



כסלו תשפ"ו
דצמבר 2025

איגרת

האקדמיה הלאומית הישראלית למדעים גיליון 47



תמונת השער:

כרם גן לאומי עבדת
כרם מורשת שהוקם בחלקה חקלאית
מהתקופה הביזנטית בגן לאומי עבדת שבהר הנגב.
צילום: ליאור שווימר; באדיבות רשות הטבע והגנים
מתוך המאמר "זרעי העבר, פירות העתיד"
מאת פרופ' גיא בר-עוז, עמ' 24

עורכת: נעמה שילוני, מנהלת אגף קשרי ציבור

סיוע בהפקה: מיה פופר

עריכת לשון: יהודית (דיתיק) ידלין

תצלומים: גדעון אבני; אוסף רשות העתיקות; צילום © מוזיאון ישראל,

ירושלים על ידי אלי פוזנר; שי בן-אפרים; איתי בנית; עידן גרוס;

הראל לוז; דרור מעין; ינון פוקס; פרייסבלום 2025 (מקור); מיכל פתאל;

צילום: ליאור שווימר, באדיבות רשות הטבע והגנים; רשות העתיקות

Blavatnik Awards, The New York Academy of Sciences; Cornell

University Press; India Office library's collection, London; Markus

Scholz/Leopoldina; McGill University Archives; National Academy of

Sciences (NAS); Nature Ecology & Evolution; The Library of the YIVO

Institute for Jewish Research, New York; The Pugwash Conferences

עיצוב ועריכה גרפית: נאוי קצמן

דפוס: רותם הפקות

האקדמיה הלאומית הישראלית למדעים

רחוב ז'בוטינסקי 43, כיכר אלברט איינשטיין

ת"ד 4040, ירושלים 9104001

טל' 02-5676222

naama@academy.ac.il, www.academy.ac.il

מועצת האקדמיה

פרופ' דוד הראל, הנשיא

פרופ' מרגלית פינקלברג, סגנית הנשיא

פרופ' יוסף קוסט, יו"ר החטיבה למדעי הטבע

פרופ' אבנר הולצמן, יו"ר החטיבה למדעי הרוח

פרופ' נילי כהן, הנשיאה הקודמת

אסתר סיוון, המנהלת

למהדורה הדיגיטלית:

<https://doi.org/10.52873/Igeret.2025.47>

תוכן העניינים

3 דבר הנשיא

7 הרצאות החברים החדשים בתשפ"ה

8 מבט מקרוב על מודלי דיפוזיה
פרופ' מיכאל אלעד

16 השיעה היא עם ישראל האמיתי: מקומה של היהדות במחשבת האסלאם השיעי
פרופ' מאיר מ' בר־אשר

24 זרעי העבר, פירות העתיד
פרופ' גיא בר־עוז

36 סינתזה כימית של חלבונים מורכבים למטרות מחקר ביולוגי
פרופ' אשרף בריק

46 הוכחות אקראיות
פרופ' עודד גולדרייך

56 מערכות אקולוגיות בעידן של שינויים גלובליים
פרופ' תמר דיין

66 חשיבה מחודשת על קרימינולוגיה: המיקום כמפתח לחקר הפשיעה
פרופ' דיוויד וייסבורד

פרופסור, איך נשמעה המוזיקה בבית המקדש?
דמיון ומציאות במורשת המוזיקלית היהודית

74 פרופ' אדוין סרוסי

83 באקדמיה

85 מה חדש באקדמיה?

96 בהוצאה לאור

103 ספרים חדשים מאת חברי האקדמיה

108 רשימת חברי האקדמיה

דבר הנשיא

חברות וחברי האקדמיה, קוראות וקוראים נכבדים,



פרופ' דוד הראל
נשיא האקדמיה

שנת תשפ"ו עומדת בסימן המשך תקופה קשה ורבת טלטלות למדינת ישראל ולחברה הישראלית. על אף הפסקת האש השברירית הנוכחית, גם עכשיו ממשיכה המלחמה שפרצה בעקבות אירועי השבעה באוקטובר 2023 להטיל צל כבד על חיינו כאן, על מרקם החברה שלנו ועל יחסי ישראל עם העולם. בתוך מציאות זו מוטל עלינו, באקדמיה הלאומית הישראלית למדעים, לנסות ולשמור על מבט מפוכח, פתוח, אחראי ומבוסס עובדות, ולתרום ככל יכולתנו לחיזוק המדע הישראלי, לשיקום האמון בין חלקי החברה ולהעמקת תחושת האחידות המשותפת לעתידנו.

יותר משנתיים חלפו מאז אותו יום נורא, והפצע עדיין פתוח. לכולנו נחרת בזיכרון מאבקם העיקש של המשפחות ושל הציבור לשחרור החטופים, מאבק שהפך לסמל של התעקשות על החיים מול אכזריות בלתי נתפסת. שחרורם של אחרוני החטופים החיים לאחר תקופה ארוכה כל כך של אי-ודאות וחרדה הביא עימו הקלה מסוימת, אך ליבנו עדיין עם משפחות החללים שגופותיהם טרם הושבו, עם המשפחות השכולות שעולמן חרב עליהן, עם הפצועים הרבים, עם המפונים שטרם חזרו לבתיהם ועם עשרות אלפי המשפחות שחיהן התהפכו בשל שירות מילואים ממושך וקשה של אחד מבני הבית.

לצד המחויבות העמוקה להחזיר כל אדם שנחטף לביתו ולדאוג לקבורה הולמת לכל מי שנרצח או נהרג בשבי, איננו יכולים להתעלם ממחירה הכבד של המלחמה ששילמו האזרחים בעזה. כמו שכבר נאמר בגילוי הדעת שלי מחודש יולי וברבים מנאומיי, שמירה על ביטחון אזרחי ישראל ומניעת פגיעה מיותרת בעשרות אלפי אזרחים חסרי ישע אינן מטרות סותרות, אלא נדבכים שונים של אותה מחויבות בסיסית לחיי אדם ולכבוד האדם. במהלך השנה שבתי והדגשתי כי הפסקה מוחלטת של הלחימה, הזרמת סיוע הומניטרי, שיקום תשתיות חיוניות והגנה על מערכת הבריאות בעזה הן אינטרס מוסרי ואינטרס מדיני ארוך טווח גם יחד.

מבית, המשכנו לצערנו לראות ניסיונות רבים לערער את עצמאות מערכת ההשכלה הגבוהה ואת החופש האקדמי. יוזמות חקיקה, התערבות בהחלטות של מוסדות עצמאיים, הצרת צעדים והצעות הכופות שיקולים פוליטיים על החלטות מקצועיות, ואף ניסיון פיזי לשבש הרצאה שגרתית באחד הקמפוסים – כל אלה מצטרפים לכדי תמונה מדאיגה. לאורך השנה נדרשה האקדמיה, כמוסד מדעי ממלכתי ועצמאי, להשמיע שוב ושוב קול ברור נגד צעדים כאלה. בהופעות בוועדות הכנסת, בגילויי דעת, בנאומים ובראיונות רבים בתקשורת חזרנו והדגשנו כי מדינה המבקשת להבטיח את עתידה המדעי, הכלכלי והביטחוני, חייבת לשמור בקפדנות על חירות המחשבה, על עצמאותם של המוסדות האקדמיים ועל איתנותם בשיקולים זרים.



בבד בבד עם הניסיונות הללו מבית החרף בשנה האחרונה האיום על מעמדו הבין-לאומי של המדע הישראלי. אין-ספור תופעות גלויות וסמויות של חרם אקדמי, קריאות לניתוק שיתופי פעולה עם ישראל וניסיונות להדירה מהשתתפות בתוכניות המחקר האירופיות החשובות, מציבים בסכנה את הישגי המדע הישראלי בעשרות השנים האחרונות. מועצת האקדמיה פרסמה גילוי דעת חריף המתריע מפני הסכנה לקרע מתמשך עם אירופה ופעלה ללא לאות מול האקדמיות הלאומיות למדעים באירופה ומול ארגונים מדעיים בין-לאומיים כדי לנסות ולמנוע את הגזרה. במפגשים, בכינוסים ובהתכתבויות רשמיות שבנו והסברנו כי חרם אקדמי אינו פוגע רק במדענים בישראל, אלא גם מערער את יסודות המדע כמשאב עולמי משותף ופוגע במיוחד בקולות המתונים והביקורתיים בתוך החברה הישראלית.

לצד המאבק בחרמות פעלנו כל העת גם להעמקת הקשרים המדעיים ולפתיחת ערוצים חדשים. במהלך השנה השתתפנו בכינוסים ובפורומים בין-לאומיים חשובים, מיפן דרך אירופה ועד צפון אמריקה, והמשכנו בשיתוף פעולה עם אקדמיות עמיתות. למזלנו, אף שרבים מן העמיתים שלנו בעולם חשים אי-נוחות ואף ביקורת חריפה כלפי מדיניות הממשלה, הם ממשיכים לראות במדענים הישראליים שותפים טבעיים למאמץ לקדם ידע, חדשנות ושלוש. האחריות שלנו כאקדמיה לאומית היא לטפח שותפויות אלו, להסביר את מורכבות המצב ולהדגיש כי מדיניות של בידוד אקדמי אינה פותרת סכסוכים אלא מקשה במציאת פתרונות.

כדי לעמוד היטב במחויבותנו על פי חוק לייעץ לממשלה בנושאי מדע והשכלה גבוהה, המשיך השנה האגף לייעוץ וקשרי ממשל בפעילות אינטנסיבית. האגף ריכז עבודת מומחים בתחומים כגון אקלים וסביבה, ביטחון תזונתי, בריאות הציבור, חשיבה חישובית, מצב מדעי הרוח ועוד. במסגרת זו נערכו ימי עיון, הוכנו ניירות עמדה, והתקדמה העבודה על דוחות עומק ארוכי טווח, ובהם הדוח התלת-שנתי הבא על מצב המדע, שיתפרסם בשבועות הקרובים. מטרת כל אלה אחת היא: להניח על שולחנם של מקבלי ההחלטות תשתית ידע עדכנית, מבוקרת ומאוזנת, גם כאשר הדיון הציבורי לעיתים קרובות שטחי ומתלהם.

על אף המציאות המורכבת המשיכה האקדמיה גם השנה בפעילות ענפה לקידום המצוינות המדעית. הרחבנו מסגרות של מלגות ופרסים לדור הצעיר של החוקרים, המשכנו בסבב ביקורים במוסדות מחקר והוראה ברחבי הארץ וחזקנו את עבודתה החשובה של האקדמיה הצעירה הישראלית. גם בהנגשת המדע לציבור הרחב נמשכה השנה תנופה ניכרת. סדרות ההרצאות, הכינוסים הפתוחים לציבור ופעילות הדיגיטל של האקדמיה, לרבות ערוץ היוטיוב העשיר, אפשרו לעוד ועוד אזרחים להיחשף לידע מדעי עדכני בתחומי הטבע, החברה והרוח. לנוכח השיח הציבורי המפולג והרווי מידע מטעה, אנו רואים חשיבות מיוחדת בהעמדת ידע אמין, מאוזן ומבוסס מחקר ועובדות לרשות כל מי שמבקש להבין לעומק את המציאות ואת העולם שבו אנו חיים.

גיליון זה של איגרת 47 מוקדש להרצאותיהן ולהרצאותיהם של החברות והחברים החדשים שהצטרפו לאקדמיה בשנה הקודמת. מאמריהם מציגים פסיפס מרשים של מחקר ישראלי, מן המדעים המדויקים ועד למדעי החיים, מדעי החברה ומדעי הרוח. אני מזמין אתכם לעיין בהם לא רק כדי להכיר את הישגיהם האישיים של הכותבים אלא גם כדי להתרשם מן העומק, מן הגיוון ומן החיוניות של הקהילה המדעית בישראל.

למרות הקשיים אני מבקש לסיים בנימה של תקווה. בשנה האחרונה למדנו שוב כמה שבריריים הם החיים, הן שלנו כאינדיוידואלים והן כאזרחי מדינתנו האהובה, וכמה קל לערער מערכות שנבנו בעמל רב לאורך עשורים. אך גם למדנו עד כמה חזקה הנכונות של רבים בחברה הישראלית להילחם על שמירת הדמוקרטיה, על חופש המחשבה ועל כבוד האדם. המדענים והמדעניות, הסטודנטים והסטודנטיות, אנשי ונשות הרוח והתרבות – כולם שותפים חיוניים למאמץ זה.

האקדמיה הלאומית הישראלית למדעים תמשיך לעשות כל שביכולתה כדי להגן על החופש האקדמי, לחזק את שיתופי הפעולה הבין-לאומיים, לטפח את דור העתיד של המחקר ולהעמיד ידע מבוסס עובדות ומחקר לרשות מקבלי ההחלטות והציבור כולו. איננו יכולים לסלק את האימים והמשברים, אך אנו יכולים וצריכים להיות אחד מעמודי התווך של חברה המבקשת לקום מן השבר אל עבר שיקום, תיקון ועתיד טוב יותר.

שלכם בברכה,



פרופ' דוד הראל

נשיא האקדמיה הלאומית הישראלית למדעים

הרצאות החברים החדשים בתשפ"ה

מבט מקרוב על מודלי דיפוזיה



מאת פרופ' מיכאל אלעד

תחילת הסיפור – ניקוי רעש מתמונה

למרבה ההפתעה, הסיפור שלנו על מודלי דיפוזיה מתחיל בתחנה בתחום אחר לחלוטין, במשימה שנחשבת לחלק מהקלאסיקה בעיבוד תמונות – ניקוי תמונה מרעש. אסביר: תמונה מיוצגת כטבלה גדולה למדי של מספרים שמתארים את הגוון שבכל

במאמר זה ברצוני לקחת את הקורא לסיור היכרות עם תחום מרתק שאליו נכנסתי לאחרונה, שנקרא "מודלי דיפוזיה". תחום זה הוא חלק נכבד מזירה רחבה יותר שנקראת "בינה מלאכותית יוצרת" (generative AI), שמדובר עליה רבות בשנים האחרונות בשל תוצאותיה המרתקות ובשל השפעתה הרחבה.



