

גליליאו



ננו מן הטבע
המבול: האומנם היה - והיכן?
אלצהיימר: מבט מקרוב



מהדורה למנויים

מחיר 38.00 ש"ח (באילת 32.90 ש"ח)

SBC
ערוץ המדענים

ifeel
www.ifeel.co.il

ifeel
www.ifeel.co.il

הבילד באגרי א/ח 3







60



28

מדורים

בראש ובראשונה

007

דפוסים חדשים

008

מכתבים למערכת • מאיר ברק

008

חדשות • יורם אורעד, דרור בר-ניר, דינה וולדרסקי, נעם לויטן, מיכל סחף, טל ענבר

010

מחקר ישראלי מצביע על קשר אפשרי בין נגיף החצבת לסרטן הריאות; ויטמין B1 ופרשת המדיה; הלווין עמוס 3 הוצב במסלול; קסיני תקיף את שבתאי שנתיים נוספות; מקלות במיתרי מפרשיות השמש; גנום מרובע כמפתח לרבייה אל-זוויגית; דלק מימני מחיידקים; תעלות זיעה כאנטנות

נפש • מרים דיסון-ברקוביץ

078

השפעתה של אמא על פטפוטי התינוק

זמן חלל • טל ענבר

080

הלווינים לעזרת החקלאי

החיים בקטן • דרור בר-ניר

084

E. coli - החיידק מרובה-הפנים

בינה מלאכותית • ישראל בנימיני

088

מדוע מחשבים (עדיין) אינם קוראים מחשבות?

קפיצת ראש • יוסי ומיכל אלרן

096

שעשועי מתמטיקה ומדע: בעיות שקילה



10



מאמרים

"המבול" - האומנם היה? ואם כן, היכן ומתי? • אריה ש. איסר ומתניה זוהר
על תיאוריית המבול במסופוטמיה

020

ננו מן הטבע: מכונות ביולוגיות מולקולריות • נגה לבנת ורועי צזנה
התא החי מספק לנו ננו-מכונות מן המוכן

028

האב הלא-נודע של עידן המידע • אמיר קליסמן
אל ההצפנה והאינטליגנציה המלאכותית, ברכיבה על חד-אופן

036

ירושלים של מטה • לירון נגר ועידן פייביש
ממצאים מתקופת בית ראשון ועד התקופה העות'מאנית שלובים אלה באתר חפירות ליד הכותל

048

ממחקרי אוניברסיטת בר-אילן

תצפית על מחלות ניווניות במוח • שלומית בקר, הגר ימין ואדוארד שטרן
אלצהיימר ומחלות ניווניות אחרות - מבט בזמן אמת אל השינויים ברמת התא

052

צוהר לעולמם של רופאים ומרפאים יהודים בארץ-ישראל העות'מאנית • זהר עמר ויעל בוכמן
שילוב של רפואה אירופית, ימי-ביניימית וערבית

060

תיאוריית אזורי האקלים בעת העתיקה ומשמעותה האנתרופולוגית • דניאלה דוויק
היפוקרטס ואריסטו על השפעת האקלים על המזג האנושי

068



בראש ובראשונה

"הוא היה צלול עד יומו האחרון." כולנו מכירים את המשפט הזה, הנאמר כנחמה מסוימת בעקבות מותו של אדם יקר. אך לא כולם זוכים לכך. עם הזדקנות האוכלוסייה, רבים יותר ויותר סובלים בערוב ימיהם מסוגים שונים של שיטיון (דמנציה) – פגיעה בזיכרון, שינויים באישיות וקשיים בהתמצאות ובתפקוד.

עם הסיבות העיקריות לשיטיון נמנות מחלות עצבים ניווניות, שהידועה שבהן היא מחלת אלצהיימר. על פי נתוני Alzheimer's Research Trust הבריטית, למעלה מ-24 מיליון איש ברחבי העולם סובלים כעת משיטיון, וחולה נוסף מתווסף מדי 7 שניות. בניגוש לתפישה המקובלת, שלפיה מחלות דוגמת אלצהיימר רווחות בעיקר בעולם המערבי, 60% מהסובלים משיטיון הם תושבי מדינות מתפתחות.

לפגיעתו הקשה של השיטיון באישיותו של החולה מתווסף המחיר האישי והכלכלי הכבד שמשלמים בני משפחותיהם של החולים, התומכים בהם, והחברה כולה. ברור, אפוא, מדוע הפכו מחלות העצבים הניווניות ליעד מרכזי למחקר.

בגיליונו הקודם פתחנו בסדרת מאמרים העוסקים בנושא חשוב זה, עם מאמרם של דינה וולדרסקי ונעם לויתן, שתיאר את חזית המחקר בחקר מחלות הנטינגטון ופרקינסון. בגיליון זה רואה אור מאמרם של שלומית בקר, הגר ימין וד"ר אדוארד שטרן, המציג גישות חדישות בחקר מחלת אלצהיימר; בחקר מחלת אלצהיימר יעסוק גם מאמרו של ארז פודולי, שיראה אור בקרוב ב"גליליאו".

עוד בגיליון: מאמרם של פרופ' אריה ש. איסר וד"ר מתניה זוהר, הגורס שהשיטפונות ששימשו השראה למיתוס המבול התרחשו במסופוטמיה – ולא באזור הים השחור, כפי שגורסת תיאוריה פופולרית אחרת וכפי שטוען פרופ' יוסי מרט, במאמרו שיראה אור בקרוב ב"גליליאו"; מאמרו של אמיר קליסמן על קלוד שנון, מהאבות הפחות זכורים כיום של עידן המידע; מאמרם של רועי צזנה ונגה לבנת על ננו-מכונות ביולוגיות; ומאמרם של לירון נגר ועידן פייביש על שרידים ארכיאולוגיים, ובהם ממצאים מתקופת בית ראשון, שנחשפו בקרבת הכותל. מאמרה של ד"ר דניאלה דוויק גורס כי הוגי העת העתיקה קישרו בין תנאי הסביבה והאקלים לבין תכונות האופי של האוכלוסייה באזור; ומאמרם של פרופ' זהר עמר וד"ר יעל בוכמן, על רופאים ומרפאים יהודים בארץ-ישראל העות'מאנית, משתלב במסגרת "שנת השישים למדינה" ב"גליליאו" – מאמרים על פנים שונות של תולדות המדע והטכנולוגיה בארץ ישראל.

פרופ' אריה ש. איסר וד"ר מתניה זוהר, מחברי המאמר על תיאוריית המבול במסופוטמיה, יתארחו בפורום "גליליאו", www.ifeel.co.il/galileo, ביום שני ה-23.6.08, בשעות 19:00-22:00, ויענו על שאלות הקוראים והגולשים. אנו מקווים לדיון ער ופורה.

**קריאה נעימה!
שלומית עוזיאל רז**


עורכת "גליליאו"
shlomit@sbc.co.il

גיליון 118 • יוני 2008
כתב-עת למדע ולמחשבה

גליליאו



מו"ל: קבוצת SBC כתובת: רח' שפע טל 6 תל-אביב, מיקוד: 67013, ת.ד. 57388, מיקוד: 61572, טל': 03-5652100

סמנכ"ל מערכת ופרויקטים: אילת מעברי

עורכת: שלומית עוזיאלרז

מעצב גרפי ראשי: נדב אליהו

עורך מדעי: צבי עצמון

מעצבת ועורכת גרפית: דנה גוטליב

עיצוב תדמית SBC: אולה נסטרובה
מנהלת קדם דפוס והפקות: אביגיל יעיש
קדם דפוס: קובי סלמה, יעקב ראובן, מקסים רומשצ'נקו
עיבוד תמונות וסריקות: יבגני צ'צ'יק
מיחשוב ומאגרי מידע: בני כלילי
מזכירות: יהודית שיינברגר
אחריות הפצה: יעל טיירי
הפצה שיווקית: משה פרידמן 050-6403007, דרור לוי 050-8993070
דפוס: אחדות
כריכה: שחף
הפצה: חברת "בר פוינט אופ סיל", טל' 03-6070707

כותבי מדורים: יורם אורעד, ד"ר יוסי אלרן, מיכל אלרן, ישראל בנימיני, ד"ר דרור ברניר, ד"ר מרים דישון-ברקוביץ, דינה וולדרסקי, מרוס כהן, נעם לויתן, מיכל סחף, טל ענבר, עידן פייביש
יועצים מדעיים: פרופ' משה אבלס, פרופ' רון אהרוני, פרופ' יצחק דותן, פרופ' שלמה יינר
יועצי מערכת: ד"ר צפרי קולת, ישראל בנימיני, אריה מלמד-כץ, ד"ר יואב בן-דב

מחלקת שיווק מוסדי: נועם ברוך (שלוחה 1233), קולט גורי (שלוחה 1248), אליס בן-ישראל (שלוחה 1432)
מנהלת הפעול מנויים: סטלה ורד
שירות מנויים: סופי דגרוזי, דינה ועקנין, חנה דביר, סאלי ראובני, עינת נגר, אורית קסטרו, מריה אדליס, ליהי שרמן
אחריות מוקד הזמנות: תמר קרידי
מנהלת שימור לקוחות: עידית קופר (שלוחה 1157)
מנהלת מכירות מנויים: ריקי לנדסברג (שלוחה 1231)
מנהלת מכירות מחלקת שטח: מירב אברך
מנהל תחום אינטרנט: אורן שמאי
עיצוב גרפי אתר ifeel: יואלה ברמץ
מפיקת מגזינים דיגיטליים: קטיה גורחוב
מנהלת שיווק אתר ifeel: אור סקרביין-ברק, or@sbc.co.il
מנהלות פיתוח עסקי: ירדן פריש, yarden@sbc.co.il
יעל גל זאדה, 050-8993070, yaelg@sbc.co.il
מנהלת מסחרית מגזיני לקוחות: אירית בנאי-נגרין, iritb@sbc.co.il
מנהלת כוח אדם: חגית מור (שלוחה 1168)

מאמרי "מחקרי אוניברסיטת בר-אילן" נכתבים ונערכים בשיתוף עם צוות בר-אילן:
עורך אחראי: ירח טל
יועצים מדעיים: פרופ' הארולד בש, ד"ר אורן הרמן, פרופ' שלומית מיכאלי, פרופ' אורי ניר, ד"ר ינאי עופרן, פרופ' מירי פאוסט, פרופ' אריה צבן, ד"ר ירון שב-טל, פרופ' בנימין שרדני
עורך מדעי: ד"ר עמוס כרמל
מרכזת מערכת: שרית לוי
טלפון: 03-5318992 פקס: 03-7384067
מייל: yerach.tal@mail.biu.ac.il



תמונת שער: אילוסטרציה: דנה גוטליב תמונות: אימג'בנק / GettyImages

רכזת פרסום: שירי אבקסיס
מנהלת מכירות: נחמה שקדי
מנהלת מחלקת תיאום מודעות: דורית מימון
עיצוב מודעות: הדר שמואלוב
מנהלת יחסי ציבור: רוזית כהן

המו"ל אינו אחראי לפרסומים, תוכנם, סגנונם, עיצובם ו/או התמונות הכלולות בהם. כל המודעות מפורסמות באחריותו הבלעדית והמלאה של המפרסם, על פי הזמנתו ובהתאם לאישורו. כי הוא זכאי כדון לפרסם המודעה.

מחלקת כספים: אביבה דוד, שיר כהן, חלי סופר,
ילנה צ'אק, סמדר כהן
משרד רו"ח: אבידן ושות' רואי חשבון

שירות לקוחות באינטרנט: www.sbc.co.il/sherut

COSMOPOLITAN	Forbes	נישה	הארץ	גליליאו	הארץ	MOUNTAINBIKE	MAXIM	גליליאו צעיר	רכב
דוך האור	דוך האונל	סטטוס הירחון לחשיבה ניהולית	משפחה טובה	DO	PG	ESTETICA	MAMA	משפחה	להיות משפחה

שינוי כתובת ניתן להעביר בפקס: 03-5626476,
או במייל: sherut@sbc.co.il

להזמנת מו"ל בין השעות 09:00-17:00: 1599-505-155
ניתן להשאיר הודעות במענה הקולי 24 שעות ביממה.
לחלוקת שירות מו"לים: 1599-505-101
להזמנת מו"ל דיגיטלי: eMag.co.il

נמצא) בשכבות הקשתית החיצונית יותר יש לפיכך חשיבות ביולוגית "מסדר שני" – חשיבות לטווח ארוך, למשל. שכבת המלנין הפנימית היא, למיטב ידיעתי, המחסום העיקרי מפני כניסת אור שלא דרך האישון, ודבר זה ביקשתי להדגיש. ג. תודה על התוספת המעניינת בעניין עיני התיקן. שתי הערות קטנטנות: חומצה אורית היא חומצת שתן, בעוד אוראה – חומר הרבה יותר מסיס – מכונה שתנן. וכן – שכבת טפטום אינה יכולה להגדיל את הרגישות במידה משמעותית ביותר, אלא, נאמר, פי 2, בעוד שבעלי-חיים רבים יכולים לתפקד בטווח בן סדרי גודל רבים של עוצמות אור. אני מבקש לשוב ולהודות לד"ר מאיר ברק על המכתב וההערות.

תיקון טעות

במדור המכתבים בגיליון 117, במכתבו של פרופ' יוסף נוימן "ורנר פון בראון – מהס"ס לנאס"א", נפלה לצערנו טעות מערכת בכיתוב לתמונה. בעמ' 10, בתמונה הימנית התחתונה, נראה הנשיא לינדן ג'ונסון ולצדו מנהל נאס"א ג'יימס וב, ולא כפי שנכתב.

להלן התמונה המקורית, שבה מופיע הנשיא ג'ונסון (במרכז) ולצדו ורנר פון בראון בצד שמאל של התמונה. אנו מתנצלים על הטעות ומדגישים כי מחבר המכתב לא היה מעורב בהכנת הכיתוב.

תודתנו לטל ענבר על שהאיר את עינינו. 



לפי מיטב ידיעתי, יש חשיבות ביולוגית גדולה מאוד לצבע הקשתית. לא בכדי הצבע הכחול והירוק נפוצים מאוד במדינות הצפוניות (הסקנדינביות) ונדירים מאוד בקו המשווה ובאפריקה. הצבענים שבקשתית מפחיתים את כניסת הקרינה האולטרה-סגולה המסוכנת לרשתית. במדינות שבהן קרינת השמש חזקה, צבע קשתית בהיר הוא גורם שלילי, ולכן סביר להניח שהלחץ האבולוציוני יוביל לצבעים כהים (ואכן זה המצב).

ג. בעמ' 43 מוזכר ה-tapetum lucidum ודרכי יצירתו. מעניין לציין כי התיקן המצוי (אותו חרק הנפוץ במחוזותינו ולא מעט מפחדים ממנו) הוא בעל-חיים מוצלח מאוד מבחינה אבולוציונית. אחד היתרונות שלו הוא היכולת להשתמש בחומצה האורית (שתנן) שלו במקום להיפטר ממנה כפסולת (כפי שבני-האדם עושים). התיקן משקיע את החומצה האורית בטפטום, כפי שצוין בכתבה, ובכך מגביר את ההארה של הרשתית, דבר המסייע לו לנוע בחושך (לצערם של רבים) בלא כל בעיה.

ד"ר מאיר ברק

מכון ויצמן

תגובת צבי עצמון:

אני מבקש להודות מקרב לב לד"ר מאיר ברק על מכתבו. תודה רבה!
ובאשר להערות עצמן.

א. בעבר הזדמן לי לא פעם לומר או לכתוב: "קטרקט, ובעברית ירוד". שוב ושוב התברר לי שדוברי עברית, ובכלל זה בקיאים בתלמוד, אינם מכירים את המילה ירוד, אך שמעו על קטרקט. עקב כך פסקתי להשתמש במילה ירוד. ואולי טעיתי בכך.

ב. אין, כמדומה, חולק על כך שלכמות המלנין במשתית הקשתית (ובמילים אחרות: ל"צבע העין") יש הקשר אסתטי. ואולם, מבחינת תפקודי הראייה החשיבות הראשונה במעלה היא של המלנין שבשכבת הגבול הפנימית של הקשתית, שכבה העשויה אפיתל דו-שכבתי גדוש במלנין. זוהי השכבה העיקרית המונעת כניסת אור לרשתית העדינה שלא מבעד לאישון. ביקשתי להדגיש כי גם מי שעניו בהירות הוא בעל שכבת מלנין אטומה בגבול הפנימי של הקשתית (רק בלבקנים מלנין נעדר גם משכבה פנימית זו). מלנין פנימי זה הוא בעל חשיבות "מסדר ראשון" לעצם הראייה: זהו המלנין העיקרי המונע כניסת אור שלא מבעד לאישון. למלנין שנמצא (או לא



ויליאם ריאן ווולטר פיטמן, המבול של נוח: התגליות המדעיות החדשות על מאורע ששינה את ההיסטוריה.

האוקיינוגרפים ויליאם ריאן ווולטר פיטמן, מאוניברסיטת קולומביה שבארצות-הברית, מתארים בספרם את תגליות שלפיה לפני כ-8,000 שנה, גבהו פני האוקיינוסים והימים

ועברו את מחסום הבוספורוס, ומי ים מלוחים חדרו אל הים השחור, שהיה עד אז אגם מים מתוקים. ריאן ופיטמן משערים, כי הצפה זו היא האירוע ששימש השראה למיתוס המבול. הספר מתאר את הראיות הגאולוגיות, הארכיאולוגיות, האתנוגרפיות והבלשניות שמציעים החוקרים לאישוש השערתם. מאנגלית: תמר אלמוג (William Ryan and Walter Pitman, Noah's Flood, 1998). עריכה מדעית: איתמר פרת. עורכת הסדרה: עתליה זילבר. עם עובד, סדרת אפקים מדע, 300 עמודים, מחיר מומלץ: 89 שקלים.



דונל או'שיי, השערת פואנקרה. סיפורה של

ההוכחה המתמטית להשערת פואנקרה, שהוגדרה כ"אחת משבע החידות המתמטיות הגדולות של האלף החדש". את ההוכחה פרסם המתמטיקאי הרוסי גרגורי פרלמן, שהפתיע את עולם המתמטיקה כשפרסם את פתרונו באינטרנט ולא בכתב-עת מקצועי. פרופ' דונל או'שיי הוא מתמטיקאי ממכללת

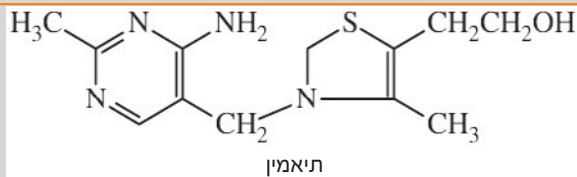
מאונט הוליאוק, מסצ'וסטס, ארצות-הברית. מאנגלית: עמנואל לוטם (Donal O'Shea, The Poincaré Conjecture, 2007). עורכת ראשית: רחל הלוי. אריה ניר הוצאה לאור, 335 עמודים, מחיר מומלץ: 96 שקלים.



הג'וק וה"שטיח הבוהק"

נהניתי מאוד לקרוא את המאמר "מבט לראייה", פרי עטו של צבי עצמון ("גליליאו" 116), הכתוב במקצועיות רבה ובצורה זורמת. הייתי רוצה להוסיף נקודות אחדות:

- א. קטרקט (cataract) נקרא בעברית יָרֹד.
- ב. בעמ' 41 צוין: "כמות המלנין וכנראה גם סוגו במשתית של הקשתית קובעים במידה רבה את 'צבע העין', הלא הוא צבע הקשתית, שיש לו אולי חשיבות אסתטית, וחשיבותו הביולוגית משנית".



ויטמין B1 (תיאמין) ופרשת רמדיה – הרקע הביולוגי

1. פירובט דהידרוגנאז (pyruvate dehydrogenase), המאפשר ("מזרז") דקרבוקסילציה של פירובט (pyruvate) לאצטיל קואנזים A (acetyl-CoA).

2. α -קטוגלוטרט דהידרוגנאז (dehydrogenase), המאפשר דקרבוקסילציה של α -קטוגלוטרט (succinyl-CoA) ל- α -קטוגלוטרט (succinyl-CoA).

3. טרנסקטולאז (transketolase), המאפשר הפיכת סוכרים בעלי חמישה וארבעה פחמנים לסוכרים בעלי שבעה ושלושה פחמנים במסלול הפנטוז-פוספט (pentose phosphate pathway).

חוסר בפעילות של שני האנזימים הראשונים משתק לחלוטין את מעגל קרבס – ובעצם את כל תהליך הנשימה האווירנית. הפסקת פעילות המעגל גורמת לירידה של פי 15 לערך בתפוקת האנרגיה שמקורה בסוכרים.

התהליך השלישי קל מאוד לזיהוי כמותי בדגימה של תאי דם אדומים, ולכן משמש ככלי לזיהוי המחסור בתיאמין. העדר תיאמין משפיע בעיקר על מערכת העצבים, כיוון שמערכת זו תלויה בלעדית באספקת אנרגיה מסוכרים, להבדיל מרקמות אחרות בגוף, היכולות להשתמש גם בשומנים כמקורות אנרגיה. ונסיים בתקווה שלקחי פרשה זו יילמדו ושאסון כזה לא יתרחש שוב.

לקריאה נוספת:

"תיאמין לא אמין" – צבי עצמון, "גליליאו" 64,

דצמבר 2003:

<http://telem.openu.ac.il/courses/c20214/thiamine-g.htm>

מידע על ההיסטוריה של בריברי (מחסור בתיאמין), תהליך

האבחון שלה, ופירוט התסמינים – דוד לוי, נובמבר 2003,

אתר הידען:

<http://www.hayadan.org.il/remedia2.html>

ויטמין B1 (תיאמין) ומחלת הבריברי – רות ערב, נובמבר

2003, אתר האוניברסיטה הפתוחה:

<http://telem.openu.ac.il/courses/c20214/beriberi.htm>

בתחילת חודש מאי 2008, קרוב לחמש שנים אחרי "פרשת רמדיה", הוגשו לבית-המשפט כתבי האישום כנגד האחראים לה. בתחילת נובמבר 2003 אובחנו ב-23 תינוקות הפרעות נירולוגיות ואחרות. שלושה מהילדים מתו, ואחרים סובלים עד היום מליקויים התפתחותיים, עיוורון, חירשות ותסמינים נוספים. המשותף לכל הנפגעים היה הזנה ממושכת ובלעדית בחלב צמחי (על בסיס סויה) מותוצרת חברת הומאנה (Humana) הגרמנית, שייבאה לישראל חברת רמדיה.

בתחקיר שנערך התברר כי עקב שינוי המוצר נגרע מהמוצר המחודש הויטמין תיאמין (thiamine), המכונה גם B1. כמות הויטמין שנמדדה בדגימות של המוצר המחודש היתה בין 29 ל-37 מיקרוגרם ב-100 גרם מוצר (על האריזה צוינה כמות של 385 מיקרוגרם – למעלה מפי 10). מחסור בויטמין זה היה הגורם לפגיעה החמורה בכל התינוקות.

לטענת היצרנית, הוספת התיאמין (שהיתה חלק מגרתי בתהליך הייצור של המוצר המקורי) למוצר המחודש הופסקה בעקבות בדיקות מעבדה שגויות לגבי כמותו במוצר המחודש, שנעשו במעבדות חברת לופה (Lufa). החברה טוענת שדיווחה ליבואנית על הפסקת הוספת הויטמין.

עם פרסום הפרשה הופיע ב"גליליאו" דיווח ("תיאמין לא אמין", "גליליאו" 64, דצמבר 2003), שכלל רקע היסטורי וביולוגי על הויטמין. כאן אתיחס בקצרה רק לרקע הביולוגי.

תיאמין, כמו ויטמינים רבים אחרים, אינו מיוצר בגופנו, אך הוא הכרחי לבריאותנו, כך שעלינו לקבלו במזון: חלב, דגנים מלאים, בשר, כבד, דגים, ביצים ועלים ירוקים. תינוקות יונקים מקבלים את הויטמין הדרוש להם מחלב האם, לכן יש חשיבות רבה לכך שבתחילי החלב, שבמקרים רבים הם מקור התזונה היחיד של התינוק, תהיה כמות מספקת של הויטמין. היעדר הויטמין גורם למחלה המכונה בְּרִיבְרִי (Beriberi), המאופיינת בהצטברות נוזלים ברקמות, בכאבי שרירים, בפגיעה קשה במערכת העצבים ובשריר הלב ובסופו של דבר – בשיתוק ובמוות.

תיאמין עובר בגופנו תהליך של זרחון, שבמהלכו מתווספות אליו שתי מולקולות של חומצה זרחתית. התוצר תיאמין פירופוספט (TPP) מהווה חלק לא-חלבוני (קבוצה פרוסתטית או קו-אנזים) בשלושה אנזימים המשתתפים בתהליכי הפקת האנרגיה בגוף. בלא תיאמין, שלושת האנזימים האלה לא יפעלו. האנזימים הם:





מעורבות אפשרית של נגיף החצבת בסרטן הריאות

ארש רזזדה (Rezazadeh) מאוניברסיטת לואיסוויל בקנטקי, ארצות-הברית, הציג בכנס את ממצאיו, שלפיהם נגיף הפפילומה (HPV), המוכר כמחולל סרטן צוואר הרחם (וראו: דינה וולודרסקי, "חיסון נגד סרטן", "גליליאו" 115), זוהה אף הוא בסרטן הריאה.

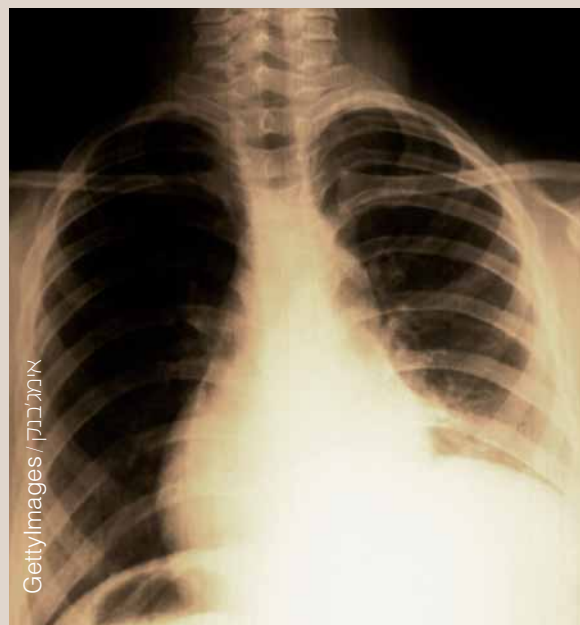
נגיף החצבת הוא נגיף RNA, ולכן לא סביר שהמנגנון הקשור להתמרה הסרטנית הוא התמזוגות של החומר התורשתי הנגיפי בגנום של התא. אריעד משער כי תאים סרטניים מבטאים קולטן מסוים, שנגיף החצבת עושה בו שימוש על מנת לחדור לתא. על פי השערתו של אריעד, חלבון נגיפי הקרוי MV-phosphoprotein (measles virus phosphoprotein) משפיע בעקיפין על חלבון תאי המכונה P53 (חלבון מרכזי בהגנה על התא מפני התמרה סרטנית), וגורם להרס שלו, כך שהתא נעשה מועד לנזקים. אריעד סבור כי הנגיף איננו גורם לסרטן, אך מאיץ תהליכים סרטניים שכבר החלו.

המחקר מעלה כמה שאלות חשובות: האם החיסון נגד חצבת (החיסון נעשה באמצעות נגיף מוחלש) משפיע על התהליך, וכיצד? האם החיסון החדש נגד סרטן צוואר הרחם ישפיע גם על סרטן ריאות וסוגי סרטן נוספים? והאם למגפת החצבת הנוכחית תהיינה השלכות על שיעורי התחלואה בסרטן בעתיד? התשובות לשאלות אלה טרם נמצאו, אך אפשר אולי להתנחם בעובדה שגם בעקבות התפרצות מגפת חצבת בשנת 1982 לא חלה עלייה מהותית בשיעורי התחלואה בסרטן הריאה בישראל.

חשוב לציין גם, כי מכיוון שהמחקר הוא מחקר רטרוספקטיבי ונעשה על ביופסיות, לא היתה אפשרות טכנית לבדוק באיזה זן ספציפי של נגיף מדובר, שכן על מנת לבדוק זאת יש צורך ב-RNA של הנגיף, שאותו אפשר להפיק רק מרקמה טרייה. לשם כך יהיה צורך בביצוע מחקר נוסף. מדובר, אם כן, בממצא חדשני וחשוב, שהשלכותיו המדויקות טרם ברורות לחוקרים.

דינה וולודרסקי ונעם ליתן

עישון סיגריות הוא גורם מרכזי לסרטן ריאות, ואולם, ממצאים אחרונים מראים כי נגיף החצבת עשוי אף הוא להיות מעורב בהתמרה הסרטנית ולהאיץ את תהליך המחלה. פרופ' שמואל אריעד (Ariad), מנהל המכון לאונקולוגיה במרכז הרפואי האוניברסיטאי סורוקה, ועמיתיו ערכו מחקר רטרוספקטיבי שבו נבדקו רקמות שמקורן בביופסיה של גידולים מ-65 חולי סרטן ריאות. במחצית הדגימות נמצאו חלבונים של נגיף החצבת. זהו הממצא הראשון המעיד על קשר אפשרי בין נגיף החצבת לבין סרטן, ממצא מעניין במיוחד נוכח מגפת החצבת הנוכחית בישראל. אריעד הציג את התוצאות בכנס האירופי בג'נבה שעסק בסרטן ריאות. בכנס הוצגו עדויות נוספות של חוקרים אחרים, המדווחים על כך שנגיף החצבת קשור לסרטן הריאות, אם כי לא הוצגה הוכחה שהנגיף הוא שגורם לסרטן.



אמג'בנקן / Getty Images

עמוס: לא רק לישראלים

חלל-תקשורת בע"מ (Spacecom) מספקת שירותי שידור ותקשורת לוויינית באמצעות הלוויינים עמוס 1, עמוס 2 ועמוס 3, באירופה, במזרח התיכון ובחוף המזרחי של ארצות-הברית. עם לקוחותיה הגדולים של חלל-תקשורת בארץ נמנים ממשלת ישראל, חברת הטלוויזיה בלוויין YES, רשות השידור, הרשות השנייה (ערוץ 2 וערוץ 10) וגילת.

בין לקוחותיה הגדולים של חלל-תקשורת בחו"ל אפשר לציין את HBO, את BOOM – מפעילת פלטפורמת DBS לוויינית ברומניה – טלספציו, אנטנה-הונגריה וגורמי שידור מסחריים וציבוריים אחרים. החברה נוסדה בתחילת שנות התשעים, והחלה את פעילותה באספקת שירותי תקשורת לוויינית בשנת 1996, עם שיגורו של לוויין התקשורת עמוס 1, שפותח ויוצר בתעשייה האווירית לישראל.

הוגי רעיון לוויין התקשורת הישראלי היו חזי כרמל ד"ל והאלוף במיל' מאיר עמית, המשמש כיו"ר חברת חלל-תקשורת. ■

לקריאה נוספת:

מצגת PDF של התעשייה האווירית על הלוויין עמוס 3:

http://www.iai.co.il/sip_storage/files/6/35886.pdf

אתר חברת חלל-תקשורת, מפעילת הלוויין:

<http://www.amos-spacecom.com/amos1/index.asp>



שיגור עמוס 3



בעין האמן: עמוס 3 על רקע החלל

המתקדם עמוס 4. עלות הלוויין 365 מיליון דולר, והוא צפוי להיות משוגר לחלל בסוף שנת 2012. לוויין זה יוצב בנקודה שונה בחלל מהמקום שבו שוהים כיום הלווייני עמוס 1, 2 ו-3, והוא יופנה לשוק תקשורת הלוויינים של המזרח הרחוק ומרכז אסיה. הלוויין עמוס 5 אמור לכסות את כל יבשת אפריקה ולספק פתרון ייחודי לבעיות התקשורת במדינות העולם השלישי. שיגורו צפוי עוד לפני שנת 2012.

| טל ענבר





עמוס 3 שוגר לחלל

משגר דו-שלבי בשם זניט 2, ששוגר 37 פעמים מבייקונוור החל מ-1985. בין השאר, משגר זה הוטאם במקור לשמש כמאיץ למעבורת החלל הסובייטית בוראן (Buran). השלב השלישי של המשגר, המכונה בלוק DM, תוכנן במקור להיות מרכיב חשוב בתכנית הירח המאווישת של ברית-המועצות, וטס בין השאר גם על המשגר פרוטון. המשגר מתנשא לגובה של 59 מטרים ושוקל למעלה מ-460 טון בעת ההמראה. ההצבה הישירה במסלול הגאוסטרכונוי אפשרה גם להגדיל את משקל המטעד של הלוויין בשיעור של למעלה מ-55%.

הלוויין עמוס 3 שונה משני קודמיו בכך שהתווספו לו עוד שלוש אנטנות, שתיים מתוכן ניתנות לניהוג, דבר המאפשר כיסוי אזורים נוספים על פני כדור-הארץ, לפי הצורך. נוסף על כך פועל הלוויין בתחום תדר חדש, Ka, נוסף לתדר Ku. תדר Ka (30 ג'יגה-הרץ בערוץ העולה ללוויין וכ-18 ג'יגה-הרץ בערוץ החוזר לכדור-הארץ) מאפשר ללוויין שידורי טלוויזיה בחדות גבוהה (HDTV), איכות שידור שהדרישה לה הולכת וגדלה בארץ ובעולם. תדר זה, בעל רוחב פס גדול יותר, מאפשר גם שירותי אינטרנט מהיר באמצעות הלוויין. האלומות הניידות של הלוויין מאפשרות למפעיליו לספק שירותי תקשורת לוויינית למגוון מדינות ומשתמשים, על פי הצורך, ובכך מאפשרות גמישות תפעולית רבה יותר ללוויין זה, שתבוא לידי ביטוי גם ברווחים שהוא צפוי להניב. ברגע זה מקיפים את כדור-הארץ 9 לוויינים ישראליים (לווייני תקשורת, תצפית ולוויין מדעי/טכנולוגי). שום לוויין ישראלי לא כשל בעת תפקודו בחלל, וכל הלוויינים תפקדו טוב יותר ולאורך זמן רב יותר מהמתוכנן.

הבא בתור? עמוס 5 לפני עמוס 4

ביולי 2007 נחתם חוזה בין חלל-תקשורת, התעשייה האווירית וממשלת ישראל לבנייה ולאספקה של הלוויין

לוויין התקשורת עמוס 3 מתוצרת התעשייה האווירית (תע"א) שוגר לחלל ב-28 באפריל בשעה 08:00 לפי שעון ישראל. הלוויין שוגר באמצעות משגר זניט (Zenit) הרוסי/אוקראיני, אשר לו שלושה שלבים, מאתר השיגור בבייקונוור, קזחסטן. כשבע שעות לאחר שיגור הלוויין, הופעלה מערכת הבקרה שלו והוא נכנס למסלולו כמתוכנן. הבדיקות הראשוניות של מערכת הלוויין מראות כי הוא מתפקד כמתוכנן. עמוס 3 צפוי לפעול במשך כ-18 שנה. הלוויין עמוס 3 נבנה עבור החברה הישראלית חלל-תקשורת (Spacecom), מפעילת לווייני עמוס 1 ו-2, המציעה מגוון רחב של שירותי שידור ותקשורת רחבת-פס. אזורי השירות של החברה כוללים את אירופה, המזרח התיכון וצפון אמריקה, ומספקים קישוריות טרנס-אטלנטית בין החוף המזרחי של ארצות-הברית והמזרח התיכון. הלוויין עמוס 3, על יכולותיו המשופרות, יאפשר להרחיב את מגוון השירותים שמציעה חברת חלל-תקשורת. תע"א מפתחת בימים אלו עבור החברה את עמוס 4 – לוויין תקשורת מהדור הבא.

הצבה ישירה במסלול גאוסטרכונוי

הלוויין עמוס 3 הוא הלוויין הראשון שאינו רוסי, אשר שוגר ישירות למסלול גאוסטרכונוי. שיטת שיגור זו מאפשרת לחסוך בדלק שנושא הלוויין, להאריך את זמן פעולתו בחלל ולקצר את הזמן הנדרש כדי להציבו בנקודה המיועדת לו בחלל. השימוש בשיטה זו לשיגור עמוס 3 התאפשר הודות למשקלו העצמי הנמוך של הלוויין, מחד גיסא, ומאידך גיסא הודות לבחירה במשגר לוויינים רב-עוצמה, המצויד בשלב עליון מתקדם, המאפשר כמה תמרונים והפעלות בחלל. היה זה גם שיגור בכורה לדגם המשגר זניט, המופעל מכן שיגור חדש בבייקונוור. את השיגור ביצע תאגיד השיגור הבינלאומי Sea Launch, המשגר דגם שונה של הטיל מאסדה צפה באוקיינוס. המשגר התלת-שלבי מבוסס על

לדהור על כנפי רוח השמש

במפרשית כדי להביא חומרים מן האסטרואידים אל מסלול סביב כדור-הארץ, וכן להגיע אל רצועת קויפר (Kuiper Belt), הנמצאת מעבר לכוכב-הלכת נפטון.

השימוש במפרשית שמש המנצלת את רוח השמש איננו חף מקשיים. אחד מהם הוא הקלישות של רוח השמש, שמשמעותה, כאמור, צורך בתיילים ארוכים. אפילו לטיסת מבחן של מפרשית שמש זו, רק על מנת להיווכח שהשיטה עובדת באופן עקרוני, יהיה צורך בשמונה תיילים באורך של כקילומטר כל אחד. השליחויות שג'אנהונן חוזה בעתיד יזדקקו לכמאה תיילים באורך של כעשרים קילומטרים כל אחד. גם כך, הכוח שיופעל על רכב החלל יהיה קטן מאוד. על פי החישובים, רכב חלל שישתמש בשיטה זו יוכל להאיץ מטען של 200 קילוגרם למהירות של 30 קילומטרים לשנייה במהלך שנה שלמה.

בעיה אחרת היא מיקרו-מטאוריטים. אלה עלולים לקרוע את תיילי המפרשית. כדי להתמודד עם הבעיה, יורכבו מקטעי התיילים מארבעה גדילים – שניים ייערכו במקביל זה לזה במרחק של סנטימטרים בודדים, וביניהם ייקשרו שני גדילים אחרים, שיחברו ביניהם באופן מצולב. כך תושג עמידות גבוהה יותר של מפרשית החלל המוצעת. ימים יגידו אם הרעיון יתגלה כישים ומעשי.

| יורם אורעד

רעיון מפרשית השמש המסורתית (עד כמה שאפשר לכנות בשם "מסורתית" רעיון הנמצא עדיין בשלבי תכנון) הוא להשתמש בלחץ העדין שמפעילה קרינת השמש על גוף הנמצא בדרכה, כדי להניע בחלל מפרשית גדולת שטח.

לאחרונה מתכננים מדענים פינים מפרשית חלל בעלת עיקרון שונה, שאינו מבוסס על קרינת השמש אלא דווקא על רוח השמש (solar wind). רוח השמש היא זרם של יונים הטעונים במטען חיובי (הרוב המכריע – פרוטונים) ואלקטרונים, הנפלטים מן השמש בלא הרף במהירויות של מאות קילומטרים לשנייה. רעיונו של פקה ג'אנהונן (Janhunen) מהמכון המטאורולוגי הפיני בהלסינקי, אחד מן החוקרים, הוא לגלול תיילי מתכת דקיקים סביב רכב חלל. תיילים אלה ייפרשו בחלל, כשהם נראים כרשת עכביש, וייטענו במטענים חיוביים. בין התיילים לבין היונים החיוביים של רוח השמש המגיעה אליהם תיווצר דחייה חשמלית, ורכב החלל ייהדף. על מנת שתיווצר דחייה משמעותית, יהיה צורך בתיילים ארוכים מאוד.

ג'אנהונן מציע שהמשימה הראשונה של מפרשית החלל החדשנית תהיה טיסה לרצועת האסטרואידים. באמצעות הטיית התיילים, תוכל המפרשית לשנות את כיוון תנועתה ובאופן זה לנוע בין אסטרואידים רבים. בעתיד הרחוק יותר, יהיה אפשר להשתמש

המשך בעמוד הבא ←



אוהבים את המגזין? רוצים לחלוק את החוויה הזו עם אחרים?

למחלקת מנויים דרושים אנשי מכירות טלפוניים

שעות עבודה נוחות • שכר גבוה!

ניתן לשלב עבודת שטח באירועים ובכנסים

לפרטים: חגית, טל': 03-5652100 שלוחה 273 | פקס: 03-6247404

SBC
נרוץ המגזינים



החללית קסיני – המסע שמעבר למסע



סערה חשמלית על פני שבתאי. תצלום: קסיני. באדיבות נאס"א

אנקלאדוס היא הסיבה לכך, שאחת ממטרותיו העיקריות של המסע בשנתיים שנוספו לו תהיה חקר ירח זה. קסיני תקרב לאנקלאדוס עד כדי מרחק של 25 קילומטרים. החללית קסיני שוגרה מכדור-הארץ ב-15 באוקטובר 1997, והגיעה לשבתאי לאחר כמעט שבע שנות מסע. במסגרת שהייתה במערכת של שבתאי וירחיו, היא שידרה לכדור-הארץ זרם קבוע של מידע שכלל עד כה כ-140 אלף תמונות וכן מידע רב שצברה ב-62 ההקפות שערכה סביב שבתאי, 43 מעברים קרובים ליד טיטאן ו-12 מעברים קרובים ליד ירחים קרחיים (icy moons) שלו. לקסיני נותרה כמות מספקת של חומר הודף להארכה בת השנתיים של מסעה, ולמעשה בתום ההארכה ייוותר לה די חומר הודף שיאפשר גם הארכה נוספת, מעבר להארכה של השנתיים. לא נותר אלא לצפות לתגליות החדשות, שייחשפו במהלך ההארכה המתוכננת ובמהלך ההארכה הנוספת שאולי תבוא אחריה.

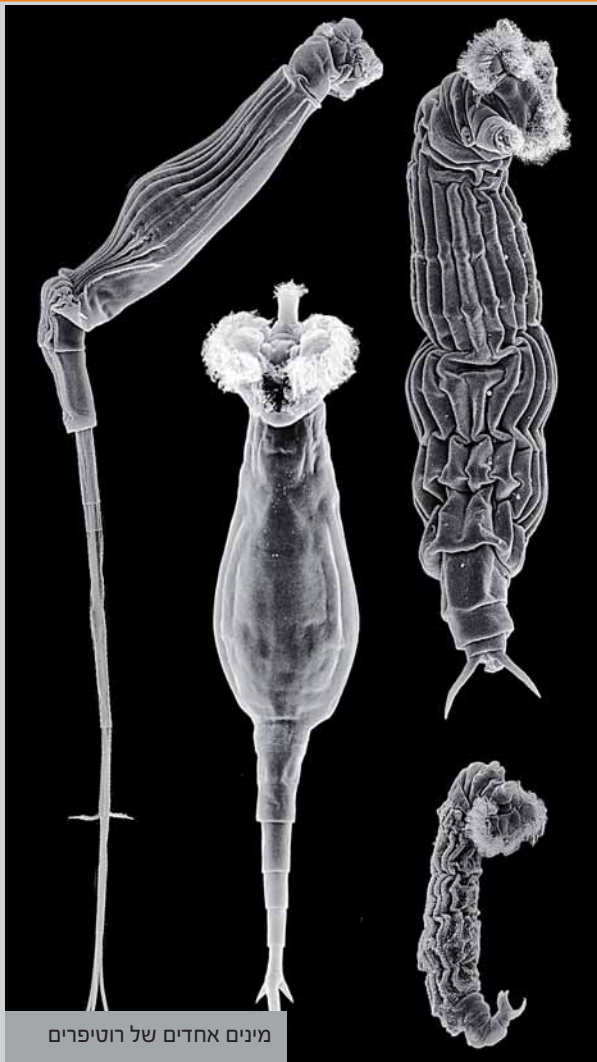
יורם אורעד |

ארבע שנות מסע התגליות של החללית קסיני (Cassini) במסלול סביב כוכב-הלכת שבתאי הובילו לגילויים מרשימים ביותר על שבתאי עצמו, טבעותיו וירחיו. כלהעת הזאת תפקדה החללית באופן יוצא מגדר הרגיל. קסיני היתה אמורה לסיים את תפקידה באופן רשמי ביולי 2008, אך לאחרונה החליטה נאס"א להאריך את מסע החללית בשנתיים נוספות. הארכה זו תכלול שישים הקפות נוספות סביב שבתאי ו-26 מעברים קרובים ליד ירחיו טיטאן (Titan), אנקלאדוס (Enceladus), דיון (Dione), ראה (Rhea) והלן (Helene). כמו כן ייחקרו במהלך ההארכה טבעותיו של שבתאי ושבתאי עצמו. על פי התכנון, במסגרת הארכת המסע

יעקבו מדעני נאס"א אחר עונות השנה בכוכב-הלכת שבתאי ועל פני ירחו טיטאן, שכבר העניק למדענים הצצה למה שהיה אולי כדור-הארץ בטרם התפתחו בו חיים. לטיטאן, הגדול בירחי שבתאי, מאפיינים מקבילים רבים לכדור-הארץ שלנו – נהרות, אגמים, דיונות, עננים וגשמים (אף שלא של מים, אלא של פחמימנים).

אחד האירועים המיוחדים שאחריהם יעקבו מדעני החלל של נאס"א באמצעות קסיני בתקופת ההארכה הוא השוויון (equinox) בין היום והלילה בשבתאי, שיתרחש ב-2009. בזמן זה יימצאו טבעות שבתאי במישור ההקפה של שבתאי סביב השמש.

לאור ממצאים שנתקבלו מקסיני, סבורים מדענים שיייתכן שמתחת לפני השטח של ירחו של שבתאי, אנקלאדוס, שקוטרו כ-500 קילומטרים (רק כעשירית מקוטרו של טיטאן וכשביעית מקוטרו ירחו של כדור-הארץ), נמצאים מים במצב נוזלי. הבסיס להשערה זו הוא התפרצויות של סילוונים המכילים מים, מעין גיזרים, מעל פני השטח של אנקלאדוס. האפשרות שישנם מים נוזליים מתחת לפני



מינים אחדים של רוטיפרים

שבמקרים מסוימים – בייחוד ביצורים אל-זוויגיים – הם עלולים לגרום להכחדה. בגנום שלנו, של בני-האדם, יש לא מעט רטרורנספוזונים, אך בגנום של הרוטיפרים הם אינם קיימים כלל. ולפי סבור כי המרה גנית וסילוק המזיקים (כגון רטרורנספוזונים) מהגנום, המלווים את תיקון ה-DNA, מעניקים לרוטיפרים מספיק מהיתרונות שהסקס מספק ליצורים המתרבים ברבייה זוויגית על מנת שישרדו וישגשגו. נוסף על כך, לדעתנו, אם יכולות אלו אפשרו לרוטיפרים לוותר על סקס, ייתכן כי אלה – יצירת מגוון ועמידות למזיקים – הם היתרונות שרבייה זוויגית מעניקה לבעלי-החיים שבהם היא מתקיימת. ייתכן שהרוטיפרים האל-זוויגיים ובעלי-החיים הזוויגיים מייצגים שני פתרונות שונים שהתפתחו במהלך האבולוציה להשגת מטרות אלו.

נעם ליתן ודינה וולורסקי |

המסוגל לתקן שברים ב-DNA שלו בעקבות קרינה מייננת של יותר מ-10,000 גריי, הוא בעל עמידות לתנאי יובש (וראו: דרוור בר-ניר, "על קרינה וחידקים", "גליליאו" 110).

אחד ממאפייני הרוטיפרים העשוי להסביר את יכולת תיקון נזקי ה-DNA המדהימה שלהם מתואר במחקר השני, שבו מסלסון, דייוויד מארק ולץ' (Welch) ועמיתיהם מהמעבדה לביולוגיה ימית מתארים את סידור הכרומוזומים של הרוטיפרים. החוקרים מצאו כי גן מסוים ברוטיפרים קיים בארבעה עותקים (ארבעה אללים), כל עותק בכרומוזום נפרד. הגנים השכנים לכל עותק – באותו כרומוזום – זהים בכיוונם ובמיקומם בכרומוזום לגנים השכנים לעותקים של הגן שבכרומוזומים האחרים, כלומר ארבעת הכרומוזומים הם הומולוגים. בבדיקה מעמיקה יותר הראו החוקרים כי ארבעת הכרומוזומים הם אמנם הומולוגים, ולכן דומים זה לזה, אך אפשר לחלקם לשני זוגות, כאשר בכל זוג הכרומוזומים דומים זה לזה יותר מאשר לאלה שבזוג האחר. הדמיון מתבטא במספר הגנים ובמיקומם בכל כרומוזום.

מסקנת החוקרים היתה כי לרוטיפרים, כמו לחיות רבות, היו שני עותקים מכל כרומוזום. ואולם, בזמן כלשהו במהלך התפתחותם הוכפל כל הגנום שלהם, כך שהתקבלו ארבעה עותקים מכל כרומוזום ולכן גם מכל גן. במהלך הדורות, חלק מהגנים הכפולים נעלמו מאחד הזוגות, אך סדר הגנים על הכרומוזומים נשמר. סידור הגנום של הרוטיפרים קרוי טטרפלואידי מנוון, וקיים גם בשמר האפייה, למשל.

החוקרים טוענים כי כאשר כרומוזום אחד נפגע בעקבות יובש או קרינה, העותקים העודפים משמשים כתבנית לשחזור של המידע הגנטי בעת תיקון שברי ה-DNA.

יכולת התיקון המדהימה של הרוטיפרים מאפשרת להם לשרוד בתנאים קשים ביותר, אך היא גם מעניקה להם את השונות הדרושה על מנת לפתח התאמות לשינויים ו"לפצות" על כך שהם מתרבים ברבייה אל-זוויגית. בעת שבירת ה-DNA ותיקונו יכול להיווצר מצב שבו הגן המתוקן יהפוך לזהה לגן המתקן (המרה גנית). אם הגן המתקן מכיל במקרה מוטציה מועילה, יצירת עותק נוסף של המוטציה עשויה לגרום לביטויה – כפי שקורה ברבייה זוויגית כאשר ההורים מעבירים לצאצא שני עותקים של אלל רצסיבי (אלל המתבטא רק כאשר הוא קיים בפרט בשני עותקים, ולא לצד אלל אחר, דומיננטי).

נוסף על כך, יכולת התיקון של הרוטיפרים מאפשרת להם ככל הנראה להיפטר ממזיקים הפולשים ל-DNA שלהם, כגון רטרורנספוזונים – קטעי DNA "אנוכי" או טפילי הפולשים ל-DNA ומשכפלים את עצמם בעוד ועוד מקומות בגנום, עד





למה להרביע כשאפשר לרבע?

לשרוד במצב זה, הקרוי אנהידרוביוזה ("חיים בלא מים" ביוונית), במשך שנים, ולהתעורר לחיים עם שוב הלחות. על פי קבוצת החוקרים שערכה את המחקרים, ההתאמות שהתפתחו ברוטיפרים, ומאפשרות להם לשרוד במהלך תקופות היובש, הן האחראיות לשגשוגם המפתיע.

