד10 – V
ד13 – II
ד14 – על-פי II
ד18 – V

פרק ה
ה4 א – XI
ה5 – V
ה10 ג – III
ה13 ימין – XII
ה15 ימין – XI
ה16 – V

פרק ו
ו1 ימין – XI (Third edition, 1994)
ו2 – I (היחידה למיקרוסקופיה אלקטרונית)
ו4 – XI (Third edition, 1994)
ו6 ימין – XI (Second edition, 1989)
ו8 – X
ו9 – V
ו10 – I (מעבדה לציטוגנטיקה, המחלקה לגנטיקה)
ו11 – V
ו12 ימין – V
ו13 ימין – V

פרק ז
ז1 – IV
ז7 – V
ז8 – XIII

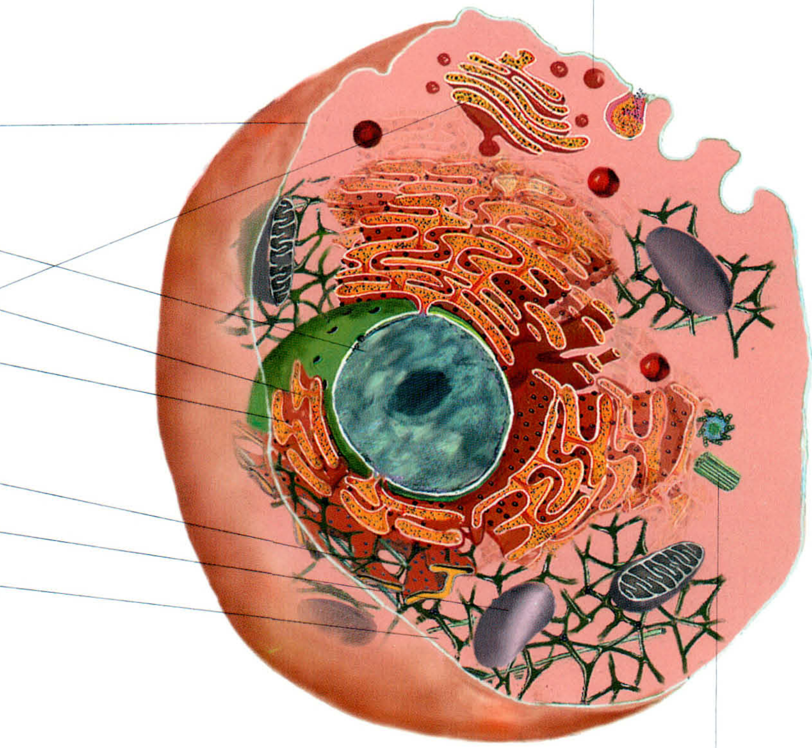
פרק ח
ח1 ימין – III
ח2 – IX
ח3 – III
ח5 – XII

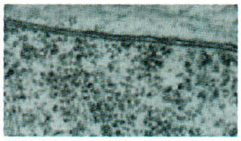
פרק ט
ט3 – על-פי II
ט5 – V
ט8 – XIV

פרק י
י3 ימין – VII
י4 – על-פי XI
י5 ימין ושמאל – V
י9 – III

תאים "טיפוסיים". ימין: תא בעל-חיים. שמאל: תא צמח.

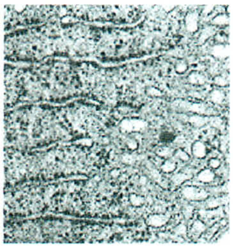
ההסברים על המבנים בתא מלווים בצילומים במיקרוסקופ אלקטרונים סורק, פרט לצילום השלד התוך-תאי שנעשה במיקרוסקופ אור.



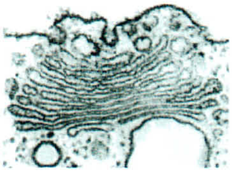


1. קרום התא
תוחם את התא ומבקר את תנועת החומרים אליו וממנו.
לקרום מרקם נוזלי-למחצה, והוא בנוי משתי שכבות ליפידים שבהם משובצים חלבונים.
אל צדו החוץ-תאי קשורים סוכרים.

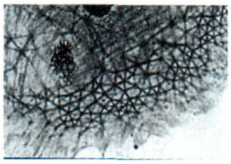
2. גרעין התא
מכיל את רוב המידע התורשתי של התא (בכרומוזומים, המורכבים מ-DNA וחלבונים). בגרעין התא יש גרעינון (אחד או יותר), שבו מיוצרות מולקולות RNA-ריבוזומי.