איור 1. משמאל לימין: תמונות מקור נקייה, גרסתה הרועשת ותוצאת ניקוי רעש מתמונה זו



איור 2. תמונות שנוצרו יש מאין בעזרת GAN

כעת נעזוב נושא זה ונעבור, לכאורה, לנושא אחר לחלוטין.

ייצור תמונות יש מאין

מהפכת ה-AI פרצה לחיינו בשנת 2012, עם פרסום המאמר המכונן של הינטון (Hinton) ותלמידיו על סיווג מידע ויזואלי בדיוקים גבוהים בעזרת רשתות נוירונים עמוקות. זמן קצר לאחר מכן, בשנת 2014, העלו קבוצות מחקר מובילות בעולם את השאלה אם ניתן לייצר תמונות יש מאין בעזרת כלי AI. כלומר, אם נוכל לכתוב תוכנית מחשב ש"תהזה" תמונות שתיראינה איכותיות כאילו צולמו. הרעיון הוא להציג לתוכנה זו שפע של תמונות דוגמה, ותהליך הלמידה יטמיע את התנהגותן ויוכל לייצר תמונות חדשות בעלות אופי דומה. כלים רבים ושונים הוצעו לפתרון בעיה זו ברמות שונות של הצלחה, ובהם שיטות כמו VAE, GAN, NF, EBM, וגם מודלי דיפוזיה שבהם מתמקד מאמר זה. באיור 2 מובאות תמונות שיוצרו בעזרת GAN, וניכר שאיכותן קרובה למושלמת.



מיקום בה. תמונה מזוהמת ברעש פירושה שהערכים בטבלה זו משתנים כשנוספים עליהם מספרים אקראיים. נניח שהמספרים האקראיים הללו נדלו מחוק פילוג גאוס. משימתנו היא בניית תהליך חישובי (אלגוריתם) שינקה רעש זה תוך כדי מאמץ לשמר את התמונה המקורית על כל פרטיה, במידת האפשר. אלגוריתם ניקוי כזה נקרא denoiser – מונח שאשתמש בו בהמשך מאמר זה. באיור 1 מוצגות תמונה מקורית, גרסתה הרועשת ותוצאת הניקוי של denoiser כלשהו (אחד מני רבים המבוסס על למידה עמוקה). ניכר שהאלגוריתם המוצג הוא בעל יעילות מפתיעה בניקוי הרעש.

ניקוי רעש מתמונה היא משימה יסודית בעיבוד תמונות, וככזו היא נלמדה באינטנסיביות במהלך ארבעת העשורים האחרונים. מטבע הדברים, עם הגעת מהפכת ה-AI בעשור האחרון הצטרפו למשפחת הפתרונות לבעיה זו גם שיטות המבוססות על למידת מכונה ועל למידה עמוקה. בראייה רחבה ניתן לומר שעד כה הצטברו יותר מ-30,000 מאמרים שעוסקים בבעיה זו ובדרכים לפתרונה, וככלל ניתן לומר שמשימה זו באה על פתרונה.

מופעלת סדרה מחזורית של צעדים, כשבכל אחת מהן מבוצע ניקוי רעש מחד, והזרקת רעש חדש מאידך, ועוד פעולות פשוטות למדי. כעבור כאלף מחזורים כאלה שיתוכננו בקפידה תיווצר תמונה איכותית. ועוד דבר שחשוב להבין – זהו תהליך סטוכסטי, כלומר אם תהליך זה יופעל שוב ושוב, הוא יניב תמונות שונות זו מזו, כשכל אחת מהן היא דגימה איכותית מחוק הפילוג $P(x)$.

בואו נצלול לרגע לתוך תהליך זה כדי להבין את מקורותיו ואת דרך פעולתו. נניח שפונקציית ההסתברות $P(x)$ ידועה לנו ושברצוננו לדגום ממנה. כיצד נעשה זאת? הינה הצעה ראשונית: נתחיל בתמונה שרירותית כלשהי (כנראה תמונת רעש) x_0 ונעדכן אותה באמצעות המשוואה האיטרטיבית הזאת:

$$x_{k+1} = x_k + a \cdot \nabla \log P(x_k) + b \cdot z_k$$

כשמ- x_0 ניצור את x_1 וממנו את x_2 וכך הלאה. משוואה זו נשענת על תוצאה משנת 1908 שאליה הגיע פיזיקאי ידוע בשם לנג'ווין (Langevin) שעסק בחקר הדינמיקה של מולקולות בנוזלים.

בביטוי שלמעלה הוספת $a \cdot \nabla \log P(x_k)$ ל- x_k מעדכנת את התמונה באמצעות טיפוס במשטח הפונקצייה $\log P(x)$, ובכך הופכת התמונה לסבירה יותר ויותר. התוספת $b \cdot z_k$ מזריקה רעש חדש לתמונה ומרעידה את כל התהליך כדי לקבל בסופו של דבר דגימה קבילה. בתכנון קפדני של המקדמים a ו- b תהליך זה יכול להוביל לדגימה ראויה מחוק הפילוג המיוחל, $P(x)$. אלא שתהליך זה נשען על הצורך בידעית $\nabla \log P(x_k)$, וכעת עולה השאלה מניין יושג ביטוי זה, המוכר בסטטיסטיקה בשם score function. וכאן אנו נקראים לתוצאה מבריקה משנת 1961 שאליה הגיע סטטיסטיקאי יפני בשם מיאסאווה (Miyasawa), שהראה שניתן לקרב את ה- score בדיוק רב

חשוב להבהיר שמבחינה מתמטית משימת ייצור תמונות יש מאין היא בעיית דגימה מחוק פילוג. כלומר, אנו מניחים שתמונה x היא ישות אקראית שניתן לייחס לה הסתברות $P(x)$, והזיית תמונות אינה אלא הגרלה מחוק פילוג זה, ממש כשם שבזריקת קובייה מוגרל ערך בין 1 ל-6 מחוק פילוג אחיד ודיסקרטי.

כאמור, רבים וטובים עסקו בשאלת לימוד חוק הפילוג $P(x)$ של תמונות והגרלה ממנו, והוצעו פתרונות איכותיים ביותר הכוללים ביצועים מרשימים למדי. תחום זה מרתק, ולו רק משום שמעניין לצפות בתמונות מלאכותיות אלה על מלוא מורכבויותיהן. אך מלבד זאת תחום זה חשוב ברמה המעשית, כיוון שהיכולת הזאת פירושה היכרות בלתי אמצעית עם חוק הפילוג של תמונות טבעיות, ואפשר לרתום היכרות זו לפתירת בעיות מעשיות רבות בעיבוד תמונות, כגון שחזור תמונות מקלקולים, דחיסת תמונות ועוד, וכן יש בה כדי להוביל לשיטות חדשות שתעלינה באיכות תוצריהן על כל שיטה קודמת.

מודלי דיפוזיה להפקת תמונות יש מאין

השאלה שנתמקד בה כעת היא זו: האם ניתן למנף אלגוריתם לניקוי תמונה מרעש - denoiser - ממש כפי שתואר קודם כדי לפתור את אותה בעיה של הזיית תמונות? התשובה לשאלה זו חיובית, והיא שמביאה אותנו למודלי דיפוזיה שהם הטובים ביותר כיום למשימה זו. שאלה זו הועלתה לפני כחמש שנים, ובשתי קבוצות מחקר, האחת בסטנפורד בידי ארמון (Ermon) ותלמידיו, והשנייה באוניברסיטת ניו יורק בידי סימונצ'לי (Simioncelli) וקבוצת המחקר שלו, הוצעו תשובות דומות וחיוביות - אכן, כן, ניתן להסב שיטת ניקוי רעש לתהליך חישובי שיליד תמונות יש מאין. התהליך המוצע מתחיל בתמונת רעש אקראית לחלוטין ללא כל ערך ויזואלי, ואז

תמונות רועשות אינו אלא חוק הפילוג המקורי $P(x)$ כשהוא מטושטש בגאוסיאן שרוחבו נקבע לפי עוצמת הרעש בתמונות. זה אומר שחוק פילוג זה כולל זנבות רחבים שנפרסים לכל עבר במרחב, ואלה משרים כוחות כיווניים שיכונוו ביעילות את התמונה המתעדכנת. וכך, בתהליך מתוקן שנקרא נוצרת כשהיא רועשת מאוד ובהדרגה מתחדדת ומתנקה. הדרגה זו של עוצמת הרעש יוצרת שרשרת של חוקי פילוג של תמונות עם תהליך דיפוזיבי ביניהן, ומכאן השם שנבחר - מודלי דיפוזיה.

זוה עובד! ALD, ואלגוריתמי דיפוזיה אחרים הדומים לו מאוד, מסוגלים לייצר תמונות יש מאין באיכות מרהיבה שעולה על כל השיטות האחרות שהוזכרו קודם. כיום זו הטכניקה המובילה והעיקרית למשימה זו בתחום הרחב של בינה מלאכותית יוצרת, ומכאן הפופולריות הרבה שלה. במאמר מוסגר נזכיר כי בשינוי עדין לתהליך שתואר ניתן לייצר תמונות שתתאמנה לתיאור מילולי הנתון כמשפט (prompt). תהליך זה, הנקרא "טקסט מנחה" (text-to-image), מרתק בתוצריו, אך אנו לא נתעמק בו כאן. איור 3 ממחיש אפשרות זו באמצעות שלוש דוגמאות שנוצרו בשיטה שנקראת imagen.

בשימוש ב-denoiser, לפי הנוסחה הזאת:

$$\nabla \log P(x_k) = x_k - D(x_k)$$

כאשר $D(x_k)$ הוא ה-denoiser הפועל על x_k . וכך, בסיכומו של דבר התקבל תהליך חישובי שכל מרכיביו פשוטים ומוכרים, כשאחד מהם הוא הפעלת אלגוריתם לניקוי תמונות, ומובטח ששרשרת פעולות זו תספק דגימה ראויה מחוק הפילוג $P(x)$.

התהליך שהצגנו, שנקרא "דינמיקת לנג'ווין" (Langevin dynamic), יכול להצליח, אך הוא סובל מפגם מהותי שבעטיו יידרשו מאות אלפי צעדים כדי להפיק ממנו דגימות ראויות. כאשר תמונה היא בגודל של 1,000 על 1,000 פיקסלים והיא צבעונית, שלושה מיליון מספרים קובעים את תוכנה. כשאנו פועלים במרחב הרב-ממדי הזה, ואנו רחוקים מהירעה שעליה נמצאות תמונות איכותיות, אין כל כוח שימשוך את עדכוני התמונה המבוצעים בתהליך הזה לעבר הכיוון הנכון, וכך נימצא משוטטים במדבריות צחיחים ללא התכנסות לתמונה איכותית. הפתרון לזה הוא טכניקה מוכרת היטב בפיזיקה ובכימיה - annealing - שמשמעותה היא שבמקום לדגום מחוק הפילוג של תמונות נקיות נדגום תמונות רועשות. למרבה הפלא (והמזל!), חוק הפילוג של



A cute sloth holding a small treasure chest. A bright golden glow is coming from the chest



A cute corgi lives in a house made out of sushi



Teddy bears in a swimming pool

איור 3. ייצור תמונות בעזרת מודלי דיפוזיה באמצעות הזנת טקסט מנחה (text-to-image)

זוהי פונקציית ההסתברות של כלל התמונות האפשריות בהסביר את המדידה y . לכן תמונות x שתהיינה בעלות הסתברות מותנית גבוהה הן שחזורים ראויים וטובים למשימת ההיפוך. וכך דגימה מחוק הפילוג המותנה $P(x|y)$ תוכל להפיק שחזורים שונים, כשכל אחד מהם הוא פתרון ראוי ותחרותי למשימת תיקון התמונה שלפנינו. כך נפתחו אפשרויות חדשות בזירה זו של בעיות היפוך, שמעולם לא נבחנו בעבר, ונוצר פרק חדש ועדכני בזירה זו.

כיצד דוגמים מחוק הפילוג המותנה? על נושא זה לא נרחיב במאמר זה, אך נאמר שהדבר מורכב ומחייב קירובים שונים. עשרות מאמרים שתקפו בעיה זו נכתבו בשלוש השנים האחרונות בקבוצות מחקר מובילות בתעשייה ובאקדמיה. קבוצת המחקר שלנו בטכניון – מכון טכנולוגי לישראל סיפקה תרומות נכבדות למגרש משחקים זה.

באיור 4 מומחשת היכולת לפתור בעיות היפוך בעזרת מודלי דיפוזיה עבור בעיית סופר-רזולוציה. תוצאות אלו לקוחות מעבודתם של בהג'ת קאוואר וגרישה וקסמן, דוקטורנטים בקבוצת המחקר שלנו בטכניון.