במחקר הראשון, יוג'ין גלדישב (Gladyshev) מאוניברסיטת הרווארד ומתיו מסלסון (Meselson) מהרווארד ומהמעבדה לביולוגיה ימית בוודס הול, מסצ'וסטס, הראו כי רוטיפרים הם בעלי-החיים העמידים ביותר לקרינה מייננת.

קרינה מייננת היא קטלנית ליצורים חיים. היא חודרת לתאים חיים וגורמת נזק ל-DNA, לרוב לשבירתו לחלקים. מנת הקרינה הנספגת נמדדת ביחידות גריי (Gray), ספיגת ג'אול אחד של אנרגיה בקילוגרם אחד של חומר). החוקרים הקרינו פרטים משני מינים-ביולוגיים של רוטיפרים המתרבים ברבייה אל-זוויגית ומין של רוטיפר הנמנה עם מחלקה אחרת, המתרבה ברבייה זוויגית, ברמות הולכות וגדלות של קרינת גמא – סוג של קרינה מייננת – ובדקו כיצד הקרינה השפיעה על החיות ועל יכולת ההתרבות של הרוטיפרים.

ברמת קרינה של 200 גריי, פוריות הרוטיפרים המתרבים ברבייה זוויגית ירדה פי 10, אך פוריותם של מיני הרוטיפרים האחרים לא הושפעה כלל! רק כשרמת הקרינה הוגדלה למעל 1,000 גריי, נצפתה ירידה של פי 10 ברמת הפוריות של הרוטיפרים האל-זוויגיים. הרוטיפרים המשיכו לחיות לאחר שהוקרנו, אף שרמות הקרינה הגבוהות יצרו שברים ב-DNA שלהם. ברמת קרינה של 560 גריי נמצאו 500 שברים ב-DNA בממוצע לתא, ואילו ברמה של 1,000 גריי נמצאו יותר מ-1,000 שברים ב-DNA. לשם השוואה, רמת קרינה של 6 גריי מספיקה על מנת להרוג אדם.

ממחקרם של גלדישב ומסלסון עולה, כי הרוטיפרים הם בעלי עמידות יוצאת מהכלל לקרינה מייננת, אך מאחר שהם לא התפתחו בסביבה בעלת רמות קרינה כה גבוהות, החוקרים משערים כי יכולתם לתקן ולחבר מחדש את ה-DNA שלהם היא תופעת לוואי של עמידותם לתנאי יובש, שגם הם גורמים שברים ב-DNA. אכן, גם החיידק העמיד לקרינה *Deinococcus radiodurans* (שפירוש שמו "גרגר איום עמיד לקרינה"),

אחד מבעלי-החיים המוזרים ביותר בעולם הוא חסר-חוליות מיקרוסקופי המתקיים באופן שעלול להיראות משמים למדי – הוא מתרבה אך ורק ברבייה אל-זוויגית, כלומר בלא סקס, ועושה זאת כבר למעלה מ-80 מיליון שנה. חסר-חוליות זה, ומאות מינים-ביולוגיים אחרים כמותו, מרכיבים מחלקה מסוימת של גלגליות (רוטיפרים, Bdelloidea), שיחודה בכך שכל המינים-הביולוגיים השייכים אליה מתרבים ברביית בתולין, בלא כל צורך בזכרים: האם מטילה ביצים לא-מופרות, שמהן מתפתחות בנות שהן השיבוט שלה.

רבייה אל-זוויגית אינה ייחודית לרוטיפרים; יש חיות רבות המתרבות בצורה זו – חרקים, נחשים, דרקון קומודו, ולפני כ-6 שנים דיווחו על כרישה בשבי שהשריצה צאצאים בלא נוכחות זכר. ואולם, בניגוד לרוטיפרים שתמיד מתרבים ברבייה אל-זוויגית, כל החיות האלו מתרבות גם ברבייה זוויגית.

לחיה המתרבה אך ורק ברבייה אל-זוויגית יש יתרון על אחיותיה המתרבות ברבייה זוויגית. כל צאצאיה של חיה כזו יהיו נקבות המסוגלות להתרבות, בעוד שמחצית מצאצאי אחיותיה הם זכרים, שאינם מטילים או משריצים כשלעצמם. במקרה זה קצב ההתרבות של המין-הביולוגי האל-זוויגי יהיה כפול משל המין המתרבה ברבייה זוויגית, ובמהרה כל האוכלוסייה תורכב מבעלי-חיים אל-זוויגיים. ואולם, ניצחון האל-זוויגיים הוא קצר. בלא רבייה זוויגית, אין נוצרת השונות הגנטית המגדילה את סיכוייו של מין-ביולוגי לשרוד במהלך שינויים בסביבה ולהתמודד עם טפילים. לפי נתוני מאובנים, רוב היצורים שהתרבו רק באופן אל-זוויגי נכחדו לאחר כמה אלפי דורות. אם כך, כיצד הרוטיפרים – המתנזרים מסקס כבר מיליוני שנים – מצליחים לשרוד ולשגשג?

שני מחקרים של אותה קבוצת מחקר, שפורסמו לאחרונה זה לצד זה בכתב-העת המדעי PNAS, מציגים פתרון לשאלה זו.

רוטיפרים המתרבים ברביית בתולין חיים בסביבות מימיות בנות-חלוף, כגון שלוליות מים מתוקים, וכן בקרקעות לחות ועל גבי טחבים, חזזיות וקליפות עצים. הצלחת הרוטיפרים באכלוס סביבות אלה, שבהן המים עלולים להתאדות ולהיעלם במהירות, תלויה ביכולתם להיכנס – בכל שלב בחייהם – למצב של חיות מושהית עם התייבשות המים. הרוטיפרים מסוגלים

אדם-זיקית



נבדק במהלך הניסוי

תוחזר במידה משתנה כתלות בפעילות בלוטות הזיעה. בניסוי שבוצע בכמה נבדקים במצב מנוחה ולאחר פעילות גופנית מאומצת, נמצא כי אכן ספקטרום ההחזרה בטווח 75-110 ג'יגה-הרץ השתנה כאשר השתנתה מידת ההזעה ואיתה מוליכות התעלות הסליליות. התוצאות הנצפות דמו לתוצאות שהתקבלו ממודל ממוחשב, ותקפותן אושרה באמצעות נטרול אלמנטים אחרים בניסוי, שהיו עשויים להשפיע על מידת ההחזרה, כגון שינויים בזרימת הדם (המקנים לעור גוון סמוק בעת מאמץ).

הבדל בספקטרום ההחזרה שקול, למעשה, לשינוי צבע העור. למרבה הצער (או השמחה) אין ביכולתנו לראות את טווח אורכי הגל הרלוונטי למערך האנטנות שעל גופנו, ולכן אין ביכולתנו להבחין בלא מכשור מיוחד בשינויי ה"גוון" המתרחשים כתוצאה מהזעה מוגברת. ואולם, באמצעות ציוד מתאים, אפשר לזהות אפילו ממרחק את השינויים בפעילות בלוטות הזיעה הנגרמים לא רק ממאמץ גופני, אלא גם משינויים במצב הנפשי.

מיכל סחף |

חוקרים ישראלים גילו כי ספקטרום ההחזרה של קרינה אלקטרומגנטית מגוף האדם משתנה כתלות בפעילותן של בלוטות הזיעה.

דבר ידוע הוא, כי לחץ הדם הסיסטולי (בזמן התכווצות שריר הלב) וקצב הלב מהווים מדד לעקה (סטריס) גופנית ונפשית. גם את בלוטות הזיעה אפשר לרתום למדידה מסוג זה, אך כעת מסתבר כי מדידה כזו אפשר לערוך ממרחק, בלא צורך במגע בעורו של הנבדק.

הפרופסורים יורי פלדמן ואהרן אגרנט מהמחלקה לפיזיקה יישומית באוניברסיטה העברית חקרו את התכונות הפיזיקליות של מערכת הולכת הזיעה מבלוטות הזיעה, הנמצאות בשכבת הדרמיס, אל פני העור, האפידרמיס. התעלות המוליכות את הזיעה הן סליליות, ולא ישירות כפי שחשבו בעבר, והן מלאות בתמיסה מוליכה. פירוש הדבר הוא, כי תעלות אלה עשויות לתפקד כאנטנות זעירות, אשר תחום התדירויות הרלוונטי להן הוא באזור 100 ג'יגה-הרץ, בתחום התת-טרה-הרץ.

על מנת שתפעל כאנטנה, דרושה תנועה חופשית של נושאי מטען בתעלה; תנועתם של יונים נושאי מטען חשמלי בזיעה מוגבלת, והם אינם יכולים להגיע למהירות הדרושה כדי לייצר זרם אפקטיבי באנטנה. ואולם, מלבד תנועת הנוזל בבלוטות הזיעה קיימים תהליכים אחרים, מהירים יותר, אשר גורמים למעבר מהיר של חלקיקים טעונים בין הדרמיס לאפידרמיס. דילוג פרוטונים (proton hopping) הוא תהליך שבו מתרחש מעבר מהיר של פרוטונים דרך נוזל מימי באמצעות קשרי מימן, כתלות בהפרשי החומציות באזור. תהליך זה מספק את תנועת נושאי המטען הנחוצה לתפקודן של תעלות הזיעה כאנטנות. לפיכך, אפשר להתייחס לעור האדם כאל מערך של אנטנות בתחום התת-טרה-הרץ.

דבר ידוע הוא, כי מידת ההזעה משנה את מוליכות העור. תופעה זו נבדקה באמצעות מגע ישיר בעור. ואולם, החוקרים הרחיבו את אפשרויות המדידה כאשר שיערו כי קרינה אלקטרומגנטית בטווח הרלוונטי, שתוקרן על העור,

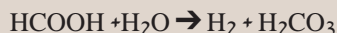


דלק מימני מחיידקים

גם בחיידקים פוטוסינתטיים, אך בכמות קטנה יחסית לכמות הנוצרת בחיידקים מתסיסים.

והנה, קבוצת חוקרים מאוניברסיטת טקסס, בראשותו של תומס ווד (Wood), החליטו לנסות לרתום את חיידק המעיים המוכר *Escherichia coli* (על החיידק ראו במדור "החיים בקטן" בגיליון זה) כדי ליצור מימן כמקור אנרגיה. הם בחרו בחיידק זה עקב המידע הרב הקיים עליו (הרצף הגנטי שלו מוכר כולו) והקלות היחסית שבה אפשר "להנדס" אותו.

בתנאי גידול אווירניים (תנאי גידול אל-אווירניים אינם נוחים בעבודה תעשייתית), *E. coli* יכול לייצר מימן מחומצה פורמית (HCOOH) על-ידי כמה אנזימים, הפועלים במסלולים מטבוליים שונים.



החומצה הפורמית נצרכת עוד בכמה מסלולים מטבוליים אחרים, שאינם מובילים ליצירת מימן. חלק מהמימן נצרך במסלולים מטבוליים אחרים, ולכן יורדת הכמות המופרשת מהחיידקים.

החוקרים הצליחו ליצור זן "מהונדס" של *E. coli*, שבו הושתקו גנים אחדים הקשורים בהפיכת חומצה פורמית לתוצרים שאינם מימן, והגברה הכמות של תוצרי גנים הקשורים בייצור מימן (על-ידי שיתוק גן המייצר דכאן במערכת), וכן שותקו גנים שתוצריהם ממירים את המימן לתוצרים אחרים.

כך נוצר זן של *E. coli* המייצר פי 140 מימן מולקולרי מזן הבר באותם תנאי גידול (במצע המכיל חומצה פורמית כמקור פחמן). עם זאת, חשוב לציין שזוהי רק תחילת הדרך. חומצה פורמית אינה נוחה ואינה זמינה לשימוש בתעשייה, וייצור המימן כאשר החיידק משתמש במקור פחמן "קונוונציונלי" יותר, כמו סוכר, הוא רק 150% (פי 1.5) מהייצור בזן הבר.

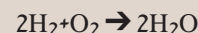
המאמר המקורי:

Toshinari Maeda, Viviana Sanchez-Torres, Thomas K. Wood (2008), Metabolic engineering to enhance bacterial hydrogen production, *Microbial Biotechnology* 1 (1), 30–3.

<http://www.blackwell-synergy.com/doi/full/10.1111/j.1751-7915.2007.00003.x>

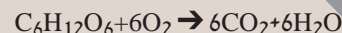
ד"ר דרור בר-ניר

למימן המולקולרי, H_2 , כמקור לאנרגיה יש שני יתרונות חשובים. האחד: זהו דלק שאינו מזהם את הסביבה לאחר השימוש בו – תוצר הפליטה שלו הוא מים בלבד:



משום כך הוא עדיף על דלקים מזהמים. נוסף על כך, בהשוואה לדלק רגיל (פחמימני, שמקורו נפט), תפוקת האנרגיה לק"ג דלק היא למעלה מפי שלושה (142 מגה-ג'אול לק"ג מימן מולקולרי לעומת 42 מגה-ג'אול לק"ג דלק פחמימני).

כאשר חיידקים (ויצורים אחרים) מנצלים אנרגיה כימית (שמקורה בחד-סוכרים, למשל) בתנאים אווירניים, התוצרים הסופיים הם לרוב פחמן דו-חמצני (CO_2) ומים, וכ-30 מולקולות טעונות אנרגיה כימית זמינה (ATP) על כל מולקולת חד-סוכר.



ואולם, בתנאים אל-אווירניים מתרחש רק פירוק ראשוני מאוד של הסוכר, בתהליך של גליקוליזה (או בתהליכים מקבילים), המוביל ליצירה של שתי מולקולות חומצה פירובית ורק שתי מולקולות ATP לכל מולקולת חד-סוכר. בתנאים אלה החומצה הפירובית משמשת כחומר גלם לתהליכי תסיסה, ותוצרי התסיסה, שהם עדיין מולקולות המכילות אנרגיה, מופרשים לסביבה. בתהליכי התסיסה שבחיידקי המעיים, אחד התוצרים, המופרשים בכמויות קטנות יחסית, הוא המימן המולקולרי.

במערכת העיכול של מרבית היונקים, רוב המימן "נצרך" על-ידי חיידקים מתאנוגנים, היוצרים ממנו מתאן (שעל פעולתו כגז חממה כתבנו במדור "החיים הקטן", "גליליאו" 107). לעתים, בתנאים של עודף בגפרית, צורכים את המימן חיידקי גפרית המייצרים H_2S .

כאשר עולה בצורה משמעותית כמות המימן המיוצר, העודפים נפלטים ממערכת העיכול אל חלל הפה ויוצאים מהגוף ביחד עם הגזים של הנשימה. כמות המימן המולקולרי הנפלטת תלויה גם בחומרי המוצא הזמינים לחיידקים: למשל, תסיסה חיידקית של לקטוז במעי הגס (תופעה המתרחשת בעיקר באנשים חסרי האנזים לקטאז – בבעלי לקטאז הלקטוז מפורק למרכיביו החד-סוכריים עוד במעי הדק) גורמת לעלייה ברמת הפליטה של המימן – תסמין המאפשר לזהות את החסר באנזים.

גם בתנאים אווירניים (בתנאי מבחנה), חיידקי המעיים מייצרים מימן מולקולרי, אך בכמויות קטנות יחסית לכמויות המיוצרות בתנאים אל-אווירניים. מימן מיוצר כתוצר לוואי

המבול, אותו אירוע מיתולוגי המתואר בתנ"ך ובכתבים קדומים אחרים, ממשיך לשלהב את הדמיון ולעורר את תשומת לבם של חוקרים מרחבי העולם גם בימינו-אנו. בספטמבר 2007 פרסמו החוקרים כריס ס.מ. טרני (Turney) והידי בראון (Brown) מאמר שבו הם גורסים, כי המבול התנ"כי התרחש בעקבות הצפה של אזור הים השחור. בכך הם חוזרים על טענתם של ויליאם רייאן (Ryan) ווולטר פיטמן (Pitman) מ-1998. לדעתנו יש להפעיל את "התער של אוקאם" גם לגבי המחקר הזה, כלומר, גם אם היתה הצפה של אזור הים השחור עקב עליית פני הימים בכלל והים התיכון בפרט בתקופה הניאוליתית, לפני כ-8,000 שנה, הרי אין להצפה זו קשר עם המבול התנ"כי, שלדעתנו התרחש במסופוטמיה לפני כ-5,000 שנה.

סיפורי המבול במזרח התיכון

במיתולוגיה של רבות מאומות העולם מופיעים סיפורים על מבולים ועל שיטפונות הרסניים. לכל הסיפורים מאפיינים דומים, כגון חלקי יבשת ששקעו ונעלמו, אוכלוסיות שטבעו וניצולים ששרדו בדרך זו או אחרת. סיפורים אלו הם, ככל הנראה, הד לאסונות שהכו אזורים שונים של העולם שבהם ישב המין האנושי מאז תום עידן תקופות הקרח. אסונות כאלו עדיין קורים ומתרחשים מעת לעת גם בימינו אלה, בעת אירוע אקלימי או גאולוגי חריג.

סיפור מבול הדומה וקרוב מבחינה תרבותית וגאוגרפית לזה הידוע לנו מהמקרא נמצא בלוחות כתבי היתדות הכתובים בשפה השומרית והאכדית, שנמצאו במסופוטמיה ובארצות אחרות במזרח התיכון, ואפילו בשבר קטן שנמצא במגידו. השפה השומרית רווחה כשפת דיבור בקבוצת ערי-המדניה שהתפרשה על פני דרום מסופוטמיה החל מהאלף החמישי ועד סוף האלף השלישי לפנה"ס. אחר-כך התחלפה שפת הדיבור באכדית, ששימשה את האוכלוסייה ממוצא שמי שישבה את מרכז מסופוטמיה, שלאחר תהפוכה פוליטית, הפכה להיות בבל. השומרית נשארה שפת הקודש של התרבויות במזרח הקדום, בדומה ללטינית במערב אירופה או לסינית הקלאסית בארצות המזרח הרחוק, עד הכיבוש היווני במאה ה-4 לפנה"ס. קרוב לוודאי שסיפור המבול,

שהיה מסורת שבעל פה שעברה מדור לדור, הועלה על הכתב כבר בתקופה המוקדמת של שושלת המלכים השומרים, דהיינו בין 2,900 ל-2,700 שנים לפנה"ס, גם אם אין הוכחות מוצקות לכך.

הסיפור השומרי הראשון הידוע לנו שנמצא בכתב מתוארך למחצית השנייה של האלף השני לפנה"ס, ומתאר את המבול. ממצא זה נמצא בעיר ניפור בתחילת המאה ה-20 (החוקר ארנו פובל, Poebel, פרסם את הממצא כבר ב-1914). מדובר בשבר תחתון של לוח המכיל בערך את השליש האמצעי של אגדתו של זיוסודרה (Ziusudra, "חיים של ימים ארוכים"), מלך אחת הערים בשומר. מכיוון שתחילת הסיפור וסופו חסרים, איננו יודעים באיזו עיר שלט זיוסודרה ואיך נגמר הסיפור.

את הסיפור במלואו אנו לומדים מאפוס גילגמש, המתוארך לסוף האלף השני ותחילת האלף הראשון לפני הספירה, והכתוב באכדית. שמו של גיבור הסיפור הוא אותנפישתים (Utnapishtim), איש צדיק מהעיר שורופאק, גם היא בארץ שומר. הגרסה המוכרת והידועה ביותר של הטקסט היא הלוח ה-11 מאפוס גילגמש, שנמצא בספרייתו של אשורבניפל בנינוה במצב שימור מצוין. ידוע לנו כי העתקים ותרגומים קדומים נמצאו בארכיון הממלכתי בחתושש (בוג'אזקוי של היום), בירת החיתים באנטוליה, ובמקומות אחרים. קיימת גם דמות ספרותית בשם אטרהזיס (Atrahasis, "החכם מאוד"); השאלה אם דמותו של אטרהזיס היא דמות נפרדת משני הגיבורים הנזכרים לעיל – לא נפתרה. ככל הנראה, זהו שם תואר של אותנפישתים, המופיע גם ביצירות ספרותיות אחרות, דוגמת השיר על אתנה (Etana) ואדפה (Adapa), שבמרוצת הזמן קיבל "עצמאות" כגיבור בפני עצמו.

בכל האפוסים העתיקים הללו אנו מוצאים את ההסבר לאסון בכעס של האלים ובאכזבתם מבני המין האנושי, שאותו בראו, בגלל התנהגותם הלא-נאותה של יצירי כפיהם. אכזבה זו הביאה את האלים להחליטה להכחיד את האנושות בטביעה, ובדרך זו לנקות ולטהר את העולם. ההכחדה נמנעה בעקבות התערבות של אלוהות נדיבת-לב שהורתה לאיש נבחר לבנות ספינה-תיבה ולצוף על מי המבול עם משפחתו. כפי שראינו, לאנוש הנבחר הזה היו שמות שונים: בגרסה השומרית שמו זיוסודרה (Ziusudra) ובגרסה הבבלית שמו הוא אותנפישתים (Utnapishtim). איננו יודעים אם





אריה ש. איסר ומתניה זוהר

תצלומים: אימלבינק / GettyImages

"המבול"

האומנם היה? ואם כן, היכן ומתי?

020

גליליאו
יוני
2008



העתיקה אור, והגיעו לשכבת חרסית שהיא משקע של שיטפון של נהר. אחרי שחפרו בשכבה זו כ-2-3 מטרים, נתגלתה שכבה נוספת של כלי חרס וכלי צור. סר ליאונרד סיכס שמצא הוכחות למבול המקראי, שלא היה אלא אסון מקומי בחלק התחתון של עמק נהרות הפרת והחידקל. מסקנתו של סר ליאונרד וולי לא התקבלה על דעת ארכיאולוגים אחרים, שעבדו במסופוטמיה – למשל בארידו (Eridu), הרחוקה רק כ-25 ק"מ מאור – מבלי שמצאו שכבות כאלו. באתרים אחרים של שומר העתיקה, דוגמת קיש, אורוק ולגש (Uruk, Lagash, Kish), נמצאו שכבות שהושקעו בשיטפון, אך מגיל מאוחר יותר מאלה שנמצאו באור. רוב הארכיאולוגים הסיקו שחפירותיהם במסופוטמיה לא סיפקו הוכחות לאירוע של מבול אזורי. לעומת זאת, החוקרים האמריקנים ויליאם ו. האלו (Halla) וויליאם קללי סימפסון (Simpson), בספרם "המזרח הקרוב הקדום", שפורסם ב-1971, מצדדים בדעה שאכן היה שיטפון שאירע בסביבות שנת 2900 לפנה"ס. הם מתבססים על מציאת שכבות של חימר וחול בחפירות הארכיאולוגיות בשורופק (Shuruppak), עיר הנזכרת בלוח ה-11 של סיפור גילגמש. השכבה הזאת חוצצת בין תקופת תרבות ג'מדת נאסר (Jamdat Nasr) ותקופת שושלת המלכים הקדומה. תקופה זו תואמת את תקופת הזמן שבה חי גילגמש, קרוב לוודאי דמות היסטורית שמשלה באורוק בזמן כלשהו שבין 2700 ל-2500 לפנה"ס.

יונה ועורב שוחררו מהתיבה, וביום ה-27 בחודש השני עזב נוח את התיבה, בנה מזבח והקריב קרבן מנחה. ניחוחו הנעים של הקרבן עלה באפו של האלוהים, והוא הבטיח שלא יחזור על מעשה זה.

האם אכן הסיפורים הללו הם הד לאסון שקרה לאנושות הקדומה של מסופוטמיה? – שאלה זו מעניינת אנשים רבים ומסיבות שונות. מצד אחד ניצבים המאמינים בקדושת המקרא, המחפשים הוכחות שכל מילה הכתובה בספר הספרים היא אמת צרופה. מהצד האחר עומדים החוקרים הרוצים להוכיח שהמקרא, כמו כל מיתולוגיה אחרת, מספר יותר על תפישת העולם בזמן כתיבת הסיפור מאשר על אירועים היסטוריים או פרה-היסטוריים, שלגביהם הבלתי ידוע מרובה על הידוע. כיום סבורים חוקרים רבים, וביניהם מחברי מאמר זה, שממצאים בשטח אכן מלמדים שהתרשש שיטפון או סדרה של שיטפונות-ענק במסופוטמיה, שנחרתו עמוק בזיכרון הקולקטיבי והועברו מדור לדור, בתחילה בעל פה ואחר-כך בכתב. אחד החוקרים הראשונים שהגיע למסקנה זו היה הארכיאולוג סר ליאונרד וולי (Woolley), שחפר בדרום מסופוטמיה בחורבות העיר אור (Ur), וסבר שהיא אולי אור כשדים המקראית², שממנה לקח תרח את בני משפחתו כדי ללכת לחורן (בראשית י"א, פסוק ל"א).

הארכיאולוגים חפרו פיר בשכבה העבה של פסולת, שבמשך דורות הושלכה והצטברה מחוץ לחומות העיר

2. סביר להניח שהשם אור כשדים הוא שיבוש שם העיר "אורוכש" (Urkish), אחת הערים החשובות של החורים שבצפון מסופוטמיה באלף השני לפני הספירה. אי לזאת, לאור (Ur) השומרית אין כל קשר לאור כשדים המקראית. המילה השומרית אור או אורו, תלוי בהקשר, משמעותה פשוט עיר.



מדובר בשני אישים שונים ובזמנים שונים במובן המודרני, או באפיתטים (כינויים) לדמויות דמיוניות בלא עבר או הווה, כרגיל בספרות העתיקה. השם השומרי זיוסודרה מופיע כ"קסיסותרוס" (Xisuthros) בכתביו של בְרוֹסוס (Berossus), כהן בבלי של האל מורדוך, שכתב ביוונית בערך בשנת 275 לפני הספירה.

נציג כאן בקצרה את תמצית הסיפורים האלה. האל אֶהּ הזעיק את גיבור סיפור המעשה, אוֹתְנִישֶׁתִים, בחלומו, והודיעו שמועצת האלים בהשפעתו של האל אֶגְלִיל החליטה להחריב את העיר שוּרוּפֶק. נאמר לאותנפישתים לפרק את ביתו ולבנות במקומו ספינה בצורת קובייה, 120 אמות לכל כיוון, שבתוכה יהיו שבע קומות ו-63 מדורים. אה הדרוך את אותנפישתים שכאשר ישאלו אותו שכניו למעשיו, עליו לרמות אותם ולא לבגוד באל חסדו. הוא אמר לו להעמיס את ספינתו ב"זרע החיים של כל המינים", במשפחתו וכן בבעלי אומנויות שונים. לאחר בניית הספינה, השתוללה הסערה במשך שבעה ימים ולילות, שבהם אפילו האלים "התכווצו בחדד כמו כלבים וכמוהם הצטנפו ליד הקיר".

אותנפישתים וכל אשר עמו ניצלו, והספינה נחה בסופו של דבר על הר נִיסִיר (Nisir). אחרי שבוע של שהייה בלא תנועה, שלח אותנפישתים מהספינה יונה, סנונית ועורב, שלא חזרו לספינה. אותנפישתים יצא מספינתו והקריב קרבן, ומסביב לקרבן "התקבצו כל האלים כזבובים המריחים ריח ניחוח מתוק". אנליל כעס מאוד על כך שנפש חיה כלשהי שרדה באסון, אבל יתר האלים הרגיעו את רוחו. אותנפישתים ואשתו זכו בחיי נצח באי המבורכים, דִילְמוֹן, גן העדן המסופוטמי, ולשם הגיע גילגמש בחפשו את סוד חיי האלמוות.

קרוב לוודאי שהאגדות המסופוטמיות היו המקור לסיפור המבול המקראי, אם כי בין שתי הגרסאות קיימים כמה הבדלים בפרטים הקטנים. נתעכב רק על כמה נקודות בולטות במיוחד.

בסיפור המקראי, אלוהים מביא את המבול כעונש על

שחיתות: "ותשחת הארץ לפני האלוהים ותמלא הארץ חמס" (בראשית ו' י"א). המקרא אינו מפרש מה היו מעשי החמס הללו, האם חוסר צדק שבין אדם לחברו או אולי בין האדם לבוראו. בסוף פרק ה' בספר בראשית, לפני או כהקדמה לסיפור המבול, אנו מוצאים את הסיפור על "בני האלוהים" שלקחו להם לנשים את בנות האדם, ומזיווגים אלו באו הנפילים. מיד אחר-כך בא הקטע שבו האל רואה "כי רבה רעת האדם" והוא מחליט למחות את האדם מעל פני האדמה (בראשית ו' ה'-ז'). בניגוד לכך עומד נח, "איש צדיק תמים". ייתכן שלפנינו עקבות טקסט עתיק המסביר את "רעת בני האדם" בהקשר פולחני, נוסח ששרד את העריכה והתוספת המאוחרת, שניכרת בה רוח מוסר הנביאים, של "ותמלא הארץ חמס".

בטקסט המקראי אלוהים מודיע לנח על תכניותיו להשמיד את האנושות ונותן לנח הוראות מפורטות לבניית תיבה בממדים של 300 על 50 על 30 אמה. ביום ה-17 לחודש השני נצטווה נוח לקחת את משפחתו ואת החיות המומלצות אל תוך התיבה, ולנעול אותה. לאחר שבעה ימים החל המבול, עם פריצת מים "מעיינות תהום רבה" שנבקעו ומ"ארובות השמים" שנפתחו. ביטויים אלו מזכירים את הסיפור הבבלי המסופר ב"אנומה אליש" ("עת מעל", סיפור הבריאה הבבלי שהושר בראש השנה הבבלי באחד בחודש ניסן) על האלה הקדומה תיהמת, שניסתה לאבד את בני האלים ומורדוך חצה אותה לשניים, לחלק העליון שבו מי השמיים ולחלק התחתון המכיל את המים התת-קרקעיים. ייתכן שהביטוי "מעיינות תהום רבה" הוא שיבוש של "מי עיני תיהמת", כלומר פריצה של המעיינות התת-קרקעיים.

על פי הטקסט המקראי, ירד הגשם 40 יום ו-40 לילה (לפי הגרסה המסופוטמית, רק 7 ימים בלבד); המים גאו והגיעו לגובה 15 אמות מעל לרכסי ההרים וכל החי על פני הארץ הושמד. בתום 150 ימים זכר אלוהים את נוח, המים שכנו וביום השביעי לחודש השביעי נחה התיבה על הרי אררט¹.

1. "אררט" – הצורה שבה ביטאו במסופוטמיה במאה ה-4 לפנה"ס את שמה של ארץ אוררטו (Urartu) שבמזרח אנטוליה. במגילות ים המלח מופיע פעמיים הכתיב "אוררת"; בגרסה הקדומה של תרגום השבעים מופיע "ארץ אררת" במקום "הרי אררת".

ובנטיפים של מערות הגליל והרי יהודה נעשה קל יותר³. מידע מקביל על כמות משקעים גבוהה במזרח התיכון במשך אותה תקופה אפשר היה לקבל ממחקר קווי החוף הקדומים של ים המלח, הן של הגאוגרפית ציפורה קליין, הן של חוקר המערות עמוס פרומקין והן של הגאולוגית רויטל קן-תורעמיתיה. תצפיותיו של עמוס פרומקין נערכו במערות של הר סדום, שנוצרו עקב המסת המלח שממנו בנוי ההר. בעת שים המלח עולה, מימיו חודרים למערות ומשאירים אחריהם קווי חוף במפלסים הגבוהים ביותר שאליהם הגיעו מי הים (וראו: רם וינברגר וזאב ב. בגין – "מה ראתה אשת לוט?", "גליליאו" 89). לאורך קווים אלו נותרו פיסות עצים שנשחפו בזרמי המים ושהגיעו לאגם בשיטפונות של הנחלים הזורמים אל הים. פיסות אלה תוארכו באמצעות פחמן 14, ועל סמך נתונים אלו שורטטה עקומה המראה שמפלס ים המלח החל לעלות בערך בשנת 2900 שנים לפנה"ס והגיע לשיא גובהו, דהיינו ל-300 מטרים מתחת לפני הים התיכון, בערך בשנת 2500 לפנה"ס.

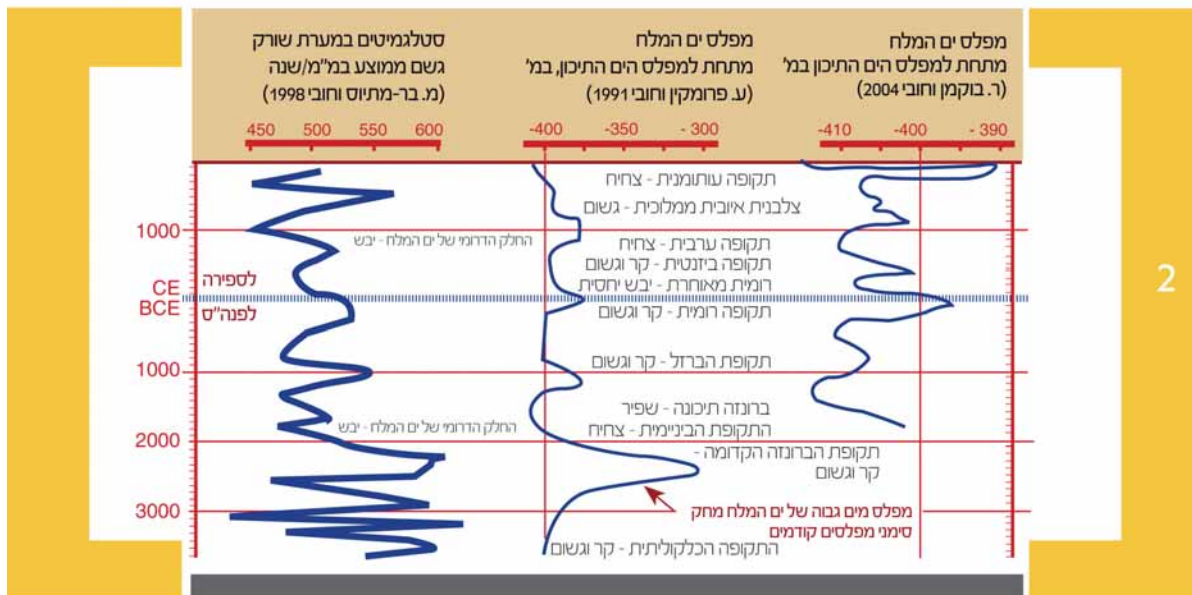
נתון חשוב נוסף התקבל מאגם ואן בטורקיה, המקבל את מימיו מאותם ההרים המספקים את המים לנהרות הפרת והחידקל. מדגמים מקידוחים לתוך המשקעים שבקרקעית האגם אפשרו לחוקרים ג'רי לֶמְקֶה (Lemcke) ומיכאל שטורם (Sturm), מהמכון הפדרלי השווייצרי למדעי הסביבה והטכנולוגיה, לשחזר את הלחות היחסית של אזור אגם ואן. ואכן, התברר כי התקופה שבה שררה הלחות הגבוהה ביותר במשך תקופת ההולוקן (10,000 השנים האחרונות), עם כמה שיאים גבוהים במיוחד, היתה בין 2900 ל-2400 לפנה"ס. מסקנות ראשוניות אלו הוכחו כאשר נעשה שחזור של כמות הגשם באזורנו לתקופה זו לפי יחסי האיזוטופים של החמצן בנטיפים של מערת שורק. יחסים אלו מראים שכמויות המשקעים במשך תקופה זו עברו את השיאים של כל התקופות ההיסטוריות שבאו לאחר מכן. אם מביאים בחשבון שבשיא תקופת הקרח האחרונה, אגם הלשון (Lisan) שקדם לים המלח הגיע למפלסו הגבוה ביותר, שהיה 200 מטרים מתחת לפני הים התיכון, ואילו בתקופת הברונזה הקדומה הוא הגיע ל-300 מ' מתחת לפני הים התיכון (לעומת סביב 400 מ' מתחת לפני הים התיכון בימינו) – אפשר להסיק שאכן תקופת הברונזה הקדומה

היתה תקופה גשומה ביותר. להערכתנו, האקלים הקר שאפיין את האלף השלישי לפנה"ס, ושגרם לאקלים גשום מאוד במזרח התיכון, הביא איתו גם סדרות של שנים של גשמים עזים בכל המזרח התיכון. בעקבות גשמים אלה עלו לא רק מפלסי ים המלח ואגם ואן, אלא גם הוצפו שטחים נרחבים בעמק הנהרות פרת וחידקל, בעיקר בחלק הדרומי הנמוך, שעליו השתרעה שומר הקדומה. כפי שמראים נתוני הסטלגמיטים והנטיפים של מערת שורק ותנאי הרטיבות באזור אגם ואן, אין מדובר באירוע אחד, אלא בסדרה של אירועים, שביניהם הבדילו תקופות של גשמים מועטים יותר. מכאן אפשר להסיק לדעתנו שמדובר בסדרת אסונות סביבתיים, שהביאה לסיפור על המבול. במילים אחרות, הסיפור נרקם והתחבר כמצבור של כמה שכבות על בסיס זיכרון רחוק של אירועים המאופיינים בשינוי משטר אקלימי, שהיה כרוך בגשמים עזים, בפריצת מעיינות ובשיטפונות עזים. הסיפורים על אירועים אלו הצטברו בזיכרון הקיבוצי של תושבי מסופוטמיה כסיפור המבול.

תיאוריית הים השחור זוכה לפרסומה

לפני שנים אחדות התפרסמה תיאוריה חדשה, שלפיה אכן היה מבול, אך מקורו לא היה בשמיים ובמי התהום, אלא בהצפה ימית. בספרם "המבול של נוח" טוענים הגאולוגים ויליאם רייאן ווולטר פיטמן שבערך לפני 7,500 שנה גרמה התחממות האקלים להמסה מהירה של קרחונים, שהביאה לעלייה מהירה של מפלסי הימים, ובהם מפלס הים התיכון. עלייה זו גרמה לפריצת המחסום שהיה קיים עד אז בבוספורוס, בחלק הצפוני-מזרחי של ים השיש. עד אז חצץ מחסום זה בין הים התיכון לאגם הגדול שקדם לים השחור, שמפלסו היה נמוך ב-150 מטרים ממפלס הים כיום. בעקבות פריצת המחסום, גלש מפל כביר של מי ים והציף את כל השטחים הנמוכים שמסביב לאגם הקדמון. לפי התיאוריה של החוקרים הללו, ההצפה המיטה אסון על היישובים החקלאיים הניאוליתיים באזור זה. רייאן ופיטמן טוענים, שאסון זה נחרת בזיכרוןם של האנשים ששרדו בהצפה והיגרו למסופוטמיה. הסיפורים שסיפרו עברו מדור לדור עד שהתגבשו באפוסים שנחרטו על לוחות החימר של מסופוטמיה הקדומה שהזכרנו לעיל.





נתונים על שינוי האקלים ב־6,000 השנים האחרונות והשוואתם עם האיזוטופים ההיסטוריים

שינוי האקלים באזורנו ב-5,000 השנים האחרונות, על פי ממצאים מים המלח ומערת שורק

בגלל תפיסת מימיהם בקרונונים. האקלים הקר גרם לעלייה משמעותית בכמות המשקעים במזרח הקרוב ולזרימה מוגברת של נהרות הפרת והחידקל. מניתוח נתונים אקלימיים והידרולוגיים מכל חלקי המזרח הקרוב עולה, שהיתה זו התקופה עתירת המשקעים ביותר מכל התקופות מאז החלה התרבות החקלאית באזור זה, כלומר עשרת אלפים השנים האחרונות. גם באזורים הדרומיים יותר של המזרח התיכון אנו מוצאים עדויות לשינוי משמעותי במשטר ההידרולוגי. נחלי האכזב בארץ ישראל, כגון נחל לכיש, הפכו לנחלי איתן. בו-בזמן, ההרכב האיזוטופי של החמצן במשקעים של אגם הכינרת

אירוע שיטפוני בעקבות שינוי אקלימי

להשקפתנו, המבול המקראי אכן התרחש בדרום מסופוטמיה לפני כ-4,500 שנה, עקב תקופה קרה וגשומה מאוד. מסדרה של נתוני אקלים (ראו גרף), מתברר שבמשך רוב האלף השלישי לפנה"ס שרר באזורנו אקלים קר וגשום (וראו גם מאמרנו: "מדבור: מי האחראי העיקרי? שינוי אקלים והשפעתם על ההיסטוריה של המזרח התיכון", "גליליאו" 92). ממחקרים שנעשו במסגרת התכנית ההידרולוגית הבינלאומית של אונסק"ו, התברר שהתקררות האקלים הורגשה בכל רחבי העולם. חופי האוקיינוסים והימים נסוגו,

3. מחקרים הראו, שיחסי האיזוטופים משתנים בהתאם לתנאים הסינופטיים, כלומר בהתאם לכיוון שממנו מגיעות אלינו המערכות האקלימיות המביאות את הגשם. באופן כללי, התברר שבתקופות של תנאי מזג אוויר קרים יותר כמות המשקעים גבוהה יותר ואילו ההרכב האיזוטופי קל יותר, ולהפך.



לקריאה נוספת:

נוסף על הספרים והמאמרים הנזכרים לאורך המאמר:
Arie S. Issar, 1990, *Water Shall flow from the Rock. Hydrogeology and Climate in the Lands of the Bible*, Springer-Verlag.

Issar, S. Arie. 1993. Once upon a time in Sumer...
Unesco Courier, May 1993. pp. 10-14.

Issar, S. Arie. 1995. Climate Change and the History of the Middle East. In: *American Scientist*, July-August, Vol. 83, pp.350-355.

Yanko-Hombach, V., Gilbert, A. S., Panin, N., Dolukhanov, P. M. (eds.), 2007. *The Black Sea Flood Question – Changes in Coastline, Climate and Human Settlement*. Springer, Dordrecht, Netherlands.
1) המשתתפים בכנס זה הסתייגו מתיאוריית המבול בים השחור. 2. בקובץ זה נכלל גם מאמרו של איסר: "Climatic changes in the eastern Mediterranean (from the last glacial maximum to the late Holocene."

Grimal, P., 1965, *Larousse World Mythology*. Hamlyn, London, New York, Sydney, Toronto.

בראון, לגבי שיטפון (גדול או קטן) שהציף את אגן הים השחור, שהתרחש כמה אלפי שנים מוקדם יותר וכ-1,500 ק"מ רחוק יותר, אין להם, לדעתנו, כל קשר עם סיפור המבול המקראי. ■

פרופ' (אמריטוס) אריה ש. איסר, מאוניברסיטת בן-גוריון בנגב, הוא מייסד המרכז למשאבי מים של המכון לחקר המדבר בקריית-בן-גוריון בשדה בוקר. התמחה במחקר משאבי מים באזורים צחיחים ובהשפעת שינויי האקלים על משאבי המים והמערכות הסוציו-אקונומיות. ב-1985 הוענק לו פרס ברגמן על תרומתו לפיתוח הנגב. ב-2003 זכה בפרס נשיא האגודה הבינלאומית להידרוגאולוגיה על תרומתו המדעית למחקר מים באזורים צחיחים ולהשפעת שינויי אקלים על אזורים אלו, וב-2004 קיבל את התואר חבר כבוד בא"ל (אגודה ישראלית למשאבי מים).

ד"ר מתניה זהר קיבל את תואר הדוקטורט מהאוניברסיטה העברית על חיבורו "תקופות המעבר הקדומות בארכיאולוגיה של סוריה וארץ ישראל". בין פרסומיו ערכים באנציקלופדיה של החברה לחקירת א"י ועתיקותיה, באנציקלופדיה לארכיאולוגיה של אוקספורד ובמילון המקראי של "אנקור" וכן דו"חות על חפירתיו באתרים שונים בא"י.

ביום ב' 23.6.08, בשעות 19:00-22:00, יתארח פרופ' אריה ש. איסר וד"ר מתניה זהר בפורום "גליליאו" וישמחו לענות על שאלותיכם. המעוניינים מוזמנים לפורום מדע וחברה באתר "גליליאו":
www.ifeel.co.il/galileo

ואכן, בדיקה בעזרת "התער של אוקאם" מראה שהשערתם של מחברי מאמר זה היא גם פשוטה יותר, וגם תואמת הן ממצאים פליאו-אקלימיים באזורנו והן פרטים סביבתיים ששרדו במיתוסים הקדומים.

סיכום

כל חוקרי ההיסטוריה של תקופת המקרא, וכן הארכיאולוגים, מסכימים שחסרים תעודות וממצאים ארכיאולוגיים ישירים לקיומו של מבול עולמי בעבר ההיסטורי, כפי שמסופר במקרא ובאפוסים המסופוטמיים. עם זאת, יש עדויות וממצאים לכמה אסונות מקומיים של שיטפונות והצפות בארץ שני הנהרות. אלו, לדעתנו, נגרמו עקב אקלים עולמי קר שהתבטא בריבוי גשמים באזור המזרח התיכון. המאורעות הללו, קרוב לוודאי, הכשירו את הקרקע להתפתחות פולקלור על אסונות טבע, שנאסף ועובד בידי מספרי סיפורים וסופרים מוקדמים של התרבות הספרותית המסופוטמית. העיבוד כלל מוסר השכל לפי הצרכים וההבנה של העורכים והמסר שההוגים הקדמונים האלה רצו להעביר. בספרות המסופוטמית, המבול נעשה לסמל ההרס הכללי והמוחלט כתוצאה מהיריבות בין האלים ומשנאת האנושות שהיתה נחלת כמה מהם. לעומתם, האלים הטובים הושיעו את האנושות. היהדות קיבלה משוכני האזור את הסיפור, אך במסגרת האמונה באל אחד, שהוא גם אל המוסר החברתי והצדק, המבול הוא תוצאה מכך ש"הארץ מלאה חמס".

להשערתנו, הסיפור המסופוטמי נכנס לכלל סיפורי המקרא במשך תקופת גלות בבל של אנשי יהודה, שהתחילה בהגליית המלך יהויכין (שעמו גלה גם הנביא יחזקאל) בשנת 598 לפנה"ס, כאשר הגולים התיישבו על הריסות של ערים עתיקות שלפי המסורת המקומית "נותרו מהמבול", ואשר נקראו באכדית תל-אבובו (tell abubu), כלומר "תל המבול" והשם שובש לתל-אביב. חיזוק להשערה זו נמצא בפסוק "ואבוא אל הגולה תל-אביב היושבים אל נהר כבר" (יחזקאל ג' טו) שבתרגום השבעים מתורגם ל"תל-אָבִיב". ייתכן שכאן שמעו הגולים משכניהם את האגדות על הסיבות להכחדתם של היישובים העתיקים.

ממצאיהם של רייאן ופיטמן, ולאחרונה כריס טרני והידי

בתקופה מאוחרת יותר, נכללו גרסאות של סיפורים אלה בכתבי הקודש העבריים, והיו לחלק מהמסורת היהודית-נוצרית-מוסלמית.

הפרסום הנרחב שניתן לספר זה בעיתונות המדעית הפופולרית התבסס על כך, שממצאם של רייאן ופיטמן פתר סופית את סוגיית המבול המקראי. מאחר שחלקים נרחבים בציבור האמריקני רואים במקרא מסמך היסטורי, אין ספק שלא רק שיקולים מדעיים הניעו את החוקרים והמוציאים לאור לקשור השערה המיוסדת על ממצא מדעי אוקיינוגרפי עם אירוע מקראי.

ממחקרים שונים מתברר שהיו כמה אירועים של הצפת האגן העמוק שאותו ממלאים בימינו מי הים השחור – הצפה אחת היתה על-ידי הים הכספי לאחר תקופת הקרח האחרונה, והאחרת לפני כ-16 עד 13 אלף שנים, שהביאה את גובה האגם הקדום קדם-הים השחור עד לגובה של מינוס 20 מ' מתחת לפני הים התיכון. לאחר מכן היו עליות וירידות של המפלס בהתאם לשינויי האקלים, וכאשר התרחשה החדירה של מי הים התיכון, היא היתה הדרגתית, ולא בצורה שמתארים אותה רייאן ופיטמן. גם השינויים הסביבתיים אינם מצביעים על משבר פתאומי ונטישה המונית של האוכלוסייה, שהביאה איתה את סיפור המבול למסופוטמיה. הדעה הרווחת כיום בקרב מדענים רבים היא, שאין כל קשר בין המבול המקראי להצפת הים השחור.

גם מחברי מאמר זה מציעים לדחות את ההשערה של "המבול בים השחור", גם אם נסכים שהיתה רק הצפה חלקית של האזור לחופי האגם, שהיה עד אז נמוך ממפלס הים התיכון. דחיית "תיאוריית הים השחור" מתבססת על "תערו של אוקאם". הנזיר הפרנציסקני ויליאם איש אוקאם, שחי בשנים 1287-1347, קבע בזמנו את הכלל ש"אין להרבות בישויות בלא צורך" (בלטינית: "Entia non sunt multiplicanda praeter necessitatem"), כלומר שיש לחסוך בטעונוים ובפלפולים מיותרים כאשר באים להוכיח איזושהי אמת מדעית (או לדידו של אוקאם, תיאולוגית). במילים אחרות, "כאשר ישנם שני הסברים שווי ערך לאותה תופעה, יש להעדיף את ההסבר הפשוט יותר". כלל זה הפך ברבות הזמן לעיקרון כללי במדע, ומכונה "תערו של אוקאם" (Occam או Ockham).

בכל מקום שנפנה אליו, ניתקל במכונות העושות מלאכות עבור האדם. מנועי קיטור בספינות ענק תפסו את מקומם של עבדים החותרים במשוטים. מנוע הבערה הפנימית החליף את הסוס ואת מושכי הריקשה. משאבות רבות-עוצמה חוסכות לנו הליכה לבאר. אין ספק שעידן התעשייה והאוטומציה מספק לבני-האדם נוחות ומותרות רבות. אך האם זהו סוף הדרך?

הננו-טכנולוגיה התחילה את דרכה בשנות השישים, עם קביעתו של חתן פרס נובל לפיזיקה ריצ'רד פיינמן (Feynman) שלפיה "יש עוד הרבה מקום בתחתית". אנו משתמשים כיום במכונות גדולות, גסות ומגושמות, אשר רובן המכריע מנצל את הדלק המוזרם לתוכן ביעילות נמוכה למדי. מנוע הבערה הפנימית ברכב משפחתי ממוצע, למשל, הופך רק 20% מאנרגיית הדלק המוזרם לתוכו לתנועה; כל השאר מבוזבז על חום ורעש. הננו-טכנולוגיה מציעה לנו אפשרות לעבוד "בתחתית" – ליצור מכונות כה קטנות, שמיליונים מהן יוכלו להימצא על ראש סיכה, ויעילות עד כדי 80% ויותר.