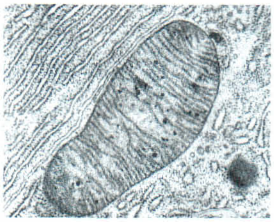
3, 4. רשת תוך-תאית
מערכת צינוריות קרומיות הפרושה בציטופלסמה.
ברשת החלקה נעשה עיקר עיבוד הליפידים, ונאגרים בה יונים. אל הרשת המחוספסת, שבה הצינוריות פחוסות, צמודים **ריבוזומים**, שהם אתר ההרכבה של החלבונים (בתא פעילים גם ריבוזומים שאינם צמודים לרשת). בחלל הרשת מעובדים חלבונים ומובלים למקום פעילותם.



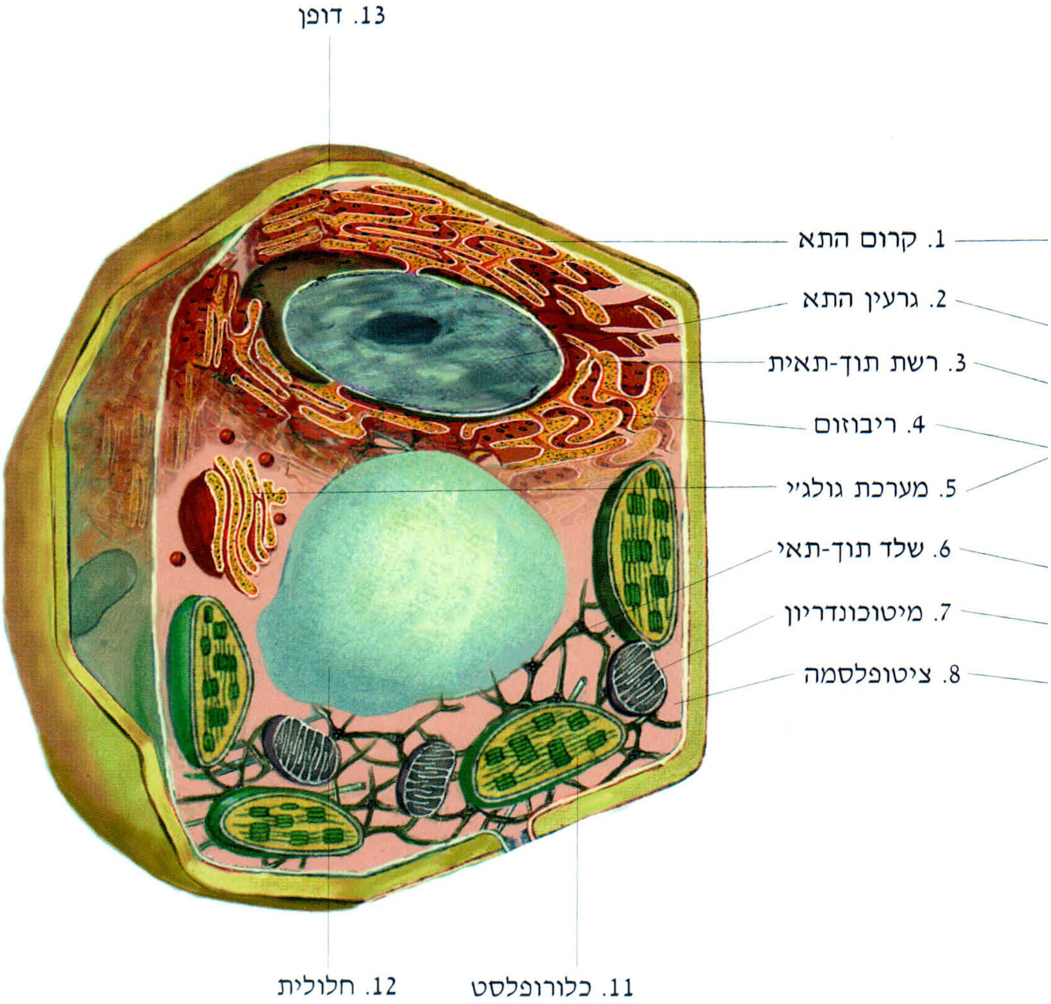
5. מערכות גולג'י
כל מערכת כוללת 6-4 שקיקים קרומיים פחוסים; במערכות גולג'י מתקיים עיבוד של חלבונים וליפידים, וכן נבנים רב-סוכרים.
כן פעילות מערכות אלה בהעברת חומרים בתא ובהפרשת חומרים מהתא.