בדוגמה זו אנו מתחילים בארבע תמונות נתונות (הימניות ביותר באיור) אשר נפגמו בגלל הורדת רזולוציה והוספת רעש – אלה נתונות בתמונות השניות משמאל. המשימה היא לשחזר את תמונות המקור בהינתן המידע המקולקל, ובאיור זה מוצעות שמונה דגימות מחוק הפילוג המותנה לכל אחת מארבע תמונות מבחן אלה. כפי שניתן לראות, התוצאות הן בעלות איכות ויזואלית גבוהה, וכל אחת מספקת הסבר ראוי למידע שבו התחלנו. עוד דבר שניכר הוא שבתוך כל מקבץ של שמונה דגימות יש הבדלים עדינים ביניהן, דבר שמעיד על אי-הוודאות בפתרון הבעיה שמטופלת. בשתי העמודות הימניות של האיור רואים את

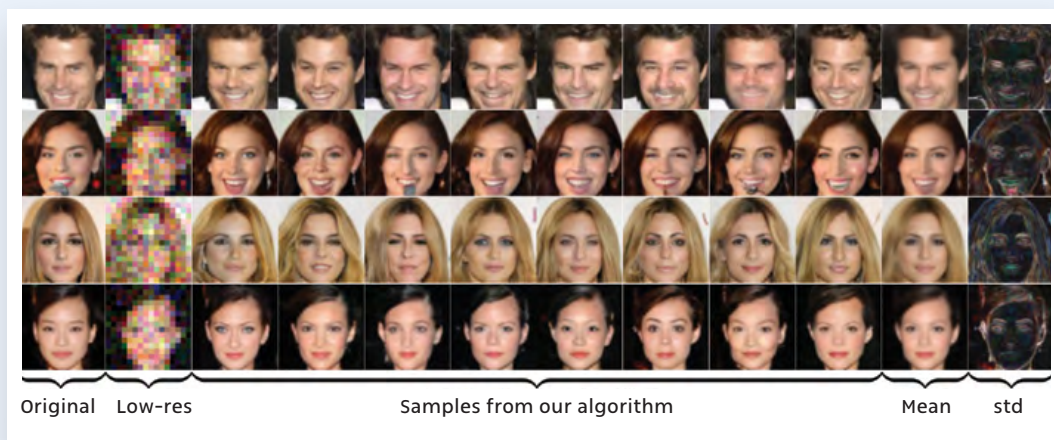
בהמשכו של מאמר זה נראה כיצד ניתן לרתום מודלי דיפוזיה לשם הצעת פתרונות חדשניים ואיכותיים לבעיות מעשיות בעיבוד תמונה. נתחיל בטיפול בבעיות היפוך ומשם נמשיך לנושא של דחיסת תמונות.

מודלי דיפוזיה לבעיות היפוך

פרק מרכזי בתחום של עיבוד תמונות עוסק בשחזור תמונות שעברו קלקולים שונים. במסגרת זו תמונה מקורית x עוברת קלקול באמצעות אופרטור H ולאחר מכן גם מזהומת בהוספת רעש n . המדידה המקולקלת היא $y = Hx + n$, ומשימתנו היא שחזור x מתוך y , דהיינו היפוך הקלקול. מכאן שמן הכולל של בעיות אלו – "בעיות היפוך". לשם דוגמה, בעיית ניקוי רעש שבה עסקנו למעלה היא מקרה פרטי של משפחה זו, ובה האופרטור H הוא מערכת יחידה שאינה משנה דבר. בעיות אחרות במשפחה זו הן שחזור תמונה מטושטש או מאובדן רזולוציה, השלמת חורים בתמונות, שחזור צבעים לתמונת שחור-לבן, שחזור תמונה מהיטליה כבטומוגרפיה חישובית ועוד.

ממש כפי שהוזכר בהקשר של ניקוי תמונה מרעש, גם באשר לבעיות היפוך מהסוג הזה ולדרכים לפתרון קיים שפע עצום של עבודות שדנות בהן, ואלו פורסמו בעשרות אלפי מאמרים לכל אורך ארבעת העשורים האחרונים, וגם בזירה זו שיטות שחזור מבוססות AI שפותחו בעשור האחרון לקחו את הבכורה.

עם פריצתם של מודלי הדיפוזיה לחיינו לפני שנים ספורות עבר פרק זה של בעיות היפוך מהפכה מטלטלת. משהתברר שמודלי דיפוזיה יכולים להפיק דגימות איכותיות מחוק פילוג מורכב למדי כמו זה של תמונות טבעיות $P(x)$, נפתחה אפשרות חדשה של דגימה מחוק הפילוג המותנה $P(x|y)$. מהו חוק פילוג מותנה זה?



איור 4. פתרון בעיית סופר-רזולוציה (הגדלת תמונה נתונה) באמצעות מודלי דיפוזיה

דחיסת תמונות גם היא משימה קלאסית בעיבוד תמונות, ורבים טובים עסקו בה. בניגוד לסוגיות האחרות שהזכרנו בעיבוד תמונות (ניקוי רעש ובעיות היפוך), לסוגיה זו גם ערך מסחרי עצום, ובשל כך קבעו חברות בעלות עניין תקינה שהסדירה שיטות אחידות לדחיסה. כך למשל נוצרה שיטת ה-JPEG ב-1992 כסטנדרט לדחיסה שפועל עד היום בכל המצלמות הדיגיטליות, במצלמות הטלפונים הסלולריים, באתרי אינטרנט ועוד. בעזרת אלגוריתם JPEG ניתן לדחוס תמונה בשיעור של פי עשרה ואפילו פי עשרים מנפח המקור של התמונה תוך כדי שימור יעיל (אך לא מושלם!) של הפרטים בה. אסטרטגיה זו קרויה "דחיסה מאבדת נתונים" (lossy compression) כיוון שהיא מתירה לעצמה שינויים עדינים בתמונה לטובת משימת הדחיסה. כל שיטת דחיסה כוללת אלגוריתם לדחיסה (נקרא לו גם ה"מסדר") שממיר תמונה למידע דחוס, ואלגוריתם תואם לו לפריסה (שייקרא ה"מקלט") שממיר חזרה מידע דחוס לתמונת התוצאה, שכאמור עשויה להיות מעט שונה מתמונת המקור.

יש שפע של שיטות דחיסה lossy שנוצרו לאחר JPEG ושעולות עליה בביצועיהן. ◀

התמונה הממוצעת של שמונה הדגימות, ולימינה את סטיית התקן בכל מקום בתמונה – לשתי אלה תפקיד חשוב באומדן של אי-הוודאות בפתרונות המתקבלים, אך לא נרחיב על כך כאן.

לסיכום, אם נתונות לנו מדידות y שמתייחסות לתמונה מקורית לא נודעת x , כשהקשר ביניהן נתון במשוואה $y = Hx + n$, אזי דגימה מחוק הפילוג המותנה $P(x|y)$ היא משימה בת השגה. כעת נראה כיצד יכולת זו בדיוק הופכת לנכס במשימה אחרת – דחיסת תמונות.

מודלי דיפוזיה לדחיסת תמונה

כפי שהזכרנו קודם, תמונה צבעונית בגודל של 1,000 על 1,000 פיקסלים נשמרת כשלושה מיליון מספרים, כלומר בקובץ שגודלו יהיה כשלושה מגבייט. האם זה מחויב המציאות? האם באמת כמות האינפורמציה בתמונה היא כה רבה? מסתבר שלא! יש יתירות רבה בתמונות, שנובעת בין היתר מהעובדה שערכים של פיקסלים סמוכים נוטים להיות דומים. משמעות הדבר היא שתמונה ניתנת לשמירה כקובץ הרבה יותר קטן, והדבר פותח פתח לדין בשיטות לדחיסת תמונות.

המידע על תמונת המקור הוא המועט ביותר. כיוון זה ייבחר כשורה הבאה במטריצה H , כדי לספק מידע מרבי על התמונה המקורית בהינתן המדידות עד כה.

4. אלגוריתם הדחיסה ייקח את השורה החדשה הזאת ויחשב את האיבר ה-11 בווקטור באמצעות הטלת התמונה המקורית על כיוון זה ויעביר מידע זה למקלט לאחר העגלה כלשהי לשם תיאור תמציתי.

5. החישובים שנעשו בצעדים השני והשלישי במשדר יכולים להיעשות באותה מידה בדיוק במקלט, כדי שהשורה החדשה של H תיבנה גם שם ללא כל צורך בהעברתה מהמשדר.

6. וכך הגענו למצב שגם במשדר וגם במקלט אנו מחזיקים כעת מידע עדכני על H ועל y , ואנו ערוכים לשלב הבא שיחזור לצעד שתיים וימשיך בצבירת שורות ומדידות.

הינה כמה מאפיינים חשובים של התהליך שתואר:

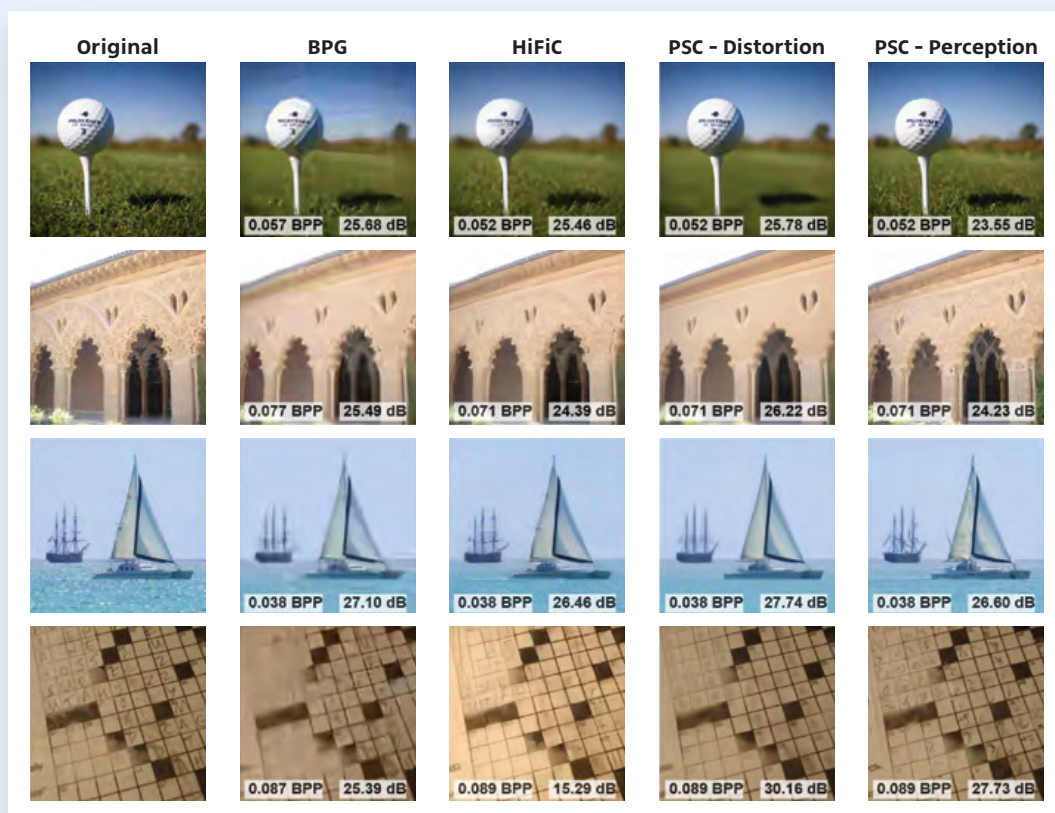
- תהליך זה צובר בהדרגה מידע דחוס שהולך ומייצג את התמונה המקורית טוב יותר ויותר. טכניקה זו נקראת "דחיסה פרוגרסיבית", כי ניתן לעוצרה בכל רגע נתון ולבחון את התמונה המתקבלת, כלומר יחס הדחיסה דינמי ונשלט בקלות.
- המטריצה H נבנית באופן ייחודי ובהתאמה מרבית לכל תמונה – מאפיין ייחודי מאוד שלא הוצעו כמוהו בספרות מעולם. לשם השוואה, שיטת ה-JPEG מפעילה פעולה H קבועה ואחידה לכל התמונות, ומכאן יעילותה המוגבלת.
- הפחתת אי-הוודאות בכל שלב יוצרת סדרה של חוקי פילוג מותנים שמתכווצים במהירות ומתכנסים לתמונה המקורית תוך כדי צבירה קצרה של מדידות – דבר המעיד על יעילות השיטה לפי המדדים של קצב ועיוות.
- ודבר אחרון – בהישענות על מודלי דיפוזיה התמונות הדגומות שמתקבלות הן בעלות איכות ויזואלית גבוהה בכל שלב בתהליך הדחיסה, מה שמבטיח שהמוצא של תהליך זה יפיק תמונות נעימות לצפייה אפילו אם יחס הדחיסה גבוה מאוד.

בשנים האחרונות הוצעו גם שיטות מבוססות AI למשימה הדחיסה, ואלו הן הטובות ביותר המוכרות כיום. ההשוואה בין השיטות השונות נעשית על סמך שלושה מדדים: כמות הביטים הנדרשת לאחסון התמונה (rate), הסטייה בין התמונה הדחוסה-פרוסה לזו המקורית (distortion) והאיכות הויזואלית של התמונה הדחוסה-פרוסה (perception). גם מודלי דיפוזיה מונפו לטובת משימת הדחיסה, ומאמרים ספורים מהשנה האחרונה הציעו סכמות דחיסה חדשניות ויעילות מאוד ברוח זו.

בעבודה משותפת עם פרופ' תומר מיכאלי מהטכניון ועם הדוקטורנט נועם אלתה פיתחנו בשנה האחרונה (2024) שיטת דחיסה חדשה המבוססת על מודלי דיפוזיה. יופייה של שיטה זו הוא ביכולתה להישען על כל מודל דיפוזיה קיים ללא כל אימון נוסף ולמנפו לטובת משימת הדחיסה. ביסודותיה של שיטת דחיסה זו נמצא שימוש בדוגם מחוק הפילוג המותנה $P(x|y)$ שהוזכר קודם, כאשר $y = Hx + n$. הרעיון הבסיסי הוא לצבור את המדידות y וכנגדן את שורות המטריצה H בהדרגה ובאופן "חמדני" שתכליתו הפחתת אי-הוודאות של חוק הפילוג המותנה בכל שלב בצורה מיטבית.