עצם שמה של הננו-טכנולוגיה מייצג את מטרתה: ננו-מטר הוא מיליארדית המטר, כאורכה של מולקולה. טכנולוגיה היא דרכו של האדם ליצור מכונות שיפתרו בעיות עבורו. ייעודה המתקדם ביותר של הננו-טכנולוגיה הוא ייצור מכונות שגודלן כגודל מולקולות – ננו-מטרים אחדים. ננו-מכונות אלו יוכלו לתפעל מולקולות ואטומים יחידים, לחבר ולהפריד ביניהם ובכך להשיג שליטה עילאית בחומרים המיוצרים. יהלום, למשל, עשוי בסך-הכל מאטומי פחמן – אחד היסודות הנפוצים על פני כדור-הארץ. הסיבה לחוזקו העצום היא סידורם המיוחד של האטומים במרחב. אם נוכל לתמרן אטומי פחמן באמצעות ננו-מכונות ולבנות מהם גביש יהלום, הרי שהיהלום יהיה חומר זמין וזול ברגע שמהפכת הננו-טכנולוגיה תגשים את ייעודה. (אמנם, כיום כבר מיוצרים יהלומים מלאכותיים, בתנאים קיצוניים של לחץ וטמפרטורה; אך אלה הם יהלומים קטנים, ולא יריעות או גושים כפי שמקווים ליצור באמצעות הננו-טכנולוגיה.) אלא שהדרך עוד ארוכה עד למכונות מולקולריות מעשה ידי אדם. עדיין אין ברשותנו כלים שיאפשרו לנו לטפל

ביעילות במולקולות ובאטומים בודדים ברמת דיוק כזו, שנוכל להרכיב מהם מכונות כרצוננו. והנה, במקום לעכב את המחקר בתחום עד שהטכנולוגיה שלנו תגיע לרמה כזו של דיוק ויעילות, חוקרים רבים פונים לאפיק מקביל – שימוש במכונות מולקולריות שמקורן אינו בכושר ההמצאה של האדם, אלא בטבע עצמו; מכונות אלו הן האנזימים.

האנזימים הם חלבונים המיוצרים כל העת בתוך כל תא. הם אחראים לפעולות המתרחשות בתא, דוגמת שעתוק המידע הטמון בקוד הגנטי ותרגומו לאנזימים חדשים, או תהליכים מטבוליים סבוכים המאפשרים הפקת אנרגיה ממולקולות פשוטות. אנזימים אלו פועלים במידה רבה על פי עקרונות כימיים שקשה להעביר וליישם בקני-מידה גדולים יותר. יחד עם זאת, ישנם אנזימים אשר פעולתם היא מכנית בעיקרה, ושאפשר לתרגם אותה בפשטות יחסית למושגים המוכרים לנו מעולם ה"מאקרו" – עולם המכונות הגדולות, שאת חוקי הפיזיקה והמכניקה שלו אנו מיטיבים להכיר. אנזימים אלו הם "מנועים מולקולריים", והם עשויים להוות את הדור הראשון של המכונות המולקולריות הנשלטות על-ידי האדם.

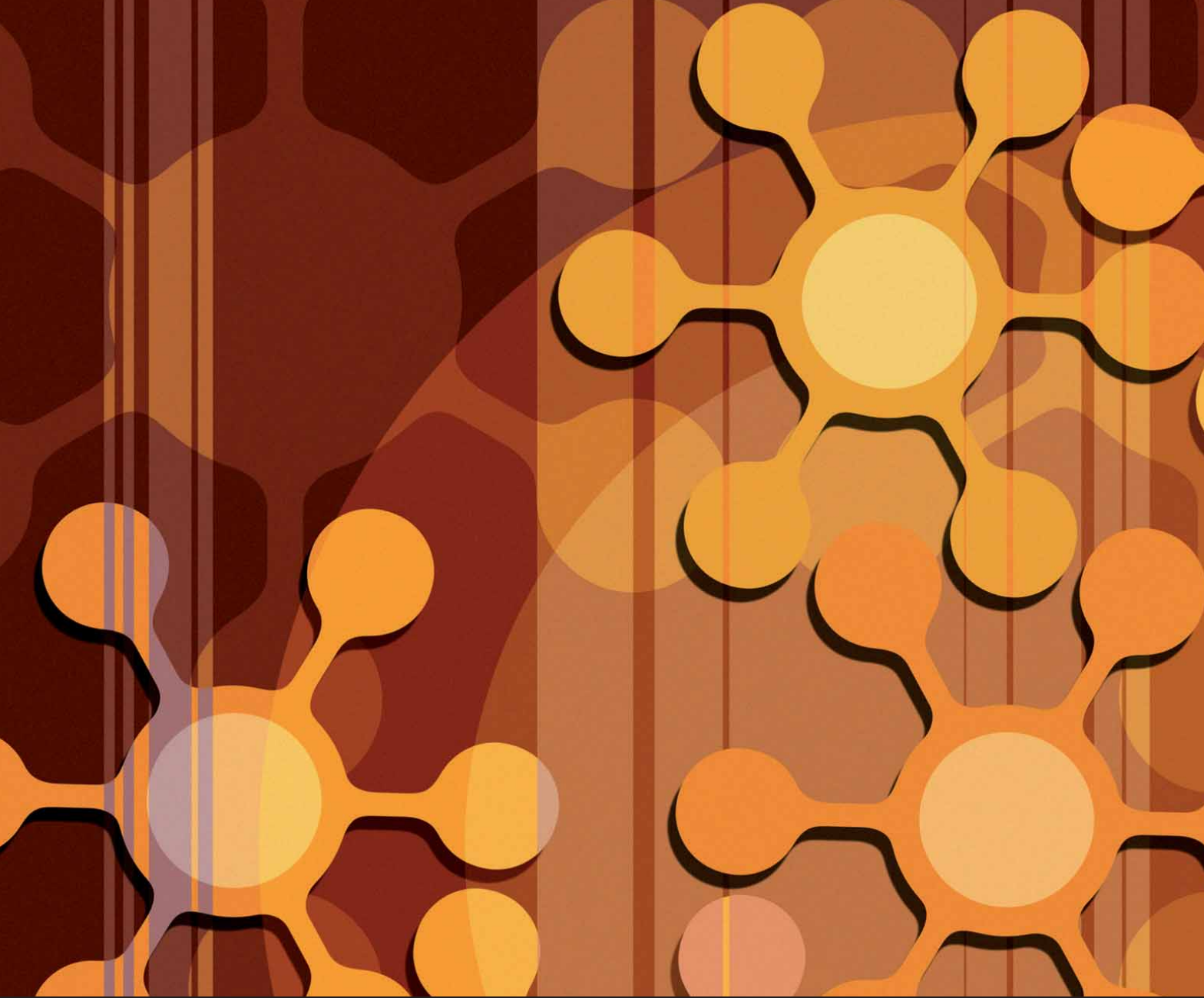
שתי קבוצות עיקריות של מנועים מולקולריים הקיימים בטבע הן:

1. מנועים סיבוביים: מנועים אלו מבצעים תנועה מכנית סיבובית. מנועים כאלו מסובבים שוטונים של חיידקים, ובכך מביאים להנעת החיידק קדימה, בדומה לדחף שיוצר מדחף של סירה. מנועים סיבוביים אחרים בתוך תאים מייצרים את מולקולות ה-ATP החשובות, המספקות את האנרגיה הנחוצה להנעת מכונות מולקולריות אחרות בתא.

2. מנועים הנעים על מסילות: מנועים כאלו מעבירים חומרי גלם שונים בכל רחבי התא, על גבי מסילות המרכיבות את שלד התא, כדוגמת מיקרו-טובולים. במנועים אחרים נעשה שימוש בסיבי ה-DNA בתור מסילות, והם מבצעים על ה-DNA פעולות שונות.

מאז שנות התשעים נערך מחקר אינטנסיבי של המנועים המולקולריים הללו, המתרכז במציאת יישומים הנדסיים לשימוש בהם. בתחום המנועים הסיבוביים המחקר מתמקד בעיקר ב-F-ATPase Synthase. בתחום המנועים הנעים על מסילות, המחקר מתמקד בעיקר בקניזין.

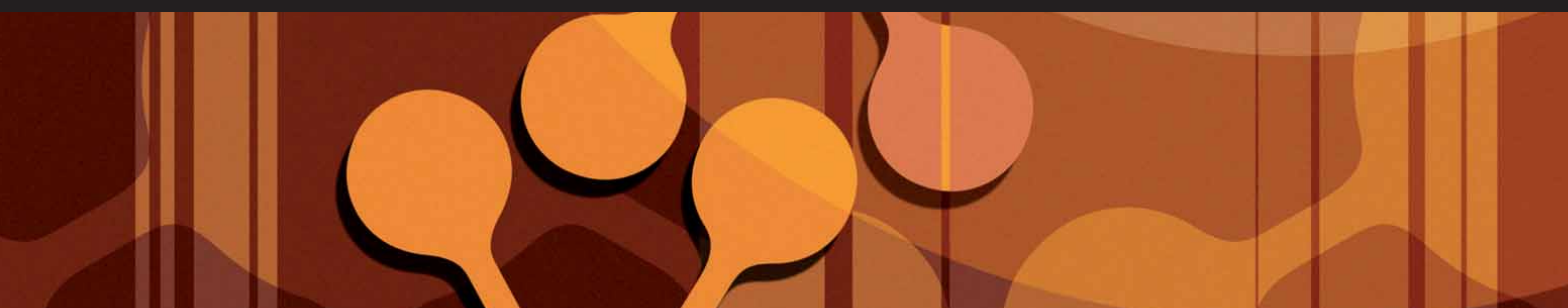


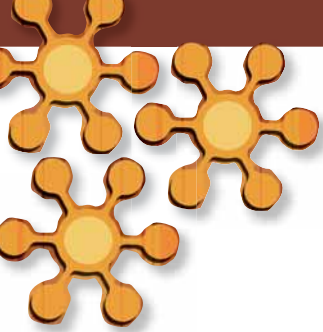


נגה לבנת ורועי צזנה

תצלום: אימל'בנק / GettyImages

ננו מן הטבע: מכונות ביולוגיות מולקולריות





דרך הפעולה של המנוע בתאים מבוססת על מעבר פרוטונים דרך הגלגל כמקור אנרגיה המסובב אותו, והמרת אנרגיה זו ליצירת מולקולות ATP עשירות באנרגיה. עם זאת, מחוץ לגוף המנוע יכול לפעול גם בדרך ההפוכה: מולקולות ATP מגיעות לראש, והוא מפרק אותן ובכך גורם לציר המרכזי להסתובב, ולסובב את הגלגל בכיוון ההפוך. גמישות זו בחומר הדלק של המנוע – מעבר פרוטונים או ATP – היא אחת הסיבות לכך שמנוע מולקולרי זה הוא כנראה הנחקר ביותר בעולם.

ב-1997 פרסם החוקר הירוויקי נוג'י (Noji) דיווח על הצלחתו לצפות בתנועת הסיבוב של המנוע. נוג'י חיבר סיב אקטיב פלואורסצנטי לציר המרכזי של המנוע, וצילם את תנועת הסיבוב של הסיב בנוכחות ATP. מחקר זה היה פריצת דרך בתחום המנועים המולקולריים והניע חוקרים רבים להתעניין בנושא.

בעקבות ניסוי זה והעניין הרב שעורר, נוצר ב-2001 השילוב הראשון של מנוע כזה הכולל חלקים אורגניים וסינתטיים. ריקי סונג (Soong) מאוניברסיטת קורנל יצר מדחף ניקל באורך של 1,400 ננו-מטר, הצמיד אותו באמצעות דבק ביולוגי לציר המרכזי של המנוע, והעמיד את המתקן כולו על עמודי סיליקון בגובה 200 ננו-מטר, כדי למנוע מהמדחפים לפגוע בתחתית. מתוך 400 מנועים כאלו שהורכבו, רק חמישה הצליחו לבצע תנועה סיבובית רצופה. עוד רבה, אם כן, הדרך ליצירת מכונות מולקולריות שיפעלו ברמת האמינות הבסיסית שהשגנו במכונות גדולות יותר. אף שהתאכזב ממספר המנועים הקטן שהצליחו לפעול, הפיק סונג מסקנה חשובה מן הניסוי. מתוך מהירות סיבוב המדחפים וידיעת אורכם, הוא הצליח להעריך את יעילות המנוע המולקולרי ולקבוע את ערכה על כ-80% – פי ארבעה מיעילות מנוע הבערה הפנימית הנמצא ברוב כלי הרכב כיום!

החוקר הייקינג ליו (Liu) השיג ב-2002 התקדמות נוספת בשליטה על המנוע הזעיר, באמצעות התקנה של "מתג הפעלה וכיבוי" במנוע. הייקינג תכנן והוסיף לאזור הראש של המנוע אתרים קושרים אטומי אבץ (Zn). כאשר האתרים הללו קושרים אליהם אבץ, המבנה המרחבי שלהם משתנה והם משתקים את יכולתו של

האנזים F-ATPase Synthase מתבסס על חלק מסתובב – החטור – המורכב מ-12 תת-יחידות המרכיבות ביחד גלגל, בדומה ל-12 מדפים של גלגל מים. כניסת פרוטון למדף אחד גורמת לגלגל להסתובב ב-30 מעלות, ולשחרר פרוטון ממדף אחר. בדרך זו, בכל סיבוב של 30 מעלות, פרוטון אחד נכנס לגלגל, ופרוטון אחר יוצא ממנו, בתנועה הדומה לזו של גלגל מים. במרכז הגלגל נעוץ ציר מרכזי, ובקצהו מקובע ראש, המוחזק בעזרת ידית כדי למנוע ממנו להסתובב ביחד עם הציר. תנועת הציר המרכזי בתוך הראש המקובע במקום היא המספקת את האנרגיה הנוחזה לפעולת הראש, אשר מושך אליו מולקולות ADP וקבוצות פוספט, ומאחד אותן למולקולות ATP. כל סיבוב שלם של 360 מעלות של הגלגל מביא לבניית שלוש מולקולות ATP.

1. החטור מורכב מ-12 תת-יחידות שביחד יוצרות גלגל, שאותו אפשר לדמות לגלגל בטחנת-מים. הגלגל מקובע בממברנה, ולצדו נמצאת תעלה שדרכה יכולים לעבור פרוטונים. הפרוטונים נכנסים לכל תת-יחידה בגלגל דרך התעלה, ויוצאים מתוך תת-יחידות בצדה האחר של התעלה. כל כניסה של פרוטון בצד האחד ושחרור של פרוטון מהצד האחר מביאים לסיבוב של הגלגל ב-30 מעלות.

2. אפשר לראות כי בתוך הגלגל מקובע ציר מרכזי, המסתובב גם הוא ביחד עם הגלגל. בקצה האחר של הציר נמצא "ראש" האנזים (בצהוב וסגול). ראש זה אינו מסתובב, מכיוון שהידית (בצהוב וחום) מחזיקה אותו מן הצד בעמדה קבועה, ואינה מאפשרת לו להסתובב. כאשר הציר המרכזי מסתובב בתוך הראש, הוא גורם לשינוי תצורה של תת-יחידות המרכיבות את הראש, ובכך מאפשר להן לבצע את פעולתן – לקשור מולקולות ATP ופוספט, ולהפוך אותן למולקולות ATP – מטבע האנרגיה המניע את החיים.

3. ראש האנזים הוא החלק המייצר את ה-ATP, או מפרק אותו. הראש מכיל שלושה אתרים שכל אחד מהם יוצר ATP בפני עצמו, בעקבות תנועת הציר. בעקבות כל סיבוב שלם של הציר בתוך הראש, נוצרות שלוש מולקולות ATP.

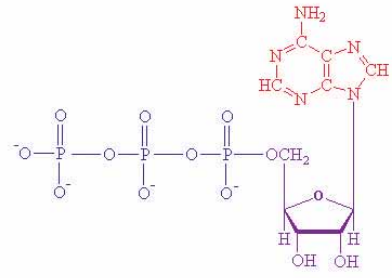
4. הציר המרכזי מסתובב בתוך הראש במעברים של 120 מעלות, ובכל סיבוב כזה עובר כל אחד מהאתרים שבראש למצב אחר: 1. מצב פתוח (Open, O) – האתר קושר מולקולת ADP ומולקולת פוספט, שהן חומרי הגלם ליצירת מולקולת ATP. 2. מצב משוחרר (Loose, L) – האתר מקר את חומרי הגלם זה לזה. 3. מצב הדוק (Tight, T) – האתר מפעיל לחץ גדול מספיק כדי לגרום לתגובה בין חומרי הגלם, שתביא ליצירת מולקולת ATP שלמה



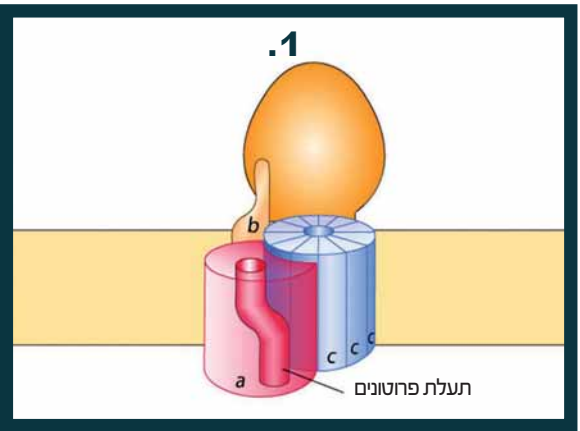
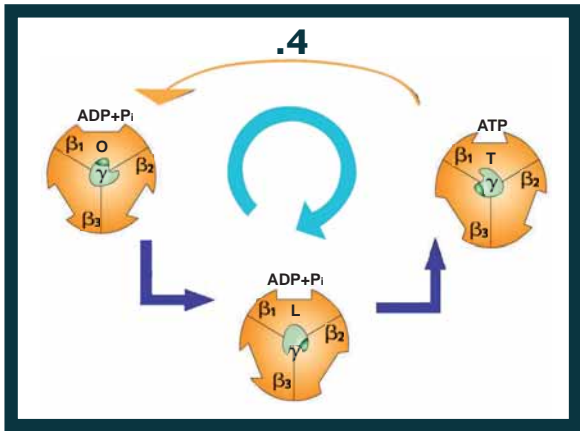
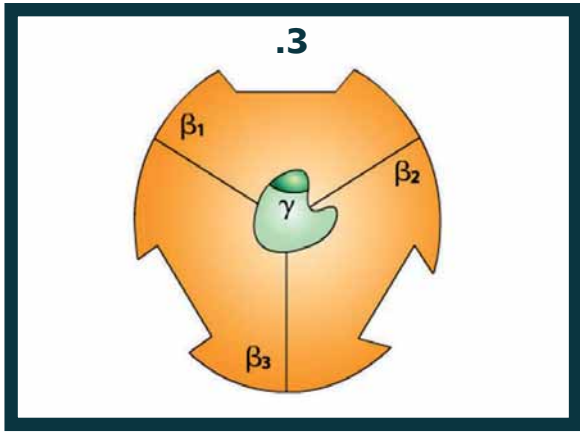
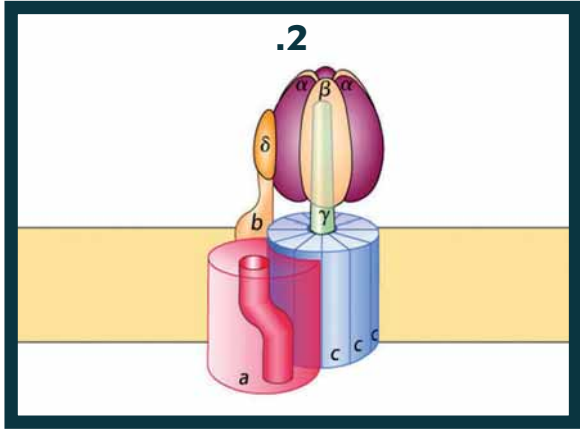


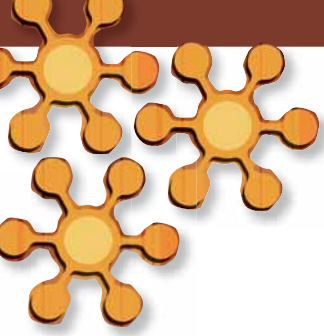
מנועים סיבוביים: F-ATPase Synthase

מקור השם ATPase הוא ביכולתו של האנזים לפרק את מולקולות ה-ATP (אדנוזין טרי-פוספט) ל-ADP (אדנוזין די-פוספט) ולקבוצת פוספט (זרחה) בודדת. מקור המילה Synthase הוא ביכולתו של אותו אנזים לבצע גם את הפעולה ההפוכה – לחבר אותם מרכיבים למולקולת ATP שלמה. עיקר פעולתו של האנזים הוא בכיוון יצירת ATP – מולקולות עתירות אנרגיה כימית המשמשות להנעת מכונות מולקולריות אחרות (ראו אזור).



למעלה: מולקולת ATP, אדנוזין טרי-פוספט, המורכבת מהבסיס החנקני אדינין (בכתום), מהסוכר ריבוז (בסגול) ומשלוש קבוצות פוספט (זרחה, בכחול). הסרת קבוצת הפוספט הקיצונית היא תהליך משחרר אנרגיה, שתוצריו הם ADP (אדנוזין די-פוספט) וקבוצת פוספט בודדת. ולהפך – קשירת קבוצת פוספט בודדת ל-ADP היא תהליך צורך אנרגיה שבו נוצר ATP, אדנוזין טרי-פוספט.





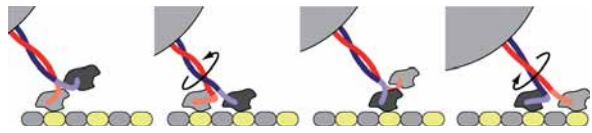
שחוקרים רבים שואפים למצוא דרך לשלב אותם בהנדסה. את אחד המחקרים המרשימים ביותר בכיוון זה ערכו כבר ב-1999 לורן לימבריס (Limberis) וראסל סטיוארט (Stewart). צמד החוקרים טען כי אפשר לחבר כמעט 100,000 קינזינים לשטח של מיקרו-מטר רבוע אחד. מכיוון שכל מנוע ייצר כוח של כ-6 פיקו-ניוטון, סך כל הכוח שיפעילו הקינזינים יהיה בסדר גודל של עשרות ננו-ניוטון למיקרו-מטר רבוע. כוח כזה אמור להיות מסוגל להניע עצמים בסדר גודל של מיקרו-מטרים. עצמים אלה יכולים להיות גלגלי שיניים, ידיעות, מיקרו-משאבות, מיקרו-גנרטורים ועוד.

כדי להוכיח את הטענה שקינזינים רבים יכולים לפעול יחד גם כשהם מסודרים בצפיפות זה לצד זה, ערכו החוקרים ניסוי מרתק במיוחד. הם הצמידו מיליוני קינזינים לשבב סיליקון ששטחו 10 מיקרו-מטרים על 10 מיקרו-מטרים, ועוביו 5 מיקרו-מטרים. אחר-כך צפו החוקרים בשבב בעזרת מיקרוסקופ אור, כאשר הוא נע על גבי מסילות מיקרו-טובולים שהוצמדו מראש לזכוכית נושאת של מיקרוסקופ. השבב נע במהירות של 800 ננו-מטר לשנייה על גבי הזכוכית, הסתובב מפעם לפעם, ואף התהפך כאשר אחת מפניותיו נתפסה במשטח. השבב שהתהפך המשיך כמובן לנוע, שכן הקינזינים היו פזורים במידה שווה גם על "גבו" של השבב...

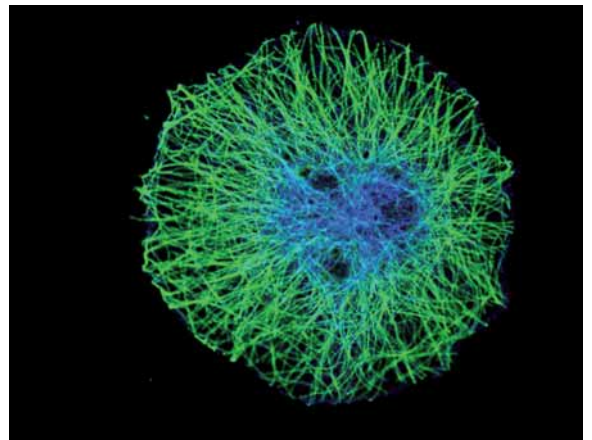
סוג אחר של מחקר בקינזינים הוא ליצירת "פסי הנעה". כאשר מחברים את הקינזינים למשטח בעזרת קצה הגבעול, הם נותרים כששני ראשיהם פונים כלפי מעלה. כל מיקרו-טובול שיונח על גבי מסילה שכזו ינוע קדימה באמצעות הראשים הנעים של הקינזינים, בדומה לכוכב רוק הקופץ מהבמה ונע בקהל על כתפיהם וזרועותיהם של מעריציו. במבט מלמעלה נראה את המיקרו-טובול נע כנחש על גבי המסילה, אך למעשה המסילה היא המפעילה את הכוח המניע, באמצעות קינזינים רבים הדוחפים את המיקרו-טובול קדימה. מסתבר כי למסילה כזו כבר הומצאו שימושים רבים.

1. פתיחת סליל DNA: ב-2003 חיבר סטפן דיאז (Diez) קצה אחד של גדיל DNA למיקרו-טובול, ואת קצהו האחר – למיקרו-טובול אחר. את שני המיקרו-טובולים הניח על מסילות קינזינים, כך שהם נמשכו לשני כיוונים מנוגדים – וגדיל ה-DNA נפרם ונפתח.

נע הקינזין עשויה ממיקרו-טובולים – סיבים בקוטר של 24 ננו-מטר בערך. המיקרו-טובולים מתוחים בין מרכז התא לבין ממברנת התא. חלבונים ממשפחת הקינזינים והדינאמינים מהלכים על המיקרו-טובולים ונושאים משאות ומטענים בכל רחבי התא.



הקינזין הוא חלבון בעל שני ראשים, שבעזרתם הוא מתחבר למסילה ו"הולך" עליה



תא של דחזופילה, שהמיקרו-טובולים מסומנים ב- DNA וה-DNA – בכחול. אפשר לראות שהמיקרו-טובולים נמתחים בין מרכז התא לבין הממברנה שלו

יתרונם הגדול של הקינזינים הוא ביציבותם. הם מסוגלים לנוע במהירות של 800 ננו-מטר לשנייה ולעשות מאות צעדים בטרם יתנתקו ויפלו מהמסילה. כל צעד שלהם מייצר 6 פיקו-ניוטון – כוח עצום ביחס לגודלם. מכיוון שכך, תפקידם בתא הוא נשיאת משאות כבדים ואברונים גדולים במיוחד. תכונותיהם המרשימות של הקינזינים אחראיות לכך,





המנוע להסתובב, בדומה למקל הנתקע בגלגל ומונע את סיבובו. ואכן, בניסויים שנעשו במנוע המולקולרי המשופר, נמצא שהוא הפסיק להסתובב ברגע שהוסף אבץ לתמיסה. המנוע חזר להסתובב כאשר הוסיפו לתמיסה את החומר PNT (פְּנָאנְתְרוֹלִין), שמשך אליו את האבץ. כאשר יצא האבץ מן האתרים שבמנוע, הם חזרו לצורתם הרגילה והלא-מפריעה, ואפשרו למנוע להמשיך להסתובב.

מנועים סיבוביים – מתיאוריה למעשה

מנועים מסתובבים מולקולריים יכולים לשמש אותנו בתחומים רבים של הנדסה. כמה משימושיהם האפשריים:

1. כממירי כוח: מנועים המשתמשים בדלק ביולוגי-כימי (מולקולות ה-ATP) ליצירת כוח סיבובי. אף שכרגע אין לממיר כוח זה שימוש בתעשייה, עם התקדמות התחום נצפה למצוא יותר ויותר מכשירים העושים שימוש במקורות אנרגיה ביולוגיים-כימיים.

2. כננו-מאוררים: תעשיית הננו-אלקטרוניקה המתפתחת זקוקה נואשות לאמצעי קירור בסדרי הגודל הזעירים שבהם מדובר. בעזרת חיבור מדחף סיבובי למנוע, אפשר למצוא פתרון לדרישה זו של התעשייה.

3. כננו-משאבות: מדחף שיורכב בצורה הנכונה על גבי המנוע יוכל להדוף מולקולות. בדרך זו אפשר ליצור ננו-משאבה שתנקה תמיסות ממולקולות בגדלים מסוימים.

4. כננו-מדחפים למטרות הנעה: ננו-מדחפים כאלו יוכלו לשנע חומרים בתוך תמיסות – ואפילו להניע "צוללות" באורך של כמה מאות ננו-מטרים בזרם הדם. מכונות עתידניות זעירות מעין אלה יוכלו לתפקד בניטור זיהומים, בשינוע חומרים ואפילו בתיקון ובשיפוץ תאים.

מבין האפשרויות הללו, דווקא הרביעית – העתידנית שבהן – נראית קרובה למימוש, ולראיה מחקר מ-2006, שערך טינג סו (Su) מבייג'ין. סו השתמש בכרומוטופורים – בוטיות זעירות מכילות צבען (פיגמנט). לכרומוטופורים תכונה ייחודית, הגורמת להם להעביר פרוטונים מן החוץ אל פנים הבוטיות כאשר הם נחשפים לאור. כתוצאה מכך נוצר ריכוז פרוטונים גבוה יחסית בתוך הכרומוטופורים. סו חיבר לדופנות הכרומוטופורים מנועים מולקולריים רבים

מסוג F-ATPase Synthase, המונעים באמצעות הפרוטונים שיוצאים מהכרומוטופור דרך "גלגל המים" של המנוע. הוא ניתק את הידית שקיבעה את ראשו של המנוע, וחיבר לראש המנוע נוגדנים ששימשו כמדחפים זעירים.

התוצאה הסופית היתה מעין "צוללת" שכל קוטר ננו-מטרים אחדים. כאשר נחשפה הצוללת לאור, התמלא הכרומוטופור בפרוטונים, אשר יצאו מתוכו דרך המנוע המולקולרי. מעבר הפרוטונים הביא לסיבוב של הראש ביחד עם הכנפונים הצמודים אליו, ובכך נוצר כוח הנעה. סו חיבר צוללות רבות כאלה לסיב אקטין שאורכו 10 מיקרו-מטרים, וצילם את הסיב משייט בתמיסה במהירות של עד 25 מיקרו-מטר לשנייה – מהירות גבוהה בהתחשב בסדרי הגודל שבהם מדובר.

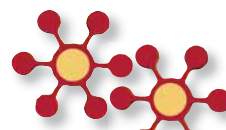
מחקרים אלה ואחרים חשפו רק את קצה-קצהו של הפוטנציאל הגלום במנוע ה-F-ATPase. לא נותר לנו אלא להמתין ולראות, לאן ייקח אותנו העתיד ולאן יוביל הזרם – בסיועו של המדחף הזעיר, כמובן.

מנועים הנעים על מסילות: הקינזין

קיימים מנועים רבים הנעים על מסילות, וכולם חיוניים לפעילותו התקינה של התא. המורכבים מכולם הם כנראה מנועי הפולימראזות, הנעים על מסילת ה-DNA כקטרים גדולים, ומשכפלים את רצף ה-DNA של התא. מנועים אלו מורכבים מתת-יחידות רבות, הקובעות היכן יתחיל מסעו של הפולימראז והיכן יתנתק מה-DNA. הפולימראז מכיל אפילו תת-יחידה טבעתית המעגנת אותו ל-DNA, כדי לוודא שלא ירד מן המסילה בעת ביצוע תפקידו.

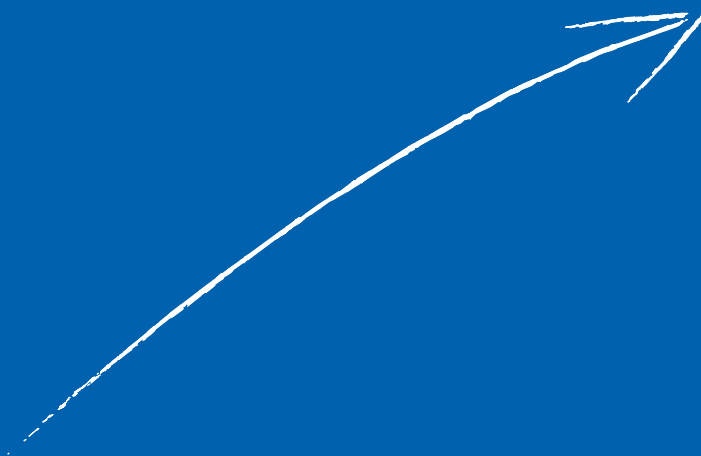
ריבוי תת-היחידות של הפולימראז אכן מרשים, אך לרוע המזל הוא גם מקשה את חקר המנוע. לפיכך החוקרים מעדיפים להתרכז במנועים פשוטים יותר הנעים על מסילות, כגון החלבון קינזין.

הקינזין מורכב משני ראשים זהים, המתחברים באמצעות שני צווארים לגבעול ארוך. הקינזין מתחבר למסילה בעזרת שני הראשים שלו, ומתקדם לאורכה ב"הליכה" המזכירה את הליכתו של אדם – "רגל אחר רגל". בקצה הגבעול הקינזין נושא את המטען שלו: בוטיות המכילות חומרי גלם שונים, המיועדים למקומות שונים בתא. המסילה שעליה





למי
שהמוצע שלו
הרבה
מעל הממוצע



הנבחרים תוכנית המצטיינים של בר-אילן

אוניברסיטת בר-אילן שמחה לבשר על פתיחת המסלול החדש לסטודנטים מצטיינים לתואר ראשון. **הטובים שבטובים** - יתקבלו בעלי ציון פסיכומטרי גבוה (מעל 740) וממוצע בגרות גבוה (מעל 110) **עד לדוקטורט** - מסלול לימודים מיוחד מהתואר הראשון עד לדוקטורט בתוך 6 שנים **כל האפשרויות פתוחות** - גמישות אקדמית מוחלטת בבחירת מסלולי הלימוד **ועוד יתרונות:** ליווי אקדמי אישי, השתתפות בכנסים מדעיים, פטור משכר לימוד, מלגות הצטיינות, מלגות קיום/דיור, חנייה בשטח האוניברסיטה ועוד.

כיצד מתקבלים לנבחרת?

פרטים במזכירות האקדמית:

טל' 03-6357348 • mishanm@mail.biu.ac.il

www.biu.ac.il

אוניברסיטת בר אילן - מסורת של מצוינות



רועי צזנה הוא ביולוג וחוקר במסגרת תואר שני בטכניון, במסלול להנדסת ננו-טכנולוגיה וננו-מדעים. מרצה בנושאי מדע שונים ומארגן פעילויות בנושאי מדע לציבור הרחב.

נגה לבנת היא מהנדסת ביו-רפואה וחוקרת במסגרת תואר שני בטכניון במסלול להנדסת ננו-טכנולוגיה וננו-מדעים.

לקריאה נוספת:

נוסח הרצאה על ATP synthase מתוך אתר אוניברסיטת אילינוי באורבנה-שמפיין:
<http://www.life.uiuc.edu/crofts/bioph354/lect10.html>

מתוך אתר פרס נובל: על פרס נובל בכימיה לשנת 1997, שהוענק בחציו לפול ד. בויר ולג'ון א. ווקר על פענוח המנגנון האנזימי לסינתזת ATP:
http://nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1997/illpres/index.html

The Atp Synthase—A Splendid Molecular Machine, Paul D. Boyer, *Annual Review of Biochemistry*, Vol. 66: 717-749.

How Molecular Motors Work, James A. Spudich, *Nature* 372, 515-518.

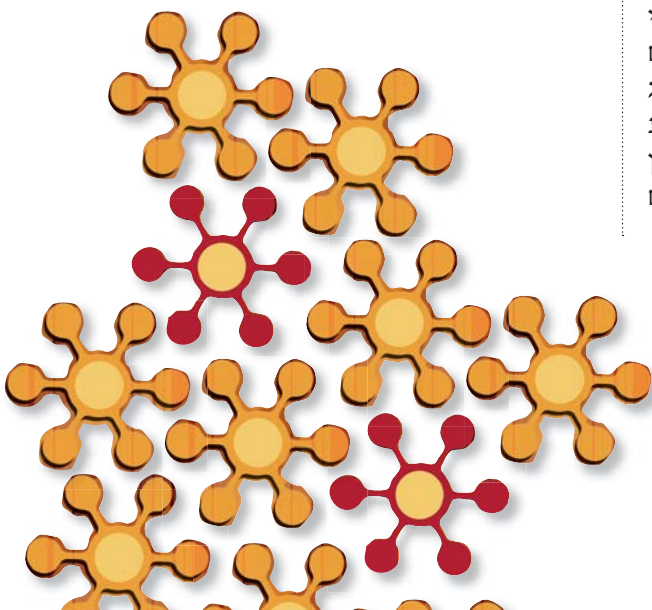
Molecular motors: from one motor many tails to one motor many tales. Lawrence S.B. Goldstein. *Trends in Cell Biology*, Vol. 11, Issue 12, 477-482.

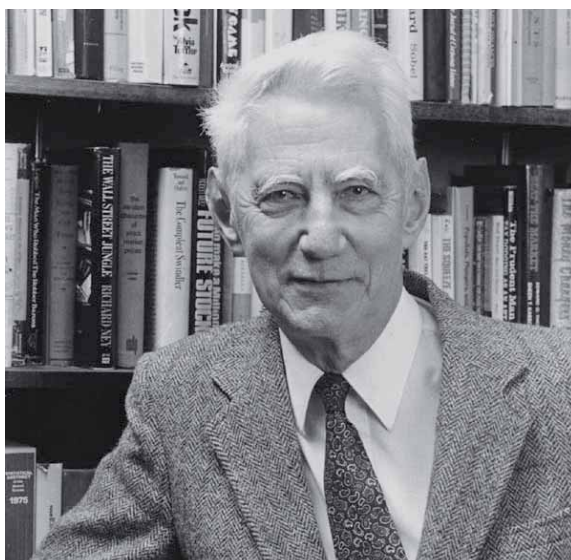
2. מדידת הכוח המופעל בין קולטנים והמולקולות המחוברות אליהם: ב-2002 חיבר הנרי הס (Hess) קולטן (רצפטור) למיקרו-טובול אחד, ואת מולקולת היעד של אותו קולטן – למיקרו-טובול אחר שהיה מקובע בקצהו, ושימש כתמוכה בעלת קשיחות ידועה. הוא הניח לשני המיקרו-טובולים לגעת זה בזה, כך שמולקולת היעד יכלה להתחבר לקולטן, ואז ניווט את המיקרו-טובול עם הקולטן כך שיתרחק מהתמוכה. כדי להישאר קשורה למיקרו-טובול עם הקולטן, התמוכה נאלצה להתכופף עד שהכוחות היו גדולים מדי והקולטן התנתק מהמולקולה שהיתה קשורה לתמוכה. על-ידי צילום האירוע בזמן אמת, הצליח הס לחשב מה מידת הכוח המחבר את הקולטן למולקולת היעד.

3. מיון של מולקולות בודדות: ב-2006 יצר מרטין ג.ל. ואן דן איובל (Van Den Huevel) מסילת קינזינים שמשני צדיה היה אפשר להפעיל מתח חשמלי. כאשר הופעל המתח, הוא השפיע על קצות המיקרו-טובולים, וגרם להם לסטות לכיוון שממנו הופעל המתח. ואן דן איובל פיזר מיקרו-טובולים שסומנו בצבעים שונים על גבי משטח קינזינים, ובעזרת מיקרוסקופ פלואורסצנטי הצליח להפעיל את הזרם בצורה סלקטיבית, לגרום למיקרו-טובולים השונים לנוע בכיוונים שונים ולמיין אותם לפי צבעיהם. אפשר ליישם שיטה זו גם למיון מולקולות קטנות יותר ממיקרו-טובולים, בתנאי שהן יושבות על גבי המיקרו-טובול.

העתיד

אפשר לחשוב על המחקרים ההנדסיים שהוזכרו, ועל דומיהם, כעל המטוס הראשון של האחים רייט – לא יותר מאופניים בעלי כנפי עץ מנוסרות בגסות. אין ספק שגם כאן לפנינו אבני דרך חשובות באמצעי ההנעה – אך בסדרי הגודל הננו-מטריים. בתוך פחות ממאה שנה, המצאתם ה"פרימיטיבית" של האחים רייט השתכללה עד לבואינג 747 העצום, המסוגל לשאת מאות נוסעים במהירויות שהממציאים המקוריים אף לא חלמו עליהן. רק עם הזמן נדע לאן יישאו אותנו – ואת האנושות כולה – המנועים המולקולריים-ביולוגיים למיניהם. ■





קלוד שנון. אבי עידן המידע

ואם לא די בכך, הרי ששנון היה שותף בחזון ובכתיבה של "מסמך היסוד" של הענף המדעי החדש הנקרא "אינטליגנציה מלאכותית" (Artificial Intelligence), שעשה בשנות החמישים את צעדיו הראשונים, וכיום הולך ותופס מקום מרכזי במערכות עיבוד אוטומטיות. (כתחביב, בנה שנון את אחת המכונות הלומדות הראשונות, ופרסם את המאמר הראשון מאז ומעולם על תכנות מכונה למשחק שחמט.)

מאוחר יותר פיתח מודלים מתמטיים לניתוחים פיננסיים, שהכניסו אותו, כבדרך אגב, לרשימת חלוצי הנושא של מתמטיקה פיננסית, שבוגריו נמצאים כעת בכל משרד המכבד את עצמו בוול סטריט (וגם הביאו לו רווחים נאים). בשעות הפנאי – שהיו רוב שעותיו, מכיוון שתמיד עסק רק במה שעניין אותו מבלי להתייחס לחשיבותו – עסק, בין השאר, בלהטוטנות (Juggling), ופיתח כמה חוקים שהפכו אותו ליקיר הענף.

אין לי ספק שבפרספקטיבה היסטורית, יהיה קלוד שנון מוכר ומוערך כ"אבי עידן המידע", כפי שאנחנו מכירים ומוקירים היום אישים כיוהנס גוטנברג (Gutenberg) – "אבי הדפוס",

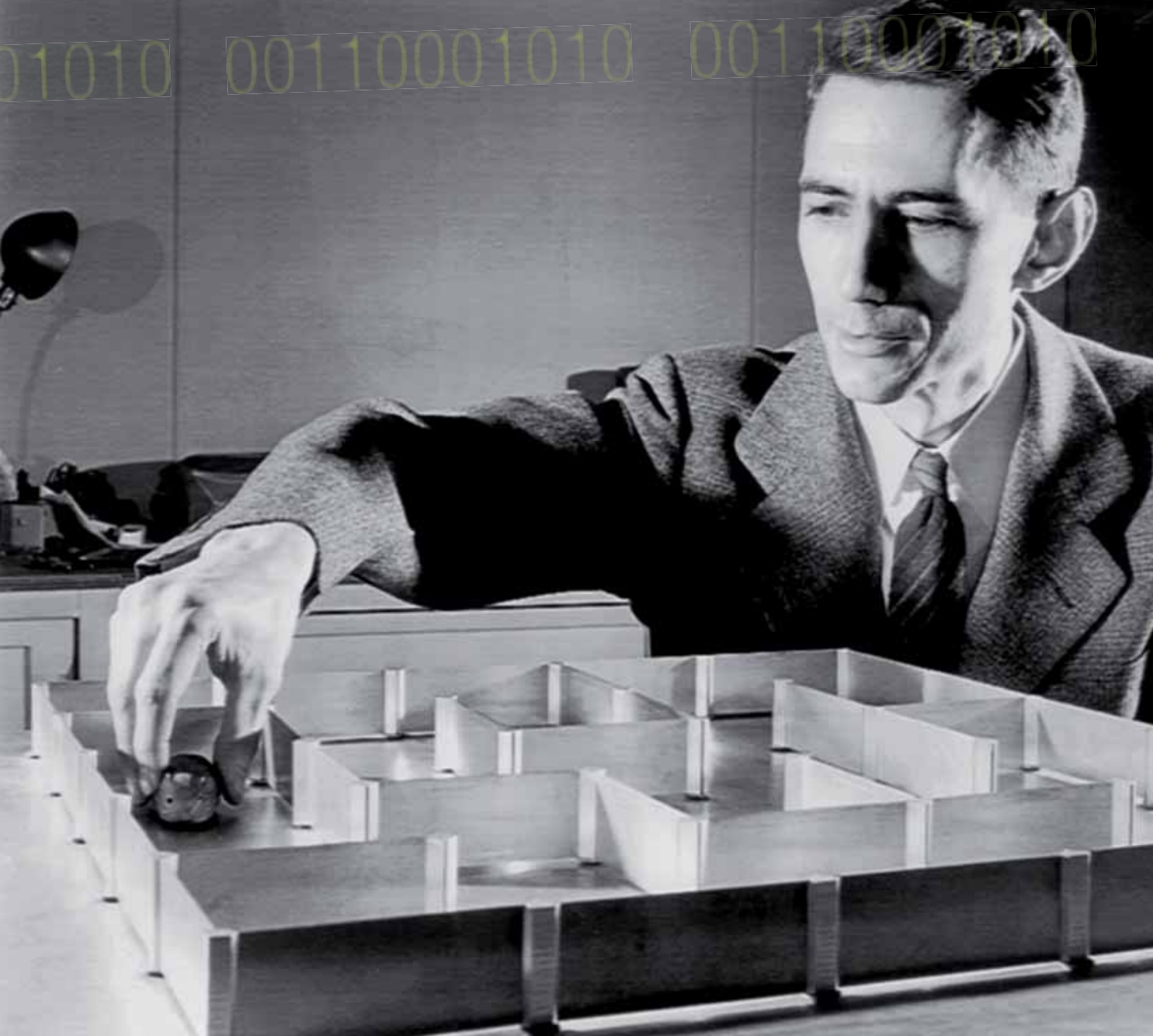
לא בכל דור, אפילו לא בכל מאה, זוכה אדם לצפות במו עיניו בכניסה לעידן היסטורי חדש. במחצית הראשונה של המאה ה-20 החל עידן חדש בפיזיקה, וכל ילד "מכיר" את אלברט איינשטיין. מאז סוף המחצית השנייה של אותה המאה, אנו חווים בכל יום את כניסתנו לעידן חדש, עידן המידע (The Information Age), וכמעט איש אינו יודע מיהו ה"איינשטיין" של העידן החדש – אבי עידן המידע.

המדען הדגול הזה נפטר לפני שבע שנים בלבד, אך למרבה הפליאה, אם ייערך משאל בין בוגרי אוניברסיטאות "מיהו שָנון?", התשובות השכיחות ביותר תהיינה כנראה "כוכב פופ" או "לא יודע". האלמוניות של השם קלוד שנון (Shannon) בקרב הציבור הרחב תמוהה שבעתים מכיוון שהאיש לא היה במקרה "האדם הנכון בזמן הנכון" כשהבשילו התנאים לעידן החדש, אלא במו ידיו – יותר נכון מוחו – יצר, כמעט יש מאין, את התשתיות הבסיסיות לעידן זה.

הישגיו המדעיים היו פריצות דרך מחשבתיות מקוריות ומהפכניות, וחלקם חוללו רעידות אדמה של ממש בעולם הטכנולוגי של תקופתם. בגיל 22 פרסם שנון את עבודת המסטר שלו, הנחשבת בעיני רבים לעבודת המסטר החשובה ביותר שפורסמה מעולם, והפכה אותו ל"אבא" בפעם הראשונה – אבי תורת המיתוג (Switching Theory). תורה זו היא אבן יסוד בתכנון של כמעט כל כרטיס אלקטרוניקה עד עצם היום הזה. ב-1948, בהיותו בן 32, פרסם את מאמריו המונומנטליים בנושא מידע ותקשורת, והיה לאב בפעם השנייה – אביה של תורת המידע, או תורת האינפורמציה (Information Theory). אי-אפשר היום לחשוב על פיתוח רשת תקשורת כלשהי, כדוגמת הטלפוניה הסלולרית והאינטרנט, מבלי להתבסס על תורה זו.

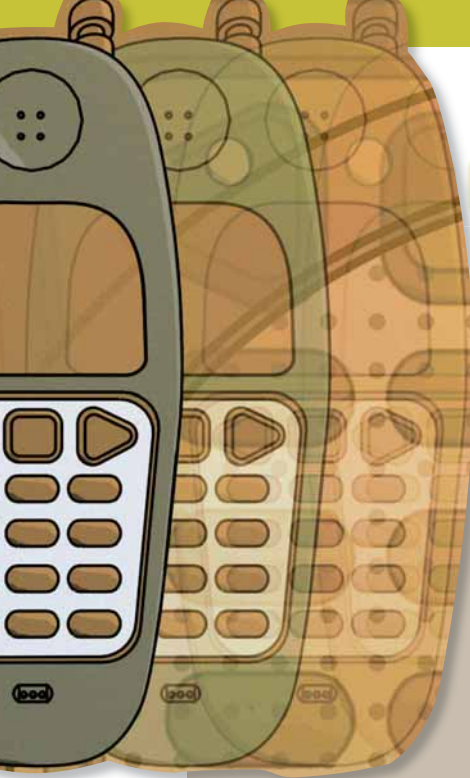
בין לבין, בסוף שנות העשרים שלו, במהלך מלחמת העולם השנייה, פיתח שנון תיאוריות הצפנה מתמטיות שסייעו למערכת הביון של ארצות-הברית, וצירפו אותו מאוחר יותר לרשימת החלוצים של תורת ההצפנה המודרנית (שבזכותה, לדוגמה, אפשר לתקשר בצורה מאובטחת באינטרנט, דרך לוויינים וכדומה).





אמיר קליסמן

האב הלא-נודע של עידן המידע



0110001010 0011000101

המיתוג כמותג (מתמטי) ייצוג פעולות לוגיות על-ידי מפסקים והסימונים המקובלים: שערים

בניח שמתג פתוח מייצג "0" ("לא" לוגי) ומתג סגור מייצג "1" ("כן" לוגי)

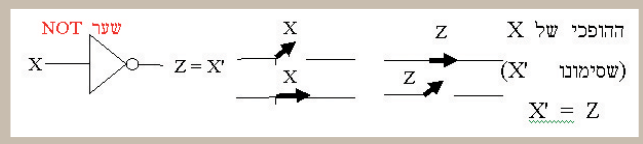
הפעולה מימוש במתגים הסימון הלוגי ("שערים", gates)



הפעולה הלוגית: אם לפחות אחת הכניסות X ו/או Y היא "1" ("כן"), אזי היציאה Z תהיה "1".
דוגמה: כאשר הדלת כן סגורה במשרד X (מתג X סגור) ו/או כן סגורה במשרד Y (מתג Y סגור) כן יידלק שלט "תפוס" ($Z = 1$).



הפעולה הלוגית: רק אם שתי הכניסות X וגם Y הן "1" ("כן") אזי היציאה Z תהיה "1".
דוגמה: רק כאשר הדלת במשרד X כן סגורה (מתג X סגור) וגם הדלת במשרד Y כן סגורה (מתג Y סגור), יידלק שלט "תפוס" ($Z = 1$).



הפעולה הלוגית: היציאה Z תהיה תמיד הפוכה לכניסה X: אם הכניסה X היא "1" ("כן") אזי היציאה Z תהיה "0" ("לא"), ולהפך.
דוגמה: כאשר הדלת במשרד X לא סגורה (מתג X פתוח) יידלק שלט "פנוי" ($Z = 1$), וכאשר הדלת סגורה, השלט לא יידלק.