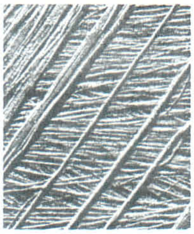


6. שלד תוך-תאי
רשת של 3 סוגים של סיבי חלבון, המקנה לתא צורה וכושר תנועה.

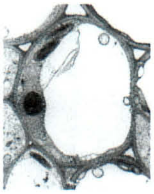


7. מיטוכונדריה (יחיד - מיטוכונדריון)
אתרי פעולתם של אנזימים המזרזים את תהליכי הנשימה התאית.



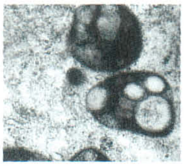


13. דופן
מבנה בהיקף תא **צמח**, המקנה לתא תמיכה חיצונית. בנוי בעיקר מסיבים של תאית.

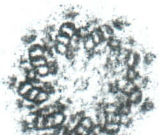


12. חלולית
שלפוחית בציטופלסמה, שבה נמצאים מים ומומסים שונים, ומתרחשים בה תהליכים אנזימטיים. גודל החלולית שונה מתא לתא: בתאים צעירים יש לפעמים מספר חלוליות קטנות, ויש תאים (בעיקר בוגרים) שחלולית אחת ממלאה את מרבית נפחם.
בתאי **צמחים** בלבד.

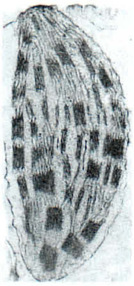
8. ציטופלסמה
חומר צמיג הממלא את רוב נפחו של התא ומקיף את האברונים שבו; עשיר במומסים אורגניים ואי-אורגניים, ביניהם חלבונים שונים, ובכללם אנזימים המשתתפים בפעילויות המטבוליות של התא.



9. ליזוזומים
שלפוחיות קרומיות המכילות אנזימי פירוק.
בתאי **בעלי-חיים** בלבד.



10. צנטריול
מבנה גלילי המורכב מסיבים. זוג צנטריולים נמצא באיזור שממנו נפרשים סיבים לכל חלקי התא.
בתאי **בעלי-חיים** בלבד.



11. כלורופלסטים
אתרי פעולתם של האנזימים המזרזים פוטוסינתזה בתאי **צמחים**. בתוך מערכת של קרומים בחלל הפנימי נמצאות מולקולות כלורופיל, המקנות לחלקים הירוקים של צמחים את צבעם.

הספר התא - יחידת החיים מיועד לתלמידי החטיבה העליונה של בית הספר התיכון, המתמחים בביולוגיה. עם זאת הספר יכול להיות מקור ידע ועניין לכל שוחר דעת.

הספר מאפשר לקורא להכיר את המבנה ואת התפקוד של יחידת החיים הבסיסית - התא. במהלך ההכרות מוצגים עקרונות, מבנים ותהליכים העומדים בבסיס כל עולם בעלי החיים והצמחים, ביניהם:

פעילות החומרים שבלעדיהם לא ייתכנו חיים - האנזימים; אופן ההוצאה לפועל של המידע המייחד יצור חי אחד מאחר - הרכבת חלבונים; הקרומים המפקחים על מעבר חומרים אל התאים ומתוכם; הפקת אנרגיה בעולם החי - נשימה; ניצול אנרגיית האור על־ידי הצמחים - פוטוסינתזה; מעבר מידע תורשתי מדור אחד למשנהו וכן מחשבות על הגדרת חיים לצד השערות באשר להתפתחות עולם החי מראשיתו של כדור הארץ ועד היום.

בספר שזורים קטעי מידע הנוגעים לחיי היום־יום, והוא מלווה בנספח, המציג כמה עקרונות של עולם הכימיה, ובמילון למונחים המדעיים המופיעים בספר.

עיצוב העטיפה: גדעון דן

התא יחידת חיים /
עתידיה יהודית
360-524
74.58 ש"ח

ISBN 965-295-014-9 מסת"ב