בפירוט רב יותר התהליך נראה כך:

1. נניח כי בדרך כלשהי צברנו עשר שורות למטריצה H וכנגדן יצרנו עשרה ערכים בווקטור המדידות y . נניח שכל אלה ידועים הן במשדר והן במקלט.
2. אלגוריתם הדחיסה יכול לשאול – מה יכולה להיות התמונה שתסביר את y ? המענה על שאלה זו יינתן באמצעות דגימה של מאה תמונות אפשריות מחוק הפילוג המותנה $P(x|y)$.
3. אם נבחן את סט התמונות הדגומות, נוכל לגלות את הציר שבו פיזורן הוא המרבי (זהו חישוב שמוכר בשם PCA) – זהו הכיוון שבו



איור 5. תוצאות דחיסה-פריסה השוואתיות בין השיטה המוצעת ל-HiFiC

ביחידות dB כשגבוה יותר זה טוב יותר. המדד השלישי של איכות ויזואלית אינו מדווח מספרית – כאן בחינה של הצופה תקבע איזו תמונה יפה יותר לעין האנושית.

לסיכום

מודלי דיפוזיה מובילים מהפך של ממש בתחומים שונים במדע, ובכללם עיבוד תמונות. מאמר קצר זה עסק במהותם של מודלים אלה כדוגמים מחוקי פילוג מורכבים של מידע עשיר. קבוצת המחקר שלנו בטכניון עוסקת באינטנסיביות בנושא זה ורותמת מודלי דיפוזיה בדרכים חדשניות ויעילות למשימות של פתרון בעיות היפוך, של ייצור תמונות יעיל יש מאין, של דחיסת תמונות ועוד.

איור 5 ממחיש את תוצאותיה של שיטה זו לעומת שתי שיטות דחיסה תחרותיות מאוד: BPG, שהיא שיטה קלאסית איכותית שנוצרה בשנת 2014, ו-HiFiC, שמבוססת על למידה עמוקה שנוצרה בשנת 2020 בגוגל. בשיטתנו אנו יכולים להתבונן בכל שלב בתוצאת דגימה יחידה, ואז לתקבל איכות ויזואלית גבוהה (עמודה ימנית), או למצוא את כלל הדגימות כדי לקבל שגיאה קטנה (עמודה שנייה מימין). יחסי הדחיסה המוצגים כאן הם 461:1 (תמונה עליונה), 338:1 (תמונה שנייה), 631:1 (תמונה שלישית) ו-269:1 (תמונה תחתונה). יחסי דחיסה אלה מתייחסים ישירות לערכים המדווחים בכל תוצאה משמאל (BPP פירושו Bits-Per-Pixel). המספרים מימין מתארים את הסטייה מהתמונה המקורית

השיעה היא עם ישראל האמיתי: מקומה של היהדות במחשבת האסלאם השיעי



מאת פרופ' מאיר מ' בר-אשר

עניינו של מאמר זה הוא עיון בתפיסה יוצאת דופן ומפתיעה למדי המצויה באסלאם השיעי כמעט מראשית התגבשותו במאה התשיעית לספה"נ ועד היום. כוונתי לתפיסה הרואה בשיעה את העם הנבחר ומזהה אותה עם ישראל. מתוך תפיסה זו צמחו בשיעה שתי מגמות סותרות כלפי עם ישראל, בשני מישורים: במישור הדוקטרינרי – ראייה בעם ישראל מופת קדום לשיעה ואף הזדהות מלאה עימו; במישור ההלכתי, מתוך תודעת הבחירה והעליונות המיוחדת את השיעה – וככל הנראה גם בהשפעת תורות חיצוניות שמקורן בין היתר בדת הזורואסטרית – התפתחו בשיעה הלכות טומאה וטוהרה מחמירות שתכליתן כפולה:

לתת ביטוי מעשי לעליונות השיעית ביחס ליהודים – ולמעשה ביחס לכל מי שאינם שיעים – ולהפריד בין השיעה, הרואה בעצמה זרע קודש נבחר, ובין המוני הכופרים והטמאים. חומרות הלכתיות אלו כוללות, בין היתר, איסור על נישואין עם יהודים ועם כל מי שאינם שיעים וכן איסור על אכילת בשר בהמה שנשחטה בידי יהודים ועל יתר מאכליהם. את דבריי כאן אקדיש רק להיבט הדוקטרינרי, דהיינו לשאלת הזדהותה של השיעה עם עם ישראל.

תפיסת הבחירה של השיעה היונקת מבחירתו של עם ישראל לא זו בלבד שלא נדחקה לקרן זוית במרוצת ההיסטוריה השיעית אלא שגם כיום היא



איור 1. תיאור של המאבק בין מֶרְחָב בן אֲבִי זִינְב, המנהיג היהודי של נווה המדבר ח'יִבְר שבצפון מערב חצי האי ערב, ובין עלי בן אבי טאלב, בן דודו וחתנו של מוחמד. המאבק בין השניים, שהתרחש בשנת 628 לספ"ה והסתיים בניצחונו של עלי ובכיבוש ח'יבר, נעשה סמל לעליונות האסלאם ולקיצה של הנוכחות היהודית בחצי האי ערב.

אני מבקש להראות את האופן שבו מובאים הדברים במקורות שיעיים ואת פשרם, אך לפני שאציג את התפיסה, אעמוד כאן בקצרה על שתי נקודות שיש להן חשיבות לצורך מסגור הנושא: הנקודה הראשונה היא שבדבריי כאן על השיעה אני מתכוון רק לזרם אחד בה – השיעה התרי-עשרית (בערבית: אלְשִׁיעָה אֶלְאֶת'נְאֶעְשְׂרִיָּה), שהיא הזרם המרכזי של השיעה, ושרוב מאמיני השיעה בעולם כיום נמנים עליו. על זרם זה נמנים השיעים באיראן, בעיראק, בלבנון, בתת-היבשת ההודית ובמקומות נוספים במרכז אסיה; הנקודה השנייה היא תיאור קצרצר של השיעה ושל הרקע ההיסטורי להופעתה. השיעה (בערבית: סִיעָה) היא קיצור של המונח "שִׁיעַת עֲלִי" (סיעתו של עלי), דהיינו תומכיו של עֲלִי בן אָבּוּ טַאֲלֵב, בן דודו וחתנו של נביא האסלאם מוחמד, ◀

עומדת במוקד של דיון אינטנסיבי. היא משמשת הן אנשי דת שיעים הן את יריביהם המנגחים אותם על שהם מחזיקים בתפיסה זו. הטענה המוכרת יותר בדבר ראייתה של הנצרות את עצמה, כבר בשלב קדום בהתפתחותה, כעם ישראל האמיתי (Verus Israel), מובנת לגמרי מכוח היותה של הנצרות דת שצמחה מתוך היהדות, ומכוח עובדה זו מובנת גם השאיפה או היומרה של הנצרות להיחשב למייצגת את הגילום המושלם והאמיתי של דת ישראל, הדת הנדחקת והדחויה. ואולם הטענה השיעית הדומה נשמעת תמוהה. על רקע האיבה והעוינות של המשטר השיעי בן זמננו באיראן ושל גרורותיו השיעיות כלפי מדינת ישראל ויהודה זרותה של התפיסה הזאת בולטת אף ביתר שאת. מה היה אפוא יכול להביא להתפתחותה של תפיסה כזאת בשיעה?

פרעה התנשא בארץ ופילג את יושביה לסיעות ודיכא קבוצה אחת מביניהן; את בניהם שחט ואת בנותיהם החיה, כי היה מן המשחיתים בארץ; ואנו (=האל) ביקשנו להשפיע חסד על אלה אשר דוכאו בארץ ולשים אותם מנהיגים (אַמֶּה) ויורשים (נֶאֱתָנוֹן), ולהושיבם על מכונם ולהראות לפרעה ולהמן ולצבאותיהם את כל אשר חששו פן יאונה להם מידם.

דברי הקוראן הללו, המתארים את עריצותו ואת רשעותו של פרעה כלפי בני ישראל, כוללים מניה וביה מינוח בעל פוטנציאל שיעי, דהיינו מילים ומונחים שהפרשנות השיעית מרבה להיאחז בהם כדי לעגן בהם רעיונות ועיקרי אמונה שיעיים אופייניים. דוגמאות לכך הן המילים הנקרות בפסוקים הנדונים כאן, כגון **אַמֶּה** (מנהיגים או אַמַּאמִים), שבה ובדומותיה תולה הפרשנות השיעית, כהרים בשערה, הרבה מתורותיה על מוסד ה**אַמֶּה** (המנהיגות הדתית באסלאם השמורה לאמאמים השיעיים, יוצאי חלציו של מוחמד); **נֶאֱתָנוֹן** (יורשים), שבה נאחזת הפרשנות השיעית כדי ללמוד על היות האמאמים יורשיו החוקיים הבלעדיים של מוחמד; **אַלְדִּין אַסְתֵּדְעַפּוּ פִּי אַלְאֶדְדִּי** (אלה אשר דוכאו בארץ), ביטוי המורה על מצבה הקיומי של השיעה לאורך רוב תולדותיה כמיעוט נרדף. הינה כך למשל מפרש **עָלִי אֶבְרָהִים אֶלְקָמִי**, פרשן שיעי נודע שפעל בשלהי המאה התשיעית ובתחילת המאה העשירית, את פסוקי הקוראן המצוטטים לעיל:

(מלשון הפסוקים הללו) אנו למדים שהדיבור בהם מופנה למעשה אל הנביא [מוחמד]. ומה שהאל הבטיח לשליחו [מוחמד] יתקיים למעשה אחריו וכי

שעל פי אמונת השיעה היה אמור להיות היורש הלגיטימי הבלעדי של הנביא, אלא שהוא נדחק ונעשק בידי קבוצה מקרב תומכיו הראשונים של מוחמד, והשלטון עבר לידיהם. הפילוג הזה סביב ירושתו של מוחמד הוליד קרע בקרב מאמיניו, ולימים התפתח ליצירת שני מחנות מתחרים, שקיימים למעשה עד היום: מצד אחד – מחנה הרוב, שבתקופות מאוחרות יותר הוגדר "סונה" ("הדרך הנכונה", אשר בעיני מאמיניה נחשבה למשקפת את דרכו ואת מנהגיו של נביא האסלאם) ואשר הפך להיות הזרם הדומיננטי באסלאם, ומנגד – דרך המיעוט, שהיא דרכם של צאצאיו של הנביא מוחמד מבתו פַּאטֶמָה וחתנו עלי, שהתפתחה להיות השיעה והתפצלה במרוצת ההיסטוריה לפלגים ולתתי-פלגים רבים שמרביתם עברו מן העולם. מתוכם נותרו כיום שלושה זרמים עיקריים, שלצד נקודות דמיון ביניהם – ואף ביניהם ובין האסלאם הסוני – התפתחו בהם דוקטרינות ייחודיות. לבד מן הפלג שבהמשך התפתחותו נודע כאמור כזרם התרייעשרי, הקרוי כך על שם שנים עשר מנהיגיו (בערבית: **אַמַּאמִים**), יצוינו הזרם הֶזְדִּי, שמרכזו העיקרי מאז המאה התשיעית הוא בתימן (החות'ים בתימן הם אחד מענפיו), והזרם האסמאעילי.

אפתח במגמה השיעית הרואה בעם ישראל מופת קדום לשיעה (או מעין "פרוטו-שיעה"). מגמה זו מעוגנת בפירוש לפסוקי קוראן שונים. כך למשל פסוקי קוראן שבהם מתוארים בני ישראל במצרים, בדומה למקרא ובהשראתו, כסובלים תחת עול פרעה, מוצגים בפרשנות השיעית כדמויות מופת למי שבסבלם ובתלאותיהם מברשים ומסמלים את סבלה של השיעה לעתיד לבוא בשלטונם של אויביה. מגמה זו ניכרת למשל בפרשנות השיעית לפסוקים 4-6 בפרשה 28 ("הסיפור") המתארת את שעבודם של בני ישראל במצרים. כך נאמר בהם:

תְּאֵוִיל אֶלְאָ'אֵיָאֵת אֶלְזָאֶהְרָה פִּי פְזָא'ל אֶלְעֶתְנָה
אֶלְטָאֶהְרָה, פִּירוּשׁ לִפְסוּקִים גְּלוּיִים [בְּקוּרָאן] עַל
 אֹדוּת שְׁבָחִי הַמִּשְׁפָּחָה הַטְהוּרָה), מִפְּרִי עֵטוֹ שֶׁל
 הַמְּלוּמָד הַשִּׁיעִי הָאִירָאֲנִי שֶׁרָךְ אֶלְדִּין עָלֵי אֶלְחֶסֶןִי
 אֶלְאֶסְתַּבְּאֶבְאֵדִי, אִישׁ הַמָּאָה הַשִּׁש־עֶשְׂרֶה.
 מַעֲנִינֶת בַּמִּיּוּחַד הַמִּסּוּרָה הַזֹּאת שְׁבָה מִנוֹסְחִים
 הַדְּבָרִים נִיסוּחַ עֶקְרוֹנִי וּמַכְלִיל:

אמר (האמאם) עלי בן אלחֶסֶן: [...] "בְּרִי
 הַלֵּב שֶׁבְּקֶרְבֵּנוּ, אֲנוּ מִשְׁפַּחַת הַנְּבִיאִים,
 וְסִיעֵתָנוּ הֵם בְּמַעֲלָתָם שֶׁל מֹשֶׁה וְסִיעֵתוֹ;
 וְאִילוֹ אוֹיְבֵינוּ וְסִיעֵתָם – בְּמַעֲלָתָם שֶׁל
 פֶּרַעַה וְסִיעֵתוֹ".²

מסורות פרשניות אלה המובאות בחיבור האחרון
 ממקורות שיעיים בני תקופות שונות מלמדות
 שמדובר ברעיון שקנה לו שביטה בשיעה ולא
 בעמדה שולית או זניחה. סיפורי בני ישראל
 במקרא בלבד הקונְאֶנִי משמשים אפוא תשתית
 לבניית האתוס המיוחד את השיעה כקבוצת
 מיעוט נבחרת שבכוחה לגבור על אויביה הרבים,
 וראוי להדגיש שהמכנה המשותף לכל סיפורי
 המקרא שהשיעה נוטה להשתמש בהם לקידום
 הרעיון הנדון כאן הוא העובדה שבמרכזם עומד
 מיעוט נבחר המועדף על פני רוב חוטא ודחוי
 או ניצחונם של המיעוט על הרוב. דוגמה ידועה
 וחביבה במיוחד על השיעה היא סיפור תיבת נח,
 שהמיעוט הזוכה להיכנס אליה, ובכך להינצל
 מכליה, מסמל את השיעה, ואילו שאר האנושות
 שנועדה לאבדון מסמלת את אויביה. דוגמה
 רווחת פחות היא סיפורו של גדעון, המעמיד את
 לוחמיו למבחן על מִי עֵין חֶרֶד (שופטים ז:ד-ח),
 המהדהד בקוראן בפסוקים 247-250 בסורה 2
 (הפרה), אף כי בסיפור הקוראני דמותו של גדעון
 מוחלפת בזו של טאלוט, הוא שאול. מוסר ההשכל
 שבו חותם הקוראן את האפיזודה הזאת ("מה
 רבים המחנות הקטנים אשר גברו על

האמאמים יהיו מבין צאצאיו; והאל נקט
 כאן לשון משל ב(הציגו) את משה ובני
 ישראל כמשל על אודותיהם (=על אודות
 השיעה) ואת פרעה וְהָמָן כמשל על
 אויביהם, שהרי פרעה הרג את בני ישראל
 ועשקם ואז הנחיל האל למשה ניצחון
 על פרעה ועל אנשיו. כיוצא בזה, [גם]
 את משפחת שליח האל – מצאו תלמות,
 מוות ועושיק, מצד אויביהם, אך האל
 עתיד להשיבם לארץ יחד עם אויביהם
 ולהמית את אויביהם.¹

במסורת הזאת, שלא נעלמה מעיניהם של חוקרים
 קודמים (דנו בה בין היתר פרופ' מאיר יעקב
 קיסטר, פרופ' איתן קולברג ופרופ' אורי רובין),
 יש פתח להבנת פשר הזדהותה של השיעה עם
 בני ישראל. היא מבטאת את הזדהותה של השיעה
 עם ישראל כמיעוט נרדף, שתולדותיו רצופות
 הסבל והתלאות מבשרות את הסבל העתיד להיות
 מנת חלקה של השיעה, ומנגד – גאולתו של עם
 ישראל מידי אויביו יש בה הפחת תקווה בשיעה
 שהיא עתידה להיגאל משלטונם המצר והמתנכל
 של אויביה.

ארבעה יסודות הופכים את סיפור בני ישראל
 במצרים דגם אידיאלי ומקור השראה לשיעה,
 ועל כן אין לתמוה על שהשיעה בחרה להידרש
 לו: מדובר בו במיעוט נרדף (עם ישראל) הסובל
 משלטון אכזר ומתנכל; יכולתו של המיעוט
 להכניע את הרוב הנוגש והמתנכל; ולבסוף –
 להיגאל משעבודו ולזכות להקים בארצו ממלכה
 עצמאית.

המסורת שהבאתי כאן אינה חריגה. כמה וכמה
 מסורות כדוגמתה מובאות בזיקה לאותם פסוקי
 קוראן במקורות אחרים (למשל בחיבור הפרשני

2. **איור 2.** מתוך הפירוש לסורה 17, מסע הלילה (אלֶאֱסָא), הנקראת גם "סורת בני ישראל", כתב יד 1076, דף 208א, אוסף ספריית ה-India Office שבלונדון

בפי הנביא מוחמד את הדברים האלה:

אני עבד האל ושמי **אַחְמַד** (אחמד הוא אכן אחד משמותיו של מוחמד!); ואני [גם בנו של] עבד האל ושמי **ישראל** וכל דבר [בקוראן] ש[האל] ציווה אותו (כלומר את ישראל הוא יעקב גם על פי הקוראן) – הוא ציווה גם אותי ובכל מקום שהוא (האל) התכוון אליו, הוא התכוון גם אליי.⁴

במהלך של לוליניות דרשנית דחוקה הפרשן השיעי מזהה את **ישראל** עם **מוחמד**. השימוש במסורת זו בכינוי **עַבְד אֵלֵהָ** (עבד האל) הוא דו־משמעי: מצד אחד זהו שם אביו של מוחמד, ומצד אחר הוא תיאורו של מוחמד עצמו כעבד האל. אך מניין הזיקה שאליה מכוונת המסורת בין מוחמד ובין ישראל? מוחמד בֶּאֱקֶר אלמֶג'לֶסִי, אחד מגדולי חכמי השיעה באיראן במאה השבע־עשרה, דן במסורת הזאת ומפרש אותה על סמך הדמיון הצלילי שבין השם המקראי **ישראל** ובין הפועל **אַסְרָא** שבו מתאר הקוראן את מסע הלילה (**אַסְרָא**) הפלאי של עבד האל המזוהה עם מוחמד ממכה לירושלים. הפועל **אַסְרָא** (שפירושו "הסיע בלילה") בפסוק הראשון של פרשה 17 (מסע הלילה) יכול להישמע כמזכיר, לפחות חלקית, את השם **ישראל**, אך לא ברור כיצד שם זה המכוון לתיאור מסע הלילה יכול לכוון גם לנוסע עצמו, הלא הוא מוחמד. מכל מקום, המסורת השיעית קיבלה את הזהות (הרעיונית למצער) בין מוחמד ובין ישראל (שמו האחר של יעקב גם בקוראן), ואם זהים הם נגזרת מכך גם הזהות שבין צאצאיהם.

רעיון קרוב, אך לא זהה, מובע במקורות שיעיים מתקופה מאוחרת יותר, שזמנם כשבע מאות שנה ויותר אחרי זמנם של אלה שבהם הובאו

מחנות גדולים מהם, כאשר הרשה האל..." הוא גם המפתח להבנת הצורך של המסורת השיעית בסיפור הזה ובדומיו, ויש להניח שאילו הכירה השיעה את סיפור מלחמת החשמונאים ביוונים גם הוא עשוי היה להצטרף למאגר הסיפורים הללו.

מעניין שהמהלך הפרשני הטיפולוגי האופייני לפרשנות השיעית בהצגת סיפורים אלה דומה מאוד לאופן הקריאה של הנצרות הקדומה את תולדותיהם של אישים ושל קבוצות במקרא כמנבאים ומטרימים את קורותיהם של ישו והנצרות.

מגמה אחרת בשיעה, מרחיקת לכת בהרבה מזו שהצגתי עד כה, מציגה זהות מוחלטת בין השיעה ובין עם ישראל. למן המאה התשיעית לספה"נ מסורות שיעיות המושמות בפייהם של אמאמים חשובים בשיעה (שהבולטים שבהם הם האמאם החמישי מוחמד אל־בַּאקֶר והששי ג'עֶפֶר אל־צַאדֶק, שפעלו במאה השמינית לספה"נ) מביעות רעיון זה ומעגנות אותו בביאורם לפסוקים מפורשים בקוראן. הדברים נאמרים, למשל, סביב פסוק 47 (=122) בפרשת 2 (הפרה), המציג את עם ישראל כעם הנבחר: "הוי בני ישראל זכרו את החסד אשר נטיתי לכם בהפלותי אתכם מכל בני האדם".

במסורת פרשנית אחת מני רבות הנדרשות לפסוק הזה, שהוא אחד הבולטים בפסוקים המציגים את עם ישראל כעם הנבחר, נאמר: "[המילים] 'הוי בני ישראל' – הם אנחנו (כלומר השיעה) **במיוחד**" (ואפשר לתרגם גם: "הם אנחנו **בלבד**"), ובמסורת סמוכה באותו מקור נאמר: "[הפסוק הזה מוסב] במיוחד על אודות משפחת מוחמד (דהיינו: השיעה, שהם צאצאיו)".³

פשר דחוק לזיהוי התמוה של השיעה עם בני ישראל ניתן במסורת אחרת באותו מקור השמה

אל מול עמדה זו, הממשיכה את המגמה המוכרת מן השיעה הקדומה, נשמעים קולותיהם המתריסים של חכמים סונים שדוחים אותה ומגחיכים אותה. אדגים את הקולות הללו בדבריו של מוחמד אל־אֶדְרֶסִי, קומיקאי תימני מפורסם, המכנה את עצמו בשם העט הסטירי "אֶאִית אללה אל־כַּבְּרָא אל־מַעְרַג'אִנִי". באחד מסרטוני האנטי־שיעיים הפרודיים הוא מציג באור מגוחך את רעיון הזהות שבין השיעה ובין בני ישראל, שבעיניו הוא מופרך מיסודו. הכיצד יעלה על הדעת – שואל אל־מַעְרַג'אִנִי בלעג – שהאל יאפשר זיהוי של השיעה עם בני ישראל, שהקוראן מציגם כהורגי נביאים? בסרטון הזה, כבעשרות אחרים דוגמתו, מכוון אל־מַעְרַג'אִנִי לשים ללעג תפיסות ואמונות שיעיות שונות מבית מדרשם של חכמי דת שיעים באיראן ובעיראק, שלדעת אל־מַעְרַג'אִנִי יש להוקיעם ולדחותם.⁷

סיכום

חרף הדמיון הרב בין עמדותיהם של האסלאם הסוני והשיעי כלפי היהודים והיהדות, האסלאם השיעי מתאפיין בכמה גְּמדות ייחודיות לו, הנובעות מתפיסה עצמית של בחירה ומיוחדות. עמדה אחת היא הזדהות עם עם ישראל, ועמדה אחרת, המנוגדת לה, היא היבדלות מן היהודים באמצעות דיני טומאה וטוהרה מחמירים, תופעה שמן הבחינה הפנומנולוגית ניתן למצוא לה מקבילות גם בדתות ובכיתות אחרות, כגון בקרב כיתות מדבר יהודה.⁸

הדרך ליישב את הסתירה העמוקה בין שתי גישות אלה כלפי היהודים היא שימוש בדיכוטומיה המובנית בקוראן עצמו בין בני ישראל (בְּנֵי אֶסְרָאִיל) ובין היהודים (יְהוּד). אלה שתי מהויות שונות בתכלית. תפיסת הבחירה של עם ישראל ובעקבותיה הזדהותה של השיעה עימו נקשרת בבני ישראל הקדמונים, אלה הנזכרים

המסורות הקודמות. מקורות אלה אינם רק אוצרים בתוכם מסורות קדומות אלא אף מחיים אותן ועוסקים בשימורן ובהנחלתן, ובכך מצביעים על חיוניותן ועל הרלוונטיות שלהן גם בימיהם של המחברים המאוחרים. כוונתי למשל לשני חיבורי פרשנות הקוראן – **תפסיר אלצאפי** של מֶחְסֵן אֶל־פִּדְ אֶל־כַּאשְאִנִי (מת בשנת 1680 לספה"נ) ו**תפסיר אל־בַּרְהָאן** מאת יוסף אל־בַּרְהָאנִי (מת בשנת 1772 לספה"נ), שניהם מלומדים שיעים בולטים שחיו ופעלו באיראן. מסורת אחת המשותפת לשניהם, שאף היא עוסקת בפסוקים הדנים בבחירת עם ישראל, חותמת בדברים הבאים המושמים בפיו של הנביא מוחמד ויש בהם הרחבה והכללה של מה שנאמר במסורת הראשונה שבה פתחתי. כך נאמר בה:

כל דיבור נאה (בקוראן) אשר ברובד הנגלה שלו מופנה אל בני ישראל מכוון, על פי הרובד הנסתר, אליי (כלומר אל מוחמד) ואל בני משפחתי (דהיינו אל השיעה, שהם כאמור צאצאיו של הנביא).⁵

לחו של הרעיון הזה לא נס גם בכתביהם של חכמים שיעים בני זמננו והם חוזרים ונדרשים לו. שיוט בחומר המצוי ברשת האינטרנט מלמד כמה בוער הנושא הזה. המלומד השיעי העיראקי הגולה עֶבְד אֶל־חֵלִים אֶל־עִזִי מאמץ את התפיסות המשתקפות במסורות שצינתי, וכדי להשיב על התמיהה מה לבני ישראל ולשיעה, הוא אומר:

המושג "בני ישראל" הוא מושג בעל משמעויות משתנות. הוא מופיע בקוראן במשמעות "צאצאי יעקב" וישראל הריהו יעקב; והוא מופיע במשמעות היהודים שהם גם השיעים; לעיתים המונח מופיע בהוראה של שבח ולעיתים בהוראה של גנאי...⁶

במקרא, שהיחס כלפיהם בקוראן הוא לעיתים קרובות חיובי אף אם אינו חף מביקורת כלפיהם ומהטלת דופי בהם. לעומת זאת ראייה ביהודים כטמאים מכוונת לא כלפי בני ישראל אלא כלפי היהודים, בני דורו של מוחמד, שהיחס כלפיהם בקוראן הוא שלילי, ורוב ההאשמות המכוונות כלפי היהודים בקוראן מוסבות אליהם ולא כלפי עם ישראל המקראי.