כמעט בכל רכיב אלקטרוני יש אלפי שערים כאלו, המחוברים זה לזה בצורה המבצעת פעולות לוגיות מורכבות מאוד. ■



אייזק ניוטון – "אבי המכניקה", גרגור מנדל (Mendel) – "אבי הגנטיקה", איינשטיין ואחרים שחוללו פריצות דרך שתרמו לשינוי משמעותי בהיסטוריה האנושית.

בלי חוגים למחוננים

קלוד אלווד שנון נולד בשנת 1916, וגדל בעיירה הקטנה גיילורד שבמדינת מישיגן בארצות-הברית. אמו היתה מורה ומנהלת בתיכון המקומי, ואביו היה איש עסקים ובורר משפטי, ובזמנו הפנוי חובב מתמטיקה. לזוג נולדו שני ילדים, קלוד ואחותו קתרין.

איך גדל ילד מחונן בכפר נידח בצפון ארצות-הברית בתחילת המאה ה-20? כמו כל הילדים האחרים. בלי בתי-ספר למחוננים ותכניות העשרה, אבל עם המון סקרנות, ובעיקר – משפחה התומכת בשטחי התעניינותו וקצת... תורשה מתאימה. בדומה לקרוב משפחתו הרחוק, הממציא הידוע תומס אדיסון (Edison), וסבו של שנון, חקלאי שהמציא כלים חקלאיים שונים וזיכר אף כממציא מכונת הכביסה, גילה קלוד שנון הילד התעניינות במדע ובטכנולוגיה. הוא בנה דגמים, פירק מכשירי חשמל ורדיו וניסה להבין כיצד הם פועלים. כשרצה לתקשר עם חברו בקצה האחר של העיירה, בנה מכשירי מורס וחיבר אותם דרך חוטי המתכת של גדרות הבתים. כתלמיד תיכון, הרוויח דמי כיס מחלוקת עיתונים ותיקון מכשירי רדיו, אבל תקופה זו היתה קצרה, מכיוון שבגיל 16 כבר סיים את לימודיו התיכוניים. הוא נפרד מביתו ועבר לאוניברסיטת מישיגן, שאותה סיים בהצטיינות בשני כיווני הלימוד העיקריים שיעסיקו אותו במשך כל חייו המקצועיים: מתמטיקה והנדסת חשמל.

סוף המדע: הכל כבר התגלה?...

כדי להעריך את גודל הישגיו של שנון, נתאר את התקופה המדהימה של תחילת המאה ה-20, שבה נולדו רבים טוענים שבסוף המאה ה-19 ובתחילת המאה ה-20 התחוללה המהפכה המדעית והטכנולוגית המרשימה ביותר בהיסטוריה (אף יותר מהמהפכה של זמננו): בתוך דור אחד התרחש המעבר מתחבורה של סוסים למכוניות ומטוסים, מתאורת נרות למנורות חשמל, מהתכתבות אטית של מכתבים

לשיחה מיידית בטלפון, מקריאת ספרים ועיתונים להאזנה לרדיו וצפייה בסרטים. לרבים, אפילו מהמדענים הבולטים באותה התקופה, היתה הרגשה ש"הכל כבר התגלה".

מה כבר יכול בוגר אוניברסיטה טרי, בן עשרים בלבד, לתרום לעולם ש"יודע הכל"? זה, כנראה, לא הטריד את שנון לקראת סיום לימודיו, אלא מה יעשה בחופשת הקיץ הקרובה. כשעבר במקרה ליד לוח מודעות באוניברסיטת מישיגן, ראה מודעה המציעה עבודת קיץ ב-MIT, המכון הטכנולוגי של מסצ'וסטס בבוסטון. העבודה היתה שגרתית למדי, אבל קרצה למהנדס והמתמטיקאי הצעיר מכיוון שהיתה בסביבה טכנולוגית חדשנית ביותר – אחד המחשבים האנלוגיים המתקדמים בעולם דאז. היה זה מחשב ענקי ומסורבל, ש"תוכנת", בין השאר, על-ידי מערכת מתגים חשמליים מסובכת. תפקידו של שנון היה להכין את המערכת לפי דרישות החוקרים שהסתייעו בו במחקריהם.

המפתח להצלחה – המיתוג הנכון

תכנון רשת המתגים שתבצע את החישובים הרצויים היה עבודה די מתישה ומשעממת, שהתבססה בעיקר על ניסוי וטעייה. מצב זה עורר את שנון לחשוב איך אפשר למצוא את הפתרון הנכון בשיטה מדעית מוכחת. בתובנה גאונית הבין, שאפשר להתבסס על תיאוריה מתמטית ישנה של המתמטיקאי והפילוסוף האנגלי ג'ורג' בול (Boole), שנפטר כ-80 שנה לפני כן, ולהתאימה לדרישות ההנדסיות של מערכות מיתוג.

תיאוריית המיתוג של שנון התפרסמה ב-1938 ועוררה מיד עניין עצום, בעיקר בחברות הטלפוניה, שהתפתחו במהירות באותן השנים. כיום, למעשה כמעט כל רכיב אלקטרוני מבוסס על מערכות עצומות של אלפי ואפילו מיליוני מתגים זעירים, אשר אי-אפשר לתכננם בלי להתבסס על תיאוריית המיתוג של שנון.

בסופו של אותו המאמר, שפורסם כשהמחשבים הדיגיטליים היו עדיין בגדר דמיון פרוע, הוא מביא דוגמה, לראשונה בהיסטוריה, של חומרה אפשרית למחשוב מודרני דיגיטלי: מימוש פעולת חיבור שני מספרים המיוצגים בצורה בינארית (על-ידי "0" ו-"1") באמצעות רשת של מתגים

איך מודדים אי-ודאות?

דורון ואחיינו הקטן אמיתי משחקים במשחק הזה: יש קופסה ובה 8 כדורים ב-8 צבעים שונים, הידועים למשתתפים מראש. אמיתי בוחר באקראי כדור אחד, ודורון צריך לגלות את צבע הכדור שבחר. ההסתברות לנחש היא $1/8$. בתקופתו של שנון, מושג ההסתברות היה כמובן ידוע לכל. שנון פיתח מושג חדש: מידת אי-הוודאות לגבי הכדור הנבחר. במקרה זה, מידת אי-הוודאות של דורון, המנחש, היא 3. מדוע? מכיוון שעליו לשאול 3 שאלות "בינאריות", כלומר שאלות שהתשובה עליהן היא רק "כן" או "לא", כדי לדעת בוודאות מי נבחר. למשל, המנחש מחלק את הכדורים, לעיני כל, לשתי קבוצות שוות א' ו-ב', ושואל: "האם הכדור שנבחר נמצא בקבוצה א'?". התשובה מצמצמת את אי-הוודאות שלו ל-4 כדורים. באופן דומה, הוא מחלק את 4 הכדורים שנשארו לשתי קבוצות של 2 כדורים ג' ו-ד', והתשובה לשאלה "האם הכדור שנבחר נמצא בקבוצה ג'?" תצמצם את אי-הוודאות שלו ל-2 כדורים. שאלה שלישית דומה על אחד מהכדורים שנשארו תיתן לו בוודאות תשובה נכונה. קל להרחיב כללים אלה למקרה כללי של N כדורים. ההסתברות לניחוש נכון היא $P = (1/N)$, ומידת אי-הוודאות תהיה $\text{LOG}_2(1/P)$ ביטים.

שנון היה, כאמור, הראשון שהשתמש במלה bit במאמר מדעי או טכנולוגי כלשהו, בשנת 1948, כיחידה למדידת אי-ודאות.

נוסיף עכשיו למשחק עוד קופסה עם 16 קוביות בצבעים שונים. הפעם, אמיתי בוחר כדור או קובייה באקראי (כלומר, בהסתברות שווה). דורון צריך לנחש בדיוק מה נבחר, צורה וצבע.

במקרה זה, שאלה ראשונה אפשרית היא: "האם נבחר כדור?"

אם התשובה היא "כן", הרי שמגיעים למצב הקודם, וצריך לשאול עוד 3 שאלות "בינאריות" כדי לדעת בוודאות איזה כדור נבחר. בסך-הכל 4 שאלות "בינאריות", כלומר מידת אי-ודאות של 4 ביטים.

אם התשובה היא "לא", הרי באופן דומה, אבל בהרחבה ל-16 צבעים במקום 8, צריך לשאול עוד 4 שאלות "בינאריות" כדי לדעת בוודאות איזו קובייה נבחרה. בסך-הכל 5 שאלות בינאריות, כלומר מידת אי-ודאות של 5 ביטים.

מכאן שבמשחק המורחב מידת אי-הוודאות איננה חד-משמעית - היא תלויה בתשובה לשאלה הראשונה: אם התשובה היא "כן", מידת אי-הוודאות היא 4 ביטים; אם התשובה היא "לא", מידת אי-הוודאות היא 5 ביטים.

מכיוון שידועים את ההסתברות לבחירת כדור או קובייה (במקרה זה $1/2$), אפשר להגדיר אי-ודאות ממוצעת. בדוגמה זו, אי-הוודאות הממוצעת היא 4.5 ביטים $(1/2 * 4 + 1/2 * 5)$.

את אי-הוודאות הממוצעת כינה שנון בשם אנטרופיה (Entropy).

נניח שדורון יודע שלאמיתי יש העדפה לקוביות, ורק ב- $1/4$ מהמקרים בממוצע הוא בוחר את קופסת הכדורים. במצב זה, אי-הוודאות הממוצעת לגבי הניחוש הנכון תהיה 4.75 ביטים $(1/4 * 4 + 3/4 * 5)$ - רמת אי-הוודאות עלתה.

זה מתאים למציאות, מכיוון שעכשיו ביותר מקרים צריך לנחש צבע של קובייה, ולגבי הקוביות יש אי-ודאות גדולה יותר מאשר בכדורים (1 מתוך 16 אפשרויות, לעומת 1 מ-8 בכדורים).

באופן כללי, כשיש N אפשרויות, וההסתברות להופעת כל אפשרות היא P_i ($i = 1, 2, 3, \dots, N$), אזי מידת אי-הוודאות הממוצעת (ל"ניחוש" נכון) היא: $H = \sum P_i * \text{LOG}_2(1/P_i)$ או ב"תבנית הקלאסית" המפורסמת של שנון (שימו לב

לסימן המינוס): $H = - \sum P_i * \text{LOG}_2(P_i)$. ■





חשמליים, כמו במחשבים כיום. אגב, שנון היה הראשון שהשתמש במונח bit במאמר מאוחר יותר שלו. תיאוריית המיתוג הזאת אף זיכתה אותו ב"פרס נובל". אמנם לא הפרס השוודי הידוע – מכיוון שאין פרסי נובל במתמטיקה או בטכנולוגיה – אלא פרס נובל האמריקני, המוענק לעבודה מדעית מבריקה של מדענים צעירים. שנון, שהיה, ונשאר לאורך כל חייו, אדם צנוע ביותר ובורח מפרסום, הופתע מאוד מהזכייה, והבין שמישהו דאג להציגו כמועמד לפרס. הוא כתב למנחה שלו, פרופ' ונוואר בוש (Bush): "...למעשה מתגנב לראשי חשד שלא רק ששמעת על זה (קבלת הפרס), אלא שהיתה לך יד בעניין... אם כך, תודה רבה. הייתי כה מופתע ושמח לקבל את המכתב המודיע לי על הזכייה בפרס עד שכמעט התעלפתי!".¹ (אגב, גובה הפרס היה 500 דולר, סכום לא-מבוטל לסטודנט באותם הימים).

צלצולי המלחמה של פעמון המדע

בתום לימודיו ב-1940, ואחרי שהות קצרה כמדען-אורח באוניברסיטת פרינסטון, הצטרף ד"ר שנון הצעיר למעבדות המחקר היוקרתיות של חברת בל (Bell Labs), אז חברת התקשורת הגדולה והמובילה בעולם.

במהלך מלחמת העולם השנייה גויסו טובי המדענים למאמץ המלחמתי. שנון הצטרף בתחילה למאמץ הפיתוח של נשק נגד איומים אוויריים, ובהמשך עסק בעיקר בנושאי ההצפנה והפענוח של שדרים סודיים. גם בעבודתו בנושא ההצפנה היה שנון חלוץ ופורץ דרך בהצגת גישה מתמטית חדשה, ובפיתוח מדדים כמותיים לבעיות מרכזיות שטופלו בעיקר על סמך אינטואיציה וצבירת ניסיון. משום כך נאמר על שנון שהפך את ההצפנה מאמנות למדע.

המדד שפיתח שנון מתבסס על תכונות סטטיסטיות של השפה המקורית והמפתח המצפין. הוא מודד את "עוצמת ההצפנה", כלומר את גודל המידע המינימלי הנדרש כדי שיהיה אפשר לפצח את הצופן. לדוגמה, כדי לפענח הצפנה של הודעה מקורית באנגלית שקודדה במפתח באורך 1,000 אותיות אנגליות (נניח א"ב אנגלי של 26 תווים שונים),

נדרש להשיג לפחות 2,600 אותיות של קוד מוצפן, כדי שיהיה אפשר לפענחו. אם המצפין יחליף מפתח בכל 2,500 אותיות, אזי לא יוכלו לפענח את המידע המוצפן.

על מידת השינוי שחולל שנון בנושא זה אפשר ללמוד מדבריו של מרטין הלמן (Hellman), ממחוללי המהפכה בתפישת ההצפנה המודרנית, המתאר את ההשראה שקיבל משנון להיכנס למחקר בנושא: "...ב-1970 אליאס נתן לי העתק של מאמרו הלא-ידוע של שנון מ-1949, שמקשר בין הצפנה ותורת האינפורמציה... ראיתי שהרבה ממה שלמדתי... ניתן ליישום בהצפנה. ייתכן שאוכל לתרום משהו בסופו של דבר...".²

ודאות לגבי אי-הוודאות

ב-1948 הגיע שנון לפסגת הישגיו המדעיים, עם פרסום מאמרו הידוע על "התורה המתמטית של תקשורת" ומאמר נוסף על "תקשורת בנוכחות רעש". מאמרים אלו חוללו רעידת אדמה בעולם התקשורת, ונחשבים ל"מגנה כרטא" (מגילת היסוד) של עידן המידע.

אגב, המאמר הראשון התפרסם תחילה במגזין הפנימי של מעבדות בל, ואף ששנון הבין את חשיבותו העצומה, לא טרח לפרסמו מחוץ לכותלי המוסד שבו עבד. בעיניו היו דברים מעניינים יותר מלכתוב מאמרים. (לדוגמה, לפתח עם ידיד שיטה להכות את הקזינו בלאס וגאס...). במאמרו אלו פיתח שנון גישה מהפכנית, מדהימה במקוריותה, לשני המרכיבים העיקריים של כל טיפול במידע: מקור המידע, והערוץ הרועש שדרכו מועבר מידע זה. הוא פיתח ביטוי שכינה בשם אנטרופיה (Entropy), המבטא את מידת אי-הוודאות שיש לגבי המידע (בדומה למדד אי-הסדר בתרמודינמיקה, שנקרא אנטרופיה כבר במאה ה-19). ביטוי מתמטי זה מבטא את "כמות המידע" שפולט מקור מידע כלשהו ואת הכמות הקטנה ביותר (של ביטים, למשל) שחייבים לשמור, או להעביר, כדי שעדיין יהיה אפשר לשחזר את המידע המקורי במדויק. עד היום, האנטרופיה היא כלי העבודה הבסיסי בתכנון של מערכות לאחסון, דחיסה



1. הציטוט מתוך מכתב של שנון לבוש ב-13 בדצמבר, 1939, כפי שמופיע במאמר "Mathematical Theory of Claude Shannon", מאת Eugene Chiu, Jocelyn Lin, Brok Mcferron, Noshirwan Petigara, Satwiksai Seshasai. תרגום הציטוט הוא של מחבר מאמר זה. המאמר נמצא באתר:

<http://www.scribd.com/doc/16024/The-Mathematical-Theory-of-Claude-Shannon>
2. הציטוט לקוח מאתר הבית של מרטין הלמן: <http://www-ee.stanford.edu/~hellman/crypto.html>



אחר העובר דרך "ערוץ רועש", המשבשש אותו. ההשקעה האופטימלית היא זו שמצליחה "לנקות את הרעש" ולשחזר את המידע האמיתי. על בסיס ניתוח סטטיסטי של המידע הגלוי, פיתח שנון תיאוריה לבניית תיק השקעות המקנה לבעלי מקסימום רווחים עבור סכום נתון. עבודותיו אלו ציפרו אותו לחלוצי הענף שנקרא היום מתמטיקה פיננסית. שנון מעולם לא פרסם עבודות אלה כמאמרים, מכיוון שלא אהב לכתוב, ולא היתה אז התלהבות בין אנשי הפיננסים לרעיונותיו. הוא הציג את עבודותיו לסטודנטים, שהתעניינו מאוד ומילאו את אולם ההרצאות, ולאשתו אליזבת שנון (בטי), שהיתה גם היא מתמטיקאית בהשכלתה. יחדיו הרכיבו תיקי השקעות שהניבו במשך השנים תשואות גבוהות מאוד. עברו שנים רבות עד שהנושא לחלל לקהילה הפיננסית. כיום, אין משרד השקעות בוול סטריט המכבד את עצמו, שאינו מעסיק מתמטיקאים ואנשי תורת האינפורמציה לניתוחים פיננסיים. כאשר שאל סטודנט את שנון באחת ההרצאות, אם הוא ממליץ לו ליישם את התיאוריות האלו באופן מעשי בהשקעותיו, השיב שנון באופן נחרץ בהומור האופייני לו: "לא! המסים יהרגו אותך!".

להטוטים מדעיים

שנון אמנם השתדל לרוץ שניים-שלושה קילומטרים מדי פעם, אך הפעילות ה"ספורטיבית" האהובה עליו באמת היתה להטוטנות (Juggling), פעילות מוזרה וזניחה בעיני רוב הציבור, אך לא בעיניו. הוא מצא בה את השילוב המעניין והאתגרי של קואורדינציה, ריכוז ו... חוקיות מדעית. הוא אמנם לא אסף כסף בהופעות בסופי-שבוע ברחובות בוסטון, אך נהנה לרכוב על חד-אופן במסדרונות הארוכים של מעבדות בל או MIT, כשהוא מלהטט בארבעה כדורים באוויר. גם את הלהטוטנות הפך שנון מאמנות למדע. בשנת 1980 פיתח את משפטי הלהטוטנות המתמטיים הראשונים במאמרו "היבטים מדעיים של להטוטנות". מאמר זה נחשב עד היום לתורה המתמטית הבסיסית בין הלהטוטנים והמדענים המתעניינים בנושא זה. המשפטים המתמטיים שפיתח בהקשר זה מקנים הבנה עמוקה וברורה יותר של תהליך הלהטוטנות ומגבלותיו.

שנון העיד על עצמו שילד חלם לברוח ולהצטרף לקרקס, ←

כפרופסור ב-MIT. שנון ומשפחתו (אשתו אליזבת ושלושת ילדיהם) קנו בית היסטורי יפהפה, שהיה שייך לאחד מצאצאיו של הנשיא האמריקני תומס ג'פרסון, על שפת אגם מיסטיק מצפון לבוסטון.

השינוי לא התבטא רק במקום המגורים, אלא גם באופן הפעילות ובמוקדי התעניינותו המדעית של שנון. הוא עדיין המשיך לעסוק בנושאים הקודמים שפיתח, בעיקר במחקרים בתורת האינפורמציה, אבל הרחיב את התעניינותו גם לכיוונים כלכליים. הוא לא הנחה בצורה פורמלית סטודנטים לתארים גבוהים, ולא לימד קורסים "סטנדרטיים" כרוב הפרופסורים, אבל הסמינרים שלו היו מהמבוקשים ביותר.

בסמינרים שהעביר נהג שנון לחשוף לראשונה את תוצאות מחקריו החדשים, ויודעי דבר מספרים שהיה סמינר אחד שבו בכל הרצאה הציג שנון תוצאה מדעית חדשה. בשלב מסוים החל שנון לעסוק במודלים מתמטיים סטטיסטיים בכלכלה, ובאופן ספציפי יותר – במודלים מתמטיים לבניית תיק השקעות מוצלח בניירות ערך.

התעניינותו בנושא לא נבעה מרצון להתעשר או להתפרסם. כפי שהוא עצמו אמר באחד מריאיונותיו הנדירים: "... רק רציתי להבין איך הדברים עובדים", ובמקרה זה – איך עובדת הבורסה. גם ניסיון קודם שלו להכות את הקזינו בלאס וגאס לא נבע מרצון "לעשות מכה" מהירה, אלא מהאתגר המדעי והשעשוע במציאת דרך לעשות זאת. שנון וידידו אד תורפ (Thorp), שהיה פרופסור למתמטיקה ב-MIT, פיתחו שיטה ממוחשבת ובדקו אותה בביתו של שנון על רולטה מקצועית שקנו במיוחד לצורך בדיקת הרעיון. בערב ניסיון אחד הם "הרוויחו" 24,000 דולר, אך כשנסעו עם רעיותיהם למקום האמיתי, קרס המחשב שהכינו לצורך העניין, והם נאלצו לחזור בכיסים ריקים... אגב, כיסיו של תורפ התמלאו במהרה בזכות רב-מכר שכתב בשם "Beat the Dealer", שהפך את הביטוי הזה לשגור בפי כל, ובזכות קרן השקעות מצליחה שהקים. גם שנון לא טמן את ידיו בכיסיו. הוא התבסס היטב מבחינה כלכלית מהשקעות עם חברים בחברות חדשות, עצמחו במהירות והצליחו מאוד בתקופה שאחרי המלחמה. כאמור, שנון החל לעסוק במודלים להשקעות פיננסיות. מבחינתו, לא היה בכך שינוי כיוון מהותי. הוא התייחס למידע על ביצועיהן של השקעות בבורסה כאל כל מידע



העברה של מידע. כשאנו שומעים מוזיקה ב-iPod, צופים בסרט במכשיר DVD או בקליפ באינטרנט, מקבלים פקס או שומרים קובץ טקסט דחוס, אנו מתבססים על התיאוריה הבסיסית הזאת של שנון.

גם בגישתו החדשנית לערוצי המידע, שבדרך-כלל יש בהם רעש המפריע לקליטה טובה, חולל שנון שינוי תפישה מהותי, שהפך על פניו את עולם התקשורת. הוא הראה שלכל ערוץ מתאים קצב מסוים של העברת מידע, שקרא לו קיבול הערוץ (Channel Capacity), שמתחתיו אפשר בוודאות להעביר את המידע ולשחזרו בלא שגיאות (בניגוד גמור לתפישה שהיתה מקובלת עד אז, שלפיה ככל שמגדילים את קצב העברת המידע בערוץ רועש, כך יגדל קצב השגיאות שיתקבל בצד הקולט). המושג "קיבול הערוץ" מהווה כלי עיקרי בתכנון של כל ערוץ תקשורת עד עצם היום הזה, 60 שנה אחרי ש"הומצא", בתקופה שבה עדיין אפילו לא חלמו על ערוצי תקשורת כדוגמת האינטרנט או הטלפוניה הסלולרית.

אינטליגנציה מלאכותית

עד לפני כמה עשרות שנים, הביטוי "מכונה אינטליגנטית" נחשב אוקסימורון – צירוף ניגודים סותרים. מכונות אינטליגנטיות נוצרו רק בסיפורים דמיוניים, החל מ"הגולם מפראג" (1580), דרך מחזה של קרל צ'אפק שהשתמש לראשונה (ב-1923) במושג "רובוט", וכלה בשלושת חוקי הרובוטיקה של סופר המדע הבדיוני הנודע אייזק אסימוב מ-1950.

בתחילת שנות החמישים, כבר היה שנון מדען מפורסם ומוערך, ושמח לסייע למדענים מבריקים בתחילת דרכם שפנו אליו. שני מתמטיקאים צעירים כאלו, ג'ון מקרתי (McCarthy) ומרווין מינסקי (Minsky) מאוניברסיטת פרינסטון, באו לעבוד איתו במעבדות בל לתקופה קצרה. הקשר המקצועי הזה, והתעניינותם המשותפת ביכולת ליצור מכונות "אינטליגנטיות", הביאו אותם למסקנה שיש צורך לרכז מאמצים לפריצת דרך בנושא. הם צירפו אליהם את נתנאל רוצ'סטר (Rochester) מ-IBM, וארגנו את הכנס המדעי הראשון בהיסטוריה שעסק באינטליגנציה מלאכותית בנושא מדעי העומד בפני עצמו. במסמך ההכנה לכנס השתמשו לראשונה במושג חדש, שהציע ג'ון מקרתי – "אינטליגנציה מלאכותית" (Artificial Intelligence) או בקיצור הנפוץ AI,

ש"הושאל" גם לסרט הידוע של שפילברג).

הכנס, שנערך באוניברסיטת דרטמות (Dartmouth) בארצות-הברית ב-1956, נחשב לאבן הפינה של הפעילות המדעית בנושא זה. הנושאים שנכללו במסמך, שכתבו הארבעה כהכנה לכנס, היו מגוונים ועתידיניים בצורה מעוררת התפעלות: החל ממחשבים ותוכנות לומדות, וכלה ברשתות נוירונים, בלימוד עצמי של מחשבים וביצירתיות של מערכות ממוחשבות. בקשר לראשית דרכו של ענף מדעי זה, חייבים להזכיר גם את אלן טיורינג (Turing), הבריטי המבריק שכבר ב-1950 פרסם את מאמרו המפורסם "מכונות חישוביות ואינטליגנציה". אלא שאלן טיורינג התאבד כשנה לפני שהצעת הכנס יצאה לדרכה.

כיום, "מכונות אינטליגנטיות" מתפתחות מסיבינו בקצב מהיר, כמעט מבלי שנרגיש. מנועי חיפוש אינטליגנטיים, דוגמת גוגל, כבר זמינים לכל ברשת; מדי פעם אנחנו כבר נעזרים במערכות מומחה אוטומטיות (Expert Systems), כלומר מערכות המיישמות חוקים לוגיים על אוסף נתון של עובדות כדי להגיע למסקנות, כגון מערכת ניווט מבוססת GPS המדריכה אותנו איך להגיע בדרך הטובה ביותר למקום מסוים; קיימות מערכות AI לזיהוי ולפענוח אוטומטיים של מידע קולי וחזותי; ואפילו בשטח הבידור הולך וגדל התפקיד של האינטליגנציה המלאכותית: החל מאנימציה ממוחשבת ובניית עולמות וירטואליים תוססים, וכלה במשחקים המבוססים על תוכנות מתוחכמות, הפועלות טוב יותר מיריב אנושי. נזכיר כי ב-1997 ניצחה לראשונה תוכנת השחמט "כחול עמוק" של IBM את אלוף העולם באותה התקופה, גארי קספרוב. 47 שנה לפני כן הניח שנון את הבסיס לכך במאמרו, הראשון בהיסטוריה, "תכנות מחשב לשחק שחמט". אגב, שנון היה שחקן שחמט נלהב שניהל, במהלך ביקור מדעי ברוסיה בתקופת מסך הברזל, קרב שקול בן 42 מהלכים עם מיכאיל בוטביניק (Botvinnik), שהיה אלוף העולם במשך שנים ארוכות.

קרן הון סיכוי

שנת 1956 היתה שנה משמעותית לא רק בהיסטוריה של האינטליגנציה המלאכותית, אלא גם בחייו הפרטיים של שנון. אחרי 16 שנות עבודה במעבדות בל, הוא עבר לכהן



דבר, ממש שום דבר, מלבד לכבות את עצמה." גם לעצמו התייחס שנון בקלילות ובשובבות. הוא סיפר פעם שבמהלך הרצאה שנתן בפרינסטון, הבחין באלברט איינשטיין נכנס לאולם מאחת הדלתות האחוריות. הוא ראה את איינשטיין משוחח קצרות עם אחד האנשים בשורה האחורית ויוצא מהאולם. כשנגמרה ההרצאה, מיהר שנון אל אותו אדם לברר מה אמר לו איינשטיין ומדוע עזב כה מהר את ההרצאה. האיש השיב שאיינשטיין פשוט שאל אותו היכן השירותים...

אפילו לתוארי הכבוד הרבים שלהם זכה במהלך חייו התייחס שנון בנימה משועשעת. הוא סידר את הגלימות וכובעי האקדמיה הרבים שקיבל בטקסי הכבוד השונים על שורת קולבים שנה, בעזרת מתקן מיוחד שבנה, במסלול סיבובי, ונראתה למסתכל מהצד כשורה בלתי נגמרת של פרופסורים מכובדים הצועדים בזה אחר זה.

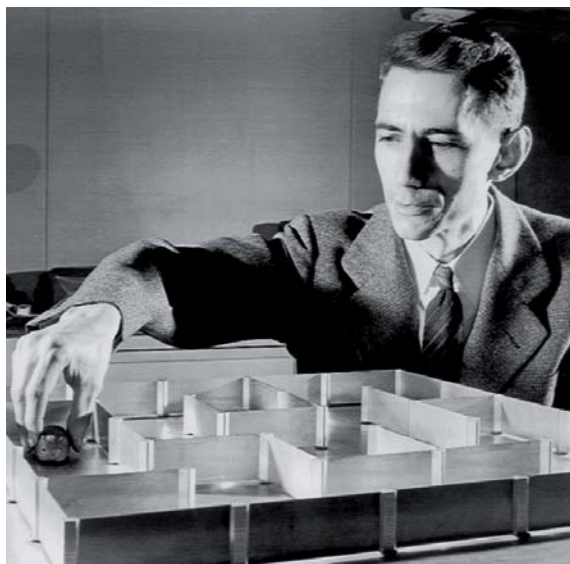
צחקו המר של הגורל

למרבה הצער, הפרק האחרון בחייו האישיים של שנון לא היה ברוח אופטימית כזו. הוא חלה באלצהיימר.

כמו בטרגדיה מהמיתולוגיה היוונית, שבה מעשיו המופלאים של הגיבור האנושי מעוררים את קנאתו של אחד האלים, המעניש את בן האנוש על "חוצפתו", כך נראית תגובתה של אלת המידע על הישגיו המדהימים של שנון בחשיפת סודותיה.

כבר ב-1949 כתב שנון בן ה-33, בסקירה לעיתון מדעי על ספר שעסק בין השאר בהשוואה בין מערכת העצבים של בעלי-חיים למכונות ממוחשבות: "... ותנאים פתולוגיים שונים במחלות עצביות, אנלוגיים לתקלות בזיכרון הפנימי של מחשב." היה פה מהלך שטני של הגורל. שנון, שהיה אבי התורות לטיפול בשיבושים באחסון מידע בזיכרון או בהעברת מידע במערכות מלאכותיות, לא היה יכול לעשות דבר לתיקון השיבושים בזיכרון הפנימי שלו ובמערכת התקשורת הביולוגית במוחו.

אין ספק ששנון הבין היטב את מצבו ואת העתיד הצפוי לו, אחרי שאובחנה המחלה בהיותו בסוף שנות השישים לחייו. על אף התסכול, שמר שנון על רוחו הטובה וקיבל בהבנה את גזרת הגורל. בשנת 1984, כשכבר היה



שנון עם העכבר האלקטרו-מכני העושה את דרכו במבוך, באחד מניסוייו הראשונים בבינה מלאכותית

שנון עצמו הסביר בהתלהבות את גישתו לעניין המשחקים, במהלך סיור שערך למראיין ב"חדר הצעצועים" שלו: "אני בונה צעצועים מתוחכמים חסרי תועלת לחלוטין, רק מכיוון שאני חושב שכיף לבנות אותם. אין להם שום ערך מסחרי, אבל אני חושב שהם יכולים להיות משעשעים..."

אכן, הוא נהנה מאוד מעיסוקיו אלו, החל מבניית פריזבי עם מנוע רקטי קטן, או מקל קפיצה עם מנוע (שעליו אמר לידידיו: "ברגע שזה יעבוד, לא תצטרכו לחשוש שאדרוס אתכם במסדרון עם החד-אופן שלי"), דרך בניית כבל מעלית מביתו לשפת האגם עבור ילדיו, או, בתקופה מאוחרת יותר, ניסיונות חוזרים ונשנים לשבור את שיאו של בנו במשחק המחשב הפופולרי של אותה התקופה, פאקמן, וכלה בבניית "המכונה האולטימטיבית" – מכונה שפשוט אינה עושה דבר! (המכונה הזאת נבנתה בהשראת רעיון של עמיתו מרווין מינסקי, וכך מתייחס אליה סופר המדע הבדיוני הידוע ארתור סי קלארק: "... יש משהו מאיים, שלא ניתן לתיאור, במכונה הזאת שאינה עושה



ומאמרו נפתח בציטוט מתוך יצירה ספרותית של רוברט סילברברג (Silverberg), "הטירה של לורד ולנטיין", המבטא את יחסו המיוחד של שנון לנושא זה:

"האם אתה חושב שלהטוטנות זה טריק ותו לא? שאל האיש הקטן שנשמע נפגע, 'בידור לקהל שצופה פעור פה? שיטות לאיסוף כמה מטבעות בקרנבלים מקומיים? כן, זה כל הדברים הללו, אבל לפני הכל זוהי דרך חיים, חברה, אמונה, סוג של פולחן.' וגם סוג של שירה, אמרה קרבלה. סליט הנהן בראשו. 'כן, גם זה. וגם מתמטיקה. זה מלמד רוגע, בקרה, איזון, תחושה של מיקום של דברים, והבסיס של תנועה. יש בזה מוזיקה שקטה. מעל לכל יש משמעת...'".³

בהמשך המאמר מביא שנון, בין שאר אנקדוטות משעשעות, את תיאורו של ההיסטוריון היווני קסנופון, המצטט את סוקרטס אחרי צפייה במופע להטוטנות מדהים של נערה צעירה עם 12 טבעות (שיא שלא נשבר במשך אלפי שנים!). סוקרטס המתפעל אמר: "הביצוע המרשים של הנערה, רבותי, הוא רק הוכחה אחת מני רבות שהטבע הנשי אינו נחות במאומה מזה של הגברים... חוץ מחסרונן בכושר שיפוט וכוח פיזי." שנון, בהומור האופייני לו, מוסיף הערה מיד אחרי הציטוט: "... לו רק סוקרטס היה שם נקודה שש מילים מוקדם יותר, היה נחשב להוגה התנועה לשחרור האשה..."

שנון לא עסק רק בפיתוחים מתמטיים. הוא היה חבר פעיל במועדון הלהטוטנות של MIT, ואף שהיה אחד החברים המבוגרים, ובלא ספק המפורסם ביותר מבין חברי המועדון (שהוא הוותיק ביותר בארצות-הברית שעדיין פעיל), הרגיש והתנהג כאחד החברים. באחד הערבים תוכננה מסיבת "וידיאו ופיצה" של המועדון, אך לא נמצא מקום מתאים עם מסך, שיהיה גדול דיו להכיל את כל החברים. שנון פשוט הזמין את כולם לביתו.

אהבתו של שנון ללהטוטנות התבטאה בין השאר ברכישת אוסף מרשים של סוגים שונים של חד-אופנים, בפיתוחים משלו כמו חד-אופן עם ציר לא-סימטרי וחד-אופן לשני

רוכבים, בהפיכת שואבי אבק לנושפים אוויר החוצה כך שיהיה אפשר לראותם מלהטטים בינם לבין עצמם בכדורים העפים בזרמי האוויר שלהם, ובעיקר בבניית מודלים מכניים מורכבים ומשעשעים של להטוטנים. גולת הכותרת של הדגמים שבנה היא מערכת מרשימה של שלושה להטוטנים, שאותה תיאר במאמר המסתיים בהתגרות הומוריסטית בעמיתיו: "גם הלהטוטנים הגדולים ביותר לא יכולים להתמיד בשיאם יותר מאשר דקות אחדות, אבל הליצנים הקטנים שלי מלהטטים כל הלילה, מבלי להפיל אפילו אביזר אחד!"

משחקים, זה שם המשחק

כפי שחוקרי התפתחות ילדים מדגישים את חשיבות המשחק להתפתחות הנפשית של הילד בדרכו להיות אדם בוגר, כך ראה שנון את המשחקים כשלב התפתחותי חשוב בשלבי ה"ילדות" של המחשוב והמכונות האינטליגנטיות. בהרצאה שנתן ב-1955 בעת קבלת אות הוקרה, אחד מני רבים, דיבר שנון על מכונות משחקות. באותו זמן לא חלמו עדיין על משחקי מחשב.

בפתח הרצאתו אמר: "היתכנות של מכונות משחקות יכולה להיראות במבט ראשון כשעשוע לשעות הפנאי ולא כנושא מדעי רציני. אכן, יש מדענים רבים המתייחסים לנושא מקסים זה כאל תחביב, אבל יש לו גם צד רציני ומשמעותי מבחינה מדעית." שנון פירט בהמשך ההרצאה את השקפת עולמו לגבי מכונות משחקות בהווה ובעתיד. בין השאר, אמר: "ראשית, זה מרחיב את הבנתנו את היכולות של המכשיר המדהים והגמיש הזה (המחשב)... ולבסוף, אנו מקווים שהמחקר של מכונות משחקות יוביל להבנה עמוקה יותר של צורת הפעולה של המוח האנושי..."

אהבתו של שנון למשחקים משעשעים השתלבה בהתעניינותו המדעית, והתבטאה מצד אחד בפיתוח תוכנה ראשונה מסוגה למשחק שחמט, או עכבר חשמלי ה"לומד" למצוא את דרכו במבוך, ומצד אחר במחשבון המבצע את חישוביו במערכת של ספרות רומאיות: I, II, III, IV וכו'.

3. מתוך:

Claude E. Shannon, "Scientific Aspects of Juggling", in: "Claude Elwood Shannon – Collected Papers" Edited by N.J.A. Sloane and Aaron D. Wyner, Published by John Wiley & Sons, Inc 1993, pp. 850-864.



המחלקה לכימיה

מדע
יהדות
מצוינות
סובלנות
אוניברסיטת בר-אילן

B.Sc בכימיה - ברמה אחרת

הירשמו עכשיו למחלקה מובילה בישראל
והצטרפו לשורה ארוכה של בוגרים שהשתלבו בעמדות מפתח
במשק הישראלי.

מגוון מגמות התמחות ייחודיות:

- סגל מרצים וחוקרים בכירים.
- תפוקת מחקר מהטובות בארץ ובעולם.
- ציוד מחקרי חדיש מהמתקדמים בעולם.
- מרכז לננוטכנולוגיה ולחומרים מתקדמים.
- כימיה תרופתית, ננו-כימיה, כימיה ומחשבים ועוד.

לפרטים: טל. 03-5318309 ■ מייל: Hanni.Regev@mail.biu.ac.il



תמונת פסלו של שנון באוניברסיטת מישיגן, שבה סיים תארים ראשונים

אמיר קליסמן עוסק שנים רבות בעיבוד אותות ובראייה ממוחשבת, והרצה בקורס "תורת האינפורמציה" במחלקה להנדסת חשמל במכללת אורט בראודה, כרמיאל.

לקריאה נוספת:

Claude Elwood Shannon – Collected Papers
 edited by N.J.A Sloane and Aaron D. Wyner, IEEE and John Wiley & Sons, Inc, 1993.

"Claude Elwood Shannon (1916-2001)", Solomon W. Golomb, Wlwyn Berlekamp, et al, *Notices of the AMC*, Volume 49, Number 1, January 2002.

"Fifty Years of Shannon Theory", Sergio Verdu, *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. 44, No. 6, October 1998.

"Claude E. Shannon: Unicyclist, Juggler and Father of Information Theory", John Horgan, *Scientific American*, January 1990.



חולה באופן ברור, התקיים כנס בינלאומי גדול בתורת האינפורמציה בברייטון שבאנגליה. שנון ורעייתו אליזבת הופיעו בכנס כמשתתפים מהשורה, מבלי שהודיעו לאיש על בואם. באחת ההפסקות חלף במקרה אחד ממארגני הכנס ליד הזוג המבוגר, והבחין בשם שעל התג. ה"תגלית" עוררה התרגשות עצומה בין באי הכנס, התכנית שונתה, ושנון התבקש לעלות לבמה בארוחת הערב החגיגית המרכזית. בצניעות ובהומור שאפיינו אותו כל חייו, פתח שנון והודה שאין ביכולתו לעניין אותם בדברי מדע, אבל הוא יכול לשעשע אותם בלהטוטנות. הוא הוציא מכיסו 3 כדורים קטנים ולהטט בהם להנאת המשתתפים. בסיום דבריו, בצעד בלתי מקובל בכנסים מדעיים, נעמדו המדענים בשורה ארוכה לקבל את חתימתו של שנון. אחד ממארגני הכנס, שעמד בצד והביט בהשתאות במראה הלא-שגרתי, אמר לחברו בהתרגשות: "זה כאילו ניוטון ככבודו ובעצמו היה מופיע פתאום בכנס מכניקה!"

סוף דבר

שנון שמר על מזגו הנוח גם כאשר מצבו הלך והחמיר. רעייתו, אליזבת, טיפלה בו במסירות רבה בביתם במשך שנים ארוכות. רק כשמצבו הידרדר ונדרש טיפול סיעודי, הועבר למוסד מתאים בקרבת ביתם, שבו סיים את חייו בשנת 2001, בגיל 84.

ההלוויה, לבקשת המשפחה, נערכה בטקס פרטי. אחרי מותו הוצב פסל הנושא את דמותו, כשהוא שקוע במחשבות ומחזיק בידו דף שעליו חרוטה אחת הנוסחאות המפורסמות שפיתח. הפסל שוכפל והוצב בכמה מקומות שהיו ציוני דרך בחייו, פינות זיכרון קטנות למדען ענק.

לסיום, ולסיכום, הצעה. בפעם הבאה שתיתקעו מול מסך המחשב, ותזעיקו את ילדכם או את ילדתכם בזעקות שבר כדי שיפתרו את בעייתכם בהינף אצבע קלה על המקלדת, אל תכריזו בגאווה: "איזה גאון האינשטיין שלי". למען הדיוק והצדק ההיסטורי, יהיה יותר מתאים במקרה כזה להלל ולשבח את ה"שנון" שלכם. ■



למפלס המדרכה המרוצפת הגבוהה קיים הבדל של כמטר אחד, וביניהם מערכת מדרגות. האבנים הרומיות הכבדות והמרשימות הונחו בצורה אלכסונית ביחס לכיוון הרחוב, צורה האופיינית לתקופה זו, שאולי נועדה לנוי ואולי כדי למנוע החלקת עגלות. אבני הריצוף הונחו על תשתית של מלט, עפר ואבנים, שלתוכה נשמטו במהלך הסלילה שברי כלי חרס, נרות ומטבעות. אלו סייעו בידי הארכיאולוגים לתארך את מועד סלילת הרחוב.

בעבר הציעו חוקרים לתארך את הרחוב לתקופה הביזנטית, כלומר למאות ה-5-6 לספירה. לאור הממצאים האחרונים, נראה שמדובר ברחוב שראשיתו עוד בתקופה הרומית, המאה ה-2 לספירה. מעל מפלס הרחוב נתגלו שרידי מבנה שנבנה לראשונה בתקופה האיטלאמית הקדומה והמשיך להתקיים תוך כדי שינויים עד התקופה העות'מאנית. כמו כן, באותו המפלס ממש, נתגלו גם רצפות מתקופות מאוחרות יותר ואפילו מסוף התקופה הממלוכית – ותחילת תקופת שלטון האימפריה העות'מאנית במאה ה-16 לספירה. ממצאים אלה הפתיעו את הארכיאולוגים, שציפו למצוא במפלס זה ריצוף מהתקופה הרומית. ההסבר לכך הוא, שחרף עליית גובהו של מפלס הרחוב במהלך התקופות, האנשים שחיו במבנים משני צדי הרחוב שמרו על גישה לחלקים התחתונים של המבנים – כדי לנצל כמה שיותר חלל.

אין לדעת בוודאות אם הרחוב שלפנינו שימש כרחוב הראשי של העיר הרומית איליה קפיטולינה, אם לאו. מכל מקום, ברור שזהו אחד הרחובות הראשיים של התקופה שבה שלטה האימפריה הרומית בארץ ישראל. אם בעבר הוצע, כי שטח העיר הרומית איליה קפיטולינה כלל בעיקר את חלקה הצפוני של העיר העתיקה, גרסה הנתמכת בריבוי שרידים מהתקופה הרומית בחלק זה של העיר – הרי שכעת נמצא חיזוק לטענה שהעלו עוד ראשוני חוקרי ירושלים בשלהי המאה ה-19, והיא שהעיר העתיקה של היום, מוקפת החומה מהמאה ה-16, שומרת על מתאר העיר הרומית גם בחלקה הדרומי של העיר.

ידיות קנקנים מתקופת בית ראשון

ידיות קנקנים הנושאות טביעות "למלך", דוגמת אלה שהתגלו באתר, אינן דבר יוצא דופן. למעשה, למעלה

אדריאנוס, מעט לפני אמצע המאה ה-2 לספירה. בקטע הרחוב שנחשף כעת נתגלתה שורת חנויות בצדו המערבי של הרחוב ולפניהן מדרכה רחבה. רוחב הרחוב הרומי שהתגלה היה 11 מטרים, ובשנים שחלפו מאז המאה ה-2 ועד ימינו הצטמצם רוחב הרחוב תוך כדי עליית מפלסו. (אותו תוואי של הקרדו שימש ברציפות זה כמעט אלפיים שנה!).

הרחוב הרומי שינה את הטופוגרפיה הטבעית של העיר: הבנאים הרומים הסירו בחציבה חלק ממדרון העיר העליונה שבלט לתוואי הרחוב המתוכנן. בחציבה זו הסירו, למעשה, שרידים מתקופת בית ראשון ומתקופת בית שני, שהיו בנויים על מדרונות העיר העליונה. מצוק הסלע הגבוה שנוצר כתוצאה מחציבה זו מפריד כיום בין בתי הרובע היהודי ממעל לרחבת הכותל המערבי למרגלותיהם – והוא, למעשה, פרי חציבתם של הרומים.



אזור החפירה במבט-על. בחלק השמאלי של התמונה: כניסה לחנויות מהתקופה הרומית. המדרכה משתרעת מהאזור המרכזי של התמונה ועד למפתחי החנויות שבצדה השמאלי. מימין: חלק מרחוב העמודים, ומעליו מבנה שנבנה לראשונה בתקופה האיטלאמית הקדומה והמשיך להתקיים עם שינויים מסוימים עד התקופה העות'מאנית. אבני הגיר, שהוצבו בתקופה הרומית, הונחו בציר אלכסוני, כפי שאפשר לראות בחלקו הימני התחתון של התצלום. תצלום: ליהן נגר ועידן פייביש

שפר מזלם של הארכיאולוגים, ובחלקו הצפוני של שטח החפירה מונח הסלע הטבעי עמוק מתחת למפלס הרחוב הרומי, וריצוף הרחוב הרומי הונח שם ישירות מעל שרידי המבנים מתקופת בית ראשון. בין מפלס הרחוב הרומי

ירושלים של מטה

שרידים ארכיאולוגיים ממגוון תקופות, ובהן תקופת בית ראשון, נמצאו סמוך להר הבית

לירון נגר ועידן פייביש

המקסימלי הוא כ-7 מטרים ביחס למפלס רחבת הכותל, והחפירה מגלה חתך של ההיסטוריה של ירושלים החל מהמאה ה-8 לפנה"ס ועד ימינו אלה.

בחפירה נחשפו שרידים של רחוב עמודים מרכזי ומפואר מהמאה ה-2 לספירה, תקופה שבה שלטו הרומאים בארץ. הרחוב רוצף באבנים גדולות שהונחו על שרידי מבנים מתקופת בית-המקדש הראשון וחתמו אותם תחתיהן, וכך, למעשה, הגנו עליהם מפני בזיזה ופגיעה בתקופות מאוחרות יותר. כמו כן התגלו שרידים רבים של כלי חרס, ביניהם ידיות של קנקנים נושאי טביעות "למלך", שברי צלמיות פריון, שברי צלמיות בעלי-חיים, חותם אישי של יהודאי בעל תפקיד חשוב מתקופת בית ראשון וממצאים נוספים.

רחוב הקרדו המזרחי

רחוב הקרדו שהתגלה היה רחוב מרכזי, אחד הראשיים בתקופה הרומית (המאה ה-2 לספירה), ומקובל לכנותו "הקרדו המזרחי". הרחוב, שהיה מרכז מסחר באותם ימים, חצה את העיר לאורכה: משער שכם בצפון ועד דרום העיר. במפת הפסיפס של מידבא שבירדן, המתוארכת למאה ה-6 לספירה, מופיע רחוב זה כמעוטר בשורות עמודים. רחובות עמודים היו נפוצים בקיסרות הרומית בתקופת שלטונו של

ב-13 במרץ 2008 הודיעה רשות העתיקות על חשיפת שרידי מבנים מתקופת בית ראשון תחת שרידיו המרשימים של רחוב מרכזי מהתקופה הרומית ברחבת הכותל המערבי. מציאת השרידים בקרבה כה גדולה לכותל, ורמות השתמרותם הגבוהה, עוררו התרגשות בעולם הארכיאולוגיה. החשיפה התרחשה במהלך חפירות הצלה הנערכות זה כשנתיים, שמבצעות רשות העתיקות בשיתוף עם הקרן למורשת הכותל. חפירות אלה נועדו לחשוף את הממצאים העתיקים, הואיל ונשקפת להם סכנת פגיעה נוכח עבודות הבנייה המתוכננות באזור.

החפירה

את החפירות באתר מנהלים הארכיאולוגית שלומית וקסלר-בדולח והארכיאולוג אלכסנדר און, בסיוע ארכיאולוגים מרשות העתיקות. עונת החפירה הראשונה באתר נערכה בספטמבר 2005. חפירה ראשונית זו ארכה כשבועיים בלבד. מעתה תתמקד החפירה באזור שוליו הצפוניים-מזרחיים של האתר, הגובלים ברחבת הכותל. באזור זה אפשר להבחין בראשי קירות מתקופת בית ראשון, והחפירה המתוכננת לזמן הקרוב עתידה לחשוף, לראשונה, את רצפת המבנה. שטחה הכולל של החפירה כיום הוא כ-1,600 מ"ר, שטח גדול בהשוואה לחפירות אחרות שנערכו בשנים האחרונות בעיר העתיקה. עומק החפירה

1. "יהודאי" הוא מושג פוליטי-טריטוריאלי המציין כל תושב בממלכת יהודה הנמנה במקור עם אחד מהשבטים יהודה, שמעון וחלק מבנימין. המושג "יהודי" משמש להגדרת דת ולאום החל מתקופת שיבת ציון ואילך.

צלמיות פריון וצלמיות בעלי-חיים

בחפירה נמצאו גם שברים של צלמיות פריון ושל צלמיות בעלי-חיים, המתוארכים גם הם לסוף תקופת בית ראשון. צלמיות הפריון שימשו בתפקיד מאגי לעידוד ולהבטחת הפריון, ההצלחה הכלכלית והמשפחתיות בכלל. פסלונים אלה שימשו גם כאלים, שהיה נהוג להתפלל אליהם. הצלמיות היו עשויות טין, אבן ולעתים גם מתכת, ולא פעם נעשה בהן שימוש גם כתכשיטים.