אחתום בעניין מאלף שעמד עליו לראשונה פרופ' שלמה פינס, והוא ממחיש את הזיקה הרעיונית שבין האסלאם ליהדות בשאלה הנדונה כאן.

רעיון הבחירה ששורשיו, כפי שראינו כאן, נטועים במקורות מקראיים, התגלגל לאסלאם והתפתח בו ביתר שאת במקורות שיעיים. אך בכך לא תמה דרכו. במאמרו המכונן על מונחים ותפיסות שיעיות בספר "הכוזרי" לרבי יהודה הלוי¹ הראה פינס שרעיון הבחירה שהתגלגל למקורות שיעיים מצא את דרכו שוב אל היהדות, ובמאה השתים־עשרה נעשה ציר מרכזי בספר "הכוזרי". לימים הורחב הדיון בנושא זה בידי ד"ר אהוד קריניס. לפנינו אפוא גלגול של רעיון מן המקרא אל המקורות השיעיים ומהם אל מקור יהודי חשוב ורב השפעה.

מקורות

- (1) ע'ל אבן אבְּרָהִים אלקמִי, תַּפְסִיר אלקמִי, נג'ף 1387 להג'רה, כרך 2, עמ' 133.
- (2) שַׂרְף אדְלִין ע'ל אלְחַסְנִי אֶלְאֶסְתְּרַאבְּאדִי, תַּאֲוִיל אֶלְאִיאַת אֶלְזַהְרָה פִי פִדְאֶ'ל אֶלְעֶתְרָה אֶלְטַהְרָה, קום 1470 להג'רה, כרך 1, עמ' 414.
- (3) אבּוּ אֶלְנֶדֶר מוּחַמַּד בן מַסְעוּד אֶלְעִיאַשִי, תַּפְסִיר אֶלְעִיאַשִי, מֵהֶדוּרַת הַאֶשֶׁם אֶלְרְסוּלִי אֶלְמַחְלַאֲתִי, קום 1380 להג'רה, כרך 1, עמ' 44.
- (4) שם.
- (5) הַמְסוּרַת מוּבַאֲתָה גַם בְּהֵעֵרָה לַתַּפְסִיר אֶלְעִיאַשִי, כרך 1, עמ' 44, הֵעֵרָה 4.
- (6) עֶבֶד אֶלְחִלִים אֶלְעִיזִי [7 באוגוסט 2022] "מִן הֶם בְּנוּ אֶסְרַא'אִיל פִי אֶלְקֶרְא'אֵן?... (מִי הֶם בְּנֵי יִשְׂרָאֵל בְּקוּרְאָן)" [יוֹטִיב] <https://www.youtube.com/watch?v=3RLsr6nTUtk>. כְּנִיסָה אַחֲרוֹנָה לַאֲתֵר 11 בִּמָּרְס 2025.
- (7) מוּחַמַּד אֶלְאַדְרִבִי [23 בִּמָּרְס 2024], "אֶלְשִׁיעָה הֶם בְּנוּ אֶסְרַא'אִיל (הַשִּׁיעִיִּים הֶם בְּנֵי יִשְׂרָאֵל)" [יוֹטִיב] <https://www.youtube.com/shorts/MiKJ8l1Syjs?app=desktop>. כְּנִיסָה אַחֲרוֹנָה לַאֲתֵר 11 בִּמָּרְס 2025.
- (8) י' שִׁיפְמָן, הַלְכָה, הַלִּיכָה וּמִשְׁחִיּוֹת בְּכַת מִדְבַּר יְהוּדָה, יְרוּשָׁלַיִם 1993, עמ' 248–257 ו־298.
- (9) Shlomo Pines, "Shi'ite Terms and Conceptions in Judah Halevi's *Kuzari*," *Jerusalem Studies in Arabic and Islam*, vol. 2 (1980), pp. 165–251

זרעי העבר, פירות העתיד



מאת פרופ' גיא בר-עוז

עצי פרי עתיקים הם קפסולת זמן למורשת חקלאית המועברת מדור לדור

צורות וטעמים. מרביתם הם גידולי בעל, כלומר אינם זקוקים לתוספת השקיה, והם חלק נכבד מנופי התרבות של הארץ.

עצי פרי עתיקים, שרבים מהם נשכחו לאורך ההיסטוריה, הם ממצא היסטורי-ארכאולוגי נדיר, "חי ונושם", והם משמשים מקור מידע עשיר על ההיסטוריה החקלאית של התקופה שבה העץ היה מנוצל. לפיכך יש חשיבות מדעית רבה ללימוד המורשת התרבותית שלהם ולשימור המגוון הביולוגי האצור בהם.

היכרות עם זני המורשת העתיקים של עצי הפרי טומנת בחובה הזדמנויות חשובות למצוא זנים לא מוכרים בעלי עמידות מורשת בתנאי אקלים קשים ושהם חלק חשוב מאוצרות הטבע של ארץ ישראל. עצי המורשת הם גם חוט המקשר באופן מוחשי בין התרבויות השונות של הארץ. במקורות היהודיים

עצי פרי עתיקים, חלקם בני מאות שנים, נפוצים באזורים רבים בנוף הכפרי של הארץ. אלו כוללים זנים היסטוריים ששרדו בנופים הצחיחים ובמדבריות של המזרח התיכון, כמו הנגב והערבה. עצי פרי אלו, המוגדרים "זני מורשת", הותאמו וטופחו במשך דורות רבים להיות עמידים בבצורות ובתקופות ארוכות של יובש תוך כדי שמירה על רמת יציבות יבול גבוהה. צמחי המורשת הארץ-ישראליים כוללים עשרות רבות של זני עצי פרי, צמחי תבלין וירקות. צמחים אלו סיפקו תוצרת חקלאית בקביעות והיו אבן בניין מרכזית בביטחון התזונתי של תושבי הארץ. עם זני המורשת של עצי הפרי נמנים הגפן, הזית, התאנה, התמר, השקד והרימון. עצי פרי אלו שרדו בחקלאות המסורתית במגוון מופעים,

בעקה. גודלו של העץ וקוטר הגזע משמשים מדד כללי לקביעת גילו. במקרה של עצים דו־ביתיים, כמו תמרים למשל, מתועד גם אם העץ הוא זכרי או נקבי. במקרי התחדשות של עצי פרי בחוטרם, כמו למשל בעצי הזית, אנו מתעדים גם את עלי החוטרם (שצמחו מהכנה) כדי לקבוע אם העץ עבר הרכבה לזן אחר.

עד היום תיעדנו יותר ממאה חלקות של עצי פרי מכל חבלי הארץ שבהם שרדו מאות רבות של עצים. אלו הם על פי רוב חלקות נטושות ששרדו בין חורבות כפרים חקלאיים ומעוזות, סמוך לאתרים קדושים ובמקומות מבודדים. מקור חשוב נוסף לגילוי אוכלוסיות שרידיות של עצי פרי עתיקים הוא בקרבת מעיינות במדבר. באזורים רבים עצי הפרי מצויים כיום במצב נואש בשל הזנחה, זיהום והתייבשות של מקורות המים. במערב הנגב ובדרום מישור החוף הבנייה המואצת המכרסמת בשטחים הפתוחים מביאה אף היא להכחדתם של זני פרי מקומיים (איור 1).



איור 1. גפן מזן דאבוקי, ששרדה בחולות זיקים נגד כל הסיכויים (זו כנראה ההזדמנות האחרונה לראותה). (צילום: דרור מעין)

ניתן למצוא תיאורים מפורטים של חקלאות הבעל המסורתית, ובכלל זה של מגוון הזנים שטופחו. יסודות רבים של החקלאות המסורתית קיימים גם בחקלאות הערבית ששימרה אותם לאורך הדורות.

הכרת ההיסטוריה התרבותית של זני עצי הפרי של ארץ ישראל נמצאת במוקד המחקר של מיזם הבוסתנים המתנהל בשנים האחרונות באוניברסיטת חיפה. במחקר אנו משתמשים בכלים ארכאולוגיים, היסטוריים וביולוגיים כדי להתחקות אחר העקרונות הבסיסיים של בוסתנאות הבעל המסורתית. מטרה מרכזית של המיזם היא לתעד זנים מקומיים של עצי פרי שגדלו באזורי ספר המדבר באלפיים השנים האחרונות. במחקר משתפים פעולה חוקרים מכמה תחומי דעת במדעי הרוח ובמדעי הטבע, וכן שותפים לו אנשי מקצוע מן האקדמיה ומן הסקטור הפרטי.

כמה עצי פרי עתיקים יש בישראל?

מספר עצי הפרי העתיקים החיים המתגלה במחקר גדל בהתמדה. במהלכו אנו ממפים עצי פרי בחלקות מטעים, כרמים ובוסתנים ששרדו באזורים שונים בארץ. עבודת המיפוי כוללת זיהוי ותיעוד של מאות רבות של עצי פרי (חלקם בסכנת הכחדה מיידי). לשם התיעוד אנו משתמשים במפות מנדטוריות משנות הארבעים שבהן מסומן מיקומן של חלקות חקלאיות, ובכלל זה מטעים, כרמים ועצי פרי. גם היום, כמעט שמונים שנה לאחר שנעזבו, רבים מהעצים המופיעים במפות שרדו בין חורבות הכפרים והחלקות החקלאיות שסביבן. לעיתים ניתן לזהות עצי פרי דרך תצלומי אוויר היסטוריים.

תהליך תיעוד העצים כולל זיהוי טקסונומי על פי אפיון מורפולוגי של העלים, של הפרי ושל דגם הצמיחה כדי לקבוע את זן הפרי. התיעוד כולל גם את רישום מצבו הפיזיולוגי של העץ – בריא או מצוי

בחולות מערב הנגב, למשל, שרד מספר רב של בוסתנים לאורך קו החולות פלמחים-ניצנים-זיקים. מגוון עצי הפרי שם כולל גפנים, זיתים, תמרים, תאנים, רימונים, שקדים ותותים וכן מספר רב של עצי שקמה הנטועים בעיקר בשולי החלקות. מרבית העצים ששרדו נמצאים במקומות שבהם מי התהום גבוהים. עצים רבים שרדו גם במטעי בעל בהר ובגליל המכילים עצים ותיקים, חלקם בני מאות שנים. דוגמה יפה לכך הם כרמי הזית של ציפורי המכילים מאות רבות של עצי זית מכמה זנים. מגוון עשיר של עצי פרי התגלה גם בבוסתנים מסורתיים בהר הנגב. אלו כוללים גם כמה מאות של עצי תמר ששרדו במעיינות הנגב והערבה המשמרים מושבות היסטוריות של זני תמרים ייחודיים.

שפע הזנים המאפיין את מגוון עצי הפרי הארץ-ישראליים כולל כמה עשרות זנים של גפנים, עשרות רבות של תאנים וכן כמה זנים של זיתים, תמרים, רימונים, שקדים, תותים ושקמים. הכרמים והבוסתנים המסורתיים מכילים בדרך כלל כמה זנים של עצי פרי, בעיקר של זיתים, גפנים ושל תאנים. הרב-זניות של המטע, של הכרם ושל הבוסתן המסורתיים הייתה מרכיב חשוב בביטחון התזונתי של החקלאי הקדום. היא אפשרה בין השאר להאריך את עונת איסוף הפרי. חלק מהזנים מבשילים בתחילת הקיץ (זנים מבכירים), ואחרים – בסופו (זנים מאפילים). חלק מהזנים מתאימים לאכילה טריים, אחרים ניתנים לשימור או לייבוש. בכך שונה מאוד המטע המסורתי מהמטע המודרני, המתבסס על גידול חד-זני (מונוקולטורה).

כך הולכת ומתמלאת בהדרגה מפת זני עצי הפרי העתיקים של הארץ. זו כוללת את עצי הפרי של אזורים אלה: הגולן, הגליל והכרמל, הרי ירושלים, השרון והשפלה, מערב הנגב, הר הנגב והערבה. אף על פי שיש מידה רבה של חפיפה במגוון מיני עצי הפרי, בכל אחד מהאזורים הרכב המינים

שונה, וניתן להבחין בגרדיאנט גאוגרפי ברור בציר צפון-דרום. ככל שמדרימים, אוכלוסיות עצי הפרי הנשירים מתמעטות, והצפיפות והשפע של עצי הפרי קטן. מגמה דומה נצפית גם בציר מזרח-מערב. חברת עצי הפרי בהר עשירה ומגוונת מזו הגדלה בשפלה ובנגב המערבי. בגליל ובהרי ירושלים שכיחות עצי הפרי הנשירים גבוהה מבאזור השפלה. לעומת זאת בדרום מישור החוף ובמערב הנגב שרדו זנים רבים של גפן ומספר רב של עצי שקמה. באזור זה תועדו גם כמה זנים של עצי הדר מזנים נדירים. עצי השקמים של דרום מישור החוף נטועים בעיקר בגבולות של חלקות חקלאיות ולאורך דרכים עתיקות. הזית הוא מעין סמל בנופי התרבות של הגליל ובמדרגות החקלאיות (טראסות) של הרי ירושלים ושפלת יהודה. בדומה לזה, אוכלוסיות שרידיות של זיתים שרדו בחקלאות הוואדיות של הר הנגב. תמרים שרדו בעיקר בקרבת מעיינות בנגב ובערבה, כמו גם בחולות מערב הנגב ומישור החוף, שם ניטעו במקומות שבהם מי התהום גבוהים.

איך נקבע גילם של עצים עתיקים?

מכיוון שמרבית מיני עצי הפרי אינם מייצרים טבעות גידול שנתיות, קשה לקבוע במדויק את גיל העץ. אפילו בעצים שיוצרים טבעות גידול, כמו הזית, קשה לקבוע את גילם בשל התנוונות בסיס הגזע והתחדשות היקף העץ דרך החוטרים. במקרים כאלו רק קוטר העץ לשמש מדד כללי לקביעת עתיקותו של העץ. לדוגמה, טבעת הגידול של הזית בוואדי זיתן דרומית לשבטה מגיעה לקוטר של יותר משבעה מטרים. עצים בקטרים דומים תועדו גם בגליל ובשפלת יהודה.

שיטה אחרת לקביעת גיל העץ היא חפירה ארכאולוגית של העץ ותיארוך של חלקי שורש עתיקים באמצעות שיטת פחמן 14. שיטה זו, המודדת את קצב ההתפרקות של הפחמן,



איור 2. מושבת הדקלים הוותיקה של עין שביב

דרך נוספת לקביעת גיל העץ היא שיטת השעון המולקולרי. שיטה זו מבוססת על ניתוח גנטי המאפשר למדוד את קצב הצטברות המוטציות הסומטיות (שינוי גנטי שהתרחש בעלים) בין ענפים רחוקים ובינם לבין קנה שורש העץ. שיעור המוטציות משמש מדד לזמן שעבר בתהליך הגדילה של העץ. ההנחה היא שהמוטציות מתרחשות בקצב טבעי וקבוע. שיטה זו, שטרם נוסתה בעצי פרי, יכולה להתאים במיוחד לעצים שלא טופלו במשך דורות רבים ולא נגזמו משנה לשנה ובין העונות. כך למשל ניתן למצוא בין עצי התמר הגדלים בדקליות צפופות במעינות הנגב, כמו בעין זיק ועין שביב, פרטים בעלי מספר רב של חוטרים שהתרבו מצמח האם. ככל שהעץ ותיק יותר, החוטרים צפויים להכיל שונות גנטית רבה מזו שבצמח האם, וזו תסייע בקביעת גילו היחסי של העץ (איור 2).

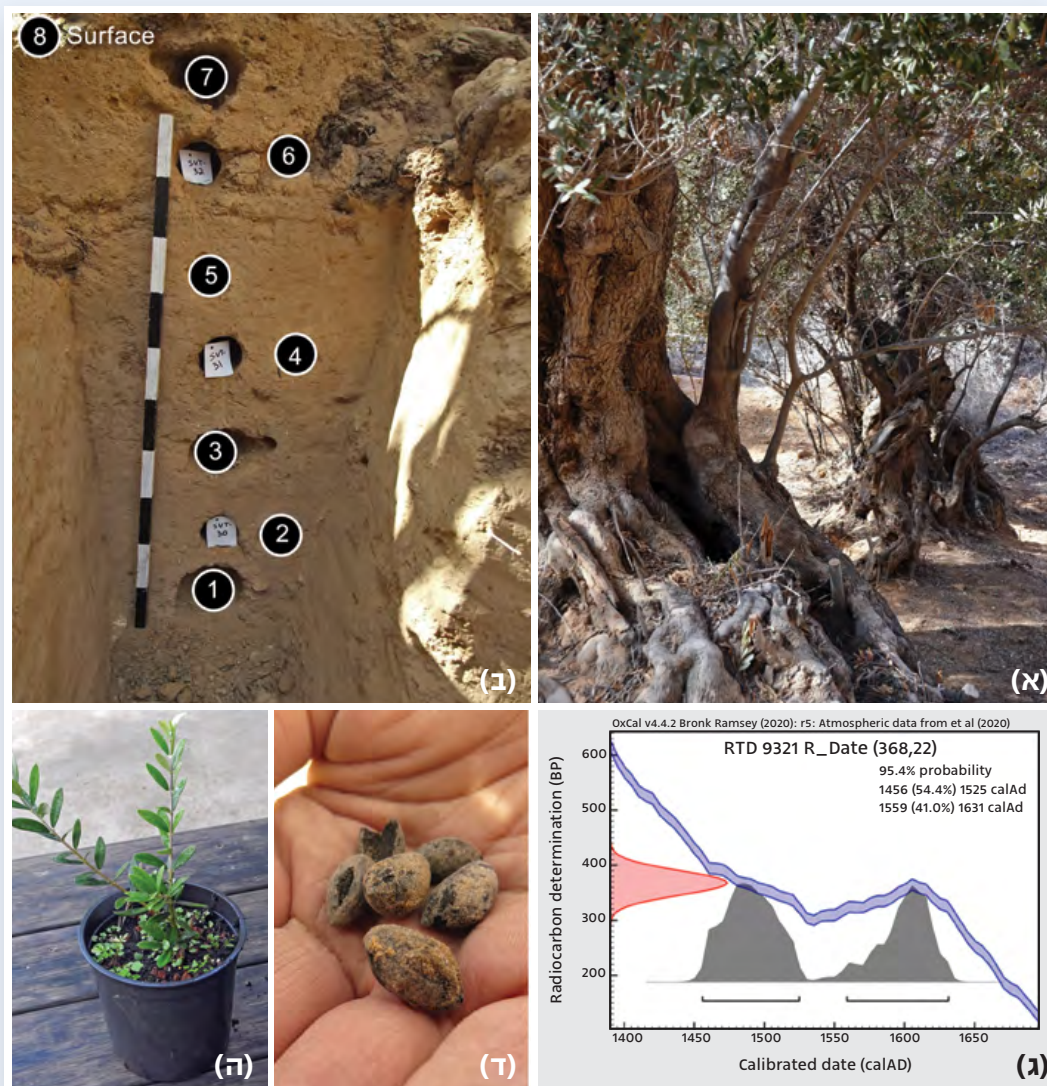


מאפשרת לקבוע את גילו המינימלי של העץ. בחפירה מתחת לעץ יש לדאוג שהנזק לרקמות החיות של העץ יהיה מזערי, וחשוב לדגום רק רקמות מתות, כמו קצות שורשים עתיקים.

חפירה של שורשי העצים העתיקים תכיל רק לעיתים רחוקות פריטים ארכאולוגיים כמו שברי חרס קטנים שהיו יכולים להצטבר בזמן נטיעת העץ אם דושן בזבל אורגני שמקורו באשפה ביתית. דרך אחרת לתארך את הקרקע שבה נטוע העץ היא שיטת (Optically Stimulated Luminescence). לפי גיל הקרקע שבה נטוע העץ אפשר להעריך את גילו המרבי של העץ. נוכחות גרגרי אבקה (פולן) ומינרלים של העץ (פיטוליתים) מעידים על המשכיות היסטוריית הטיפוח של העץ בחלקה העתיקה. ניתוח טקסונומי של פולן, פיטוליתים ושל דנ"א קדום יכול לשמש גם לזיהוי מיני צמחים נוספים שגדלו בקרקע החקלאית.

לזהות סוגים של זבל אורגני מן החי ששימשו לטיוב הקרקע. ניתוח של הרכב הקרקע מאפשר לזהות את שיטת הבנייה של החלקה החקלאית שאפשרה את איגוס המים בסביבת העץ והבטיחה

בדומה לזה, ההרכב האורגני וניתוח איזוטופי של הרכב החנקות בקרקע יכולים לשמש ללימוד שיטות דיסון להשבתת הקרקע בעת העתיקה. ניתוח איזוטופי של החנקן ($\delta^{15}N$) מסייע



איור 3. ואדי זיתן – זקן השבט: העץ נטוע בתוך חלקות ביזנטיות המתוארכות למאות הרביעית-השביעית לספירה. העץ נטוע בקרקע שגילה כ-1,400 שנים. גילם של שורשי העץ העתיקים ביותר שתוארכו הוא כ-500 שנים. גרגרי אבקה של זית בשכבות הקרקע העתיקות מעידים על המשכיות גידול זית בחלקה. בדיקות גנטיות ראשוניות גילו שהכנה של העץ היא מן חדש שאינו מוכר למדע. עץ זה, ועוד כמה פרטים נוספים לידו ובאתרים מבודדים נוספים בהר הנגב, שורדים כבר מאות שנים ללא טיפול, בתנאים הצחיחים של הנגב (כמות משקעים רב-שנתית קטנה מ-100 מ"מ גשם בשנה). (א) מבט כללי על בסיס העץ; (ב) חתך החפירה מתחת לעץ. המספרים מציינים את אזורי הדגימות שנלקחו לתיארוך הקרקע ולחיפוש גרגרי אבקה של זית בשכבות העתיקות; (ג) גרף התפלגות הגילים של שורשי העץ העתיקים, שגילו המוערך כ-400 שנים; (ד) גלעני זיתים עתיקים מהחפירות באשפות היישוב שבטטה; (ה) ייחורים של הזית העתיק של הזיתן במשתלה.

ולשחזרה. באמצעות ניתוחים גנטיים ניתן לזהות את הזנים שגודלו בעבר, לבחון את הקשרים ביניהם לבין זנים מודרניים ולהבין את תהליך טיפוחם לאורך הדורות. לשם כך דרוש בסיס נתונים גנטי של זני המורשת המקומיים שהרבה מהם אינם מיוצגים בבסיסי המידע של בנק הגנים העולמי (GenBank).

דוגמה מובהקת לכך היא הקשר ההיסטורי-תרבותי בין אוכלוסיות התמרים לבני האדם בסביבה המדברית. מחקרים מצביעים על יחסי גומלין ארוכי שנים בין תפוצת התמרים לתוואי הדרכים העתיקות בנגב. ניתוח גנטי של תמרי נאות המדבר חושף מגוון רחב של זנים בעלי הרכב גנטי ייחודי, המעידים על הכלאות של זני תמר שמוצאם בצפון אפריקה וזנים מן המפרץ הפרסי. מידת השונות הגנטית, ובעיקר נוכחותם של קטעי גנום ייחודיים, מחזקות את ההשערה כי אוכלוסיית תמרי המעינות בנגב עשויה להיות שריד של מרכז של ביות התמר שלא היה ידוע עד כה. תוצאות מחקר של חרצני תמרים עתיקים שהתגלו בחפירות ארכאולוגיות בתחנות דרכים בנאות המדבר מחזקות הנחה זו.

דוגמה נוספת לפוטנציאל של זני המורשת בחקלאות המודרנית ניתן למצוא בגפנים ששרדו בדיונות של חולות פלמחים-ניצנים-זיקים. גפנים אלו גדלות פרא כבר יותר משמונים שנים, ללא טיפול, השקיה או הדברה, ולעיתים אף בתנאי סביבה וקרקע קיצוניים. למרות זאת הן שורדות וממשיכות להניב פרי. נראה כי יכולת הישרדות זו נובעת מתכונות ייחודיות המעניקות לגפני החולות סבילות למגוון עקות סביבתיות. כך למשל מחקרים ראשוניים העלו שגפני החולות מפגינות סבילות למחלות עלים. תצפיות נוספות מעידות כי זנים אלו עמידים גם בתנאי חום ויובש קיצוניים. תכונה זו הופכת אותם למקור פוטנציאלי להשבחת זני גפן בעתיד. ◀

את המשך קיומו גם מאות שנים לאחר שהטיפול בו פסק. דוגמה יפה לכך הם עצי הפרי ששרדו בכיסי קרקע שנוצרו בתקופה הביזנטית בהר הנגב במהלך האלף הראשון לספה"נ.

שילוב כל שיטות התיארוך עם תיעוד ארכאולוגי של החלקות שבהן נטועים העצים מאפשר להקטין את הטווחים בין הגיל המזערי (פחמן 14 של שורשים עתיקים) למרבי (שעון מולקולרי ותיארוך קרקע) ולדייק בקביעת גילם של העצים. כך למשל תיארכנו את עץ הזית העתיק ששרד במעלה נחל זיתן בהר הנגב בתוך חלקה חקלאית מן התקופה הביזנטית דרומית לשבטה. תיארוך שורשיו העתיקים קבע כי גילו לפחות 500 שנים, והקרקע שבה הוא נטוע היא בת כ-1,400 שנים, כלומר משלהי התקופה הביזנטית. ממצאים של גרגרי אבקת זית (פולן) בשכבות הקרקע העתיקות מעידים על המשכיות גידול הזית באזור לאורך הדורות. ניתוח גנטי ראשוני של העץ חשף כי הוא משתייך לזן הסורי אך מורכב על כנה של זן עתיק ונדיר שטרם נחקר (איור 3).

מה מספרת השונות הגנטית של עצי הפרי?

עצי פרי עתיקים משמרים מורשת פנוטיפית ושונות גנטית עשירה המאפשרת לסרטט את הגאוגרפיה ההיסטורית של זני עצי הפרי. להבדיל מגידולים חד-שנתיים המופצים רק ברבייה מינית באמצעות זרעים המכילים מידע גנטי מהאב ומהאם, עצי הפרי טופחו והועברו במהלך הדורות בעיקר באמצעות ייחורים, כלומר באמצעות צמחים שהם זהים גנטית לצמח האם (רבייה וגטטיבית).