כמה מאות צלמיות נשים התגלו בחפירות ארכיאולוגיות אחרות בתחום ממלכת יהודה בין באר שבע בדרום לבין בית אל בצפון, ותוארכו לסוף תקופת בית ראשון. צלמיות אלה היו מגוונות בגודליהן, אך גובהן לא עלה על 20 סנטימטרים. הנשים המופיעות בפסלונים אלה תומכות את שדיהן בידיהן ועומדות על עמוד שבסיסו רחב, בלא רגליים. מרבית החוקרים מזהים פסלונים אלה עם אלת הפריון, אשרה, והם היו זולים וקלים להכנה. פולחן אלות בתקופת המקרא היה, ככל הנראה, נפוץ מאוד ומקובל בקרב החברה היהודאית, אך מחבר המקרא גינה עבודת אלילים זו.

צלמיות בעלי-חיים שימשו כנראה גם הן בתפקיד מאגי-פולחני.

הממצאים המתוארים הם דוגמה מרתקת לאופן שבו שרידים מתקופות שונות בהיסטוריה של ארץ ישראל בכלל, וירושלים בפרט, מופיעים זה לצד זה ואף שלובים זה בזה, ומעידים על מרקם חיים ממושך באותו האתר עצמו. מלאכת הפענוח והתארוך של הממצאים עודנה בעיצומה, ואין ספק שתניב מסקנות מרתקות. ■

המחברים מודים לארכיאולוגית שלומית וקסלר-בדולח, מנהלת החפירה באתר מטעם רשות העתיקות, לפרופ' ישראל אפעל מהחוג להיסטוריה של עם ישראל באוניברסיטה העברית בירושלים ולד"ר נילי ואזנה מהחוג להיסטוריה של עם ישראל וראש החוג למקרא באוניברסיטה העברית בירושלים, על הסיוע בהכנת המאמר.

ליטרטית, שבה רבים ידעו קרוא וכתוב. לא זו בלבד, אלא שבחפירות ארכיאולוגיות באזורים אחרים בממלכת יהודה נמצאו עשרות חותמות השייכים דווקא לנשים – דבר המעיד על מעמדן השוויוני של הנשים באותם ימים, שהיו רשאיות לחתום בעצמן על מסמכים חשובים.

המילה "חותם" מופיעה במקרא 15 פעמים, מתוכן פעם אחת במשפט המתאר את אופן ענידת החותם בתקופת ירמיהו הנביא, בסוף תקופת בית ראשון, התקופה שבה אנו עוסקים: "חותם על יד ימין" (ירמיהו כ"ב, כ"ד). ואילו על תפקידו החשוב של החותם בימיו של ירמיהו מעיד הפסוק: "וכתוב בספר וחתום והעד עדים" (ירמיהו ל"ב, מ"ד). טביעות החותם הקדומות ביותר הידועות היום לארכיאולוגים התגלו בחפירות שנערכו באזור אנטוליה ומסופוטמיה, והן מתוארכות לתקופת האלף ה-7 לפנה"ס. חותמות היו נפוצים מאוד בתקופת בית ראשון, ובחפירות ארכיאולוגיות נוספות התגלו אף בערד, במגידו, בלכיש ועוד. אף שהחותמות נחשפים בחפירות ארכיאולוגיות, טבעות החותם או התליונים שבהם שולבו החותמות לא נמצאו מעולם.



חותם עברי סגלגל שחרות עליו "לנחניהו בן יאש" (קרי: יאוש). כנראה חלק מטבעת של אדם פרטי נושא תפקיד ממלכתי. בשליש העליון של החותם מוטבע עיטור שרשרת ובה ארבעה רימונים. גודל החותם 1.1 ס"מ על 1.4 ס"מ. באדיבות רשות העתיקות



מ-2,000 ידיות כאלה התגלו באתרים שונים בארץ, שהיו משויכים בעבר לממלכת יהודה של שלהי המאה ה-8 לפנה"ס. מבדיקות מדוקדקות עולה, כי חלק מהקנקנים יוצרו במקום אחד: עמק האלה. הטביעות על הידיות נעשו בחותם השייך, כנראה, למנהלה של המלך. המילה "למלך", לפיכך, פירושה: שייך למלך.

לכל קנקן כזה היו 4 ידיות, והטביעות נמצאו על כולן או על חלקן. טביעות כאלה הן עדויות חשובות ביותר במחקר הארכיאולוגי כיום. בטביעות החותם שנמצאו בממלכת יהודה טבועה דמות מופשטת של חרפושית בעלת שתיים או ארבע כנפיים, פרושות לצדיה. מיד לאחר המילה "למלך" מופיעה אחת מ-4 ערים: חברון, שוכה (בשפלת יהודה), זיף (תל זיף של היום, דרומית לחברון) או ממשות (שמיקומה אינו ידוע בוודאות). אלה היו כנראה ארבעה מרכזים מנהליים בממלכת יהודה של ימי המלך חזקיהו. לא ברור מה היה תפקידם של הקנקנים באותה תקופה: האם שימשו להעברת סחורות ממחסן מלכותי אחד למשנהו, לגביית מסים או לצורך אחר.



אבן מאתר החפירות שחוקקה בה כתובת עברית, שטרם פוענחה במלואה וטרם תוארכה. אפשר להבחין באותיות העבריות צ', ד' ו-ב' סופיות. האבן שולבה בשימוש משני במבנה מקושט מימי הביניים. תצלום: לירון נגר ועידן פייביש

חותם עברי מסוף תקופת המלכים

חותם עברי מתקופת בית-המקדש הראשון התגלה באזור הצפוני של החפירות. צורתו אליפטית ועליו חרוט: "לנתניהו בן יאש" (יש לקרוא יאוש). נראה שחותם זה היה חלק מטבעת שהיתה שייכת לאדם פרטי נושא תפקיד ממלכתי. "לנתניהו" מציין את שמו של בעל החותם, "יאש" מציין את שם אביו. החותם נחלק לשלושה פסי רוחב, וכתובת זו נחרתה על שני התחתונים שבהם, והוטבעה בכתב ראי כשלב אחרון בהתקנת החותם. במדור העליון הוטבע כעיסור מוטיב מעולם הצומח, החוזר בחותמות נוספים שהתגלו מאותה תקופה: שרשרת ובה ארבעה רימונים. עיטור חותמות היה נפוץ מאוד בממלכת ישראל ובממלכת יהודה במחצית השנייה של המאה ה-8 לפנה"ס, אך נדיר מאוד ביהודה של המאה ה-7 לפנה"ס, התקופה שלאחר כיבוש שומרון וגלות ישראל לאשור (שנת 720 לפנה"ס). חלקו העליון של החותם קמור וחלקו התחתון שטוח, והוא מחורר לאורכו לצורך שיבוצו במסגרת מתכת ולאחר מכן בתליון או בטבעת.

חותמות כאלה, שנקראו "דמויי-חיפושית" (Scaraboid) בשל דמיונם לחיפושית המצרית, היו נפוצים בתקופת בית ראשון החל משנת 900 לפני הספירה (תקופת בית ראשון החלה בסוף המאה ה-11 לפנה"ס והסתיימה במאה ה-6 לפנה"ס). חותמות אחרים, אך נדירים הרבה יותר, היו בעלי צורות אחרות, כגון חרוט, מלבן או ריבוע. החותם שהתגלה בחפירות האחרונות עשוי אבן חצי-יקרה. חותמות אחרים מאותה תקופה היו עשויים מתכות, זכוכית, חרס, עץ וכדומה.

חותמות שהיה מוטבע עליהם כתב עברי שימשו בארץ ישראל עוד מראשית הופעתו של הכתב העברי, לאחר שזה התפתח מהכתב הפניקי במאה ה-9 לפנה"ס. החותמות שימשו בעיקר לחתימת תעודות, לסגירת כלי קיבול מחרס או לחתימתם לפני צריפתם ואף לחיתום שערים. לעתים שימשו החותמות כקישוט או כעירבון, במיוחד אם היו עשויים חומרים יקרים ושימשו כחפץ המזהה את בעליו. החותמות השתייכו לאנשים פרטיים שנשאו בדרך-כלל משרות ציבוריות או תפקידים ממלכתיים. ריבוי החותמות בממצאים הארכיאולוגיים של אותה תקופה מעיד על חברה

זיכרון והפרעות תנועה שמקורן בהתנוונות אוכלוסיות תאי עצב, שהנפוצה ביותר מביניהן היא מחלת אלצהיימר.

מחלת אלצהיימר, שבה ניכרת פגיעה הדרגתית בזיכרון ובתהליכים קוגניטיביים עד לאבדן זהות מוחלט, פוגעת כיום בכאחד מתוך עשרה אנשים מעל גיל 65, ובאחד מתוך שניים מעל גיל 85, והיא הגורם הראשון לשיטיון (דֶמְנְצִיָה) תלוי גיל. המחלה נמשכת בממוצע 7 שנים עד למות החולה, אך הטווח הוא רחב: מ-5 עד 20 שנה עד למוות. יש לציין כי גם חולים המצליחים לחיות בצל המחלה תקופות חיים ממושכות זקוקים לטיפול יומיומי, ההולך ונעשה צמוד יותר עם התקדמות המחלה. צורך זה בטיפול הופך את מחלת אלצהיימר לנטל כלכלי עצום על הפרט ועל החברה. מעבר לכך כרוך הטיפול בחולה במחלה זו, כבמחלות ניווניות אחרות, בנטל רגשי עצום. אחוז האוכלוסייה הגדול הנפגע ממחלות ניווניות מתווה את הצורך בחיפוש אחר טיפול הולם, והופך אותו להכרח חברתי.

הנוירולוג הגרמני אלואיס אלצהיימר (Alzheimer) גילה את המחלה הנושאת את שמו ב-1906, לאחר שהבחין בניתוח שלאחר המוות באי-סדר ובהרס של תאי עצב בקליפת המוח, נוסף על הצטברות פסולת ליד התאים הפגועים. כמאה שנה לאחר מכן, הבנתנו את המנגנונים הגורמים לתסמינים של אלצהיימר ושל מחלות ניווניות אחרות היא עדיין חלקית בלבד. עם זאת, בשנים האחרונות נמצאה תכונה משותפת לכל אותן מחלות ניווניות במוח. הוכח כי בכל אותן מחלות קיימת הופעה אבנורמלית ובלתי מבוקרת של חלבונים הממלאים תפקיד במוח הבריא, המופיעים בתחילה כצברים מסיסים ומצטברים מאוחר יותר לגושים בלתי מסיסים (וראו: נעם לויתן ודינה וולדרסקי, "מחלות עצבים ניווניות: מנגנוני הפוך על הפוך", "גליליאו" 117). דוגמאות לצברים כאלה הם פלאקים חוף-תאיים (plaques) וסבכים תוך-תאיים (tangles) במחלת אלצהיימר, כפי שמצא כבר ד"ר אלצהיימר ב-1906; גופי לואי (Lewy bodies) תוך-תאיים במחלת פרקינסון; ואינקלוזיות (inclusions) המופיעות בגרעין התא ובנוזל התא, המתגלות במחלת הנטינגטון. ההנחה הרווחת היא שהצטברות חלבונים באופן בלתי תקין

"חודשים אחדים לאחר שאובחנה שירלי כחולה במחלת אלצהיימר, החלו הידרדרות והחמרה בתסמיני המחלה... היא לא היתה מסוגלת לנקות את הבית או לבשל. היא לא יכלה עוד לעקוב אחר מתכונים, ופעמים רבות ערבבה יחד מצרכים בטעות, והאוכל נזרק לפח... הנהיגה שלה הפכה מסוכנת ולא- בטוחה. עם הזמן, הסופרמרקט שבפינה היה המקום הרחוק ביותר שאליו הרגישה בטוחה לנהוג בכוחות עצמה... היא לבשה אותו בגד כל יום במשך חודשים, עד שהתבלה. עם הזמן פחתו יכולות התקשורת שלה עד שהשתמשה רק במספר מילים מצומצם, וכשדיברה היה קולה שקט ובקושי נשמע. היא לא יכלה לנהל שיחות, אלא רק לחזור על כמה מילים שאמרת לה... היא החלה להשמיע לעתים קרובות צווחות כאשר היתה חסרת סבלנות, למשל כשעמדנו בתור למסעדה בקניון. התנהגותה חסרת הסבלנות היתה ביטוי לתסכולה כאשר ניסתה לתקשר עם אנשים, כשניסתה למשוך את תשומת לבו של מישהו או כשהביטה במראה... היא החלה לאבד את שיווי המשקל בהדרגה, וגם כשתפסה את ידי בחוזקה, היתה מחליקה ונופלת... כעבור כשנתיים מגילוי המחלה איבדה שירלי לחלוטין את כושר הדיבור". (תרגום המחברים מתוך יומן הרשת של בוב הופמן, המפורסם על-ידי מרכז מאיו לחקר אלצהיימר שבמינסוטה. הופמן טיפל באשתו במשך מחלתה ותיעד את שלבי התקדמות המחלה מאז אובחנה כחולה אלצהיימר ועד לפטירתה).

ככל שמתארכת תוחלת החיים, כך קבוצת המחלות העצביות המוגדרת כ"מחלות ניווניות של מערכת העצבים" (Neurodegenerative diseases) הולכת ומקבלת ממדים של בעיה חברתית. מחלות אלה, המתבטאות בהתנוונות של אוכלוסיות תאי עצב במערכת העצבים המרכזית, משפיעות על חלקים גדלים והולכים באוכלוסייה. עם מחלות אלה נמנות אלצהיימר, פרקינסון, הנטינגטון, טרשת אמיוטרופית (ALS, מחלת לו גריג)¹ ועוד שלל הפרעות

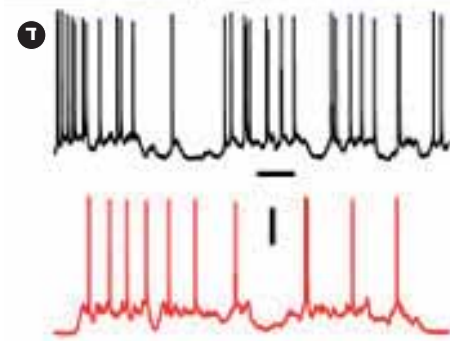
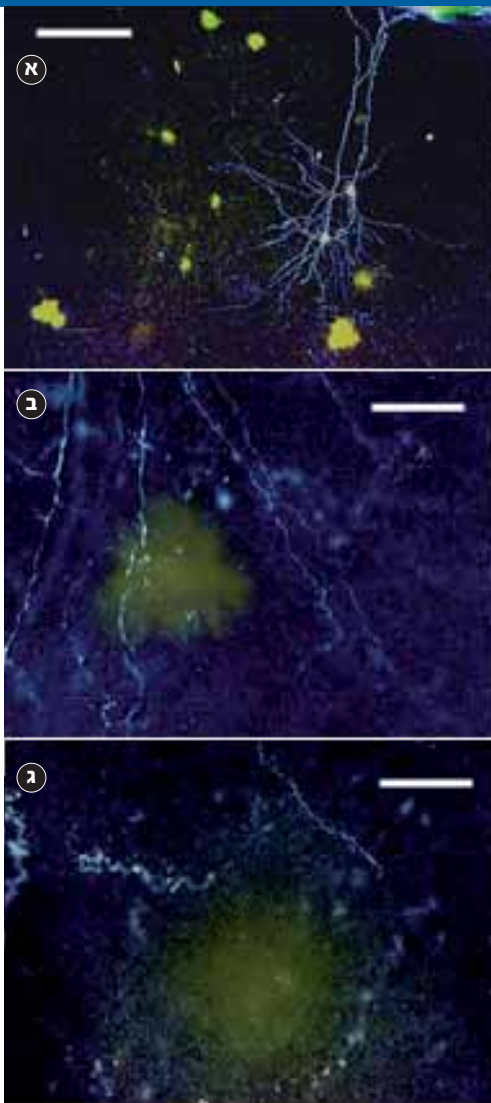
1 Amyotrophic Lateral Sclerosis, הידועה בארצות-הברית גם כ"מחלת לו גריג", על שם שחקן הבייסבול האמריקני לו גריג (1903-1941), שהמחלה קטעה באבה את הקריירה שלו.



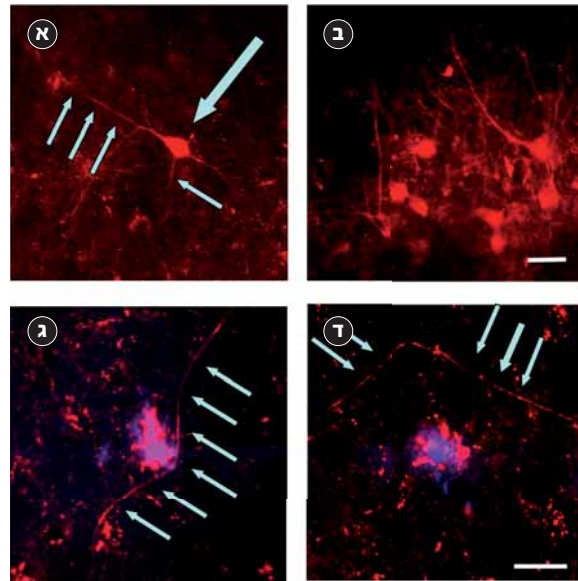
תצפית על מחלות ניווניות במוח

שלומית בקר, הגר ימין ואדוארד שטרן

תצלום: אימג'ינג / GettyImages



תמונה 2: הפרעה של פלאקים של $A\beta$ למבנה תאי העצב. א. שני תאי עצב של עכבר טרנסגני עם כמות מוגברת של $A\beta$. הפלאקים נראים בצבע צהוב. ב, ג. הגדלה של אחד משני הפלאקים מתמונה א, שבה נראים תאי עצב המתעקלים סביב הפלאק. נראה כי חלק מהשלוחות הדנדריטיות של הניורונים עוותו עקב הפלאק. ד. ירי (העברת אות עצבי) ספונטני של תאי עצב. בשחור - של עכבר רגיל; באדום - של עכבר טרנסגני. סקאלה: $100\mu\text{m}$. (מתוך: Stern et al., 2004)



תמונה 1: התעקלות תאי עצב סביב פלאקים. א. תא עצב (מסומן בחצים) מקליפת המוח של חיית ביקורת (לא-טרנסגנית). ב. תאי עצב מקליפת המוח של חייה טרנסגנית. ג. תא עצב (מסומן בחצים) בחיה טרנסגנית, המתעקל סביב פלאק. ד. דוגמה נוספת להתעקלות תא עצב סביב פלאק, הפעם כשהוא מרוחק ממנו מעט יותר. סקאלה: $25\mu\text{m}$ (מתוך: D'amore et al, 2003)

אלצהיימר, שהופיעו רק בנוכחות של פלאקים. תא עצב בריא מתקשר עם התאים הסובבים אותו על-ידי שרשרת של תהליכים אלקטרוכימיים. ירי של פוטנציאלי פעולה, שהם שינויי מתח מהירים העוברים לאורכו של אקסון העצב, מחולל תהליך נוסף שבו עובר שדר כימי במרווח שבין שני תאי עצב (המרווח הסינפטי), וממנו לתא הבא. כך נוצרת תקשורת בין התאים. בתא הפגוע של חולי אלצהיימר ניכרת פגיעה בתקשורת זו. לקווית אלה לא נמצאו בעכברים בלא פלאקים, גם אם התבטאה בתאיהם כמות גדולה של $A\beta$ מסיס. ניסוי זה הוא ההוכחה הראשונה להשפעה ספציפית של פלאקים על המבנה והתפקוד של תאי עצב במוח. חלק מממצאי הניסוי נראים בתמונה 2. נוסף על מדידת ההשפעה של פלאקים על המבנה





במוח, בצורותיהם המסיסות והבלתי מסיסות, מובילה בסופו של דבר למוות של תאי עצב בסביבתם. יחד עם זאת, התהליך המוביל לתוצאה זו עדיין לא פוענח במלואו. מאחר שמספר גדול של מחלות ניווניות של מערכת העצבים מופיעות רק בבני-אדם, מחקר מעבדתי של מנגנוני המחלה היה עד כה קשה עד בלתי אפשרי ליישום. מאחר שמחקר פולשני בבני-אדם כרוך בבעיות רבות, היה זה חיוני לצורך מחקר מדעי שלם לפתח מודלים של המחלות בחיות מעבדה, תוך שימוש ברעלנים או בטכניקות ניתוח שונות אשר הורסות באופן סלקטיבי אוכלוסיות תאי עצב מסוימות, ובכך מחקות את התופעות המתרחשות במחלה. בזכות מחקר הגנום וגילויים של גנים אנושיים רבים, נמצאו גם גנים הקשורים במחלות ניווניות. הנדסה גנטית מאפשרת לבצע מניפולציה בגנים אלה, לשלב אותם במינים שונים של בעלי-חיים, ובכך ליצור מודלים טרנסגניים למחלות אנושיות. החיה הנפוצה ביותר בשימוש זה היא העכבר, וכיום קיימים כמה מודלים למחלות ניווניות אנושיות בעכברים. מודלים כאלה מחקים, גם אם באופן חלקי, את תהליכי המחלה בבני-אדם, שבהם מצטבר במוח החולה חלבון אחד או יותר באופן בלתי תקין ותלוי גיל.

אחת השיטות המתקדמות בחקר המוח כיום היא דימות באמצעות מיקרוסקופ רב-פוטוני. מיקרוסקופיה רב-פוטונית היא שיטת דימות המאפשרת לדמות רקמה חיה עד לעומק של כמה מילימטרים. השיטה מבוססת על הרעיון, שלפיו אפשר להבחין בחלקיקים פלואורסצנטיים בתהליך של קליטה ופליטה של פוטונים. כאשר נשלחים שני פוטונים בו-זמנית מקרן לייזר אינפרה-אדומה שבמיקרוסקופ, הם נבלעים במולקולה ברקמה הביולוגית אשר נצבעה בצבעים זרחניים קודם לכן. שני הפוטונים מעוררים אזור קטן מאוד ברקמה, וקרן הלייזר מבצעת סריקה תלת-ממדית של הרקמה, שממנה נבנית תמונה של התא או המבנה שאותו מעוניינים לבחון.

יתרונו של המיקרוסקופ הרב-פוטוני בחקר המוח הוא בכך, שהוא מאפשר דימות של מוח שלם ומתפקד של חיה מורדמת, וכך אפשר להבחין בתהליכים כפי שהם מתקיימים בגוף החי, במקום דימות של רקמת מוח שהוסרה מהחיה, המאפשר רק הצצה חלקית ושאינה לאורך זמן בתהליכים אלה.

בהמשך נתאר מחקרים אחדים שנעשה בהם שימוש, בין היתר, בשיטת דימות זו, כדי לשפוך אור על המנגנונים הפועלים במחלת אלצהיימר.

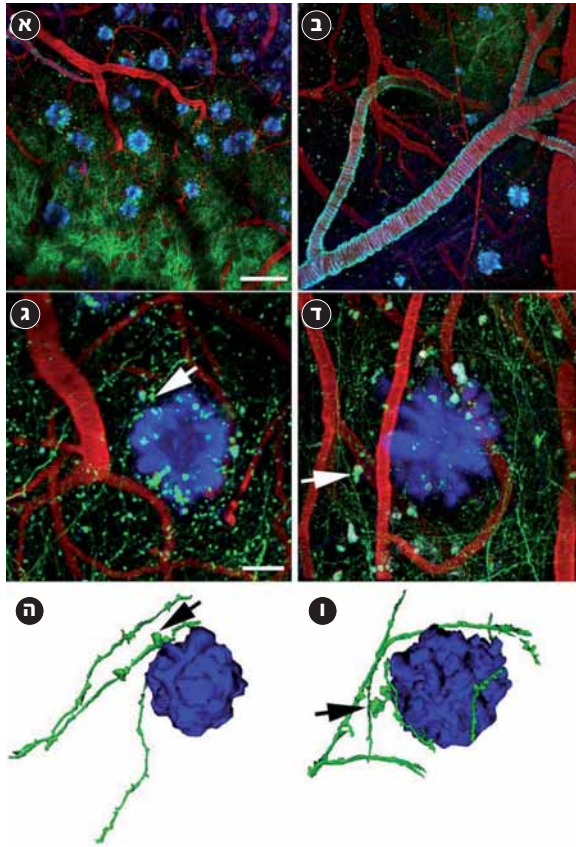
במחקר שנעשה במכון לחקר מחלות ניווניות בבית-החולים הכללי של מסצ'וסטס (MIND), נבדקו באמצעות דימות במיקרוסקופיה רב-פוטונית תאי עצב של עכבר טרנסגני, שהוחדרו לו הגנים המייצרים את החלבון אמילואיד ביתא (amyloid β , או $A\beta$), החלבון המופרש באופן בלתי מבוקר במוח של חולה אלצהיימר, ויוצר את הפלאקים הסניליים שהוזכרו לעיל. חלבון זה הוא אחד מסימני ההיכר של המחלה. עכבר טרנסגני כזה מפתח פלאקים בעיקר בקליפת המוח ובהיפוקמפוס, אזורים האחראים, בין היתר, ללמידה ולזיכרון. גם הוא, כמו בני-האדם החולים במחלת אלצהיימר, סובל מהידרדרות קוגניטיבית והולכת ומחמירה עם הגיל.

באמצעות צביעה זרחנית של תאי עצב ושל אותם פלאקים במוח של העכבר החולה, אפשר לצפות באמצעות המיקרוסקופ הרב-פוטוני בהשפעת חלבוני המחלה על תאי העצב לאורך זמן. התמונות שלהלן הן תמונות דימות של תאי העצב של עכבר החולה באלצהיימר.

בתמונה 1 אפשר לראות התעקלות של האקסון, החלק הארוך בתא העצב, סביב הפלאק, אשר מפריע למסלולו התקין. כפי שנראה בתמונה, התעקלות זו אינה נצפית במוח בריא.

בקיומם של הפלאקים במוח יש משום סכנה ממשית לתפקודו התקין, מאחר שהם משבשים תהליכים עצביים. הפלאקים גורמים לשינויים במבנה ובתפקוד של האקסון והדנדריטים, אותם חלקים בתא העצב אשר מהווים את הבסיס המבני לתפקודו הראשי של תא העצב, העברת מידע אל תאי עצב סמוכים לו.

במחקר נוסף שנעשה באותו מכון, נמצאה דוגמה נוספת להפרעה לתהליכים עצביים על-ידי הפלאקים של החלבון $A\beta$. הפעם, נוסף לדימות שבוצע על תאי עצב שהופרעו על-ידי פלאקים, נרשמה גם הפעילות הפיזיולוגית של אותם תאים. רישום זה היה המדידה הראשונה של השינויים הפונקציונליים בתא עצב בודד בבעל-חיים המשמש מודל למחלת אלצהיימר. מדידה זו חשפה לקויות בתקשורת בין תאי עצב בעכברים חולי



לשוב ולבצע דימות של אותם המבנים, גם ברמה התת-תאית, לאורך זמן. כך אפשר, למשל, לבחון את השפעתם של פלאקים על המבנה של הדנדריטים והספיינים (מבנים בתר-סינפטיים) שעל הדנדריטים לאורך זמן. כפי שניתן לראות בתמונה 4, ערוץ אחד במיקרוסקופ משמש לדימות של המבנה העצבי (בירוק), ערוץ שני לדימות הפלאקים (בכחול) וערוץ שלישי לדימות של כלי דם המשמשים כסמני מיקום מהימנים (באדום). כפי שאפשר לראות בשורה התחתונה שבתמונה, הספיינים באזור הפלאק הם בעלי צורה מעוותת ולא-תקינה, ואפשר להסיק מכך שהשפעתם של הפלאקים על מבנים עצביים אינה מכנית בלבד, כפי שהיה אפשר לחשוב על פי התעקלותם של התאים סביב הפלאק, אלא גם רעלית,

תמונה 4: פלאקים של $A\beta$ משנים את צורתם ואת מסלוליהם של תאי עצב בגוף החי. א, ב: דימות תאי עצב (בירוק), פלאקים של $A\beta$ (בכחול) וכלי דם המשמשים סמני מיקום (באדום). ג, ד: הגדלה של תמונות א, ב. נראים חלקים של תאי העצב שעברו שינוי מבני (מסומנים בחצים) בעקבות הקרבה לפלאקים. תאי העצב אינם חודרים את הפלאק, אלא מתעקלים סביבו. ה, ו: שחזור תלת-ממדי של פלאקים ותאי עצב מראה את ההתעקלות סביב הפלאק ואת השינויים במבנה של התאים באזורים הקרובים לפלאק. (מתוך: Spiess et al, 2005)

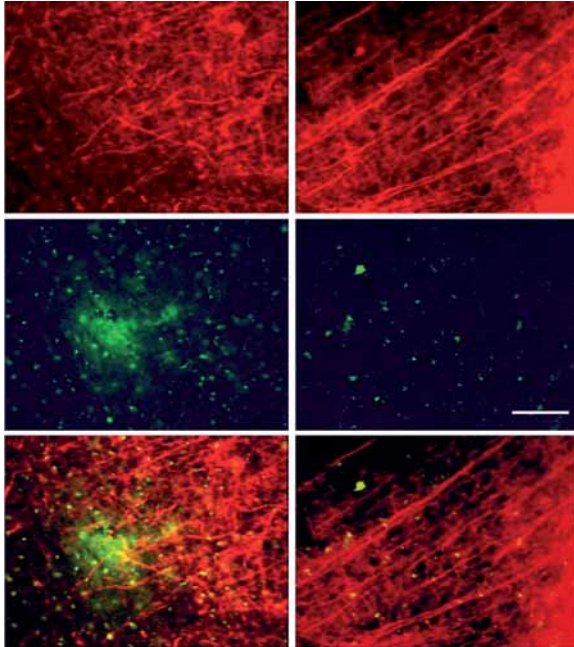
סקאלה: א, ב: $100\mu m$. ג, ד: $20\mu m$

גליליאו

פורום "גליליאו" נועד לאפשר מפגש ודין בטווח רחב של תחומי מדע ומחשבה - מגנטיקה עד תורת הקוונטים, מחורים שחורים עד פרקטלים. מדי חודש מארח הפורום מומחה בתחום מסוים, אשר כתב בגיליון האחרון. בואו לשאול, לשוחח ולענות.

www.ifeel.co.il/galileo





תמונה 3: התמונות בצד שמאל מראות חלק מקליפת המוח שלא טופל, ואלה שממין מראות חלק שטופל. השורה הראשונה מראה את הענף האדום של המיקרוסקופ, שבו אפשר לראות נאוריטים (אקסונים ודנדריטים) שנצבעו בצבע הביולוגי. בחלק המוח שלא קיבל את הנוגדנים (משמאל), העקמומיות של הנאוריטים היא כה גדולה עד כי קשה להבחין במסלוליהם. לעומת זאת, בחלק המוח אשר כן קיבל את הנוגדנים (מימין) מסלולם מתיישר והם בעלי כיווניות דומה, בדומה למה שנראה בחיות בריאות. בשורה האמצעית נעשה דימות של אותם אזורי מוח בדיוק, אך באורך גל אחר, כך שכעת אפשר להבחין בפלאקים של $A\beta$ שנצבעו בצבע ביולוגי אחר. בצד שמאל אפשר להבחין כי אותו אזור שנצפתה בו עקמומיות גבוהה של תאי העצב מאוכלס בפלאק של $A\beta$. לעומת זאת, שום פלאק לא נצפה באזור שטופל בנוגדנים. בשורה התחתונה נעשה מיזוג של שני התמונות, ובו נראית בבירור ההשפעה של הפלאקים על העקמומיות. התמונה הימנית התחתונה מציגה רקמה נקייה מפלאקים ובעלת נאוריטים ישרים. (מתוך: Lombardo et al., 2003)

ידי שימוש במיקרוסקופ רב-פוטוני עם גלאים לשלושה אורכי גל שונים. דימות של כלי הדם מאפשר לנו שחזור מדויק יותר של האזורים הנבדקים. על-ידי שימוש ב"מפת הדרכים" של כלי הדם, אפשר

והתפקוד העצביים, דימות של תאי עצב בחיות טרנסגניות מאפשר לבחון את השפעתן של גישות חדשות לטיפול במחלות ניווניות במוח. למשל, ממחקר של בריאן בקסקאי (Bacskaï) ועמיתיו ממכון MIND, מתברר כי חיסון פסיבי כנגד הצברים של החלבון $A\beta$ עשוי להסיר פלאקים של $A\beta$ מהקורטקס של עכברים טרנסגניים. עם זאת, עדיין נותרה בלתי פתורה שאלת גורלם של תאי העצב לאחר סילוק הפלאק: האם תאי עצב של חיה בוגרת שעברו דפורמציה עקב נוכחות פלאקים יכולים לשקם את מבנם לאחר סילוק הפלאק? שאלה זו חשובה בעיקר כי במשך שנים סברו כי למוח ישנה יכולת מועטה בלבד להשתנות, וכי הפלסטיות שלו מוגבלת רק לגילים צעירים. אם אמנם יכולים תאי העצב להשתקם לאחר דפורמציה, יש לכך השלכות משמעותיות על המחקר של ריפוי מחלות ניווניות.

על שאלה קריטית זו ניסינו לענות במחקר שנערך במעבדתנו במכון MIND. הוספנו באופן ישיר מנה בודדת של נוגדנים ל- $A\beta$ לאזור מוח מסוים של עכברים טרנסגניים שפיתחו כמות גדולה של פלאק בקליפת המוח, ולאחר מכן השוונו שני אזורי מוח שונים, האחד אשר קיבל את הנוגדן והאחר שלא קיבל את הנוגדן. בחלק המוח שלא קיבל את הנוגדנים (תמונה 3 משמאל), העקמומיות של הנאוריטים (שלוחות תאי עצב: אקסונים ודנדריטים) היא כה גדולה, עד כי קשה להבחין במסלוליהם. לעומת זאת, בחלק המוח אשר כן קיבל את הנוגדנים (מימין) מסלולם מתיישר והם בעלי כיווניות דומה, בדומה למה שנראה בחיות בקרה שאינן טרנסגניות.

המחקר שלעיל מספק הוכחה לכך שלאחר הסרת הפתולוגיה במוח הקיימת במחלת אלצהיימר, מבנה תאי העצב יכול להשתקם. על מנת לסתור את האפשרות שהנוגדן גרם למוות של הנאוריטים העקמומיים ולכן אין הם נצפים באזורים המטופלים, נמדד ונמצא כי צפיפות הנאוריטים לא השתנתה בין אזורים שטופלו ושלא טופלו. מעבר לכך, כשהשתמשנו בנוגדנים אשר לא מפרקים פלאקים של $A\beta$, לא נמצא שינוי בעקמומיות הנאוריטים.

אפשר אף לשכלל את המחקר במחלות ניווניות בגוף החי ולבצע דימות של מבנים נוספים, דוגמת כלי דם, על-



שירת המדע... לזכרו של פרופ' עפר לידר

פרס עידוד היצירה האמנותית
בין מדענים לשנת 2008

מפעל זה מבטא את דרך חייו ומשאלתו של עפר, אשר ראה את המדע כיצירה, את המדען כיוצר ואת התרבות כנובעת לא מן הפיצול, כי אם מן ההפריה ההדדית בין מדע ליצירה.

התחרות מיועדת לכותבים שעיסוקם במדעי החיים, הרפואה והבריאות, ההנדסה והמדעים המדויקים בעלי תואר שני (M.Sc) ומעלה, לרבות תלמידי תואר שני.

העמותה תעניק שלושה פרסים ליצירות בשפה העברית שטרם פורסמו בדפוס, בתחום השירה או הסיפור הקצר. גובה הפרסים 7,000 ₪, 4,000 ₪ ו-3,000 ₪. היצירות יוגשו וייבחנו בעילום שם ע"י ועדת שיפוט.

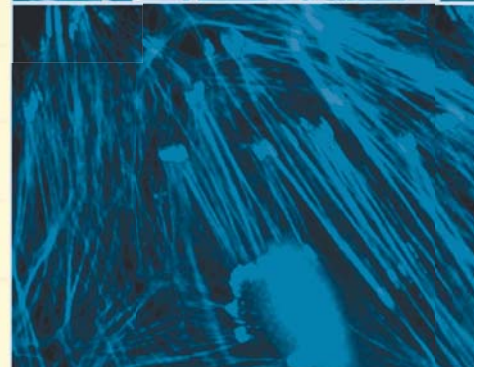
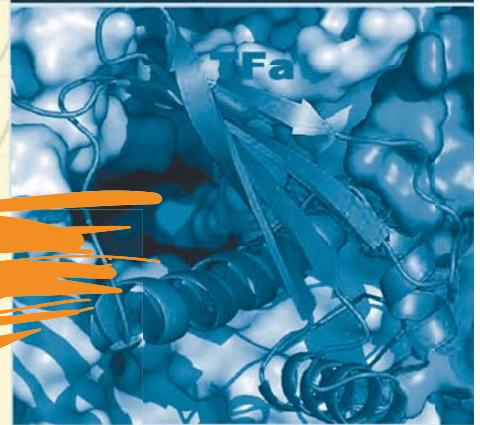
המועצ האחרון
להשגת היצירות
30 ביוני 2008

תקנון הפרס, טופס הרשמה
ופרטים נאתר:
www.weizmann.ac.il/ofcr

טקס הענקת הפרסים
יתקיים בערב "שירת המדע" לזכרו של פרופסור עפר לידר, המוקדש למפגש בין המדע לרוח,
שייערך במכון ויצמן למדע, ברחובות, ב-8 בינואר 2009.

* העמותה "שירת חייו" לזכרו של עפר לידר. ע"ר מס' 580438984.
מייסדי העמותה: פרופ' יוסף ירדן, פרופ' בני ביגר, פרופ' ירון כהן, יוספה גבעולי, דני קרמן, פרופ' דני כספי, חנה ריינשרייבר, אסנת לידר.
ועדת ההיגוי לפרס עידוד היצירה כוללת את מייסדי העמותה וכן את: פרופ' ליאה אודי, אהרון אפלפלד, חיים באר, איזי גורן,
שולמית בלכוע, חיה הופמן, פרופ' שלמה יגור, רחל חלפי, פרופ' אבנר סריינין, פרופ' עדנה מוזס, אני משעול, רוני סומק,
אירית סלע, פרופ' מיכאל סלע, צבי עצמון, ליאת קפלן, פרופ' רות קרטון-בלום, פרופ' יאיר רייזנר, פרופ' ענר של, אבנר שץ
כתובת העמותה: רח' התלמים 119, כפר בילו 76965, טלפון 052-2455062.
ניתן להעביר תרומות לחשבון: 10-930-40217/04 פרטים נוספים בדוא"ל: osnat@interpage.co.il

על חייו ויצירתו של עפר לידר: www.lider.name



לקריאה נוספת:

Bacsikai B, Kajdasz ST, Christie RH, Carter C, Games D, Seubert P, Schenk D, Hyman BT. Imaging of amyloid-b deposits in brains of living mice permits direct observation of clearance of plaques with immunotherapy. *Nature* 2001 7(3):369-372.

D' Amore J, Kajdasz ST, McLellan ME, Bacsikai BJ, Stern EA, Hyman BT. In Vivo Multiphoton Imaging of a Transgenic Mouse Model of Alzheimer Disease Reveals Marked Thioflavine-S-Associated Alterations in Neurite Trajectories. *Journal of Neuropathology and Experimental Neurology* 2003 62 (2) 137-145.

Stern EA, Bacsikai BJ, Hickey GA, Attenello FJ, Lombardo, JA, Hyman, BT Cortical Synaptic Integration In Vivo Is Disrupted by Amyloid-b Plaques. *The Journal of Neuroscience* 2004 24(19):4535- 4540.

Lombardo JA, Stern EA, McLellan ME, Kajdasz ST, Hickey GA, Bacsikai BJ, Hyman BT. Amyloid-b Antibody Treatment Leads to Rapid Normalization of Plaque-Induced Neuritic Alterations. *The Journal of Neuroscience* 2003 23 (34):10879 -10883.

Spires TL, Meyer-Leuhman M, Stern EA, McLean PJ, Skoch J, Nguyen PT, Bacsikai BJ, Bradley TH. Dendritic Spine Abnormalities in Amyloid Precursor Protein Transgenic Mice Demonstrated by Gene Transfer and Intravital Multiphoton Microscopy. *The Journal of Neuroscience* 2005, 25 (31):7278 -7287.

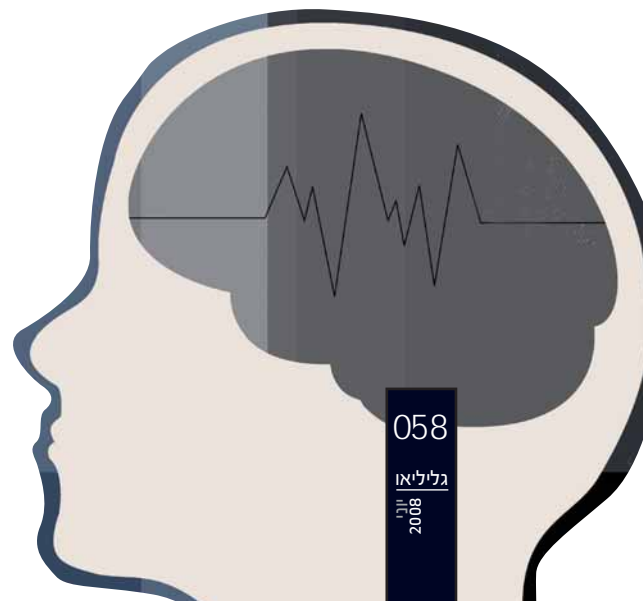
מכיוון שהיא משנה את צורת המבנה בדרך שאינה מוסברת באופן אחר. באמצעות שיטת דימות זו אפשר גם לעקוב אחר השפעתה של תרופה על היעלמותם של פלאקים ולעקוב אחר שינוי המבנה העצבי באזור המטופל.

לסיכום, למיקרוסקופיה הרב-פוטונית בשילוב עם מודלים של חיות טרנסגניות למחלות ניווניות יש יתרון גדול הן בחקר התפתחות המחלה והן בבחינת שיטות טיפול חדשות. אם בעבר היתה לנו רק היכולת להביט בתמונה בודדת של התפתחות המחלה לאחר המוות, כעת יש בידינו דימות של רצף התפתחות המחלה ושל תהליך הריפוי. בשילוב עם מחקרים אלקטרופיזיולוגיים אשר בוחנים את תפקוד התא, אפשר לקבל תמונה מהימנה של הפגיעה המבנית והתפקודית בתאי עצב במוחה של חיה החולה במחלת עצבים ניוונית.

אנו תקווה כי מחקרים מתקדמים כאלה ואחרים של מחלות ניווניות של מערכת העצבים אמנם ישפכו אור על אפשרויות הריפוי של מחלות קשות אלה, אשר טרם נמצא להן מרפא. ■

ד"ר אד שטרן הוא חוקר וראש המעבדה לחקר מחלות ניוורודגנרטיביות ורשתות עצביות במרכז הרב-תחומי לחקר המוח על שם גונדה באוניברסיטת בר-אילן.

הגר ימין ושלוּמית בקר הן תלמידות לדוקטורט במעבדה זו.





באוניברסיטאות אירופה מועט יחסית, אך מהמאה ה-17 ואילך התרבה מספרם של היהודים בעלי תואר זה.

מאפייני הרופאים בארץ-ישראל

בקרב היהודים שעלו לארץ-ישראל מכל חלקי העולם היהודי, ובייחוד מחצי-האי האיברי, היו אישים רבים שעסקו ברפואה. הידיעות על רופאים, ועל רופאים יהודים בפרט, בארץ-ישראל בתקופה העות'מאנית ניזונות מפירוורי מידע הפזורים במקורות כתובים שונים, ורובן נוגעות רק לירושלים. מרופאי ירושלים נזכר את ר' דוד אבן שושן, ראש הישיבה הספרדית בירושלים בראשית המאה ה-16 ורופא הקהילה היהודית; אברהיהם בן שומלי – רופא יהודי, שנזכר בקשר לטיפול שהעניק לחולה מוסלמי; יחיא בן יוסף, שהוסמך מטעם חצר הסולטן העות'מאני בירושלים; ר' יעקב צמח, שהיה רופאו הפרטי של מושל צפת; ר' רפאל מרדכי מלכי, שרכש את הכשרתו הרפואית באיטליה; ר' טוביה כ"ץ (המכונה טוביה הרופא), שעלה לארץ-ישראל בסוף ימיו; והיו רבים אחרים.

מספרות המחקר אפשר להעריך הערכה כללית את מספרם של הרופאים היהודים בירושלים: בתעודות הסג'ל (מסמכי בית-הדין המוסלמי) הוזכרו לפחות עשרה רופאים יהודים שפעלו בשנים 1531-1587; ברשימת המסים העות'מאנית משנת 1690 נזכרו שלושה רופאים; ברשימת בעלי מקצוע יהודים בירושלים משנת 1806 נמנו שלושה רופאים – מספר התואם את עדותו של ר' אליעזר ברגמן: הוא סיפר בשנת 1815 על שלושה רופאים מומחים שפעלו בעיר, מהם אחד מפולין ואחד מאיזמיר.

מקורות אלה מראים שהיה מספר קבוע למדי של רופאים בדור: שלושה-ארבעה. סביר להניח שמספר הרופאים היהודים בירושלים בתקופות אלה היה רב יותר, שכן הקביעה שהיו שלושה רופאים בממוצע מבוססת על נתונים רשמיים המתייחסים לרופאים מוסמכים, המוכרים רשמית מטעם השלטון. אין בידינו נתונים די הצורך לשער את מספרם של הרופאים המוסלמים והנוצרים בירושלים ואת מספרם של הרופאים ביתר ערי ארץ-ישראל.

הרופאים בירושלים היו מאוגדים באגודה מקצועית (גילדה) שכללה את כלל הרופאים. אלה כונו "טביב" או

בעקבות הכיבוש העות'מאני בדצמבר 1516 וסדרי המנהל הנמרצים שהביא עמו השלטון החדש, השתפרו שירותי הרפואה הציבורית בארץ-ישראל, ועלה מספר הרופאים היהודים (המוסמכים) עד שנעשה גבוה יחסית למספר הרופאים באוכלוסייה הכללית. במחצית הראשונה של המאה ה-16 פעל השלטון העות'מאני לשיפור ההיגיינה הציבורית. מפעולותיו בירושלים: שיפוץ מערכת הספקת המים והרחבתה, בניית בתי-מרחץ ציבוריים ופיקוח על טריות המזון.

בקרב הרופאים העות'מאנים היה אפשר להבחין בסוגים שונים. הסוג הראשון היה "רופא מוסמך", המכונה במקורות "רופא מובהק" או "רופא מומחה" ("טביב"), שלמד במוסד הוראה מוכר והוסמך מכוח לימודיו וניסיונו. "רופא מובהק" הוגדר גם מי שהתמחה אצל רופאים מובהקים אחרים, המוכרים בתחומם. הסוג השני היה "מרפא", כלומר מי שלא הוכשר הכשרה רפואית מוכרת.

הרופאים שעבדו במסגרת הממשל העות'מאני רכשו את השכלתם המקצועית במוסדות הוראה המוכרים מטעם השלטון, כמו המחלקות הקליניות של בתי-החולים הגדולים ובתי-ספר לרפואה (מדרסות) במרכזי הערים הגדולות. בוגרי בית-הספר הממלכתי לרפואה באיסטנבול קיבלו כתב מינוי רשמי מטעם השלטון, ובו צוין תחום התמחותם. שיטת לימודי הרפואה שהיתה מקובלת באימפריה העות'מאנית היתה המשכה של השיטה ההיפוקרטית-גלנית, ששוכללה בידי אנשי מדע הרפואה המוסלמים בימי הביניים.

לצד הרופאים מן המזרח פעלו גם אנשי מקצוע שמוצאם במרכז אירופה ובמערבה, ובהם נוצרים ששירתו במסגרת המסדר הפרנציסקני (רוב הפרנציסקנים בעלי התפקידים הרפואיים היו קשורים לסייעוד ולרוקחות, ולא לריפוי מובהק) ויהודים. רובם רכשו את השכלתם הרפואית באוניברסיטאות אירופה, ובייחוד באיטליה. אוניברסיטאות דוגמת אלו של פאדובה, פירוג'ה, פרארה ופאביה העניקו למסיימי ההכשרה הרפואית את התארים "מגיסטר" – דיפלומה מקצועית שהסמיכה את בעליה לעסוק במקצוע הרפואה, או "דוקטור" – תעודה שהתירה לרופאים גם להורות באוניברסיטאות ולזכות בהטבות כספיות מהשלטונות. מתעודות רשמיות עולה, שבמאה ה-15 היה מספרם של הרופאים היהודים שקיבלו תואר "דוקטור"





זהר עמר ויעל בוכמן

תצלומים: אימג'בנק / GettyImages

צוהר לעולמם של רופאים ומרפאים יהודים בארץ-ישראל העות'מאנית

060

גליליאו
ח'שן
2008



המרפאים העניקו עזרה ראשונה, חילקו תרופות ומוצרים רפואיים וסיפקו עצות מתחום הבריאות, ובכך מילאו תפקיד חשוב גם ברפואה מונעת.

מרפא ורפא

כדוגמה למרפא ולרופא יהודי בתקופה העות'מאנית ישמשו ר' חיים ויטאל (נולד בצפת בשנת 1543 ונפטר בדמשק בשנת 1620) ור' דוד דה-סילוה (חי בירושלים בשנים 1684-1740). שניהם נולדו בארץ-ישראל, ומוצאם היה כנראה ממגורשי ספרד שהיגרו לאיטליה וממנה לארץ-ישראל. שניהם היו תלמידי-חכמים ובעלי השפעה רבה בקהילה היהודית, ועם זאת הושפעו מן הספרות הרפואית האירופית.

ר' חיים ויטאל (רח"ו) מייצג את חוג המרפאים – שלמדו מתוך ניסיון אישי ומעיון בספרות הרפואית המקצועית, ושנעזרו בקשריהם עם רופאים מובהקים ועם רוקחים. המקור היחיד המלמד על התעניינותו ועל עיסוקו של רח"ו ברפואה הוא כתב יד פרי עטו של רח"ו מאוספו של ר' שלמה מוסאיוף, שפורסם בחלקו לאחרונה (בידי המחברים).

החלקים הרפואיים של כתב היד דנים במגוון המחלות האופייניות לתקופה ובדרכי הטיפול בהן. המחלות הנזכרות: דבר, מחלות ילודים וילדים, מחלות עור, מחלות עיניים, מחלות האופייניות לנשים, מחלות מערכת השתן והעיכול. שיטת הרפואה שנקט רח"ו מבוססת על השיטה הגלנית המסורתית, ובכלל זה אבחון על פי סימנים בשתן, הקזת דם, תזונה נכונה ותרופות המתאימות לסוג המחלה. עם זאת ניכרת גם השפעה מעטה של הרפואה האיטלקית בת אותו זמן. בטקסטים יש גם תיאור של ניתוח עפעפיים; לא ברור אם רח"ו עסק בכירורגיה בפועל, אך אין ספק שהכיר את יסודותיה. רח"ו מזכיר התייעצות עם רופאים, נוקב בשמות של רופאים יהודים שהיה לו קשר איתם ומציין חלק ממקורותיו, שחלקם מוכרים לנו, דוגמת "שבילי אמונה" לר' אלדבי, שממנו העתיק קטעים רפואיים רבים; "מפתח הרפואה" לאלישע הרופא; "ספרי סרפיאנוני" וה"אנטידוטריום" לניקולאנו; ואחרים שלא זוהו, דוגמת "ספרי הרופאים", שמהם למד הכנת משחות ותרופות, ו"ספר נודע של רופאים" שעסק באופני הכנת סירופים (שראבאת), מרקחות רפואיות (מעג'ון) וריבות רפואיות (מורבא).

1611-1684 (לערך) כתב כי מצרים סבלה ממחסור ברופאים, ורבים מהרופאים המקצועיים היו יהודים. וכך ציין גם הנזיר הפרנציסקני אלזער הורן (Horn), ששהה בארץ-ישראל בשנות השלושים של המאה ה-18.

מאפייני המרפאים

הרופאים המקצועיים שירתו רק חלק קטן מהאוכלוסייה, בעיקר עירוניים ובעלי הכנסה גבוהה יחסית. חולים רבים, בייחוד עירוניים מבני המעמד הבינוני והנמוך ובני האזורים הכפריים, פנו לקבלת טיפול רפואי לקשת רחבה של אנשים שהיתה להם נגיעה בתחום הרפואה, או לחלופין העדיפו לטפל בעצמם. חולים ובני משפחותיהם, בפרט באזור הכפרי, הכירו ממסורת אבות את התכונות הרפואיות של חומרי המרפא, ולרבים היה ידע רפואי בסיסי. בבתים רבים באימפריה העות'מאנית היו "ערכות עזרה ראשונה" שהכילו תרופות מסוגים שונים: שמנים, משחות, גלולות מרפא, אבקות, חומרים משלשלים וצמחי מרפא שונים. במקרים מסובכים יותר הם נעזרו בידע של מרפאים מקומיים שהיו מוכרים להם, לעתים אפילו סָפְּרִים.

אבליה צ'לבי ציין כי רק שלושה אחוזים מהעוסקים ברפואה באיסטנבול היו בעלי מינוי שלטוני רשמי. כל היתר, שסווגו ביומנו בשבע קטגוריות, היו מרפאים – רופאים חסרי הכשרה פורמלית: רוקחים, מרפאי עיניים, ספקי משחות, יצרני בשמים ושמנים רפואיים, מוכרי תרופות ותבלינים (עטארין) וסָפְּרִים. המוסדות הרפואיים הרשמיים לא יכלו לטפל בצורכי כלל האוכלוסייה והיו יקרים יחסית, ואילו המרפאים היו זמינים ותעריפיהם היו זולים יותר. מלבד זאת, הטיפול הרפואי הממסדי כלל לעתים ניתוחים וטיפולים פולשניים, ואלה גרמו לפעמים סיבוכים וזיהומים. לפיכך נוצר חוסר אמון כלפי הרפואה המקצועית, וחולים רבים סמכו יותר על מרפאים מוכרים שהשתמשו באמצעי ריפוי עממיים, מה גם שחלק מאמצעים אלו לוו באמונה דתית בסגולותיהם, כמו לחשים, קמעות ואבנים יקרות. חולים מכל המעמדות החברתיים ומכל הדתות שבאימפריה האמינו ביכולת הריפוי של אבנים וקמעות, שנקשרו בדרך-כלל לפסוקים ולפתגמים דתיים מוכרים וסייעו להם נפשית להתגבר על פחדיהם מפני המחלה ואף להחלים ממנה.





של רופא יהודי במוסלמי עוררו לעתים תגובות חריגות כלפיו או כלפי הקהילה היהודית כולה. על הנוצרים הפרנציסקנים נאסר לקבל תרופות מידי רופאים יהודים, חוץ ממקרים יוצאים מן הכלל. נראה שמדובר בהנחיה מטעם הכנסייה (שחודשה מפעם לפעם), ועל פיה אסור ליהודים לטפל בחולים נוצרים. ואולם ידוע, שבמקומות שונים באירופה ובירושלים לא הקפידו רשויות הכנסייה על תקנות אלה.

הרופאים היהודים, לפחות אלה שעבדו כרופאים מטעם השלטון, נמנו עם המעמד החברתי הגבוה. הם היו פעילים בולטים בהנהגה היהודית, ומקצתם אף נמנו עם גדולי התורה שבה. כיאה למעמדם הרם, הם ניכרו בלבושם המיוחד. ליאונרד ראולף (Rauwolf), רופא ובוטנאי גרמני, סייר בסוריה ובארץ-ישראל במחצית השנייה של המאה ה-16. ביומן מסעו כתב, שבמקום הטורבן הצהוב שאפיין את הטורקים, חבשו הרופאים היהודים כובע גבוה עשוי בד קטיפה אדום. גם ר' משה חאגיז, שנולד בארץ-ישראל בראשית המאה ה-18, תיאר את לבושם: "דרכן שכל מי שהוא רופא מומחה יש לו מלבוש מיוחד שניכר בו שהוא רופא אומן מותר ללבושו... שגם רופאי ישראל לובשים אותו".

השלטון העות'מאני קיבל בזרועות פתוחות את הרופאים היהודים, שכן אלה היו בעלי ידע מן העולם המערבי ודיברו בשפות רבות. הנוסע והחוקר הצרפתי פייר בילון (Belon) סייר במזרח בראשית התקופה העות'מאנית (1546-1549). ברשימות ממסעו כתב, שרוב הרופאים בערי טורקיה הם יהודים, ושיש להם יתרון על הרופאים הטורקים, מאחר שהם דוברים שפות רבות ומכירים את הספרות הרפואית המקצועית שנכתבה במערב, ושרק חלק ממנה תורגם לטורקית. תיאור דומה מתאר גם ליאונרד ראולף. הוא התרשם מרמתם המקצועית הגבוהה של הרופאים היהודים וכתב ביומנו, כי שלא כרופאים הטורקים, היהודים משכילים וביכולתם לקרוא את הספרות הרפואית בשפה היוונית, הערבית והלטינית. גם הנזירים הפרנציסקנים שיבחו את רמתם המקצועית של הרופאים היהודים, וכתבו כי הם נמנים עם השכבה המשכילה. כך כתב הנזיר הפרנציסקני אוֹג'ן (אבגניוס) רוג'ה (Eugene Roger), ששהה בארץ-ישראל בשנים 1628-1635 והיה רוקח ורופא במקצועו. הנוסע הטורקי אבליה צ'לבי (Evlilya Tshelebi's)

← "חכים" (רופא) ו"ג'ראח" (מנתח). את ראש הגילדה בחר הקאדי על סמך מקצועיותו של הנבחר והקריירה הרפואית שלו, והוא היה ממונה, בין היתר, על שמירת רמתם המקצועית של הרופאים בעירו, על הפיקוח עליהם ועל השתלמות הרופאים שטרם סיימו את הכשרתם המקצועית.

רופאי ירושלים היהודים השתייכו גם הם לגילדת הרופאים, ואולם שכרם היה נמוך משכר הרופאים המוסלמים, והם לא הורשו לעבוד בבית-החולים "אלצלאחי", ולפיכך עבדו בעיקר עבודה פרטית או במוסדות הבריאות העדתיים היהודיים. בתי-החולים בתקופה זו לא התמקדו בטיפול רפואי בחולים בלבד, אלא העניקו גם שירותי סיעוד והארוחה. בית-החולים הציבורי היה אמור לשרת את בני כל הדתות, ולא לנהוג בהם איפה ואיפה, אך למעשה הוא שירת בעיקר את האוכלוסייה המוסלמית. הקהילות היהודיות – הספרדיות והאשכנזיות – החזיקו בתי-חולים משלהן. בתי-חולים אלה שירתו רופאים שקיבלו מינוי רשמי ומשכורת מהשלטון המרכזי. קהילות יהודיות שונות באימפריה העות'מאנית החזיקו במוסדות "ביקור חולים" הנזכרים במקורות מן המאה ה-17 – מוסדות שהעניקו לנזקקים שירותי סיעוד והארוחה. מהמקורות עולה שמוסד "ביקור חולים" בירושלים, שפעל לטובת כל אלה שלא היה ביכולתם לממן טיפול רפואי פרטי, סבל ממחסור בכספים ולא היה ביכולתו להחזיק ברופא מוסמך.

הרופאים היהודים, בפרט אלה שהשתלבו בהייררכיה המקצועית, טיפלו לא רק בבני עדתם אלא גם בבני הדת המוסלמית והדת הנוצרית. טיפול של יהודים בבני הדת האחרות טמן בחובו סכנות: תקלות ואסונות שנבעו מטיפולו



הן כמרכיב בתרופה בדומה לשימוש במינרלים אחרים, והן כסגולה. בקטעים הרפואיים אין עדות ל"מאגיה", אך אין ספק שר"ו האמין שהשפע והכוחות הטמונים בלבנה ובכוכבים עוברים לחומרי הרפואה. כך לדוגמה תיאור הכנת תרופה להופעת צהבת: "לאדם שפניו ירוקים [צהובים] ולא מחמת חולי הירקון אם תרצה שיאדימו פניו תעקור עשב שיכוריה (= עולש, Cicorium) עם שרשיה ותבשל במים ושים המים באשישת זכוכית תחת הכוכבים בלילה".

כדוגמה לרופא בחרנו להציג את ר' דוד דה-סילוה (רד"ס), בנו של מחבר הספר "פרי חדש" על השולחן ערוך, הרב חזקיה דה-סילוה (1656-1696), ונכדו של הרופא הירושלמי המפורסם הרב רפאל מרדכי מלכי (נפטר בשנת 1702).

בהיותו כבן 12 שנה התייתם רד"ס מאביו, וגדל והתחנך אצל סבו הרופא. בערך בשנת 1705 יצא לאירופה כשליח הקהילה וכדי לגייס כספים להוצאת ספרי אביו. באמסטרדם פגש יהודים עשירים שהכירו את האב, והם לקחו אותו תחת חסותם. הבולט שבהם הוא ר' משה אורוביו, שסייע בידו לרכוש השכלה רפואית פורמלית בזמן קצר. אפשר לשער כיצד רכש רד"ס את השכלתו הרפואית בזמן כה קצר על פי הדרך שבה הוסמך לרפואה ר' אורוביו. אורוביו נרשם בפקולטה ללימודי הרפואה באוניברסיטת לייזן, וביום המחרת כבר ניגש לבחינה ועבר אותה בהצלחה. דבר זה הקנה לו את הזכות להגיש את התזה שלו לפני הפרופסורים וסנאט הפקולטה. שלושה ימים לאחר הרשמתו הוא ניצב לדיון על עבודתו לפני שופטי הסנאט, ולאחר אישור התזה הוענק לו התואר "דוקטור לרפואה". נראה שגם רד"ס עבר אותם שלבי הסמכה.

כאשר הגיע להולנד כבר היה רד"ס בעל ידע תיאורטי נרחב ברפואה, ידע שרכש באופן עצמאי מקריאה בספרות מקצועית, משיחות והתבוננות בסבו הרופא ומסיוור באירופה, שבמהלכו התוודע למשכילים שונים בהולנד ובאנגליה. נראה שר' משה אורוביו הכינו לבחינות, ומיד לאחריהן הגיש רד"ס תזה שהוכנה מראש. לאחר שקיבל את הפאטנטל (patentel) – רישיון וזיכיון רשמי לשאת בתואר "רופא מובהק" – הוא שב לארץ-ישראל ועבד במקצועו החדש.

רד"ס, שהחזיק בתואר "רופא מובהק", ביקר בחריפות את





נוסף על הספרות המקצועית הנזכרת בכתב היד שבאוסף מוסאיוף, שאב רח"ו את ידיעותיו ברפואה, על פי עדותו שם, מתוך התבוננות בעבודתם של רוקחי התמיסות הרפואיות – סירופים רפואיים – ובעבודתם של רופאים, וכן מתוך קבלת מידע בעל פה מהם.

רח"ו החל לעסוק ברפואה, ככל הנראה, רק בערוב ימיו. בשנת 1604 חלה במחלה קשה שפגעה בראייתו. בספרו "ספר החזיונות" כתב רח"ו כי חיפש מזור לחוליו דווקא אצל מכשף נודע. ייתכן שהחיפוש אחר מרפא למחלתו הניע אותו ללמוד את רזי הרפואה והרוקחות. אפשרות נוספת היא דרישה מצד בני קהילתו. רח"ו שימש רב של קהילת בני סיציליה בדמשק. מן הדוגמאות שהוא נותן בגוף ראשון לטיפול בחולים אפשר להניח שטיפל בעיקר בילדים או במקרי חירום שהופנו אליו, דוגמת התקף אסתמה קשה שגרם לחנק:

"לחולי האזמא ואפי' שהיא נושנת. קרה מקרה לא' שהיה עלול מזה החולי ופעם א' נתחזק עליו והציקהו מאד עד שכמעט נפסקה נשימתו והיה נחנק בסכנה גדולה. ותחלה נתתי לו ש'ארב זה עשוי מן ט'ו אסופיפאש [שיזף תרבותי – הערת המחברים] וב' דרהם גרעיני חבושים... וישתהו חם מעט מעט פעם אחר פעם ויחזיקנו מעט בגרון ויבלענו. ואז נתתי לו ביצה צלוייה רכה ובתוכה שיעור פול א' מן חלתית הנק' אסא פיטיד'א [כלך החלתית – הערת המחברים] ומעט זעפרן וע'י זה נעקרו הליחות לגמרי והשליכם ובתוך כ'ד שעות נתרפא מהמצוקות ההם וחזר למציאותו הראשון אך החולי עצמו כבר ידעת שאין לו תרופה לגמרי רק להקל אותו קצת מחוזקו וכחו ותקפו..."

מהערות על דרך טיפולו אנו למדים שחוליו נמצא במעקב רפואי צמוד, לעתים גם בלילה או לפנות בוקר. לצד הטיפול המדעי השתמש רח"ו גם בלחשים, בקמעות ובסגולות, אבל רק כאשר נוכח לדעת שהטיפול המדעי אינו יעיל, לדוגמה בהופעת הצהבת: "קח עשב הנק' בלשון יון מרצולו וזרעהו בגינה תוך חצירך ותשתין עליו ט' נקבים בחסרון הלבנה קודם הנץ החמה. וצריך שיהיו תשעה נשים ג' בתולות וג' אלמנות וג' נשואות וביד כל אחת מהן כברה א' ויאמרו לחש זה".

רח"ו השתמש גם באבני חן, דוגמת אודם, ספיר ויהלום,



בארצות האלו... שאינו יודע כי אם להקיז ולעשות איזה תחבושת קורין אותו בשם סינייור דוטור, נותנים ידם לרשעים רופאי אליל, כאילו להתגאות ולהתנשא ולרדות בחכמים ורופאים אמתיים". ■

המאמר הנוכחי נערך על בסיס גרסה מלאה שראתה אור בליווי מראי מקומות, תחת הכותרת "מרפאים ורופאים יהודים בארץ-ישראל בתקופת השלטון העות'מאני", "ממזרח וממערב" ח' (תשס"ח), הוצאת אוניברסיטת בר-אילן, עמ' 197.

פרופ' זהר עמר הוא מרצה וחוקר במחלקה ללימודי ארץ-ישראל וארכיאולוגיה, וראש המדור לתולדות הרפואה, באוניברסיטת בר-אילן. מתמחה בתולדות הטבע בעת העתיקה (ובמיוחד במקורות ישראל), תרבות חומרית וחיי יומיום בארץ-ישראל בעת העתיקה, תולדות הרפואה ואתנופרמקולוגיה. פרסם מאמרים וספרים רבים בתחומים אלה.

ד"ר יעל בוכמן היא מרצה וחוקרת בחוג ללימודי ארץ-ישראל וארכיאולוגיה, שלוחת בר-אילן במכללה האקדמית כנרת בעמק הירדן. מתמחה בהיסטוריה, רפואה, תרבות חומרית וחיי יומיום של תקופת ימי הביניים והתקופה העות'מאנית בארץ-ישראל. פרסמה בתחומים אלה.

לקריאה נוספת:

- י' בוכמן ז' עמר, "רפואה מעשית לרבי חיים ויטאל: מרפא בארץ-ישראל וסביבותיה", ירושלים תשס"ז.
- ר' ברקאי, הפצת מחשבה וידע באגן הים התיכון - הרפואה בראשית ימי הביניים, "זמנים" 34-35 (1990), עמ' 75-81.
- א' ווסט, אלישע היווני: רופא ופילוסוף בתחילת התקופה העות'מאנית, "פעמים" 41 (תש"ן), עמ' 49-57.
- ז' עמר, "פרי מגדים לר' דוד די-סילוה הרופא מירושלים", ירושלים תשס"ד.
- מ' שפר, רופאים ובתי-חולים בחברה העות'מאנית, "זמנים" 62 (1998), עמ' 38-48.

אטיות חדירתה למזרח. רח"ו לא השתמש בתורת התרופות הכימיות של פרצלסיוס, ובוודאי שלא הכיר את תורת מחזור הדם. יותר ממאה שנים לאחר גילוי אמריקה, לא הזכיר בכתביו חומרי רפואה מהעולם החדש. רד"ס, כמאה שנים אחריו, עדיין ריפא ברוח הרפואה הגלנית. בחיבורו נמצאים רק הדים לתורות החדשות וקצת אזכורים של סממני רפואה חדשים.

האסכולות האירופיות החדשות חדרו לארץ-ישראל בעזרת מערכת הקשרים הענפה שנשמרה בין חכמי ארץ-ישראל ובין חכמי אירופה, בעיקר מקהילות איטליה, שאליה הגיעו משפחותיהם של רח"ו ורד"ס לאחר גירוש ספרד ושממנה עלו לארץ-ישראל. הרופאים שהוכשרו למקצועם באירופה (רובם הוכשרו באיטליה) השתמשו בחיבוריהם בשמותיהן האירופיים, הלטיניים והערביים של התרופות ושל המחלות. שמות אלה נזכרים בחיבוריהם של רח"ו ושל רד"ס, והם מעידים על בליל השפות שהיו שגורות בפי יהודי הגליל וירושלים מן המאה ה-16 עד המאה ה-18: איטלקית, ספרדית, פורטוגזית, ערבית ואפילו לטינית. ידיעת השפות באה לידי ביטוי גם בספרות השו"ת שנכתבה בארץ, חלקה על-ידי הרופאים-החכמים שהזכרנו לעיל, ובה מוצאים אותם מונחים וביטויים. אלה מלמדים על הקשר של הרופאים עם ארצות מוצאם בהעברת מידע וספרות רפואית.

רח"ו ורד"ס נמנו עם שכבה של רבנים-רופאים שהשתייכו להנהגה המרכזית של היישוב היהודי בארץ-ישראל. רח"ו מייצג את דמות המרפא, שלא שלל את הרפואה העממית וקיבל אותה כחלק משלים לרפואה המדעית. הרפואה לא היתה פרנסתו אלא, ככל הנראה, השלמה לפועלו כרב הקהילה. הנזקקים פנו אליו, כאל מרפאים אחים בני זמנו, כאשר לא השכילו לפתור את הבעיה הרפואית בעצמם או כאשר לא יכלו להיעזר בשירותי הרופא המקצועי. רד"ס, לעומתו, העיד על עצמו שהוא רופא מובהק והתפרנס מרפואה. כסבו המפורסם שלל שימוש בסגולות, בקמעות ובלחשים שיעילותם לא הוכחה, ויצא חוצץ כנגד מי שמתכנים "רופאים" אבל אינם מומחים: "החסירי הדעת אינם יודעים שלא יקרא חכם אלא בעבור החכמה, ולא דוטור אלא בעבור הדוטורייאה, כמו שנוהגים בכל ערי פראנקייא מה שאין כן עושים



המרפאים הבלתי מוסמכים ואת רופאי האליל השרלטנים שהיו ברחבי האימפריה העות'מאנית ובירושלים. דוגמה לכך היא דרך הטיפול בירושלים בבן גיטנו, שפניו התעוותו במחלת "עיקוש הפה" (ככל הנראה, הכוונה לתופעה הנקראת כיום Bell's palsy או facial paralysis: שיתוק של עצב הפנים הגורם לחולשת שרירים בחלק אחד של הפנים ולאי-יכולת לעצום את העין בצד זה). תחילה טיפלו בו נשים המרפאות בדרך מאגית, בטענה "שהיה ממעשה שדים וכאן אין צריך חכמת רופא". כאשר אשתו של רד"ס סיפרה על כך לבעלה, מיד התרה בהן שיפסיקו לעסוק בכשפיהן. הוא בדק את החולה ולאחר האבחון ריפאהו בדרך "הטבע": "שלחתי להם שאל ילכו בדרכיהם ובעצותיהם המקולקלים שהמה הבל ורעות רוח שלא ידעו ולא יבינו בחשיכה יהלכו, כי זה החולי הוא מפני נזק המוסקולי שבא לו מפני הגידים שבפנים והתחלת חוט השדרה. ובא אלי החכם הנ"ז תכפ והודעתי לו סבותיו ואותותיו ע"ד טבע וידע והבין ומיד נשתדלתי לעשות תרופה. אחר שבעה שמונה ימים מהחולי ונתרפא בתוך ב' ימים בס"ד".

סימן נוסף המעיד על היותו רופא מובהק הוא השימוש במונחים מדעיים לטיניים. שלא כרח"ו, בחיבורו של רד"ס מצוינים שמות המחלות והתרופות במינוח המדעי בשפה הלטינית או האיטלקית. בחיבורו "פרי הדס" מתגלה רד"ס כרופא מיומן ומנוסה, אשר טיפל במגוון המחלות הנפוצות, כמו קדחת (הופעת חום מסיבה לא-ידועה), דבר, מחלות עיניים ומעיים, בעיות עקרות של נשים ואין-אונות בגברים. במסגרת עבודתו טיפל בחולים שונים, בלא הבדל של מין, גיל, מעמד או דת. כרופא פרטי ביקר ביקורי בית אצל חוליו, ולעתים הובאו החולים אליו.

רד"ס, כמו טוביה כהן הרופא (הם הכירו זה את זה בירושלים), טיפל בשיטת הרפואה האירופית וראה באברהם זכותא לזיטנוס (1575-1642) מודל לדמות הרופא היהודי האידיאלי. עצותיו של זכותא, כגון התייעצות עם רופאים אחרים במקרי מחלה קשים, הנחו אותו בעבודתו המעשית כרופא. מבחינת עולם הרפואה השתייך רד"ס לאסכולה המסורתית, שהחזיקה בתורת הליחות, טבעי המזגים והתרופות הגלניות. עם זאת, אפשר לראות שאימץ תפישות מעטות מן הרפואה המודרנית, כמו שימוש בתרופות

כימיות המבוססות על מתכות ועל מינרלים, כמו באסכולת פרצלסיוס (1493-1541) או תורת מחזור הדם שגילה ויליאם הארווי (1578-1657).

רד"ס גם מזכיר צמחי רפואה שמקורם בעולם החדש, כמו כינין, טבק וקקאו.

סיכום

במאמר זה הצגנו בקצרה שני רופאים יהודים – ר' חיים ויטאל (רח"ו), אוטודידקט בהשכלתו שפעל כרופא לא-מוסמך בתחילת המאה ה-17, ור' דוד דה סילוה (רד"ס) – גם הוא, בעיקר, אוטודידקט, אך בעל רישיון וזיכיון לשאת את התואר הרשמי "רופא", שפעל במאה ה-18.

התערות שכבת הרבנים-הרופאים בארץ-ישראל, ששניהם נמנו עמה, עם רופאים שרכשו את השכלתם הרפואית בארצות האימפריה העות'מאנית, יצרה מזיגה מיוחדת של רפואה אירופית-גלנית-ערבית. הן רח"ו והן רד"ס פעלו ברוח הרפואה הגלנית המסורתית של ימי הביניים, ואולם היתה להם גישה גם לתורות החדשות שהתפתחו באירופה, תורות שהשפיעו יותר על רד"ס מאשר על רח"ו.

תחומי המדע באירופה התפתחו בקצב מהיר ממחצית המאה ה-15. בתקופה זו החלו לתרגם את ספרות הרפואה היוונית הקלאסית ישירות ללטינית. התרגום הישיר, בלא הפרשנות הערבית שנלוותה לספרות הרפואה הערבית, סייע בהתפתחות תורות חדשות ובהעמקה בתחומי הכימיה והאנטומיה. האישים המפורסמים שהשפיעו על תחיית הרפואה במאות ה-16 וה-17: פרצלסיוס (1493-1541), שהשתמש בתרופות כימיות המבוססות על מתכות ומינרלים; אנדרה וסליוס (1514-1564), שנחשב למייסד האנטומיה המודרנית; אמברואז פרה (1510-1590, Paré), שתרגם רבות להתפתחות הניתוח המודרני; וויליאם הארווי (1578-1657), שגילה את מחזור הדם.

לצד לימוד הרפואה הגלנית הקלאסית, החלה העמקה ביסודות המדעיים על סמך ניסויים ודרישה להרחבת השכלתם הכללית של הסטודנטים. חיבוריהם של רח"ו ורד"ס מעידים על קשרים עם אירופה, אך הם מעידים גם על השפעתה המוגבלת של האסכולה האירופית ועל



ממחקרי אוניברסיטת בריאילן

ההיגיון עצמו מחייב שכל החיות וכל הצמחים דומים באותו סוג של אקלים ובאותם תנאים של מזג אוויר, כלומר נמצאים באותו קו מקביל וממוקמים באותו מרחק משני הקטבים (קלאודיוס פטולמאיוס, "גאוגרפיה", ספר ראשון סעיף 9).

כך מצהיר קלאודיוס פטולמאיוס, איש אלכסנדריה שבמצרים, בחיבורו הגאוגרפי שנכתב במאה השנייה לספירה. פטולמאיוס (= תלמי) עסק בחקר מדעים שונים, ובהם אסטרונומיה ומתמטיקה, וידוע בזכות חיבורו "אלמגסט" (Almagest), שסקר באופן מקיף תופעות וגופים אסטרונומיים, ובהם השמש, הירח, כוכבי-הלכת וליקויים, תוך שימוש בטריגונומטריה. בצד אלה חיבר יצירה גאוגרפית מקיפה שבה סקר את שלוש היבשות הידועות בזמנו – אירופה, אסיה ואפריקה – בשילוב יסודות אסטרונומיים של מדידת קווי רוחב ונקודות ציון. ההצהרה הנזכרת כאן, מתוך הפתיחה ל"גאוגרפיה", מקשרת בין בעלי-חיים וצמחים ובין אקלים ומיקום ביחס לקטבים על גבי קו מקביל, כלומר קו רוחב. מה הם שורשי של קישור זה, כיצד בא לידי ביטוי במקורות העתיקים ומה המשמעויות שנודעו לתפישה זו בקרב אנשי העת העתיקה?

העיסוק באקלים ובהגדרות אסטרונומיות וגאוגרפיות של אזורים שונים על פני כדור-הארץ השתייך בעת העתיקה לתחום התעניינותם של פילוסופים, אשר כבר בעידן הקדם-סוקרטי העלו שאלות באשר ליקום, לעולם המיושב ביחס לשאר חלקי היקום, למבנה ולהרכב של החיים על פני האדמה ולדינמיקה של הטבע על ענפיו השונים. ה"פיזיקה" היתה אחד משלושה תחומים שבהם דנה הפילוסופיה העתיקה (לצד אתיקה ולוגיקה), והיא חבקה כל מה שנוגע ל"פיסיס" (physis), כלומר לחומרים שמהם מורכב הטבע ולחוקים שעל פיהם הוא מתנהל. משום כך, כלולה בחיבורים פילוסופיים

עתיקים קבוצה מרכזית של מקורות בנושא האקלים. בצד טקסטים פילוסופיים המהווים מבחינתנו מקור להבנת תיאוריית אזורי האקלים, אנו מוצאים שפע של מידע בטקסטים גאוגרפיים. הגאוגרפיה היוונית העתיקה כענף אינטלקטואלי התפתחה תחילה כגאוגרפיה תיאורית, שלא השתמשה בחישובים מדויקים ובמחקר אמפירי, אלא הציעה תיאורים של אזורים ואתרים. הבסיס היה בדרך-כלל תיאור מראהו של אתר על מאפייניו הטופוגרפיים, הבוטניים והזואולוגיים, וכן ההיסטוריים והמיתולוגיים. תיאור מקיף כזה של אזור נתון נקרא בפי היוונים "כורוגרפיה", מן המילה היוונית "כורה" (chora), שפירושה מרחב, מקום, ארץ. מלבד ענף זה של טקסטים גאוגרפיים, התפתחה תת-סוגה אחרת של כתיבה גאוגרפית שאפשר להגדירה כיום כגאוגרפיה מדעית, אשר השתמשה באסטרונומיה, באריתמטיקה ובגאומטריה כדי לקבוע נקודות ציון של אתרים, מרחקים בין נקודות, צורות וגדלים של אזורים. נוסף על שתי תת-סוגות אלה, אנו מוצאים גם ספרות המתעדת מסעות בעולם, ויחד עם התיאורים המלומדים, משלימה את תמונת העולם הפיזי בעיני היוונים.

הרודוטוס איש הליקרנסוס (המאה ה-5 לפנה"ס) זכה כבר בעת העתיקה לכינוי "אבי ההיסטוריה", ועבודתו מהווה ציון דרך חשוב גם בתולדות הגאוגרפיה העתיקה, בשל הקטעים הנרחבים שבהם תיאר הרודוטוס ארצות ועמים שהיו חלק מהאימפריה הפרסית במאה ה-6 לפנה"ס. כאשר דן בארצם של הסקיתים, עם שישב בצפון העולם המיושב הידוע בזמנו (אוקראינה ודרום רוסיה כיום), ציין הרודוטוס:

כל הארץ הזאת... היא בעלת אקלים קר במיוחד. במשך שמונה חודשים הקור הוא ללא נשוא. בחודשים אלה אם תשפוך מים, לא יתהווה בוץ אלא אם תדליק אש. הים וכל הבוספורוס הקימרי קופאים ועל הקרח צועדים צבאות הסקיתים... (ספר רביעי סעיף 28, בתרגום ב. שימרון ור. צלינק-אברמוביץ, הוצאת פפירוס, תל-אביב 1998).

> דיוקן בתחרית צבוע מימי הביניים של הגאוגרף והאסטרונום קלאודיוס פטולמאיוס

1. אם לא צוין אחרת, הקטעים המצוטטים הם בתרגום המחברת מהמקור היווני או הלטיני. בסוף המאמר מובאות הפניות למהדורות בתרגום לאנגלית.



דניאלה דוויק

תיאוריית אזורי האקלים בעת העתיקה ומשמעותה האנתרופולוגית

ממחקרי אוניברסיטת בריאילן



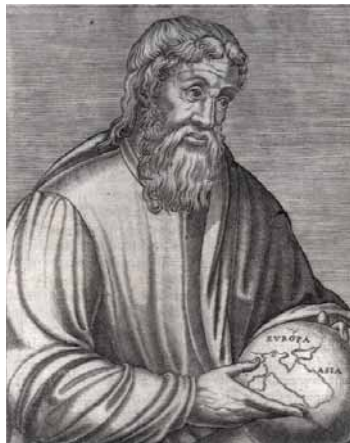
המילה "אקלים", שאנו משתמשים בה כיום (climate באנגלית, Klima בגרמנית, climat בצרפתית), מקורה במילה היוונית klima, שמשמעותה הראשונית עיקול, שיפוע, ובמיוחד – הנטייה המשוערת של כדור-הארץ ביחס לקטבים. מכאן שהתופעה הקשורה בשינויים האזוריים של מזג האוויר כרוכה מילולית בתפישה היוונית בדבר אזורי רוחב אשר זהים עם אזורי אקלים.

אפשר להתחקות אחר התפתחות תורת האקלים והתפישות הכרוכות בה, באמצעות חיבור גאוגרפי אנציקלופדי בן המאה הראשונה לספירה, שכתב ההיסטוריון והגאוגרף סטראבו (Strabo) איש אמסיה שבאסיה הקטנה. סטראבו הקדיש מזמנו למיזם גדול, שבו התכוון לתאר את כל העולם המיושב כפי שהיה ידוע בזמנו. הוא התמקד בסקירות תיאוריות ואתנוגרפיות על פי מיטב המסורת היוונית. חיבורו, המכונה "גאוגרפיה", מקיף 17 ספרים, והוא מחולק לפי אזורים, שופע נושאים וכולל פרטים רבים מתחום הבוטניקה, הזואולוגיה, ההיסטוריה, האסטרונומיה ותחומי ידע רבים אחרים. בשל רוחב היריעה הנושאת שלו, וגם בשל העובדה שסטראבו הסתמך על מאות מקורות קודמים, החיבור נחשב אנציקלופדיה של מידע ומהווה אבן יסוד בהבנת הגאוגרפיה העתיקה, וכן מאגר של עובדות ורעיונות הנוגעים לתחומים רבים אחרים בחקר העידן העתיק. במסגרת המבוא למפעלו האנציקלופדי מבהיר סטראבו:

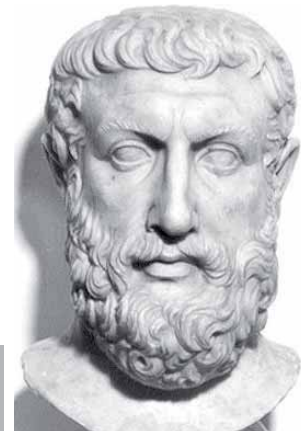
בין השמש ובין כדור-הארץ. לפי חלוקה זו קיימים על גבי הגלובוס חמישה אזורים: אחד משווני, המצוי סביב קו המשווה ומאופיין באקלים חם במיוחד; שניים קוטביים, המצויים סביב שני קוטבי הכדור ומאופיינים באקלים קר במיוחד; ושניים בינוניים, המצויים בין האזור המשווני ובין האזור הקוטבי בכל אחד מחצאי הכדור (תרשים 1). פרמנידס גם טען, שהאזור המשווני אינו מיושב בגלל קרינת השמש הישירה, המגבירה את החום במקום באופן שאינו מאפשר קיום חיים אנושיים.



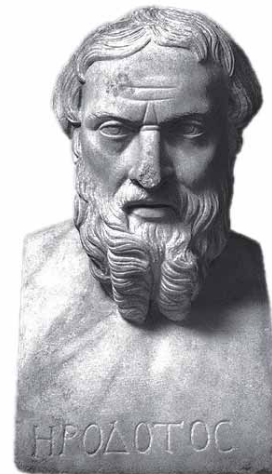
תרשים 1. חלוקת כדור-הארץ לחמישה אזורי אקלים על בסיס התיאוריה של פרמנידס.



דיוקן בתחריט מימי הביניים של ההיסטוריון והגאוגרף סטראבו



דיוקן שיש הלניסטי של הפילוסוף פרמנידס



דיוקן שיש הלניסטי של
ההיסטוריון הרודוטוס

בצפון, ההודים במזרח, האתיופים בדרום והאיגרים במערב – עולה אצל הרודוטוס גם ביחס לאזורים המזרחיים, ושוב בקישור לתנאי מזג האוויר:

מבין בני-האדם הידועים לנו ושעליהם ניתן לומר דבר בטוח כלשהו, ההודים הם הרחוקים ביותר במזרח בכיוון לשמש העולה מכל העמים שבאסיה. הארץ שבמזרח הודו היא שממה בגלל החול... אצלם השמש לוחטת ביותר בבוקר, לא כמו במקומות אחרים – בשעות הצהריים... בשעות אלה לוחטת השמש הרבה יותר מאשר בצהרי היום ביוון... בצהרים לוחטת השמש בהודו כמעט כמו אצל בני-אדם אחרים, ואחרי הצהריים חום השמש הוא כמו אצל אחרים בבוקר. כאשר השמש מוסיפה לשקוע, נעשה קר יותר עד שעם שקיעתה נעשה קר מאוד (ספר שלישי סעיפים 98, 104).

הרודוטוס מציין כאן תופעה שמפגיעה גם אותו, והיא, שחום השמש בהודו עז יותר בשעות הבוקר והוא הולך ופוחת במהלך היום, בניגוד לחוויה בכל מקום אחר בעולם, שבו חום השמש נמוך בבוקר, גובר לקראת אמצע היום ושוכך לקראת הערב. הבחנה זו ביחס להודו – שאינה עומדת כמובן במבחן המציאות – קשורה לתפישת מבנהו של העולם כמשטח שטוח מוקף מים. שהרי לפי תפישה זו, מאחר שהודו שוכנת בקצה המזרחי של העולם המיושב, כלומר סמוך לקצהו של משטח האדמה, כאשר השמש זורחת היא מצויה במרחק קצר ביותר מהארץ, וככל שהיא מתקדמת היא מתרחקת מהאזור המזרחי. כלומר, ציון שינוי הטמפרטורה במהלך היום באזור ההודי משקף למעשה תפישה של העולם כשטוח, שרווחה עדיין בתקופתו של הרודוטוס.

ואולם, עוד לפני זמנו של הרודוטוס כבר הועלתה תיאוריה שלפיה העולם הוא כדור. תיאוריה זו מיוחסת לפילוסוף פיתגורס, שחי ופעל במאה ה-6 לפנה"ס. המערכת האסטרונומית הפיתגוראית הניחה שקיימת אש מרכזית, שסביבה נעים במעגלים הגופים השמימיים, ובהם השמש וכדור-הארץ. לתלמידו של פיתגורס, פרמנידס איש אליאה שבסיציליה, מיוחסת הגדרתם של אזורי אקלים בצורה של אזורי רוחב על גבי כדור-הארץ, בעזרת הזוויות המשתנות

כלומר, הרודוטוס, או מקורותיו, שמעו על הקור הקיצוני באזורים הצפוניים, שלא דמה לחורפים שהכירו בארצות המרחב היווני. מעבר לכך, מופיע בכתבי הרודוטוס גם הד לידיעות על תנאים קשים אף יותר באזורים צפוניים מאזורי המושב של הסקיתים:

בארץ שמצפון לשטח שכניהם אי-אפשר לראות עוד כלום ואי-אפשר לחדור אליה בגלל מטר הנוצות. כי האדמה והאוויר מלאים נוצות והן מונעות את הראייה (ספר רביעי סעיף 7).

ידיעות אלה מדגישות הן את התנאים הקיצוניים והן את העובדה שבשל כך אזורים שלמים בלתי ראויים למושב בני-אדם ואף אינם מאפשרים מעבר. באזורים הצפוניים המתוארים כאן, מדובר ב"נוצות" שהרודוטוס דואג להסביר את מהותן באופן הזה:

אשר לנוצות שעליהן אומרים הסקיתים שהאוויר מלא אותן ושאי-אפשר בגללן לראות את מה שמעבר לארץ או לעבור שם, זו דעתי: מצפון לארץ הזאת יורד שלג מתמיד, אמנם פחות בקיץ מבחורף, כמתקבל על הדעת. מי שראה מקרוב ירידת שלג סמיך יודע מה אני אומר. כי שלג דומה לנוצות. לכן בגלל חורף מסוג זה הארץ שבצפון היבשת אינה מיושבת. (ספר רביעי סעיף 31).

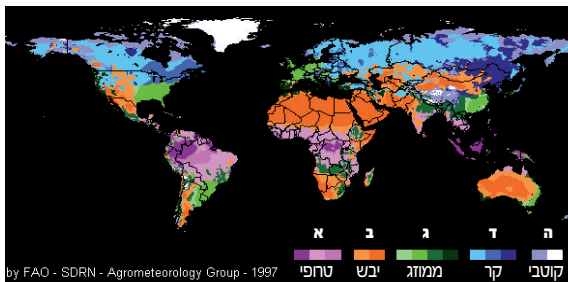
תפישת גבולות העולם המיושב – האויקומנה (oikoumene) – המסומנים בצורה של אזורים שוממים, אשר בגבולותיהם שוכנים עמי קצוות קבועים – הסקיתים

ממחקרי אוניברסיטת בריאילן



מפת העולם על פי קלאודיוס פטולמאיוס, תחריט מאת יוהנס שניצ'ר, 1482

באופן כללי, הקישור בין אזורי אקלים לבין אזורי רוח ברוח בחוגים המדעיים מאז העת העתיקה ועד ימינו. את המיון הראשון של אקלים שלא בעזרת מדידות אסטרונומיות הציע פיזיולוג הצמחים ולדימיר קופן (Köppen), שפרסם את חלוקתו זו ב-1900. קופן קישר בין סוגי צמחייה לבין תנאי אקלים (תרשים 3). כדי להגדיר את החלוקה שלו, בחר בחמש קבוצות צמחייה ושייך אותן לאזורי האקלים השונים, אבל עדיין התבסס על החלוקה היוונית העתיקה לחמשת אזורי האקלים. הוא ניסה להתאים קווי רוחב בעלי טמפרטורה זהה לסוגים של צמחייה ולגבולות של אזורים חקלאיים. כך נקבע הקו שמעבר לו כבר אין צומח דגן, קו שמעבר לו כבר אין צומחים עצים וכן הלאה.



תרשים 3. אזורי האקלים על פי ולדימיר קופן

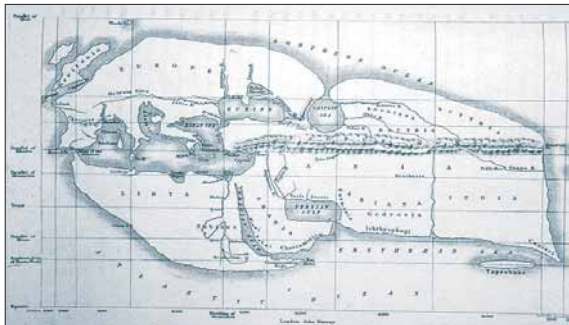
הראשונה לפנה"ס, שאף הוא, כבן זמנו היווני סטרבו, שאף לתאר את האויקומנה. וכך הוא כותב:

...הארץ נחלקת לשני חצאים ממזרח למערב שאותם מכנים המיספרות, והיא מחולקת לחמישה אזורים אופייים. החום לא מאפשר חיים באזור המרכזי והקור – באזורים החיצוניים ביותר. בשני האזורים הנותרים והניתנים ליישוב יש אותן עונות שנתיות, אבל לא באותו זמן. האנטיכטונים (Antichtones) מיישבים אזור אחד ואנחנו – את האחר. הכורוגרפיה של האזור האחד אינה ידועה בגלל החום באזור הביניים, ואילו הכורוגרפיה של האחר תתואר עתה ("תיאור העולם", ספר ראשון סעיף 4).

ובחזרה לפטולמאיוס: בעזרת חישובים אסטרונומיים, הוא שכלל את הגדרת קווי הרוחב וביסס אותה על רישום ההבדל שנמדד בשעות בין אורכי היום הארוך ביותר בנקודות שונות. בכך הוא חילק את פני כדור-הארץ בעזרת טבלת אקלימים אסטרונומית, שחלק ממנה מובא כאן לשם הדגמה:

הראשון [קו הרוחב] נבדל מקו המשווה ברבע שעה [כלומר היום הארוך ביותר בשנה בקו רוחב זה הוא בן 12 שעות ורבע]
 השני נבדל בחצי שעה
 השלישי בשלושת רבעי השעה
 הרביעי בשעה... והוא עובר ב-Meroe...
 השישי... בשעה וחצי... ועובר ב-Syene...
 העשירי בשעתיים וחצי... ועובר ברודוס...
 העשרים ואחד בשמונה שעות... ועובר ב-Thule...
 ("גאוגרפיה", ספר ראשון סעיף 23).

המקומות הנזכרים הם Meroe – ממלכה באתיופיה המזוהה עם שבת התנ"כית; Syene – היא אסואן שבמצרים; רודוס שביוון ו-Thule, המזוהה עם סקנדינביה. כלומר, האזור המיושב של העולם מתחיל בקו הרוחב הרביעי שקבע תלמי ומסתיים בקו הרוחב ה-21, אשר עובר באזור סקנדינביה. אלו הם למעשה גבולות האויקומנה כפי שהיה מוכר בזמנו בצפון ובדרום, כלומר אתיופיה בדרום וסקנדינביה בצפון.



תרשים 2. מפה מודרנית מהמאה ה-19, המשחזרת את תמונת העולם על פי סטרבו. מתוך: E. H. Bunbury, *History of Ancient Geography*, London 1879, vol. 2, p. 238

האי הענקי הזה. כ-250 שנה לפני הולדתו של סטרבו, אסף הפילוסוף אריסטו בספרו "מטאורולוגיקה" תובנות שונות ביחס לאקלים. ושם הוא קובע:

אנו מכירים את האוקיינוס לרוחבו עד לאזורים הבלתי מיושבים, ושם מצד אחד אף לא גר בגלל הקור ומצד אחר בגלל החום. ואילו מעבר להודו ולעמודי הראקלס [מצרי גיברלטר] בגלל הים אין התיישבות ואין רצף יבשתי סביב הכדור ("מטאורולוגיקה", ספר שני סעיף 5).

לפי ציטוט זה, העולם המיושב מוגבל לרוחבו בשל האקלים ולאורכו בשל האוקיינוס המקיף אותו. מטעמים של סימטריה, שיער אריסטו גם שכפי שיש אזור מיושב המוכר ליוונים בחצי הכדור הצפוני, כך יש אזור מקביל בחצי הכדור הדרומי:

יש שני חלקים שאפשר ליישב: אחד, שבו אנו חיים, בכיוון הקוטב העליון, והשני – בכיוון הקוטב האחר, כלומר הדרומי... רק אלה יכולים להיות מיושבים... ("מטאורולוגיקה", ספר שני סעיף 5).

השילוב של תפישת אזורי האקלים הפרמנידית עם ההשערות האריסטוטליות מסוכם באופן בהיר בדברי הפתיחה של הגאוגרף הרומי פומפוניוס מלה (Mela) במאה

הגאוגרפיה מבקשת להגדיר את חלק העולם שבו אנו יושבים בכך שהיא מגבילה אותו באמצעות אחד משני האזורים הממוזגים. במערב ובמזרח הים מגביל אזור זה, אבל בדרום ובצפון – טבע האוויר; שהרי האוויר שבין גבולות אלה הוא ממוזג ונוח עבור צמחים ובעלי-חיים, בעוד שהאוויר משני צדי אזור זה הוא לא-נוח בגלל עודף חום או בגלל חוסר חום. היה צורך לחלק את הארץ לחמישה אזורים המקבילים לשלוש הקבוצות השונות של מזג אוויר. חיתוך כדור-הארץ על-ידי קו המשווה לשתי המיספרות, הצפונית שבה אנו חיים, והדרומית, מציג את שלושת מזגי האוויר השונים. שהרי המחוזות על קו המשווה ובאזור המשווני אינם מיושבים בגלל החום, ואלה שליד הקוטב אינם מיושבים בגלל הקור, ואילו אזורי הביניים הם ממוזגים ומיושבים ("גאוגרפיה", ספר שני סעיף 3 תת-סעיף 1).

כלומר, סטרבו, שהכיר את התיאוריות המוקדמות מפרמנידס ואילך, מסכם ואומר שהאוקיינוס, הנתפש כאי מוקף אוקיינוס, מוגבל בארבעת קצותיו על-ידי הים או תנאי האקלים. למעשה, את התיישבות האדם – שהיא זו שעניינה, ככלל, את הגאוגרפים העתיקים, שכן לא היה להם עניין בתייעוד אזורים שוממים – קובעים גבולות ידועים, שאינם מאפשרים התפתחות של מושב בני-אדם. במפה מודרנית המשחזרת את תפישת האוקיינוס של סטרבו (תרשים 2), אפשר לראות מהו היקף הידע בזמנו: אפריקה, למשל, איננה מוכרת בשלמותה, והנימוק העתיק למגבלות הידע הוא שאין התיישבות אנושית דרומית לאזור של האתיופיים בגלל החום:

ארץ הקינמון [דרום אתיופיה] היא הארץ המיושבת הרחוקה ביותר בדרום... הקו המקביל שעובר דרכה מצוי בהתחלה של האזור הממוזג ושל האוקיינוס... ("גאוגרפיה", ספר שני סעיף 1 תת-סעיף 13).

יש כאן זיהוי בין ארבעה יסודות: גבול היישוב האנושי, גבול העולם המוכר, גבול האזור הממוזג וקו הרוחב הדרומי ביותר. כחלק מתפישה זו, מובן שיבשות אחרות מלבד אירופה, אסיה ואפריקה לא היו מוכרות לגאוגרפים של העולם העתיק, בגלל האוקיינוס המקיף את האוקיינוס ומהווה גבול התחום את



הופכים תרבותיים כאשר יש להם מנהיגים טובים. כמו למשל היוונים, למרות שבארצם הרים וסלעים, הם חיו באושר בגלל שהחשיבו ממשל טוב ואומנויות... וגם הרומאים כבשו עמים רבים שהיו פראיים מטבעם בגלל האזורים בהם חיו, שהיו או סלעיים או ללא מעגנים או קרים או בלתי ראויים להתיישבות מסיבות אחרות, וכך לא רק גרמו להם להיות בקשר עם עמים אחרים שהיו מבודדים, אלא גם לימדו את הפראיים ביותר כיצד לחיות במדינה מתוקנת... ("גאוגרפיה", ספר שני סעיף 5 תת-סעיף 26).

לפי דברים אלה של סטרבו, אפשר לתרבת עמים למרות המיקום ותנאי האקלים שבהם הם חיים. בד בבד, היוונים מוכיחים בהתפתחותם הפוליטית והתרבותית כי לעתים אפשר גם להתגבר על תנאים פיזיים מקומיים קשים ולפתח "ממשל ואומנויות". כלומר, האקלים והטופוגרפיה הופכים להיות חלק מהתיאור הסביבתי, אבל לא בהכרח גורמים אשר קובעים באופן בלתי הפיך את האופי של העמים השונים.

מאמר זה מבוסס על הרצאה שניתנה במסגרת הכנס השנתי השמיני של האגודה הישראלית להיסטוריה ופילוסופיה של המדעים, מוזיאון המדע, ירושלים, מרץ 2008.

ד"ר דניאלה דוויק היא בוגרת החוגים להיסטוריה ולתולדות האמנות באוניברסיטה העברית בירושלים, שבה השלימה גם תואר שני ותואר שלישי תוך התמחות בהיסטוריה עתיקה. כיום היא מרצה בכירה וחוקרת במחלקות להיסטוריה כללית ולימודים קלאסיים באוניברסיטת בר-אילן, וחברה בוועדת העורכים של השנתון Scripta Classica Israelica היוצא מטעם האגודה לקידום הלימודים הקלאסיים בישראל. נושאי מחקרה הם תיאורים גאוגרפיים ונרטיב גאוגרפי, פרגמנטים של יצירות גאוגרפיות יווניות ורומיות אבודות, ציטוטי שירה בחיבורי פרודה ופגתמים כממצא היסטורי.

וסטרבו, מראָה, התנהגות ובריאות קשורים כולם קשר הדוק לתנאים מקומיים ונובעים מהם. הגישה האריסטוטלית הרחיבה את ההבנה של השפעת האקלים גם לתכונות אנושיות אחרות:

העמים בארצות הקרות ככלל, ובייחוד אלה באירופה, הם מלאי חיוניות אך לוקים במיעוט כשרון כפיים ותבונה, ולכן הם מוסיפים להיות חופשיים במידה רבה אך אינם מגיעים לידי התפתחות פוליטית ואינם מגלים יכולת לשלוט באחרים. העמים באסיה ניחנו בכשרון כפיים ובתבונה אך לוקים במיעוט חיוניות. לפיכך הם מוסיפים להיות עמים משועבדים ועבדים. היוונים, המצויים בתווך במיקומם הגאוגרפי, מאחדים את התכונות של שתי קבוצות העמים. הם בעלי חיוניות ותבונה גם יחד: התכונה האחת מאפשרת להם להוסיף ולהתקיים כבני-אדם חופשיים, האחרת מאפשרת להם להגיע לפסגות של ההתפתחות הפוליטית, ולגלות יכולת למשול בכל עם אחר – אילו רק עלה בידם לכוון אחדות מדינית (אריסטו, "פוליטיקה", 7.7, תרגום בנימין איזק. בתוך "זמנים" 89, 2005).

נראה, אם כן, כי מהמקורות העתיקים עולה גישה דטרמיניסטית, אשר קובעת כי לסביבה כוח לעצב את האדם ולקבוע את תכונותיו. אחדים ממלומדי העת העתיקה החזיקו בסטריאוטיפים אתניים המבוססים על האקלים והגאוגרפיה, שהיו אולי בעלי נימה שמזכירה גזענות. אריסטו אינו מהסס לקבוע כי הסביבה קובעת את האופי של קבוצות אוכלוסין בעולם, וניכר שבתפישה זו טמונה גם ההנחה כי היוונים, בהיותם יושבי האזור הממוזג, הם המתאימים ביותר לשלוט באחרים. סדקים בגישה דטרמיניסטית ומוחלטת זו, לפחות בכל הנוגע להיבט הפוליטי, ניכרים בדבריו של סטרבו, שחי בעולם רב-תרבותי תחת השלטון חובק האופקים של האימפריה הרומית:

עלי להתחיל באירופה... שהרי כולה מיושבת, מלבד אזור קטן שאינו מיושב בגלל הקור... בחלק הלא-מיושב, האזורים ההרריים והקרים מספקים מטבעם תנאי קיום עלובים, אבל אפילו האזורים העניים שבהם יש שודדים,





הגאוגרפים של העולם העתיק לא רק קישרו, אם כן, בין אקלים לבין אזורי רוחב על פני כדור-הארץ באופן המהווה תשתית לדיונים קלימטולוגיים עד עצם היום הזה, אלא ראו גם קשר בין תנאי מזג האוויר לבין צורות החיים בכל אזור ואזור. כך הדבר ביחס לבעלי-החיים:

גיוון בעלי-חיים נוצר מהבדלים במיקום, וכך במקום אחד חיה מסוימת כלל לא נמצאת, במקום אחר היא קטנה או קצרת חיים או לא שורדת... במקומות רבים האקלים משפיע על הבדלים. כך באיליריה, בתראקיה ובאפירוס החמור הוא קטן, ובגאליה ובסקיתיה אין בכלל חמורים בגלל הקור בארצות אלה (אריסטו, "חקר בעלי-החיים", ספר שמיני סעיף 28).

וכך הדבר ביחס לצמחים:

תזונה ואקלים הם הגורמים החשובים ביותר הנחוצים לשם צמיחה... המיקום חשוב יותר מעיבוד וטיפול. הוכחה לכך היא צמחים שמועברים ממקומם, מפסיקים לעתים לשאת פירות ובמקרים מסוימים מסרבים להתפתח (תאופרסטוס, "חקר הצמחים", ספר שמיני סעיף 7, תת-סעיף 6).

אך לא רק צמחים ובעלי-חיים, אלא גם בני-אדם מושפעים מאקלים. באופן הבסיסי ביותר, בריאותם מושפעת מהמיקום. בחיבור המיוחס להיפוקרטס (-469/399 לפנה"ס בערך), ראש האסכולה הרפואית הקדומה ביותר בהיסטוריה היוונית, הוא דן בקשר בין מיקום לבין טבע התושבים ומחלותיהם, ואגב כך גם מכוון לידע הדרוש מבחינת הרופא העתידי:

על מי שרוצה לעסוק במדע הרפואה כיאות לנהוג כך: תחילה עליו להבין כיצד כל עונה משפיעה... לכן כאשר רופא מגיע לעיר שאינו מכיר, עליו לבדוק את מיקומה ביחס לרוחות ולשמש... התרומה של אסטרונומיה לרפואה... גדולה ביותר, שכן עם העונות משתנות מחלותיו של אדם וכן מערכת העיכול שלו... בעיר

שחשופה לרוחות החמות... ומוגנת מפני רוחות הצפון, המים שופעים ומלוחים וקרובים לפני הקרקע, חמים בקיץ וקרים בחורף. ראשי התושבים לחים ומלאים בריר ואיברי העיכול שלהם מתקלקלים לעתים קרובות בגלל הנוזלים שמגיעים אליהם מהראש. לרובם יש מראה מדולדל והם אינם אוכלים הרבה ואינם שותים הרבה כי אנשים עם ראשים חלשים לא יכולים לשתות שכן ההשפעות מאוד מעיקות עליהם. (היפוקרטס, "על אוויר, מים, מקומות", ספר ראשון סעיף 1).

משתמע מדבריו אלה של היפוקרטס, שהטבע הגופני של בני-האדם שונה במקומות שונים, כלומר אין מדובר בהשפעה של אקלימים שונים על גוף האדם באשר הוא, אלא על אופי גופני מקומי. צעד נוסף בקישור כזה מופיע שוב בכתבי סטרבו, המסביר במה שנראה לו קישור הגיוני, מדוע הפיזיונומיה של בני-אדם ובעלי-חיים באזורים חמים היא אחידה ובעלת צורה אופיינית. כהרגלו, סטרבו מסכם דעות של מלומדים שונים, ולקראת סוף הקטע המצוטט מתייחס לדבריו של פוסידוניוס איש אפמיאה שבסוריה, שקדם לו בכמה עשרות שנים:

...באזורים אלה השמש נמצאת בדיוק מעל הראש למשך כחצי חודש בכל שנה... הם [האזורים] חרוכים במלוא מובן המילה, חוליים ואינם מניבים דבר מלבד סוג של שומר וכמה פירות חריפים שמתייבשים בגלל החום. שהרי באזורים אלה אין הרים שמולם העננים יכולים להישבר ולהוריד גשם, וגם אין בהם נהרות. ולכן הם מייצרים יצורים בעלי שיער מקורזל, קרניים מפותלות, שפתיים בולטות ואפים שטוחים, שכן קצוותיהם מתעוותים בגלל החום. ואוכלי הדגים גם חיים באזורים אלה. פוסידוניוס אומר שברור שדברים אלה אופייניים לאזורים אלה כי האנשים שחיים דרומה משם הם בעלי אופי ממוזג יותר ובעלי ארץ פורייה ורוויה יותר ("גאוגרפיה", ספר שני סעיף 2 תת-סעיף 3).

כלומר, לפי הגישה העתיקה למן המאה ה-5 לפנה"ס וכפי שהיא מסתכמת גם בדבריהם של פוסידוניוס

גם מי שיש לו זיכרון של פיל...

כדאי לו להיעזר בשיטות
יעילות, בעזרים ובדרכים
מעשיות לשיפור הזיכרון

ספר חדש
מאת ניצה אייל
ועל רייכנטל



המוח והזיכרון זקוקים להתחדשות, לאימון ולתרגול

לפי ממצאי מחקרים מדעיים אפשר לשפר את הזיכרון בכל גיל. אורח חיים בריא, פעילות גופנית ותזונה עוזרים לזיכרון.

חוכמת הזיכרון המעשי הוא מדריך ייחודי והוליסטי לאימון הזיכרון, המתבסס על ממצאי מחקרים אחרונים ועל ניסיון מקצועי רב. המלצות מעשיות, שיטות ועזרים עדכניים לשיפור הזיכרון הם לב-לבו של הספר שהינו מורה דרך לאורח חיים בריא לזיכרון. הספר כולל שאלון מקיף לזיהוי חוזקות וחולשות של הזיכרון הפרטי שלך ומשמש בסיס להכנת תוכנית אימון אישית. **חוכמת הזיכרון המעשי** הוא חדר הכושר האישי שלך לאימון ולחיזוק הזיכרון.

בעזרת המדריך נוכל: • לשפר את הריכוז • לזכור שמות של אנשים • ללמוד ביעילות מידע חדש • לא לשכוח ימי הולדת • לזכור את ההוראות שנתן הרופא • לא לשכוח מועדי פגישות • לזכור מספרים חשובים וסיסמאות אישיות • למצוא בקלות את המכונת בחניון • ועוד דברים רבים שרצינו לזכור, ושכחנו...

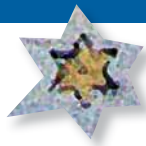


להזמנות: 02-6557880

אריה ניר

חדש בהוצאת

הוצאה לאור בקים



לקריאה נוספת:

בנימין איזק, "גילויי גזענות בעולם העתיק", זמנים 89 (2005), עמ' 16-25.

Monin, A.S. (1986) *An Introduction to the Theory of Climate*, Dordrecht.

Sanderson, M. (1999) "The Classification of Climates from Pythagoras to Koeppen", *Bulletin of the American Meteorological Society* 80, 4: 669-673.

Thornthwaite, C.W. (1943) "Problems in the Classification of Climates", *Geographical Review* 33, 2: 233-255.

Ward, R.D. (1905) "The Climatic Zones and Their Subdivisions", *Bulletin of the American Geographical Society* 37, 7: 385-396.

Ward, R.D. (1914) "A Note on the Classification of Climates", *Bulletin of the American Geographical Society* 46, 2: 108-116.

← אם לא צוין אחרת, הקטעים המצוטטים לאורך המאמר הם בתרגום המחברת מהמקור היווני או הלטיני. לנוחות הקוראים מובאות כאן הפניות למהדורות בתרגום לאנגלית:

Aristotle, *Meteorologica*, translated by H.D.P. Lee, Loeb Classical Library, Cambridge, Massachusetts 1987.

Aristotle, *Historia Animalium*, translated by A.L. Peck, Loeb Classical Library, Cambridge, Massachusetts 1970.

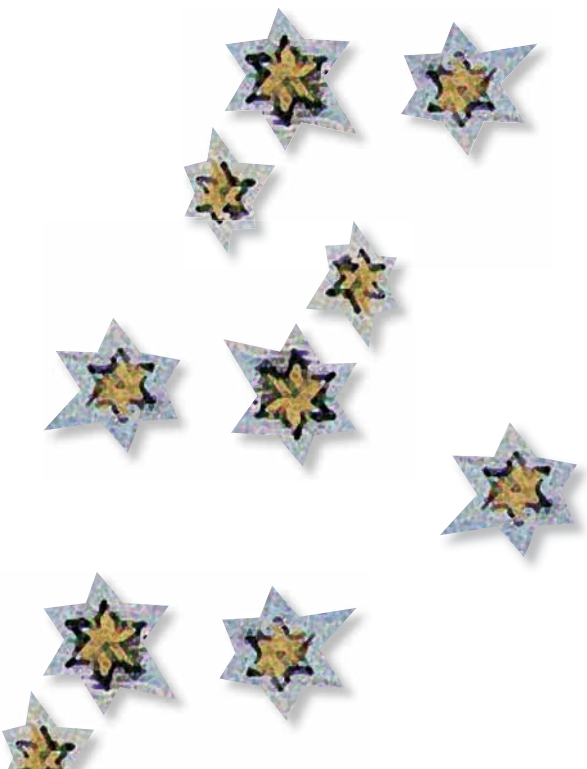
Hippocrates, vol. 1, translated by W.H.S. Jones, Loeb Classical Library, Cambridge, Massachusetts 1943.

Pomponius Mela's Description of the World, translated by F.E. Romer, Ann Arbor, Michigan. 1998.

Ptolemy's Geography: An annotated translation of the theoretical chapters, by J.L. Berggren, Princeton 2000.

Strabo, *The Geography*, translated by H.L. Jones, Loeb Classical Library, Cambridge, Massachusetts 1960.

Theophrastus, *Enquiry into Plants*, translated by A. Hort, Loeb Classical Library, Cambridge, Massachusetts 1961.



ההתלהבות של תינוק מכך שאמו מדברת עמו לבין אפקטים שמקורם בכך שאמו מגיבה ישירות על הפטופטים שהוא משמיע, נוצרו קבוצות המחקר השלישית והרביעית באופן הזה: האמהות בקבוצות אלו הרכיבו אוזניות שבאמצעותן הורה להן הנסיין כיצד לדבר עם התינוק. האמהות בקבוצה השלישית התבקשו להגות אותן התנועות שהגו האמהות בקבוצה הראשונה; האמהות בקבוצה הרביעית התבקשו להגות אותן המילים (עיצור-תנועה) שהגו האמהות בקבוצה השנייה. שימו לב שהאמהות בשתי הקבוצות הראשונות הגיבו "און ליין" באופן ישיר לפטופטי תינוקותיהן. לעומת זאת, התגובות של האמהות בקבוצות השלישית והרביעית היו זהות לאלה של האמהות בשתי הקבוצות הראשונות בצלילים שהפיקו, אך היו נטולות סינכרוניזציה עם פטופטי התינוקות שלהן-עצמן. כמו האמהות בקבוצות הראשונה והשנייה, גם האמהות בקבוצות השלישית והרביעית התבקשו להתקרב אל התינוק כשהן מדברות עמו, לגעת בו ולחייך אליו.

פטופטי התינוקות בכל הקבוצות נותחו לפי דמיון הצלילים שהפיקו לעיצורים ולתנועות. מניתוח ממצאי המחקר עולה, כי תינוקות בקבוצות הראשונה והשנייה שינו את פטופטיהם לפי המבנה הפונולוגי של הדיבור של אמהותיהם: תינוקות בקבוצה הראשונה השמיעו פטופטים הדומים יותר לתנועות, ואילו תינוקות בקבוצה השנייה השמיעו פטופטים הדומים יותר לרצף של עיצורים-תנועות. לעומת זאת, תינוקות בקבוצות השלישית והרביעית, אשר שמעו אותם צלילים אמהיים ששמעו התינוקות בשתי הקבוצות הראשונות, אך אמהותיהם לא סנכרנו את דיבורן עם פטופטיהם, לא שינו את המאפיינים הפונולוגיים של פטופטיהם (למשל, הגיית יותר תנועות או יותר עיצורים).

לסיכום, עצם הימצאותם של דפוסים פונולוגיים בדיבורה של הדמות המתקשרת עם התינוק אינו מספיק כדי לסייע בלמידת שפה, שכן תינוקות שאמהותיהם לא הגיבו "און ליין" לפטופטיהם (בקבוצות השלישית והרביעית) לא הפגינו למידה (שינוי במאפיינים הפונולוגיים של פטופטים). מממצאי המחקר משתמע, אם כן, כי האופן שבו האם (או הדמות המטפלת) מגיבה "און ליין" על פטופטי תינוקה משפיע על היכולת השפתית של התינוק. ■

חדשים של מבנים פונולוגיים מדיבורה של האם, חולקו המשתתפים לארבע קבוצות ניסוי. האמהות בשתי הקבוצות הראשונות התבקשו להגיב על כל פטופט של התינוק בדיבור עמו, תוך כדי כך שהן מתקרבות אליו, מחייכות אליו ונוגעות בו. האמהות בקבוצה הראשונה התבקשו להגיב בדיבור המורכב מתנועות בלבד. האמהות בקבוצה השנייה התבקשו להגיב בדיבור המורכב ממילים, כך שהתינוקות ייחשפו לדפוס דיבור של עיצור-תנועה.

כדי להפריד בין אפקטים העשויים להתקבל מתוך עצם



אומניבנק / Getty Images

ד"ר מרים דיסון ברקוביץ היא פסיכולוגית ויועצת ארגונית ושיווקית.

מעשוב חברתי לפטופטי תינוקות



כל מי שמצוי בחברתם של תינוקות מתמוגג בוודאי לעקוב אחר ה"פטופט" שלהם; למשל, כשהם פונים למובייל התלוי מעל מיטתם או לדמות המטפלת בהם.

מי שעוקב אחר ההתפתחות השפתית של תינוקות מתפעם בוודאי גם מהשינויים הדרמטיים שמפגינים תינוקות בשנתם הראשונה. מיכולת ראשונית להפיק צלילים, רוב התינוקות מתקדמים עד גיל שנה לביטוי מילים ראשונות. בין לבין הם לומדים לבטא הברות הדומות לדיבור ולעצב את הגייתן באופן הדומה לשפה המדוברת בסביבתם.

רוב המחקרים בתחום זה התמקדו עד כה בגורמים ביולוגיים או קוגניטיביים להתפתחות השפתית של תינוקות, ו"פטופטי תינוקות" לא היוו מושא מחקר. ואולם, ממצאי מחקרים מהשנים האחרונות מורים כי כאשר הדמות המטפלת בתינוק מגיבה על פטופטיו, הדבר מסייע לתינוק הן להבחין בין צלילים שונים והן ללמוד להגות צלילים של השפה המדוברת בסביבתו. מעט המחקרים בתחום זה התמקדו עד כה בדמיון בין הקולות שמפיק התינוק לבין הברות הקיימות בשפה המדוברת סביבו.

קעת מנסים מייקל גולדסטיין (Goldstein) וג'ניפר שווייד (Schwade), במחקר המתפרסם בכתב-העת *Psychological Science*, לענות על השאלה אם האופן שבו הדמות המטפלת מגיבה על פטופטי התינוק משפיע על הפונולוגיה של הפטופט, כלומר על האופן שבו התינוק מצרף הגאים, הרבה לפני השלב שבו הוא מפיק מילים.

במחקר נטלו חלק 60 תינוקות בני כתשעה חודשים ואמהותיהם. התינוקות הגיעו עם אמם למעבדת המחקר, והוצמד להם ולאם מיקרופון אלחוטי, שבאמצעותו הם הוקלטו. כדי לבחון את היכולת של התינוקות ללמוד דפוסים

דמיינו לעצמכם חקלאי: קם השכם בבוקר, יוצא אל שדותיו רכוב על טרקטור, עמל במשך שעות ארוכות תחת השמש היוקדת בקיץ והגשם בחורף, ובדי עמל מוציא את פרנסתו מהקרקע, לאחר חריש, זריעה, דישון, הנחת קווי מים, הדברת מזיקים – שעות על גבי שעות במשך השנה כולה.

רגע, הרי אנו במאה ה-21. נשוב ונדמיין את החקלאי שלנו: קם בשעת בוקר מאוחרת, קורא עיתון, שותה קפה, ומציץ בצג המחשב שלו. לאחר עיון באתרי חדשות, הוא קורא את העדכונים האחרונים מהשטחים החקלאיים שאותם הוא מעבד: מה מצב הלחות בקרקע, מה מצב הצמחים, האם יש אזורים המגלים סימני מחלה? הוא מקבל גם עדכון על מערכת ההשקיה הממוחשבת, מצב הדשן במכלים ותחזית מזג אוויר מעודכנת ליממה הקרובה. לאחר סיום ארוחת הבוקר נוסע החקלאי אל השדה, ומגיע ישירות לאזורים שבהם נוכחותו נדרשת. ליד שיח אחד הוא מתקן את זווית הטפטפת, ליד אחר הוא נוטל דגימת קרקע לבדיקת מעבדה. בחלקה סמוכה הוא מוסיף דשן למכל, וכן הלאה.

נשמע דמיוני? לא ממש. זוהי, בתמצית, משמעותה של מהפכת ה"חקלאות המדויקת" (Precision Farming). חקלאות מדויקת עושה שימוש במגוון חיישנים – קרקעיים, אוויריים וחלליים. בטור זה נפנה את תשומת הלב אל המרכיב החללי בחקלאות המדויקת ואל הפוטנציאל הטמון בו. בחקלאות המסורתית, המוכרת לכולנו, הצמחים במטע או בשדה זוכים לטיפול – השקיה, הדברה או דישון – על פי הערכה של הצורך הממוצע: הרי בהכרח ישנם עצים הזקוקים ליותר מים ואחרים הזקוקים לפחות, צמחים נגועים יותר במזיקים ואחרים שנוגעו פחות, וכן הלאה, אך הטיפול ניתן בצורה אחידה למדילשדה או למטע כולו. החקלאות המדויקת משלבת חיישנים שונים ומערכת מחשוב, המסייעת בקבלת ההחלטות וביצוען, לשם טיוב מרבי של התוצרת החקלאית, חיסכון במשאבים ושמירה על איכות הסביבה.

הרכיב החללי של חקלאות מדויקת

חקלאות מדויקת עושה, כאמור, שימוש במגוון אמצעי חישיה, מתחת לקרקע ומעליה, בכלי טיס ובלוויינים. המרכיב החללי של החקלאות המדויקת כולל היבטים אחדים:

● GPS/DGPS: מערכת האיכון הגלובלית (GPS) היא מערכת לוויינים אמריקנית, המאפשרת זיהוי מיקום עצמי. מסלול הלוויינים הוא כזה שבכל מקום על פני כדור-הארץ

אפשר לקלוט לפחות 3 לוויינים, המאפשרים למקלט, ומכאן – למשתמש, למצוא את נקודת הציון שלו ברמת קו רוחב וקו אורך. לרוב אפשר לקבל מידע מ-4 לוויינים (ויותר), וכך למצוא גם את הגובה מעל פני הים. דיוק המערכת (בשימוש האזרחי שלה) הוא 5-15 מ'.

על רקע הצורך בדיוק גבוה יותר בתחומים רבים (ובהם חקלאות), פותח ה-DGPS. הרעיון הוא למדוד את חוסר הדיוק (להלן: השגיאה) בנתוני ה-GPS על-ידי קבלת קריאה בנקודה ידועה ומדודה. השגיאה משודרת למקלט נוסף ב-GPS ונגרעת מהמדודה הסטנדרטית המתקבלת בו. בחקלאות מדויקת נפוץ תיקון דיפרנציאלי לרמת דיוק של מטר אחד. יחד עם זאת, אפשר להגיע לדיוק גבוה יותר (של סנטימטרים), וזאת לצרכים כגון ניהוג אוטומטי של כלים חקלאיים ומערכות טפטוף.

● חישיה מרחוק: איסוף מידע על הגידול וסביבתו באמצעות חיישנים המורכבים על כלי טיס ולוויינים. ברמה הבסיסית אפשר להיעזר בתצלומי אוויר באור נראה לשם איתור הבדלים בין הצמחים על בסיס זיהוי הבדלים בצבע. ברמה גבוהה יותר, אפשר לפתח מודלים על בסיס הבדלים ספקטראליים בין תופעות שונות בשדה.

● מערכות מידע גאוגרפי (GIS): מיפוי הנתונים מבוסס על הנחות גאוסטטיסטיות, שעל בסיסן מתבצעת אינטרפולציה בין הנתונים הבדידים הנאספים בשדה. פעולה זו אפשרית בתוכנות זולות יחסית (מאות דולרים), הנמכרות, בדרך-כלל, יחד עם אמצעי איסוף המידע. תוכנות אלו מאפשרות בנייה וניתוח של מסד נתונים גאוגרפי. הבסיס למסד הנתונים הוא הממד הגאוגרפי, המשותף לכל הנתונים הנאספים מאותו השטח.

מעקב חללי אחר גידולי שדה

המפתח לחישיה מרחוק (Remote Sensing) באמצעות לוויינים, שתיושם בחקלאות, הוא אמצעי חישיה מולטי-ספקטראלי – כלומר תצפית במגוון אורכי גל (בעתיד נראה לוויינים היפר-ספקטראליים, שיסקרו באלפי אורכי גל שונים). חישיה-מרחוק זו תאפשר מגוון גדול של יישומים לחקלאות, עד רמת זיהוי בעיות בעץ בודד או בשורה יחידה בשדה ענקי. חישיה מרחוק באמצעות לוויין תאפשר לחקלאי לקבל מידע על היבטים רבים של הגידולים, כגון תכולת כלורופיל (היכולה להצביע על עקת חנקן), תכולת





חקלאות מדויקת - מהחלל

חישה מרחוק

חישה מרחוק היא היכולת ליצור מידע על סמך דימות (Imaging) של האטמוספירה, המים, הקרקע, המסלע, החי, הצומח והסביבה הבנויה. תמונות הדימות מיוצרות לפי קרינה אלקטרומגנטית (בתצלומי לוויין של כדור-הארץ בדרך-כלל בתחום האור הנראה, האינפרא-אדום והרדיו) המגיעה לחיישנים לאחר שהוחזרה מפני השטח או פוזרה מחלקיקים המצויים באטמוספירה. הרגישות של החיישנים לקרינה באורכי גל שונים מאפשרת יצירת תמונות מורכבות ולימוד התנאים השונים באזור הנסקר.

פענוח המידע הדרוש למשתמש נעשה תוך שימוש במודלים פיזיקליים וסטטיסטיים המקשרים בין תכונות פני השטח ותכונות הקרינה המופצת מהם, ועל בסיס המאפיינים המרחביים (צורה, דגם) של התופעות והעצמים בפני השטח. החישה מרחוק מיושמת בתחומים רבים, ובהם מעקב אקלימי וסביבתי, ביטחון ומודיעין, מיפוי, מעקב אחר איכות הסביבה, פיתוח תשתיות מלאכותיות ועוד. ■

חליבה רובוטית, ומטעים. את המיזם מרכזת סוכנות החלל הישראלית. הלוויין ונוס יוכל להשתלב ביוזמה האירופית לבניית מערך לווייני חישה מרחוק ליישומי איכות סביבה וביטחון, המכונה GMES.

הצד המדעי של הלוויין ונוס נסמך על עבודתם של חוקרים ממגוון מכוונים ומרכזי מחקר, ובהם המעבדה לחישה מרחוק של אוניברסיטת בן-גוריון, המרכז למחקר חקלאי בישראל (מכון וולקני) ומכוני מחקר צרפתיים אחדים. כמו כן, במסגרת מיזם ונוס יצא קול קורא למדענים מרחבי תבל להגיש הצעות למחקרים שיעשו שימוש בלוויין, ועשרות פניות התקבלו עד כה, ממדינות רבות.

חיישני הלוויין ונוס יוכלו לשמש לא רק למטרות חקלאות מדויקת, אלא גם למעקב אחר זיהומים של גופי מים (נחלים, אגמים וימים) וזיהום אוויר. כך למשל, על-ידי מדידת כמות הכלורופיל באזורים הסמוכים לחוף אפשר לעמוד על כמות האצות מסוגים שונים, המהווה אינדיקציה לרמת זיהום מי הים בשפכים. החיישנים יוכלו לעקוב גם אחר זיהום אוויר הנגרם מפליטות של ארובות מפעלים כימיים שונים, ולסייע במקרי חירום בניטור עננים של כימיקלים רעילים. ■

טל ענבר הוא ראש המרכז לחקר החלל, מכון פישר למחקר אסטרטגי אוויר וחלל, ויו"ר אגודת החלל הישראלית.

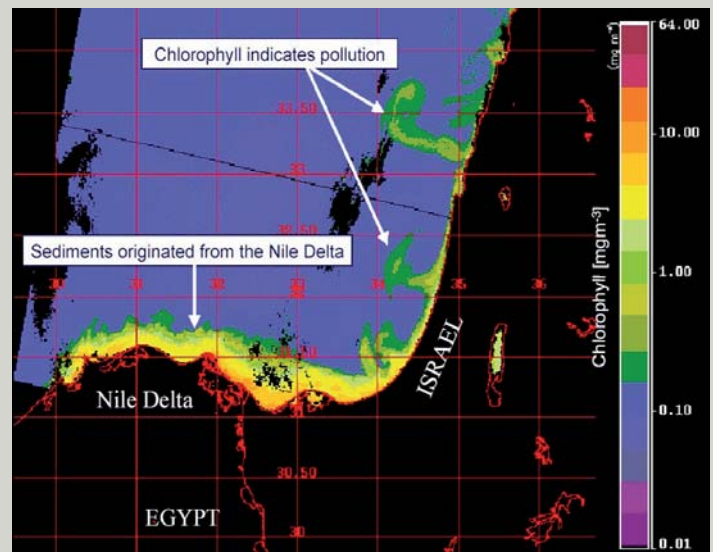
לקריאה נוספת:

אתר החקלאות המדויקת בישראל:
<http://www.ipf.co.il/>

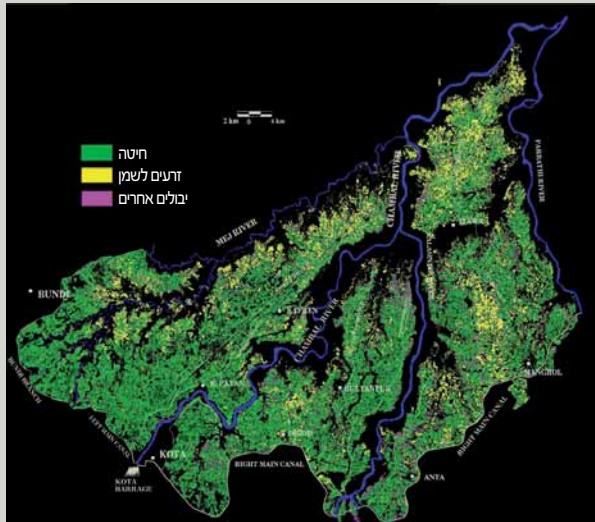
אתר נאס"א המוקדש ללוויין Terra, לוויין החישה מרחוק העיקרי של הסוכנות ללימוד ומעקב אחר כדור-הארץ:
<http://terra.nasa.gov/>

אתר של סוכנות החלל האירופית המוקדש ליישומי חלל להגנה על הסביבה וניטור:
http://www.esa.int/esaCP/SEM39Y715QE_Protecting_0.html

אתר סוכנות החלל הצרפתית המוקדש ללוויין ונוס:
<http://smc.cnes.fr/VENUS/index.htm>



ריכוז כלורופיל בים התיכון בחופי ישראל ומצרים. ריכוז הכלורופיל הוא מדד לזיהום מי הים בשפכים



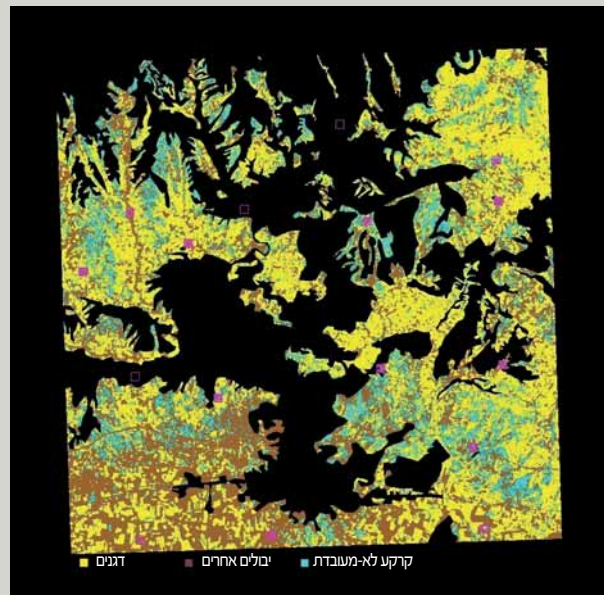
ניתוח של שטחי חקלאות לפי סוגים באזור רג'סטן בהודו. צולם מהלוויין הארצי IRS-1

הנקודה הישראלית: הלוויין ונוס

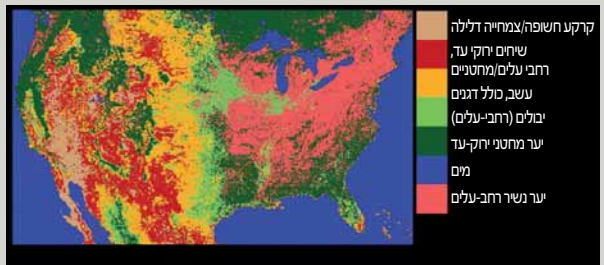
"ונוס" הוא מיזם משותף לישראל ולצרפת, ומהותו – פיתוח והפעלה של לוויין בעל מצלמה מולטי-ספקטרלית למטרות מחקריות שונות. השותפות הראשיות למיזם הן סוכנות החלל הישראלית וסוכנות החלל הצרפתית (CNES). הלוויין אמור להיות משוגר לחלל במהלך 2010-11. למימון הפרויקט בישראל אחראית ממשלת ישראל באמצעות משרד המדע והטכנולוגיה והמדען הראשי במשרד המסחר והתעשייה, בהשתתפות תעשיות חלל מובילות בישראל (ובהן התעשייה האווירית, רפאל ואל-אופ, מפתחת המצלמה של הלוויין). צרפת מממנת חלק ניכר של המיזם באמצעות סוכנות החלל השלה.

הלוויין ונוס יהיה מסוגל להתמקד מהחלל בשטח אדמה שגודלו חמישה מ"ר בלבד, ב-12 ערוצים שונים, שיבחנו פרמטרים שונים בגידולים. הוא אמור לחלוף מעל החלקה פעם ביומיים, קצב חליפות שיאפשר מעקב צמוד אחר שינויים בקרקע ותגובה מיידית. הלוויין יותאם במיוחד לענפים כגידולי שדה (כותנה, תבואה, מספוא) וישמש כלי עזר לכיוון טרקטורים בשדה הפתוח, מעקב אחר בעלי-חיים וזיהויים, גידול פרטני ברפת החלב, ובכלל זה

← חומר אורגני בקרקע, רמת זרחן בקרקע ומיפוי יבולים. השימוש הראשון בלווייני חישה מרחוק לצורכי חקלאות הסתמך על סדרת לווייני Landsat, ששיגרה סוכנות החלל האמריקנית, נאס"א, ואשר הגישה למידע מהם היתה פתוחה לכל מי שחפץ בכך. יישום חלקי של יכולות הלוויינים לחקלאות נעשה במדינות רבות, באירופה, בארצות-הברית וגם בישראל; עם זאת, יש להדגיש שהלוויינים מהדור הראשון היו מוגבלים ביכולותיהם, וכן לא שוגרו במיוחד למטרות חקלאיות.



תצלום הלוויין Landsat של אזור חקלאי בטורקיה. תמונת הלוויין מאפשרת להבחין בין דגנים לגידולים אחרים



תצלום לוויין של ארצות-הברית המורכב מתמונות דימות רבות – מאפשר להבחין בסוגים שונים של צמחייה, טבעית וחקלאית

מיץ אוכמניות וחמוציות לטיפול בדלקות של דרכי השתן

דלקות בדרכי השתן עקב נוכחות חיידקי *E. coli* נפוצות מאוד, בעיקר בנשים, בשל הקרבה של פי הטבעת לשופכה (אך גם בגברים התופעה קיימת). דלקות אלה מתבטאות בכאבים, בצריבה ובשלב מתקדם, גם בהופעת דם בשתן.

אחת מ"תרופות הסבתא" המוכרות לטיפול בדלקות אלה היא שתיית מיץ אוכמניות (blueberries) או חמוציות (cranberries), ובמשך שנים רבות לא התייחסו הרופאים לתרופה זו ברצינות הראויה. במחקר מדעי, שבו נבדקה השפעת מיץ האוכמניות על חיידקי *E. coli* ועל הדלקות שהם גורמים, ושבזו היתה מעורבת גם קבוצת המחקר של פרופ' יצחק אופק מאוניברסיטת תל-אביב, התברר שאכן, סבתא צדקה, והחוקרים אף הצליחו להסביר מדוע.

החיידקים, המגיעים מפי הטבעת, חודרים לדרכי השתן ונצמדים לדופןותיהם באמצעות צמדנים – הנקשרים לשני סוגים של קולטנים שעל פני תאי האפיתל. קולטנים ייחודיים אלה הם רב-סוכרים, שאחד מהם (המכונה MS) מכיל שיירי פרוקטוז, והאחר (המכונה MR) מכיל שיירי מנוז.

מיצים של פירות רבים מכילים פרוקטוז, ומסתבר שסוכר זה, כאשר ריכוזו בדם גבוה, מגיע גם לדרכי השתן, ואם יש שם חיידקי *E. coli*, הוא נקשר לצמדנים שעל גבי החיידקים (אלו הנקשרים לקולטני ה-MS) וחוסם אותם. אך למרות החסימה, עדיין קיימים הצמדנים הנקשרים לקולטני ה-MR, ולכן החיידקים יכולים עדיין להיצמד לתאי המטרה באמצעות הצמדנים ל-MR ולגרום לדלקת. ואז הסתבר שרק במיץ של אוכמניות או חמוציות – שניהם פירות של צמחים מהסוג *Vaccinium* – יש, נוסף על פרוקטוז, גם אוליגוסכרידים המכילים מנוז, והמנוז – כשיריכוזו בדם גבוה – מגיע אף הוא לשתן, וחוסם גם את הצמדנים לקולטני ה-MR.

כשהצמדנים החיידקיים לשני הקולטנים "סתומים" על-ידי הסוכרים ואינם פעילים, החיידקים אינם נצמדים לתאי האפיתל ונשטפים עם השתן החוצה – ואין דלקת... ■

בתחילת דרכה של ההנדסה הגנטית, היה *E. coli* האורגניזם הראשון שבו נעשו הניסויים של החדרת גנים זרים. קל מאוד לגדל אותו בתנאי מעבדה, וזמן הדור שלו (הזמן בין שתי חלוקות עוקבות) במצע גידול מינימלי ("דל") הוא כ-60 דקות ובמצע גידול "עשיר" – כ-20 דקות; לכן תוצאות הניסויים הנעשים בו מתקבלות מהר יחסית לעבודה עם חיידקים אחרים. בעקבות הצלחות אלה נעשה בתעשיית התרופות שימוש בתאי *E. coli* לייצור הורמונים של יונקים, כדוגמת אינסולין לחולי סוכרת וסומטוטרופין (הורמון הגדילה), תרופות כאינטרפרון וחומרים אחרים. בוודאי היו ממשיכים להשתמש בו, אלמלא השוני בעיבוד ובשינוי חלבונים לאחר התרגום בין תאי החיידקים לתאים איקריוטיים. שוני זה גורם לעתים להבדלים בתכונות החלבון ואף לאימונווגניות שונה (יחסית לחלבון המקורי). בהמשך, כשנצבר ניסיון ונמצאה הדרך לשתול גנים בשמרים (שגם הם, כמונו, איקריוטים, ולכן קרובים אלינו הרבה יותר מבחינה גנטית וביוכימית), עברו לשבט בהם גנים איקריוטיים.

E. coli כגורם מחלות

זני *E. coli* החיים במעייהם הם חיידקים מועילים או קומנסלים (נהנים אך אינם מזיקים) אך ורק כאשר הם נמצאים במערכת העיכול. אם וכאשר הם מגיעים למקומות אחרים בגוף, הם עלולים, כמו הרבה חיידקי מעיים אחרים, לגרום למחלות, ולעתים קטלניות: דלקות בדרכי השתן, אלה דם, דלקות ריאות ודלקות קרום המוח. שלוש המחלות האחרונות נגרמות בעיקר בבתי-חולים, בחולים המגיעים לשם מסיבות אחרות (מחלות נוזוקומיאליות: nosocomial nosus ביוונית הוא שילוב של nosus – מחלה, ו-komeion – מטפלים). בנושא זה ראו גם מדור זה, גיליון 104.

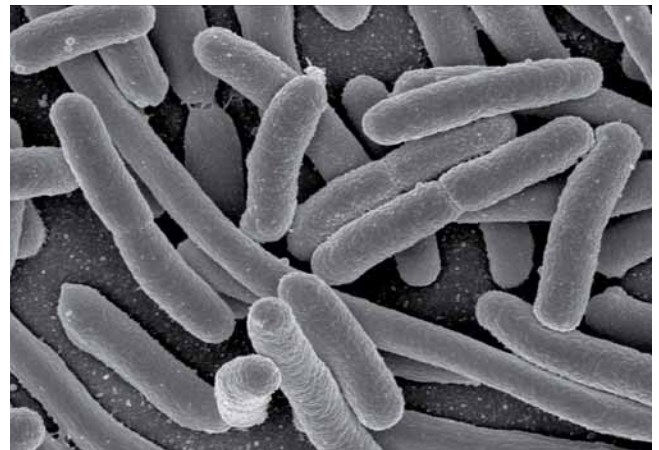




על היצורים
המיקרוסקופיים
המקיפים אותנו

Escherichia coli - אוהב או אויב?

זנים רבים של *E. coli* הם חלק מאוכלוסיית החיידקים התקינה (האנדוסימביוטית - ראו מדור זה, "גלילאו" 116) של מערכת העיכול של היונקים והעופות, וצפיפותם במעי היא 10^{10} חיידקים למ"ל. הם היצרנים העיקריים של ויטמין K - ויטמין חיוני לקרישת דם תקינה. הימצאותם של זני *E. coli* אנדוסימביוטיים במקורות מים ובמוצרי מזון מעידה על זיהום צואתי של החומר הנבדק. החשש לבריאות הצרכנים הוא בשל נוכחותם האפשרית של נגיפים או חיידקים גורמי מחלות בצואה המזהמת, ולא מחיידקי ה-*E. coli* כשלעצמם. הבדיקה עצמה היא רחבה יותר ומתייחסת לאוכלוסייה של חיידקים המכונה קוליפורמים (coliforms) - בעלי צורה של (*E. coli*). אוכלוסייה זו כוללת גם את חיידקי המעיים מהסוגים *Klebsiella*, *Enterobacter*, *Serratia*, *Citrobacter* ומינים אחרים, כולם מתסיסים לקטוז על מצע מקונקי וניתנים לאבחון תוך כ-12-16 שעות.



חיידקי *E. coli* מבעד למיקרוסקופ

E. coli במדע ובביוטכנולוגיה

ברבות הימים הפך *E. coli* לחיידק הנחקר ביותר, ומרבית המידע שיש לנו על חיידקים בכלל התגלה תחילה ב-*E. coli*, ורק אחר-כך נבדק בהשוואות עם חיידקים אחרים. המחקרים ב-*E. coli* שימשו כבסיס לכל הביולוגיה המולקולרית המודרנית.

הנובליסטים

אלה חתני פרס נובל במדעי הרפואה שקיבלו אותו על עבודתם ב-*E. coli*:
ג'ושוע לדברג (Lederberg), ב-1958, על גילוי הקונוגציה והרקומבינציה החיידקית.
פרנסיס ז'אקו (Jacob), אנדרה לבוף (Lwoff) וז'ק מונו (Monod), ב-1965, על גילוי הבקרה הגנטית על ייצור חלבונים (אופרון הלקטוז) בחיידקים.
מקס דלברוק (Delbrück), אלפרד הרשי (Hershey) וסלבדור לוריא (Luria), ב-1969, על הסברת מבנה ומהות החומר הגנטי בנגיפי החיידקים. ■



E. coli כאנדוסימביוט

ב-1885 בודד ואפיין רופא הילדים יליד בוואריה תיאודור אשריך (Escherich - ראו תיבה) חיידק מצואה של ילדים בריאים. לחיידק קרא בשם *Bacterium coli* (colon בלטינית - מעי גס). ב-1919, שמונה שנים לאחר מותו, שונה לכבודו שם החיידק ל-*Escherichia coli*.



מגלה החיידק - תיאודור אשריך

תיאודור אשריך (1857-1911) הוסמך כרופא ילדים באוניברסיטת ורצבורג (Würzburg). ב-1884, בעקבות מגפת הכולרה בנפולי, החל להתעניין בבקטריולוגיה של דרכי העיכול, ובקשר של חיידקי המעי לתקינות העיכול. נוסף על כך התפרסם במאמציו לשיפור הטיפול הרפואי בילדים ולהפחתת תמותת היילודים. ■

5. זנים "תוקפניים" (Enteroinvasive - EAEC) – זנים אלה התגלו לאחרונה והם גורמים לשלשולים כרוניים, בעיקר בחולי AIDS.

לסיכום

חיידקי *E. coli* הם אנדוסימביונטים של מערכת העיכול שלנו ושל בעלי-חיים אחרים, כלי מחקר חשוב בביווגיה ואף בתי-חרושת זעירים לייצור חומרים ביולוגיים חשובים לרפואה. נוכחות חיידקים אלה במקורות מים ומזון מעידה על זיהום צואתי של אותם מקורות.

חיידקי *E. coli* אנדוסימביונטיים העוברים מחלל מערכת העיכול לאזורים אחרים בגוף עלולים לגרום למחלות. זנים מסוימים, שאינם אנדוסימביונטיים, מזהמים מזון ומים וגורמים לנו (וכן לבעלי-חיים אחרים) מחלות. ■

לקריאה נוספת:

יצחק אופק, חסימת היצמדות חיידקים כגישה למניעת זיהומים,

"סינתזיס" 7, 43, 1994.

<http://www.telem.openu.ac.il/courses/c20237/bacadhes.htm>

ד"ר דרוו בר-ניר מלמד מיקרוביולוגיה וביווגיה של התא באוניברסיטה הפתוחה.



יצירת חלבונים המאפשרים את ההיצמדות והחדירה לתאי האפיתל – בפלסמידים. טיפול תומך (החזרת נוזלים ומלחים) מאפשר לרוב לחולה להחלים.

3. זנים "מחוללי מחלה" (Enteropathogenic - EPEC) – זנים אלה מכילים בפלסמיד את הגנים המאפשרים להם להיצמד לתאי האפיתל של המעי הדק ולהרוס אותם. הם גורמים, בעיקר בילדים, לעלייה בטמפרטורת הגוף, בחילות והקאות, ולשלשול המכונה Infantile diarrhea. סימני המחלה דומים לאלה שגורמים חלק מחיידקי ה-*Salmonella*. בלא טיפול תומך, החולה עלול למות מהתייבשות.

4. הזנים המכונים לעתים בעמודי החדשות הם הזנים גורמי הדימום (Enterohemorrhagic - EHEC). זנים אלה מפרישים רעלנים המכונים ורוטוקסינים (verotoxins), הפועלים על תאי המעי הגס וגורמים לכאבי בטן חזקים ולשלשול מימי ההופך לדמי (כמו בדיזנטריה), אך ההמשך יכול להיות קטלני גם עם טיפול תומך. הסיבוך העיקרי הוא התסמונת המכונה hemolytic uremic syndrome (HUS) – המשלבת אנמיה וכשל בתפקודי הכליה, בעיקר בילדים ובקשישים. כאן הגנים האחראים לפתוגניות נמצאים בפרופאג (צורה בלתי פעילה של נגיף חיידקי).

זן *E. coli* O157, הזן ה"מפורסם" ביותר מבין זני ה-EHEC, התגלה לראשונה בשנות השמונים של המאה הקודמת. הוא מועבר בחלב לא-מפוסטר, בסיידר תפוחים (שנהגו שלא לפסטרו, אך כיום כבר מפסטרים אותו), בהמבורגרים לא עשויים היטב ובירקות שונים (שלא נהוג לבשלם). בשנת 1996 חלו בעיר Sakai ביפן למעלה מ-9,000 איש, רובם ילדים (למעלה מ-600 אושפזו ו-3 מהם מתו) בעקבות זיהום שמקורו בנבטי צנון שהופצו למאות בתי-ספר. בחקירה האפידמיולוגית התברר שכבר הזרעים היו מזוהמים.

בשנת 2006 חלו 199 אנשים בארצות-הברית (ב-26 מדינות שונות). 102 אושפזו ו-31 מהם פיתחו HUS. 3 מהם מתו. המקור להתפרצות היה עלי תרד מזוהמים שמקורם באותו יצרן. ■



קללת מונטסומה

מונטסומה השני (Montezuma II) היה המלך העצמאי האחרון של האצטקים, בזמן הכיבוש הספרדי בשנת 1520. מקום מושבו היה בעיירה המקסיקנית טנוצ'טיטלאן (Tenochtitlan). מונטסומה מת בהיותו אסיר של הספרדים בביתו-שלו, ומרובות וסותרות הגרסאות על מותו. האגדה מספרת שכאשר עינו אותו הספרדים במהלך שביו, הוא קילל אותם. עד היום מוזהרים התיירים הלבנים במקומות מסוימים במקסיקו שלא לשתות ולאכול את המים והמזון המקומיים (שאיכותם המיקרוביאלית אינה מזוהרת). אלה שבכל זאת מתעקשים לאכול ולשתות במקומות מפוקפקים, אכן מרגישים את חמת זעמו של מונטסומה - שבבדיקה מיקרוביאלית מתגלה לרוב (מעל 60%) כזיהום של ETEC. המקומיים אינם נפגעים משתייה ואכילה, כנראה משום שכבר חלו, והם מחוסנים בפני מחלה חוזרת. ■

2. זנים "חודרניים" (Enteroinvasive - EIEC/EVEC) - זנים אלה (המכונים גם דמויי *Shigella*) חודרים לתאי האפיתל של המעי הגס ופוגעים בכלי הדם המגיעים אליהם. פגיעה זו גורמת למחלת הדיזנטריה: עלייה בטמפרטורת הגוף, התכווצויות בבטן, שלשול מימי ואחריו שלשול דמי (המאפיין את מחלת הדיזנטריה). גם זנים אלה נושאים את גורמי האלימות שלהם - הגנים המקודדים

תעודת זהות ביולוגית

הסוג *Escherichia* מכיל, מלבד המין המוכר *E. coli*, עוד שישה מינים אחרים. ישנם חוקרים הטוענים, שארבעת המינים של הסוג *Shigella*, שביחד עם קבוצת הזנים ה"חודרניים" של *E. coli* גורמים למחלת הדיזנטריה החיידקית (bacillary dysenteriae), הם בעצם זנים חסרי יכולת תנועה של *E. coli*. גם החוקרים החולקים על כך מסכימים ששני הסוגים, *Escherichia* ו-*Shigella*, קרובים מאוד מבחינה גנטית. הסוג *Escherichia* משתייך למשפחת חיידקי המעיים, Enterobacteriaceae, בתת החטיבה γ -proteobacteria. חיידקי *E. coli* הם גרם-שליליים, אל-אווירניים פקולטטיביים (מבצעים נשימה אווירנית בנוכחות חמצן ונשימה אל-אווירנית ו/או תסיסה בתנאים חסרי חמצן). זמן הדור של *E. coli* בתנאים אווירניים, במצע עשיר ובטמפרטורה האופטימלית (39°C-42) הוא 20 דקות. ■

מלבד הזנים האנדוסימביונטיים (המכונים גם זני מעיים - intestinal), קיימים זנים ש"רכשו" אלמנטים גנטיים, לרוב פלסמידים אך לעתים גם בקטריופאגים, הנושאים גנים האחראים ליכולת של חיידקים אלה לחולל מחלות (ואלה מכונים "חוץ-מעיים" - extraintestinal). קיימות לפחות חמש קבוצות של זני *E. coli* גורמי מחלות (EC) בראשי התיבות (שבהמשך). כולם מועברים באמצעות מזון או מים מזוהמים.

1. זנים יוצרי רעלנים (Enterotoxigenic - ETEC) - לזנים אלה פלסמיד ובו גנים המקודדים שני רעלנים, אחד מהם דומה לרעלן שמייצרים החיידקים הגורמים לכולרה (*Vibrio cholerae*). לאחר זמן דגירה של עד יומיים, החיידקים (והרעלנים) גורמים לדלקת במעיים הדקים, המכונה גם בשמות העממיים "קללת מונטסומה" (במרכז אמריקה - ראו מסגרת) ו"שלשול המטיילים" (Traveler's diarrhea). הדלקת מתבטאת בחום נמוך, כאבי בטן, התכווצויות, בחילות והקאות, ושלשול מימי הדומה לזה של כולרה. רוב המקרים המחלה חולפת מאליה לאחר 24-72 שעות.



מדוע מחשבים אינם קוראים מחשבות?

בני-אדם מוכשרים מאוד בקריאת מחשבות – לא בצורה על-טבעית, אלא דרך שפת גוף, הבעות פנים וטון הדיבור. אנו לא רק קוראים מחשבות בצורה זו, אלא גם מביעים אותן: בתקשורת בין אנשים, רבים מהמסרים מועברים בצורה זו. אדם שאינו משתמש בערוצים אלה כדי להביע את עצמו, או מתעלם ממסרים כאלה שמביעים אחרים, נתפש כקר ומנוכר ומפסיד מידע רב וחשוב (או שהוא מאובחן כלוקה בבעיה התנהגותית-פסיכיאטרית).

עבור אנשים רבים, חלק גדול מהתקשורת היא בינם לבין מחשב, או בינם לבין אנשים אחרים דרך ערוצי תקשורת מתווכי-מחשב, דוגמת דואר אלקטרוני או מסרים מיידיים. תקשורת זו מעוקרת מהתכנים הנוספים, ולכן היא מוגבלת ביכולתה להעביר מידע רב בצורה מדויקת, להדגיש את הנושאים החשובים ולהביע רגש, אך גם למונע התלקחויות רגשיות מיותרות. יתרה מזו, אנו כל-כך רגילים להשתמש במגוון ערוצים חושיים תוך כדי שיחה, עד שקשה לנו להשקיע את כל תשומת לבנו בשיחה המבוססת רק על טקסט או דיבור, אף שדווקא בשיחות נטולות רמזים כאלה אנו נדרשים ליותר מאמץ כדי להבין ולהיות מובנים.

מסיבות אלה, אנשי עסקים רבים משקיעים בהקמת מערכות לשיחות וידאו. כיום נמכרות מערכות שעלותן מגיעה למאות אלפי דולרים, הגורמות למשתתפים לחוש כאילו הם באמת יושבים סביב שולחן אחד – לא "מפגש מרחוק" (teleconference) אלא "נוכחות מרחוק" (telepresence). ועם כל זאת, עדיין מקובלת הדעה כי אין תחליף למפגש פנים-אל-פנים.

מדוע הפנים מיוחדות עד כדי כך? לפי השיטה המקובלת כיום לקידוד הבעות פנים, FACS (Facial Action Coding System), אפשר לסווג כל הבעה לפי צירוף של 66 "יחידות פעולה". לדוגמה, החיוך ה"לא-אותנטי" (מנומס או מזויף) שאנו יכולים להפעיל כרצוננו מפעיל את יחידת פעולה 12: משיכת קצות השפתיים כלפי מעלה. החיוך האמיתי, שהוא בדרך-כלל לא-רצוני מכיוון שקשה מאוד להפעילו כאשר איננו חשים צורך פנימי לחייך, מפעיל נוסף על כך גם את יחידת פעולה 7 – כיווץ הפינות החיצוניות של העיניים. החיוך ה"מזויף" נקרא בספרות הטכנית "חיוך פאן אמריקן", בעקבות התרשמות החוקרים מפרסומות בטלוויזיה לחברת תעופה זו. החיוך ה"אמיתי" נקרא "חיוך דושן" על שם הניירולוג הצרפתי בן המאה ה-19 גיליאם דושן (Duchenne), שתיאר לראשונה את תפקיד שרירי הפנים בחיוך (וראו: מרים דישון-ברקוביץ, "הבעות פנים ספונטניות של ניצחון והפסד", "גליליאו" 103). אף שמעטים בקיאים במכניקה שבבסיס ההבדל

בין חיוכים אלה, כמעט כולנו חשים בהבדל, החושף את רגשותיו האמיתיים של האדם העומד מולנו – אכן "קריאת מחשבות".

אין זה מקרה שהמין האנושי, אחד המינים החברתיים ביותר מבין היונקים, פיתח מערכת מורכבת כזו של תקשורת נוסף על יכולת הדיבור. אחד הראשונים שעמדו על המשמעות האבולוציונית של הבעות הפנים היה צ'רלס דארווין בספרו "הבעת הרגשות באדם ובחיות" שראה אור בשנת 1872, שנה לאחר ספרו "מוצא האדם".

מה חושבת המונה לזיהה?

מה צריך לעשות כדי להיעזר בתקשורת הלא-מילולית גם כאשר אנו "מדברים" עם מחשבים או דרך מחשבים?

אחד הצעדים הראשונים הוא פענוח הבעות הפנים. זהו תחום "חם", הנמצא כיום בחזית המחקר. לדוגמה, באתר מעבדת הבינה המלאכותית באוניברסיטה הפוליטכנית של מדריד (קישור בסוף הטור) אפשר לראות סרטים המציגים פענוח תנועות והבעות פנים: אף שהאדם המצולם מזיז את ראשו למעלה, למטה ולצדדים, המחשב מזהה "נקודות מפתח" בפניו של האדם, ומפענח לפיהן את כיוון ההסתכלות ומצב חלקי פנים, כמו העיניים, השפתיים והגבות. בסרט העליון באותו אתר אפשר לראות איך המחשב משתמש במידע על מצב חלקי הפנים כדי לדרג את הבעות לפי התאמתן לששת הרגשות הבסיסיים המוגדרים ב-FACS: הפתעה, פחד, שמחה, עצב, גועל וכעס.

בשיטה דומה השתמש בסוף שנת 2005 ד"ר ניקו סבה (Sebe), חוקר מאוניברסיטת אמסטרדם, בעזרת תוכנה שפותחה באוניברסיטת אילינוי באורבנה-שמפיין (Urbana-Champaign), כדי לפענח את הרגשות המובעים בתמונות מפורסמות. כפי שאפשר לראות בסרטון (קישור בסוף הטור), החליטה התוכנה כי בנאום של הנשיא בוש על המלחמה בעיראק הביעו פניו הפתעה, פחד ועצב. התצלום המפורסם של מייקל ג'קסון כשהפתיעו אותו עיתונאים ביציאה מבית-המשפט פוענח כמורכב מחלקים שווים של פחד, כעס וגועל. לשאלה ארוכת-השנים לגבי הבעתה של המונה לזיהה התוכנה: 83% שמחה, 9% גועל, 6% פחד ו-2% כעס. עכשיו הכל ברור...

האם תשובותיה של התוכנה נכונות? לפחות במקרה של המונה לזיהה, לא סביר כי נאמרה המילה האחרונה בוויכוח. לטענתו של ד"ר סבה, התוכנה מגיעה לדיוק של 85% בפענוח רגשות על פי תצלומים, הישג הקרוב מאוד ליכולותיהם של בני-אדם באותה משימה. אם כך, המחשב כבר קורא מחשבות כמעט ברמה אנושית.





על הממשק ועל הפנים קריאת מחשבות



תצלומים: אימאבוק / Getty Images



נרגיש יותר נוח אם נוכל לעשות זאת בלי להיחשף. ולבסוף, לפעמים פשוט מעניין יותר ומהנה יותר להופיע בדמות אחרת, כפי שנעשה במשחקי מחשב רבים.

דרך להעביר רבים מהערוצים הלא-מילוליים בלי להראות את תמונתנו, ותוך דרישות נמוכות של רוחב פס, היא להשתמש באווטאר (Avatar). המילה באה מהפילוסופיה ההינדית, שבה היא מציינת התגשמות גולמית של אל על פני האדמה. בעולם המחשבים והאינטרנט הושאל מושג זה עבור דמות סנתטית המייצגת משתמש אנושי בתוך עולם ממוחשב, כמו פורום לדיונים, עולם וירטואלי או משחק מחשב.

אחת המערכות המתקדמות ביותר המעבירות תקשורת לא-מילולית דרך אוטארים פותחה באוניברסיטת בן-גוריון בבאר שבע, במסגרת מעבדות דויטשה טלקום (קישור בסוף הטור) – שיתוף פעולה אקדמי-תעשייתי בין האוניברסיטה לבין חברת התקשורת הגרמנית המובילה. במסגרת זו, שנוסדה בשנת 2004, פועלים ארבעה פרופסורים וכארבעים פוסט-דוקטורנטים. המעבדות מתמקדות בשלושה תחומים: "שימושיות אינטואיטיבית" על-ידי ממשקי משתמש חדשים ורב-ערוצים; אבטחת מחשבים; ותהליכים עסקיים.

קבוצה זו, יחד עם שותפיה בגרמניה, הציגה את אחד הפיתוחים בתחום הראשון באפריל 2008, במאמר בכתב-העת הנחשב *IEEE Transactions on Multimedia*. מחברי המאמר הם אוליבר שריר (Schreer), רומן אנגלרט (Englert), פטר אייזרט (Eisert) וראלף טנגר (Tanger). המערכת פועלת על מחשב שולחני רגיל בשילוב עם מצלמת אינטרנט פשוטה ואזניות סטנדרטיות (הכוללות מיקרופון). ליושב מול מערכת זו מוצגת דמות ממוחשבת בסגנון המזכיר סרטים מצוירים, אך פועלת כאילו המסך היה ראי: תנועות הפנים, השפתיים, הגוף והידיים מחקות את תנועות המשתמש בזמן אמיתי.

התוצאות הראשונה, אנו סוקרים אותה במהירות. אילו המחשב היה יכול לדעת כמה זמן התעכבו עינינו על כל תוצאה, ולגלות אם תוך כדי ההסתכלות על חלק מהתוצאות השתנתה הבעתנו, אזי היה ביכולתו לחדד את הגדרת החיפוש ולהביא אותנו מהר יותר אל המידע שחיפשנו (גם כאן קיים כמובן פוטנציאל לניצול המידע לטובת פרסום ממוקד או לחדירה אחרת לפרטיות).

תנועות ידיים יכולות כמובן לעזור לנו לבחור פעולות, ובמיוחד להזיז דברים על המסך – להקטין, להגדיל, לסובב וכו'. ממשק המבוסס על תנועות ידיים מופיע בסרט "דו"ח מיוחד" (2002, במאי: סטיבן שפילברג) והוא כבר קיים במציאות במכשירים מסחריים כמו Microsoft Surface, אם כי במכשירים אלה הידיים חייבות לגעת במשטח. כפי שנראה בהמשך, באוניברסיטת בן-גוריון הוסרה מגבלה זו, והידיים יכולות לנוע בחופשיות.

האווטאר מחקה אותך

אותן טכניקות יכולות לעזור גם כאשר המחשב מתווך בתקשורת בין בני-אדם. בדרך-כלל התקשורת דרך המחשב מוגבלת לטקסט, וכך היא מאבדת את מגוון הערוצים שאנו מצפים להם בשיחה פנים-אל-פנים. אף ששיחות וידאו דרך המחשב הן זמינות וזולות, הן עדיין מהוות רק חלק קטן מהתקשורת. יש לכך כמה סיבות: שיחות כאלה דורשות "רוחב פס" (כמות מידע משודרת ליחידת זמן) גבוה, וגם כאשר רוחב פס זה אמור להיות זמין אנו נתקלים לעתים קרובות ב"קפיצות" ובתמונה קפואה, כך שתחושת הקשר הבלתי אמצעי נפגעת. יש גם מצבים שבהם איננו רוצים להראות בווידיאו, אם משום שאיננו חשים מטופחים מספיק ואם משום שאנו רוצים לשמור על פרטיותנו. דוגמה לאפשרות השנייה היא היכרויות באינטרנט: כיום זוגות רבים נפגשים לראשונה באינטרנט, אבל בשלבים הראשונים של ההתוודעות הם מעדיפים שלא לאפשר לצד האחר לראות את פניהם.

גם כאשר אנו פונים לנציג חברה (למשל בנק, או תמיכה טכנית), יהיה לנו יותר קל לתקשר אם נוכל לראות ולהראות תנועות ידיים והבעות פנים, אבל גם אנו וגם נציגי השירות





רעיונות חדשים המתאפשרים הודות לזיהוי הבעות. למשל, המוכר בחנות יוכל לקבל אינדיקציה עד כמה אנו מעוניינים במוצר שאותו אנו בוחנים כרגע, אפילו כאשר הוא מרוחק מאיתנו, ולאחר מכן לנצל זאת כדי להצליח יותר במשא ומתן או כדי להציע מוצרים נוספים. נואמים עשויים להיעזר במצלמות המכוונות אל הקהל ומספקות משוב מידי לגבי תגובות הקהל לדבריהם. חברות הכבלים יוכלו לקבל מהמשפחות המשתתפות במדידת המדרוג (רייטינג) מידע רב יותר – לא רק כמה זמן צפו בכל ערוץ, אלא גם מה הרגישו בכל שנייה במשך השידור – שלא לדבר על מדידת התגובה לפרסומות...

מצד אחר, אפשר גם לחשוב על שימושים חיוביים יותר, כמו תוכנה המגלה מתי הנהג עומד להירדם (קיימות כבר מערכות כאלה, המבוססות למשל על תנועות העיניים, אבל ייתכן שפענוח תנועות כל הפרצוף יהיה פשוט ואמין יותר).

הרעיונות שתוארו עד כה, חיוביים או שליליים ככל שיהיו, מתייחסים למצבים שבהם איננו מנהלים תקשורת דו-סטריית (או לפחות איננו יודעים שהצד האחר קולט את הרגשות שאנו מביעים). אם נתייחס לתפקיד העיקרי של הבעות פנים – העברת מסרים כערוץ נוסף של התקשורת שבה אנו נמצאים כרגע בידעיתנו וברצוננו – נמצא מגוון רחב ומעודד יותר של שימושים.

נתייחס תחילה לתקשורת בין אדם למחשב. גם עבור הפעולות המורכבות ביותר שעבורן אנו נעזרים בתוכנה, אנו מוגבלים בהעברת הפקודות למחשב על-ידי הממשק: אנו יכולים להשתמש בכמאה המקשים שעל לוח המקשים ובתנועות של העכבר – קדימה ואחורה או ימינה ושמאלה. בדרך-כלל כל פעולה כזו באה לחוד, למעט צירופים של מקשים מיוחדים (כמו shift) עם מקשים אחרים על לוח המקשים או על העכבר. תקשורת זו שונה מאוד מתקשורת רב-ערוצית, שבה קורים דברים רבים במקביל: לצד המילים שאנו אומרים באות גם תנועות הידיים, הבעות הפנים, טון הדיבור, מהירות הדיבור, תנוחת הגוף, קשר עין ועוד. אם יעמדו לרשותנו גם ערוצים אלו, נוכל להשתמש בהם כדי לשפר ולהאיץ כמעט כל אינטראקציה עם המחשב.

ניקח למשל חיפוש באינטרנט: לאחר שקיבלנו את רשימת

אפשר להגיע לדיוק גבוה יותר אם מפענחים הבעות לפי סרטי וידאו ולא לפי תמונות בודדות, מכיוון שתנועות הפנים מבהירות טוב יותר את מצב השרירים השולטים על ההבעה. כידוע, גם בני-אדם מצליחים יותר בזיהוי הבעות של "פנים חיים" מאשר הבעות בתמונה. המגבלה העיקרית בשיטה זו היא מהירות החישוב: מכיוון שתמונה חדשה מופיעה כ-30 פעם בשנייה, המצב האידאלי הוא זיהוי ההבעה תוך פרק זמן קרוב ל-1/30 של שנייה – פעולה ב"זמן אמיתי" (real-time). המחקרים שהוזכרו לעיל, באוניברסיטה הפוליטכנית של מדריד, מצליחים להגיע למצב זה ולדיוק של 89% בזיהוי, גם כאשר הצילומים הם מאיכות נמוכה בגלל בעיות בתאורה ותזוזות מצלמה, כפי שקורה לעתים קרובות ב"עולם האמיתי" (כלומר שלא בתנאי מעבדה).

לאן יכולה יכולת זו להתפתח בעתיד? לא כל בני-האדם מוכשרים באותה מידה בקריאת קולם ופניהם של אחרים, אבל פערים אלה עשויים להצטמצם בעזרת תוכנה מתאימה. בשלב שלאחר מכן, עשויה התוכנה להצליח יותר מאשר המומחים הטובים ביותר לקריאת שפת גוף. אין ספק שיש לכך ביקוש: כבר לפחות עשר שנים אפשר לרכוש תוכנות לניתוח קול הטוענות ליכולת להחליט אם האדם שהמערכת מקשיבה לו דובר אמת או משקר, אף שאמינותן של תוכנות אלו מוטלת בספק. אם יכולות כאלו יגיעו לרמה גבוהה של אמינות וזמינות, אפשר לדמיין אפילו את הטלפון הנייד שלנו, בעזרת המצלמה והמיקרופון הקבועים בו, מסמן לנו ברטט קל מתי בני-שיחנו משקרים, מתרגשים, מעוניינים או פוחדים. גם מכשירי טלוויזיה יוכלו לסמן, ליד ראשו של כל אדם הנראה בתמונה, מה הוא מרגיש באותו רגע. איך תיראה חברה אנושית שבה כל האנשים מצוידים בטכנולוגיה כזו?

פני הדור כפני הקלט

בטור זה דיווחנו בעבר ("האח הגדול מזהה אותך", "גליליאו" 108) על זיהוי אנשים לפי תמונותיהם ועל הפוטנציאל של טכנולוגיה זו לטוב ולרע. מי שחושש – ובצדק – מהפגיעה בפרטיות היכולה להיווצר בשל מצלמות הנמצאות בכל מקום ומחוברות לתוכנת זיהוי פנים, ודאי לא ישמח לשמוע על





בחדרי שיחה (chat rooms) וירטואליים, ולאפשר ממשקים המופעלים בתנועות אצבעות: למשל גלילת תפריטים והודעות בטלפונים ניידים, או הפעלת מכשור רפואי בחדרי ניתוח. כאמור, פענוח תנועות האצבעות הוא אתגר קשה, ויש עדיין צורך בשיפור כדי לאפשר זאת בצורה אמינה שאינה רגישה לתנאי הסביבה והתאורה.

הרחבת מעגלי המשתמשים

המגבלות של ערוצי הממשק הנוכחיים – בעיקר עכבר ולוח מקשים – אכן מקשות את התקשורת, אבל אנשים רבים חווים קשיים גדולים הרבה יותר. קושי להפעיל את הידיים עשוי להשאיר אותם מחוץ למעגלים החברתיים הנשענים יותר ויותר על תקשורת ממוחשבת. קושי כזה יכול להופיע לא רק במצבים שבהם היד חסרה או משותקת: גם המחלות הנובעות לעתים משימוש מרובה במחשב (כמו Carpal Tunnel Syndrome) עשויות להאט מאוד את השימוש של אנשים מסוימים בערוצים הממוחשבים.

להפעלת המחשב בעזרת ערוצים חלופיים יש פוטנציאל להקל בעיות אלה. הפיזיקאי הנודע סטיבן הוקינג שולט כיום במחשב בעזרת תנועות העיניים, אך שליטה כזו דורשת אימון וריכוז רב. אנשים אחרים עשויים למצוא עניין בהמצאה של מועצת המחקר הלאומית שבאוטווה, קנדה – ה-Nouse. הרעיון הוא פשוט: התוכנה "ננעלת" על קצה אפו של המשתמש, כך שתנועות הראש משמשות להזיז את הסמן על המסך או לשלוט בתנועות כיסא הגלגלים. מכאן השם – שילוב של "nose" ו"mouse". בעברית, מערכת "גלילאו" מציעה "אפבר" או "עכבראש". בחירת פעולה מבוצעת על-ידי מצמוץ: העפעף השמאלי והעפעף הימני פועלים בצורה דומה לכפתור השמאלי והימני על העכבר ה"רגיל" (כדי להימנע מבלבול עם מצמוצים רגילים ולא-רצוניים, יש צורך ב"מצמוץ כפול" – גם כאן יש דמיון לשימוש בעכבר). בקישור שבסוף הטור אפשר לראות את התוכנה בפעולה ואפילו להוריד גרסה שלה לשימוש במחשב האישי.

בעיות פיזיות אינן היחידות המגבילות את היכולות החברתיות: מצבים הנמצאים על ספקטרום האוטוים

גורמים לקושי רב בתקשורת, המתבטא בין השאר בקושי להבין את הרגשות שמביעים אנשים אחרים בהבעות הפנים ובשפת הגוף. אפילו תנועה פשוטה כמו הרמת גבה עשויה להיות בעלת משמעויות שונות לחלוטין, בהתאם להקשר שבו היא מופיעה. ייתכן כי ילדים אוטיסטים מונעים מעצמם אינטראקציה עם אחרים כי המידע הכלול בשפת הגוף מבלבל מדי.

קספר, רובוט בגודל ילד שפיתחה קבוצת המחקר למערכות אדפטיביות באוניברסיטת הרטפורדשייר (Hertfordshire), משמש לבדיקת הרעיון שדווקא רובוטים יכולים לעזור בלימוד יכולות חברתיות אנושיות. אף שרעיון זה נוגד את האינטואיציה, יש לו כמה יתרונות. אפילו המטפלים הטובים ביותר עשויים להיות לא עקביים דיים בהבעות הפנים ובשפת הגוף שלהם, וקשה מאוד להציג כל גירוי כזה במנותק מגירויים אחרים. הילדים המטופלים עשויים אף להעדיף את הרובוט, הן מפני שהוא מספק להם אינטראקציה פשוטה,

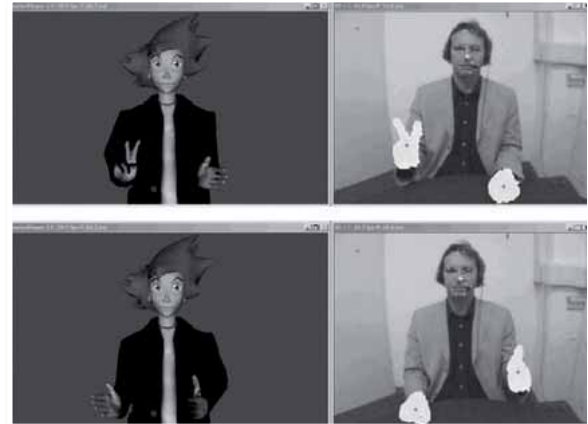




– למשל, האצבעות תמיד צריכות להיות מחוברות ליד ולא לרחף בחלל. על התוכנה להתמודד עם עוד אתגרים רבים נוספים: בני-אדם שונים זה מזה בגודלם וביחסי הגודל בין חלקים שונים בגופם; הם לובשים סוגי לבוש שונים; הידיים עשויות להסתיר זו את זו ואת הפנים; התאורה אינה תמיד טובה; הרקע עשוי להשתנות בכל רגע; והמשתמש נע, מתקרב ומתרחק, במהלך האינטראקציה עם המחשב.

לאור כל זאת, ההישג של פעולה בזמן אמיתי בעזרת ציוד מחשוב ביתי הוא מרשים. יתר על כן, התוכנה אינה דורשת שום שלב של "לימוד" שבו היא מתאימה את עצמה לכל משתמש חדש. הדבר היחיד שהמשתמש נדרש לעשות בתחילת האינטראקציה הוא להניע את ידיו כך שהתוכנה תוכל לזהות את צבען ומיקומן של הידיים. מסיבה זו, כדאי גם להימנע מבגדים הדומים בצבעם לצבע העור.

בימים אלה מוצגת התוכנה בהנהלת דויטשה טלקום בעיר בון שבגרמניה ובמעבדות החברה שבברלין. מבקרים במקומות אלו יכולים להתרשם מדמויות מצוירות המחקות את תנועותיהם. בעתיד מתכננים החוקרים להשתמש בטכנולוגיה שפיתחו כדי לאפשר אינטראקציה בין אוטוארים



אוטואר על מסך, מחקה את תנועותיו של אדם
Schreer, et al. ©2008 IEEE

כדי להגיע לרמת דיוק זו, התוכנה משתמשת במצלמה כדי לעקוב בכל זמן אחר 66 הפרמטרים המייצגים את תנועות הפנים, יחד עם 186 פרמטרים המייצגים תנועות גוף: מצב הראש, פלג הגוף העליון והזרועות. נוסף על כך יכולה התוכנה לזהות את תנועות האצבעות ברמת דיוק המספיקה אפילו כדי לפענח את רוב הסימנים באלפבית של שפת הסימנים האמריקנית. התוכנה מקשיבה גם למיקרופון, כדי לזהות את ההברות שהוגה המשתמש ולהזיז את השפתיים בהתאם. פעולה זו מעצימה את החוויה המציאותית, וגם עוזרת להבין את הנאמר (וראו "רואה לך בשפתיים, רואה את הקול", "גליליאו" 112).

אחד האתגרים הקשים ביותר שעמדו בפני החוקרים היה קריאת מצב הידיים, ובמיוחד האצבעות – כך אמר למגזין "גליליאו" ד"ר רומן אנגלרט, ממפתחי התוכנה, המשמש גם כאיש הקישור בין דויטשה טלקום לבין מעבדות דויטשה טלקום באוניברסיטת בן-גוריון. האצבעות מסתירות זו את זו לעתים קרובות, ועל התוכנה להציג את הניחוש הטוב ביותר לגבי עמדת כל האצבעות בצורה שלא תסתור את חוקי הטבע



גליליאו

כתב עת למדע ומחשבה



מבצע היכרות מיוחד מצטרפים לכתב העת גליליאו למדע

1 - 75 ש"ח בלבד

מחפשים להרחיב ולהעשיר את הדעת? אוהבים לדעת יותר על הכל?



בואו לקרוא חדשות מדע, סקירות של מחקרים חדשים ומאמרים מרתקים בתחומי הביולוגיה, הפיזיקה, חקר החלל, פרדוקסים לוגיים ועוד.



להזמנת מנוי חייגו: **155-505-1599** 24 שעות ביממה

* אין כפל מבצעים * ט.ל.ח. * התמונות להמחשה בלבד * המבצע למצטרפים למינוי ריבועוני (3 חודשים) במחיר מיוחד של 75 ש"ח בלבד !!!

www.ifeel.co.il



קישורים

זיהוי פנים והבעות:
http://www.dia.fi.upm.es/~pcr/face_expressions.html

פענוח הבעת המונה ליזה:
http://www.sciencedaily.com/videos/2006/08/11-mona_lisa_smiling.htm

מעבדות דויטשה טלקום באוניברסיטת בן-גוריון:
<http://tlabs.bgu.ac.il/Deutsche%20Telekom%20Lab>

אוטאר המחקה את האדם:
<http://www.physorg.com/news125667740.html>

ה"אפר", Nouse:
<http://ivim.ca/e>

הרובוט קספר, המסייע לילדים אוטיסטים בלימוד כישורים חברתיים:
<http://kaspar.feis.herts.ac.uk>

← החוזרת על עצמה ואינה מפתיעה אותם בשינויים ובגוונים שונים; והן מפני שילדים אוטיסטים רבים מעדיפים – אולי בדיוק מסיבה זו – אינטראקציה עם חפצים דוממים על פני אינטראקציה עם בני-אדם.

פניו של קספר בנויות מגומי סיליקון המונע מבפנים על-ידי מסגרת אלומיניום, המאפשרת לו להביע שמחה, עצב או הפתעה. ראשו וידיו של הרובוט יכולים לנוע בצורות רבות (טכנית, יש לו שמונה דרגות חופש בראש ובצוואר ושש דרגות חופש בכל זרוע), ובכל עין מותקנת מצלמת וידיאו. הרובוט מבצע תנועות ומציג הבעות פשוטות במהלך האינטראקציה עם הילד, ומעודד את הילד להגיב ולחקות אותו. כך הילדים לומדים דרך הממשק הפשוט של אינטראקציה עם הרובוט איך להתמודד עם הממשק המורכב של בני-אנוש (וראו גם: שרית לוי, "רגש אקס מאכונה", "גליליאו" 112).

האם הילדים יוכלו להכליל את שלמדו מהרובוט לאינטראקציה חברתית עם בני אנוש? קשה לדעת, אבל החוקרים מעודדים מהתוצאות הראשונות. ד"ר בן רובינס (Robins), ראש הצוות הרב-לאומי המפתח את קספר, סיפר לעיתון *Wired* שכאשר החל לבדוק את הרובוט עם ילדים, הם התייחסו אל רובינס כמו לזבוב על הקיר, אבל כל אחד מהם נפתח אליו בסופו של דבר. רובינס סיפר על ילד שהתעלם ממנו במשך שבועות, אבל יום אחד בא והתיישב בחיקו, ואז לקח את ידו והוביל אותו אל הרובוט, כדי לחלוק את החוויה.

פיתוחים טכנולוגיים כאלה עשויים להרשים את הטכנולוג בהתגברות על אתגרים רבים בתחום הרובוטיקה והראייה הממוחשבת, אבל חשיבותם האמיתית היא בהקשר החברתי: המעבר אל ממשקים טבעיים המבוססים על ערוצי תקשורת אינטואיטיביים ואנושיים יכול לא רק להקל את עבודתנו עם מחשבים, אלא גם לפרוץ חומות ומחסומים של מרחקים גאוגרפיים, פיזיים ומנטליים. ההתקדמות הרבה בזמן האחרון מבטיחה לממש פוטנציאל זה בעתיד הקרוב.

ישראל בנימיני עובד בחברת ClickSoftware בפיתוח שיטות אופטימיזציה מתקדמות.



מבין הפותרים בגיליון 116 זכה במנוי
ל"דרך האוכל" מיכאל קם מבר שבע.

בין הפותרים יוגרל מני לירחון
"דרך האוכל". בירחון תוכלו
למצוא מתכונים נפלאים,
מאכלי עדות, טיפים ועצות,
ראיונות עם שפים מובילים,
קישוטי מזון, אלכוהול ועוד.



את הפתרונות יש לשלוח
ל"מערכת גליליאו",
SBC הוצאה לאור,
רח' שפע טל 8
תל-אביב, 67013
או ל: shlomit@sbc.co.il
ולציין בשורת הנשוא
"למדור קפיצת ראש".
נא לציין שם מלא, כתובת וטלפון.

גם פתרונות לחלק מהשאלות
בלבד ישתפו בהגדלה.

הבעיות שהוצגו כאן נחשבות לבעיות הקשות ביותר בתחום חידות השקילה. מעניין לדעת שמתמטיקאים מחפשים עד היום שיטות כלליות לפתרון בעיות כאלה במספר השקילות הקטן ביותר, אך הם עדיין לא הצליחו בכך. חוקרים רבים נעזרים בתכניות מחשב כדי למצוא מהו המספר הגדול ביותר של מטבעות שאפשר לשקול בעזרת n שקילות על מאזני כפות כך שנמצא בוודאות מטבע מזויף. אם משתמשים באלגוריתם הפשוט המוצג בתחילת המדור, מספר המטבעות הוא 3^{n-1} . אם משתמשים באלגוריתם השני, אזי מספר המטבעות הוא: $(3^n - 3)/2$ (ראו הערה למטה).

בסוג נוסף של בעיות שקילה משתמשים במאזניים רגילים (שבהם נמדד משקלו של גוף באופן מוחלט). נדגים בעיה זו בשאלה שלהלן:

שאלה: נתונות עשר ערמות של מטבעות. בכל ערמה יש עשרה מטבעות. ידוע שמטבע אמיתי שוקל 10 גרמים, ומטבע מזויף שוקל 9 גרמים. אחת הערמות היא של מטבעות מזויפים, וכל השאר הן של מטבעות אמיתיים. איך, בעזרת שקילה אחת, נגלה איזו ערמה היא זו של המטבעות המזויפים?

פתרון: ניקח מטבע אחד מהערמה הראשונה, שני מטבעות מהערמה השנייה, שלושה מטבעות מהערמה השלישית וכן הלאה, עד עשרה מטבעות מהערמה העשירית. את כל המטבעות האלה נשקול במאזניים, ולפי המשקל שהתקבל נדע איזו ערמה היא המזויפת (כיצד?).

סוג נוסף של בעיות שקילה הציג המתמטיקאי והחידונאי הצרפתי בן המאה ה-16 קלוד גספר באשה דה מזיריאק (Bachet de Méziriac). באשה חיבר ספרים רבים שעסקו בחידות ושעשועי מתמטיקה. ספרים אלה, שהיו מן הראשונים מסוגם, היוו בסיס לרוב הספרים בנושאים אלה שנכתבו בשנים מאוחרות יותר.

באחד מספריו מופיעה בעיית שקילה מעניינת: מהו המספר הקטן ביותר של משקולות שונות שצריך כדי לשקול משקל כלשהו בין 1 ל-40 ק"ג, במאזני כפות? במבט ראשון נראה, כי אפשר להשתמש בשש המשקולות: 1 ק"ג, 2 ק"ג, 4 ק"ג, 8 ק"ג, 16 ק"ג ו-32 ק"ג, כדי לשקול כל חפץ שמשקלו בין 1 ק"ג ל-40 ק"ג.

לדוגמה: אם נשים שק של תפוחי אדמה שמשקלו 11 ק"ג בכף אחת של המאזניים, נוכל לאזן אותו בעזרת שלוש המשקולות: 1 ק"ג, 2 ק"ג ו-8 ק"ג, שנשים בכף האחרת של המאזניים. המשקולות שבהן השתמשנו הן כולן חזקות של 2 (מספרים בינאריים).

אחת התכונות המעניינות של מספרים בינאריים היא שאפשר ליצור בעזרתם את כל המספרים השלמים באמצעות פעולת החיבור, מבלי להשתמש במספר (בינארי) יותר מפעם אחת, ולפיכך, משקולות "בינאריות" מתאימות לפתרון החידה.

ואולם, אפשר לשפר את הפתרון לבעיה של באשה אם ניעזר ב"טריק" קטן. עד עכשיו הקפדנו לשים את המשקולות בצד אחד בלבד, ואת החפץ שאותו שוקלים בצד האחר. אבל אם נשים את המשקולות משני צדי המאזניים, נוכל לפתור את הבעיה עם ארבע משקולות שונות בלבד. מבחינה מתמטית נשתמש בפעולת חיבור, וגם בפעולת החיסור! לא נרצה, כמובן, להרוס לכם את הכיף, ולכן השארנו לכם לפתור בעיה זו בעצמכם בהמשך. רק נרמז שהפעם משתמשים במספרים טרנאריים, והמבין יבין.

לסיום, קצת היסטוריה. בעיות שקילה הן עתיקות מאוד, אבל העניין בנושא התגבר עם פרסום הספר "הבדקים מתמטיים" (Mathematical Snapshots), של המתמטיקאי היהודי-פולני הוגו סטיינהאוס (Steinhaus).

* M. Martelli and G. Gannon, "Weighing Coins: Divide and Conquer to detect a counterfeit", *College Mathematics Journal* 28, 365-367, 1997.

בעיות שקילה

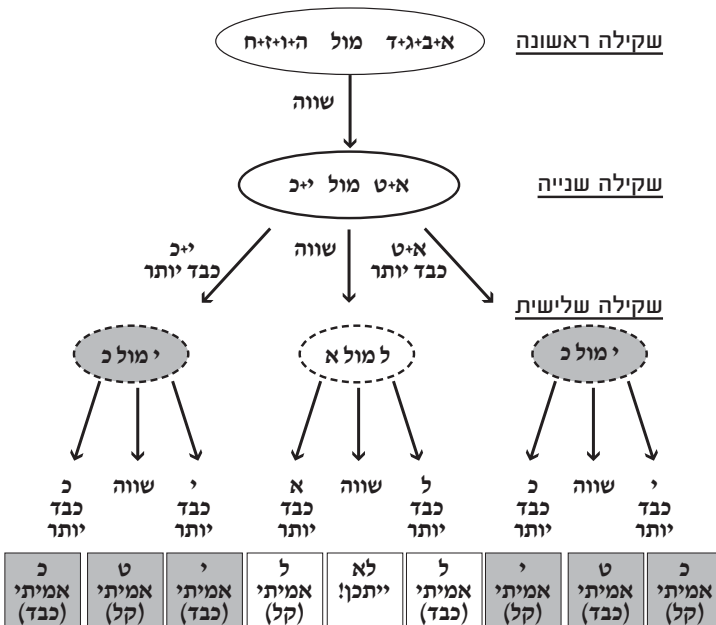
הרעיון הבסיסי העומד בבסיס הבעיה הזאת הוא שאפשר לבחור את המטבעות שאותם נשקול באופן כזה, שבחלק מהשקילות משתמשים במטבעות שכבר גילינו שהם אמיתיים. נדגים זאת בשאלה שלהלן.

שאלה: נתונים 12 מטבעות, וצריך למצוא מביניהם אחד השונה במשקלו מכל האחרים (נקרא לו מטבע מזויף), ואף לקבוע אם הוא קל או כבד יותר מהאחרים. מותר לנו לעשות זאת בעזרת שלוש שקילות על מאזני כפות.

פתרון: נסמן את 12 המטבעות באותיות א, ב, ג, ד, ה, ו, ז, ח, ט, י, כ, ל. בשקילה הראשונה נשווה בין משקלי המטבעות א', ב', ג', ד' (כולם ביחד) לבין משקלי המטבעות ה', ו', ז', ח' (כולם ביחד). יש שלוש תוצאות אפשריות:

- א. שני הצדדים מאוזנים (המשקלים שווים)
- ב. הרביעייה א'+ב'+ג'+ד' כבדה יותר מהרביעייה ה'+ו'+ז'+ח'
- ג. הרביעייה א'+ב'+ג'+ד' קלה יותר מהרביעייה ה'+ו'+ז'+ח'

נניח ששקלנו על כפות המאזניים את שתי הרביעיות א'+ב'+ג'+ד' מול ה'+ו'+ז'+ח', והמאזניים התאזנו. במקרה זה, נמשיך לשקילה השנייה, והפעם ניקח את א' עם ט', מול י' עם כ'. בעזרת שקילה זו והשקילה שלאחריה אפשר למצוא את המטבע המזויף. פתרון זה מוצג בתרשים שלפניכם. אפשר להכין תרשימים דומים עבור המקרים (ב) ו(ג) - הפותרים החרוצים מוזמנים לעשות זאת...



חידות רבות עוסקות בזיהוי חפץ (מטבע, גולה וכדומה) מזויף מבין חפצים אמיתיים (או אמיתי מבין מזויפים). ההבדל היחיד בין האמיתי למזויף הוא במשקל - בכל שאר התכונות (גודל, צורה, צבע וכדומה) הם זהים. על כן, יש להשתמש בשקילה כדי לאתר את החפץ המזויף. ישנם כמה סוגים של בעיות שקילה. בעיה נפוצה במיוחד דורשת מהפותר למצוא את משקלו של גוף במאזני כפות במספר השקילות הקטן ביותר האפשרי. למשל, הבעיה הזאת:

שאלה: נתונים שלושה מטבעות, מהם אחד מזויף, אבל לא ידוע אם הוא כבד יותר מהאחרים או קל יותר. מותר לבצע שתי שקילות באמצעות מאזניים. איך נזהה את המטבע המזויף? האם הוא כבד יותר מהאחרים או קל יותר?

פתרון: נקרא למטבעות מטבע א', מטבע ב' ומטבע ג'. נשווה בין המשקלים של א' וב'. כעת יש לנו שתי אפשרויות:

- **אפשרות 1:** אם המשקל שווה, אזי ג' הוא המזויף. כדי לדעת אם המטבע המזויף הוא קל או כבד מהאחרים, נבצע שקילה שנייה שבה נשווה בין א' לג'.

- אם א' כבד מג', סימן שהמטבע המזויף (ג') קל יותר ממטבע אמיתי.
- אם א' קל מג', סימן שהמטבע המזויף (ג') כבד יותר ממטבע אמיתי.
- **אפשרות 2:** אם המשקלים שונים (א' כבד מב' או ההפך, ב' כבד מא'), צריך לבצע שקילה נוספת כדי לגלות את המטבע המזויף. נניח שראינו שמטבע א' כבד מב'. בשקילה זו נשווה בין א' לג'.
- אם המשקל שווה, אזי ב' הוא המזויף, והוא קל יותר ממטבע אמיתי.
- אם ג' קל מא', אז א' הוא המזויף והוא כבד יותר ממטבע אמיתי.

הערות:

א. אין אפשרות שבשקילה האחרונה ג' יהיה כבד מא', כי אז לשלושת המטבעות יהיו משקלים שונים - וזה סותר את תנאי השאלה.
 ב. אם בשקילה הראשונה א' היה קל מב', פשוט משנים את השמות שנתנו למטבעות בהתחלה, הופכים את א' לכ' וב' לא' ופותרים באותו אופן. שיטה זו היא שיטה כללית, ואפשר להרחיב אותה למספר גדול יותר של מטבעות (אתם אכן מוזמנים לפתור בעיה דומה בהמשך...).
 לכאורה נראה, שכדי למצוא מטבע מזויף מתוך עשרה מטבעות נדרשות ארבע שקילות (אם איננו יודעים אם המטבע המזויף קל או כבד מהאמיתי). הנחה זו נכונה אם אנחנו שוקלים את המטבעות לפי האלגוריתם שהוצג כאן, ואולם, אפשר לשנות טקטיקה ובעזרת שלוש שקילות בלבד למצוא מטבע מזויף מתוך עשרה. למען האמת, אפשר אפילו למצוא מטבע מזויף מתוך 12 מטבעות בעזרת שלוש שקילות בלבד!



הפקולטה למדעי החיים
ע"ש מינה ואבררד גודמן

הפקולטה
למדעים מדויקים

נמשכת ההרשמה לתכניות לימודים במסלולים המשולבים הבאים:

ביופיסיקה

מסלול לימודים לתואר ראשון, המשלב לימודי פיסיקה, כימיה ומדעי החיים. לימודים במסגרת תכנית זו הם אתגר לתלמידים מצטיינים, בתקופה שבה צפוי גידול ניכר בדרישה למחקר ולידע בין-תחומי במדעי הטבע וליישומים בתעשייה, ברפואה ובחקלאות. בוגרי התכנית יכולים להמשיך בלימודים מתקדמים בתחומים רבים כגון: ביופיסיקה ניסויית, עיונית ורפואית, ביוטכנולוגיה, מדעי החיים, כימיה ביולוגית, הנדסה גנטית, הוראת המדעים, ולאחר מילוי דרישות השלמה גם בהנדסה ביורפואית, כימיה, פיסיקה ועוד.

תואר שני בביופיסיקה

מסלול לימודים ומחקר המשלב נושאים בפיסיקה, כימיה ומדעי החיים. נושאי המחקר כוללים ספקטרוסקופיה, שימוש בלייזרים במחקר ביופיסיקלי ורפואי, פוטוכימיה ופוטופיסיקה של חלבונים, תהודה מגנטית גרעינית, ביולוגיה מבנית, ממברנות ופולימרים ביולוגיים, מיקרוסקופיה מתקדמת, ביופיסיקה של תאים ומערכות, ביופיסיקה של מערכות עצבים ועוד.

פיסיקה ראשי ומדעי החיים משני

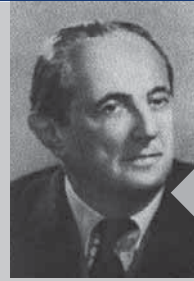
מסלול לימודים לתואר ראשון המכשיר בוגרים בעלי הכשרה כפיסיקאים ובעלי ידע בביולוגיה.

לפרטים על תכניות אלו, מסלולי הלימוד ואפשרויות ההמשך:

טל. 03-5318433/4 ■ ph.biu.ac.il ■ biu.ac.il/PH/biophysics

[טריוויה מדעית]


1. היכן ממוקמות אוזני הצרצר?
2. מאיזה מדען מנעו הנאצים, על פי השמועה, פרס נובל שני עקב יהדותו?
3. היכן נמצא ים הגשמים?





הוגו סטיינהאוס.
הבזקים מתמטיים

סטיינהאוס נולד בשנת 1887 בגליציה (אז אוסטריה, היום פולין), ועשה את רוב ימיו באוניברסיטה של לבוב שבפולין, שם המשיך ללמד – הודות לעובדה שלבוב נמצאה אז תחת שלטון סובייטי – עד שנת 1941. עם כניסת הנאצים לעיר, נאלץ סטיינהאוס היהודי להסתתר. למרות רעב נורא וקשיים מרובים, הצליח לשרוד במלחמה והמשיך בעבודתו, בעיקר בתחומי תורת המספרים וההסתברות. הוא היה תלמידו של המתמטיקאי הנודע דיוויד הילברט (Hilbert), והיה בין המייסדים של ה"איגוד המתמטי הפולני". בשנת 1939 פרסם סטיינהאוס את ספרו "הבזקים מתמטיים", שעסק בעיקר בחידות מתמטיות. הספר, שהפך לרב-מכר, היה כתוב בצורה כה יפה, שהתאים גם למתמטיקאים מקצועיים וגם ל"אדם הפשוט". אף שהחידות המובאות בספר נראות פשוטות, חלקן מעסיקות מתמטיקאים עד היום הזה, ובהן, כאמור, בעיות הקשורות לשקילת מטבעות.

ובינתיים, אנו ממליצים לכם לשקול בכובד ראש ולנסות לפתור את השאלות שלהלן, מהקל אל הכבד...

נתונים 9 מטבעות. אחד מהם מזויף, אבל לא ידוע אם הוא כבד יותר מהאחרים או קל יותר. איך נמצא את המטבע המזויף בעזרת **שלוש שקילות?** 

נתונות 3 ערמות, בכל ערמה 5 מטבעות. מבין הערמות יש ערמה אחת של מטבעות מזויפים, או שאין בכלל מטבעות מזויפים. ידוע שמטבע אמיתי שוקל 20 גרם, ומטבע מזויף שוקל 17, 18 או 19 גרם. כיצד, בעזרת שקילה אחת, נוכל לגלות את ערמת המטבעות המזויפים (אם יש ערמה כזו)? 

מהן ארבע המשקולות שבעזרתן אפשר לפתור את חידת באשה, וכיצד אפשר לשקול בעזרתן משקל של גוף שיכול להיות כל מספר שלם בין 1 ל-40 ק"ג? 

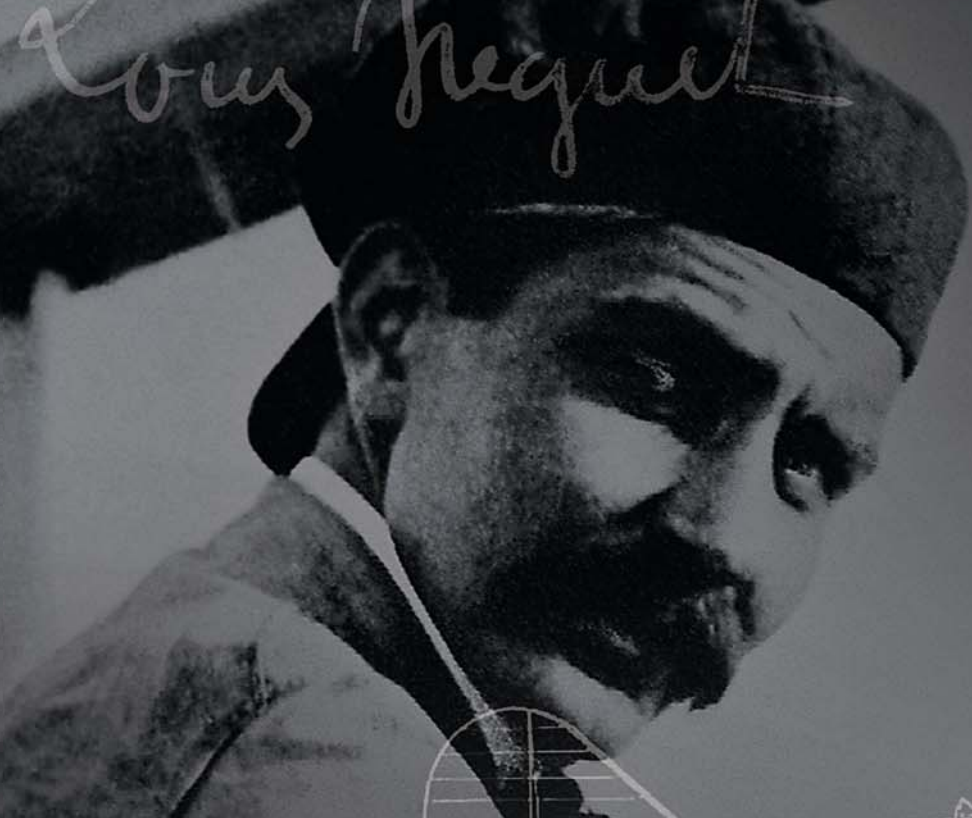
פתרונות גיליון 117

[חידות מתמטיות]

1. $7+53=13+47=17+43=19+41=23+37=29+31=60$
2. סכום שישים יום יכול להתקבל רק מצירוף פברואר מעובר עם אוגוסט. כלומר, פעם בארבע שנים – וזאת מאחר שבמשך 60 השנה הבאות אין שנה המתחלקת ב-100, שבה אין עיבור של מרץ. כלומר: 15 פעמים.
3. $8 \times (8 - \frac{1}{2}) = 60$

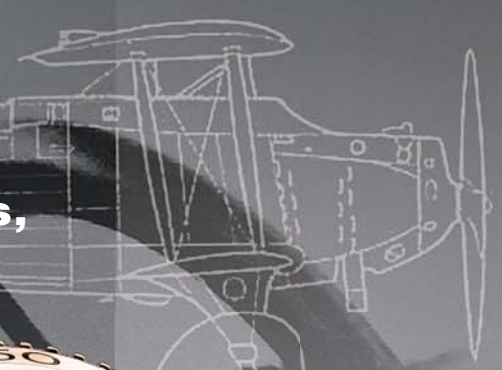
[טריוויה מדעית]

1. החללית הסובייטית הלא-מאוישת לונה 3 צילמה את הצד הנסתר (הרחוק) של הירח בשנת 1959. האנשים הראשונים שראו לראשונה את הצד הרחוק של הירח במו עיניהם (ולא בתצלום) הם האסטרונומים שהשתתפו במשימת אפולו 8 של סוכנות החלל האמריקנית, נאס"א – פרנק בורמן (Borman), ג'יימס לוואל (Lovell) וויליאם אנדרס (Anders).
2. איזוטופ הניקל (מספר אטומי 28), המכיל 60 נוקליאונים (28 פרוטונים + 32 נייטרונים), הוא איזוטופ יציב.
3. היסוד שמספרו האטומי 60 הוא ניאודימיום (Neodymium, Nd), יסוד מתכתי הנמנה עם קבוצת העפרות הנדירות; הוא משמש בעיקר לייצור מגנטים קלים, חזקים וזולים.



Breguet
Depuis 1775

**Louis Breguet,
pioneer in aeronautics,
equipped his planes with
Breguet chronographs.**



Type XXI Collection - Fly-Back Chronograph and 24-Hour Time Display - 3810BR

impress

רשת חנויות לשעוני יוקרה

גרנד קניון | 04-8221178 קריית | 04-8764137 קניון עזריאלי | 03-6967435
קניון רמת אביב | 03-6411997 אילת קניון מול הים | 08-6342243
פתח תקווה רח' אימבר 7 | 03-9297000

מרכז שירות ארצי 03-9297008