לימוד הפרופיל הגנטי של עצי פרי המתגלים בחפירות הארכאולוגיות בשיטות פליאו-גנטיות מאפשר לעקוב אחר מסלולה וזמנה של הפצת הזנים בתקופות שונות במהלך ההיסטוריה

[illegible]



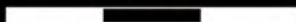
5 mm



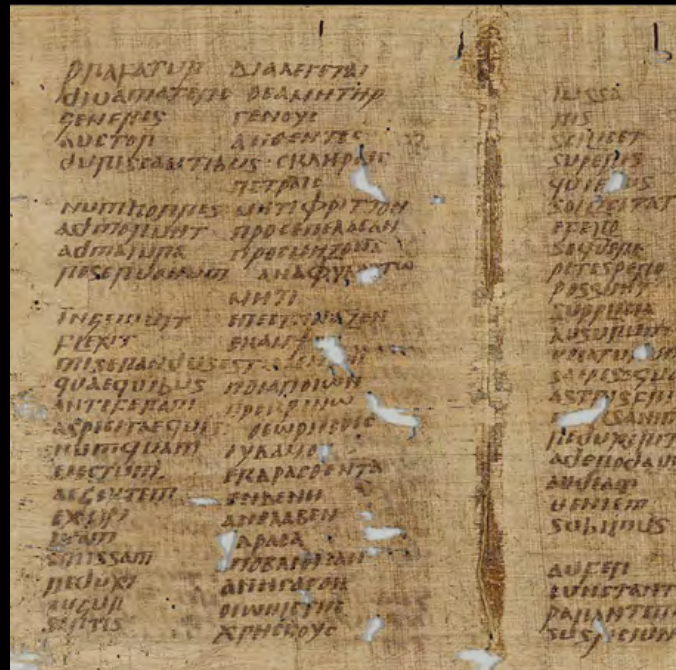
(א)



30 cm



(ד)



איור 4. עדויות ארכאולוגיות והיסטוריות לגידול גפן ולייצור יין בתקופה הביזנטית (מאות 4–7 לספה"נ) בנגב. (א) גלעיני ענבים משבטה; (ב) כפירסי ניצנה (באדיבות רשות העתיקות); (ג) גת תעשייתית בעבדת (צילום: גדעון אבני); (ד) אמפורה ליין מטיפוס קנקן עזה (באדיבות רשות העתיקות); (ה) פסיפס שהתגלה בכנסייה בכיסופים ומתוארך למאה השישית לספה"נ. הפסיפס מציג את "אורביקון", מוביל גמלים הנושא ביד אחת אשכול ענבים ומוביל גמל הנושא קנקני יין מטיפוס קנקני עזה (אוסף רשות העתיקות; צילום © מוזיאון ישראל, ירושלים על ידי אלי פוזנר).

השבה לחיים של זני עצי פרי היסטוריים

בחפירות שערכנו בערמות אשפה באתרים שבטה, חלוצה, ניצנה ועבדת, גילינו כמות רבה של חרצני ענבים המעידים על מרכזיותם של גידול הגפן ותעשיית היין בנגב בתקופה הביזנטית, בעיקר בין המאה הרביעית למאה השביעית לספה"נ. מקורות כתובים מהנגב (על גידול גפן וייצור יין) וכן מספרן וגודלן של הגתות התעשייתיות בנגב, מקורות כתובים מחוץ לנגב (בנוגע לאיכות היין) ותפוצת קנקני עזה (שהכילו יין מהנגב) בכל רחבי הים התיכון – כל אלה מעידים על היקפי הייצוא של יין ועל חשיבותם הכלכלית של גידול הגפן וייצור היין עבור האוכלוסייה המקומית (איור 4). בתקופה זו ראה הנגב תנופת התיישבות אדירה ופיתוח של העורף החקלאי בהיקפים שלא נראו בו קודם לכן ולא שבו והתקיימו בו עד הקמת מדינת ישראל ויישובו של הנגב בעידן המודרני.

פיענוח דנ"א קדום של חרצני גפן עתיקים שהתגלו בחפירות בעבדת חשפו פרק חשוב, שלא היה מוכר קודם לכן, על ההיסטוריה החקלאית של הנגב. כך התגלה כי הגפנים העתיקות שגודלו בהר הנגב בתקופה הביזנטית היו זנים יס-תיכוניים מקומיים ייחודיים לאזור, ללא קשר לזני גפן ממוצא אירופי. ההתאמה הגנטית לאוכלוסיות מקומיות הובילה אותנו לחפש את הזנים הקרובים להם ביותר הקיימים היום. בניתוח הנתונים כללנו גם מספר רב של דוגמאות של "גפני פרא", גפנים מקומיות ששרדו במעזבות ובבוסתנים נטושים בדרום הארץ.

פריצת הדרך נוצרה כשהתגלה שהפרופיל הגנטי של הגפנים העתיקות מעבדת נשמר עד היום בגפנים ששרדו במערב הנגב, בחולות ניצנים וזיקים, בין שרידי כפרים ערביים נטושים סמוך ליד מרדכי ולאור הנר, ולאורך נחל שקמה.

באזורים אלו שרד מספר רב של גפנים הגדלות על עצי שקמה. מתוך מגוון הגפנים שנבחנו בשני זנים מקומיים "סריקי" ו"באר" נמצאה התאמה גנטית רבה לגפני עבדת. לבאר יש קרבה משפחתית גדולה לזן מורשת נוסף הנפוץ במערב הנגב בשם "דבוקי". הזהות הגנטית מעידה כי הגפנים התרבו במשך השנים רק באמצעות ייחורים. תגלית זו מעידה על המשכיות חקלאית בין-דורית בגידול זני גפן מסורתיים – ששרדה עד היום.

הסריקי הוא זן של גפן המניב אשכולות גדולים ורבים של ענבים אדומים. זן זה נפוץ עד היום בחלקים רבים במזרח הים התיכון. יש לו היסטוריה ארוכה בייצור יין בכרתים ובקפריסין, והוא משמש עד היום לייצור יין אדום ואיכותי בלבנון. שמו היווני אולי משמר את מוצאו הגאוגרפי: אזור נחל שורק, וייתכן שזהו הזן המקראי והוא משמר את השם המצוין בברכת יעקב ליהודה: "אֶסְרִי לְגִפְנֵי עֵירוֹ, וְלִשְׂרָקָה בְּנֵי אֶתְנֹ" (בראשית מט:יא). הבאר הוא זן של גפן המניב ענבים לבנים ואשכולות קטנים יחסית. הזן נקרא על שם גפן עתיקה ששרדה סמוך לקיבוץ פלמחים על שפת באר מים עתיקה. הבאר זוהה בתור זן ייחודי לישראל. יש לו קרבה משפחתית לזן הדבוקי, זן מקומי נוסף של גפן המניב ענבים לבנים ואשכולות בינוניים שהיה נפוץ בכרמי האוכלוסייה הערבית לפני 1948 והגיע לכדי 50% משטח הכרמים בארץ. מאות רבות של גפני דבוקי וסריקי שרדו באזורים נוספים בנגב המערבי. זנים אלו מותאמים לגידולי בעל, והם זנים עמידים המניבים פרי רב ומתוק.

הסריקי והבאר הושבו בספטמבר 2023 לכרם המורשת שהקימה רשות הטבע והגנים בגן לאומי עבדת (איור 5). הכרם הוקם על בסיס המבנה המסורתי של כרמים שהיה נפוץ בקרב חקלאי ארץ ישראל בתקופת המשנה והתלמוד והוא



איור 5. כרם גן לאומי עבדת: כרם מורשת שהוקם בחלקה חקלאית מהתקופה הביזנטית בגן לאומי עבדת שבהר הנגב. (צילום: ליאור שווימר; באדיבות רשות הטבע והגנים)

הרוח והחברה. מחקר מתקדם על עצי הפרי העתיקים יכול לשמש בסיס לחיבור בין מגוון של מיני עצי הפרי בעבר ובהווה. בהקשר זה מעניינים במיוחד אותם זנים שטופחו והותאמו במרוצת הדורות לסביבות חיים צחיחות. תוצאות מחקרנו מהנגב יכולות לשמש תבנית למחקרים דומים באזורים נוספים בעלי עדות היסטורית ארוכה של בוסתנאות בעל מסורתית.

לזיהוי ולמיפוי של זני המורשת יש חשיבות מדעית, חברתית וחינוכית רבה. הרבה מעצי הפרי העתיקים טרם נחקרו בכלים מדעיים. כדי ליצור את התשתית למחקר שיבחן את תכונותיהם הייחודיות של זני המורשת אנו אוספים ייחורים של הזנים ומייצרים שתילים המהווים אוסף לימודי של חברת עצי הפרי בכל אחד מחבלי הארץ. עצים אלו משמשים להקמת גרעין רבייה לכל אחד מהאזורים וישמשו להקמת בוסתני מורשת באזורים שבהם התגלו (in situ conservation). תיעוד עצי המורשת והגנה עליהם מעוררים עניין רב גם בקרב הציבור הרחב ויוצרים בסיס לשיתוף פעולה פורה במגוון מיזמים המבוססים על מדע אזרחי ועל יוזמות קהילתיות מקומיות.

אחרית דבר שיכולה להיות גם הקדמה

במהלך שנות מחקרי באקדמיה עברתי כמה גלגולים בתהליך הכשרתי ובתחומי המחקר שלי. נקלטתי בחוג לארכאולוגיה באוניברסיטת חיפה בשנת 2003 בתור זואולוג-ארכאולוג שהתמחה בעיקר בתקופות הפרהיסטוריות. בשנים אלו הקמתי את המעבדה לארכאוזואולוגיה שהתפתחה להיות מרכז לחקר עולם החי הקדום של ישראל. מרבית העבודות שכתבתי בעשור הראשון באקדמיה עסקו באבולוציה של הצייד האנושי, בראשית ביות בעלי החיים ובמעבר לחקלאות

משמש מרכז לימודי-חינוכי להצגת המודל של מערכת חקלאית מדברית. הכרם משמש גשר תרבותי-תקופתי ומחבר את דרך היין ההיסטורית עם דרך היין המודרנית ואת המורשת העתיקה של יין הנגב עם תעשיית היין החלוצית של היום. אז, כמו היום, גידול הגפן וייצור היין היו מנוע צמיחה מרכזי בכלכלת הנגב.

הערות מסכמות ומבט לעתיד

שינויי האקלים והתרחבות רצועת המדבריות העולמית פוגעים בנופי חקלאות הבעל המסורתיים בכל חלקי אגן הים התיכון וגורמים לאובדן מגוון רחב של זני עצי פרי ייחודיים החיוניים לחקלאות המודרנית. המחקר האקדמי יכול למלא תפקיד מרכזי בהגנה על המגוון הביולוגי של עצי הפרי ובשמירתו באמצעות העלאת המודעות לזני עצי פרי עתיקים ולשימור המורשת של תרבות הבוסתנים שאפשרו את הישרדותם. מהלך כזה יכול להוביל לשיתופי פעולה בין-לאומיים בין מרכזי מחקר, גופים ממשלתיים ועמותות וכן להקמה של רשת טקסונומית בין-לאומית לתיעוד עצי פרי מסורתיים ולשימורם.

הארגון הבין-לאומי לשימור הטבע (IUCN) מזהיר מפני המעבר לחקלאות חד-זנית (מונוקולטורה) ומאובדן המגוון הביולוגי שטופח במשך אלפי שנים. בשונה מגידולים חד-שנתיים המתרבים באמצעות זרעים, השונות הגנטית המעטה של עצי הפרי המתרבים בייחורים מאפשרת לשמר את עצי הפרי.

הניסיון המחקרי שצברנו עד כה בשטח ובמעבדה מלמד כי הדרך הטובה ביותר לחקור את ההיסטוריה האקולוגית והתרבותית של עצי הפרי היא עשיית מחקר רב-תחומי שישתתפו בו חוקרים מכמה תחומי דעת ממדעי הטבע וממדעי

הסחר הקדומים בנגב שעד אז היו מוכרים רק מהעובדות ההיסטוריות. מתוך החומרים עלתה מרכזיותה של חקלאות הנגב המדברית בתקופה הביזנטית, ובעיקר ענף גידול הגפן וייצור היין.

לימוד החקלאות העתיקה של הנגב הוביל אותי למסע חדש שבעקבותיו התחלתי לחקור עצי פרי עתיקים ששרדו בנגב ובאזורים נוספים בארץ. בשלב הראשון למדתי קורס מעשי בנושא חקלאות מחדשת ובוסתנאות בעל מסורתית. משם המשכתי למסע חקר להיכרות בוסתני הבעל של הארץ. במהלך המסע פגשתי חוקרים, עמיתים וחברים שעזרו לי להכיר את הדרך ולחוש בטוח לצעוד בה. חקר בוסתנים עתיקים, עצי מורשת וההיסטוריה התרבותית של עצי הפרי העומד במוקד מחקריי בשנתיים האחרונות מציג את הגלגול המחקרי הנוכחי. ■

בשלהי הפרהיסטוריה, בלימוד השפעות האדם על סביבות עתיקות ובהתפתחות נופי התרבות של הארץ.

לפני כעשר שנים שיניתי את המיקוד המחקרי והתחלתי לעבוד בנגב של התקופה הביזנטית. בתור פרהיסטוריון שהתחיל לעבוד בתקופות ההיסטוריות התמקדתי בחפירה של תילי אשפות שהצטברו באתרי הנגב המרכזיים (חלוצה, שבטה, ניצנה ועבדת), כמו גם בחפירה של אשפות השיירות שהצטברו באתרי חניה לאורך דרכי הסחר הקדומות בנגב. חפירת האשפות גילתה עושר של חומרים ביו־ארכאולוגיים שאפשרו בפעם הראשונה להכיר את אבני היסוד של כלכלת הקיום, לבחון את תהליכי ההתמוטטות החברתית של האזור שהתרחשה בכמה מחזורי דעיכה בשלהי העת העתיקה ולשחזר את נתיבי

סינתזה כימית של חלבונים מורכבים למטרות מחקר ביולוגי



מאת פרופ' אשרף בריק

הדנ"א מורכב משרשראות ארוכות מאוד של חומרים אורגניים שנקראים נוקלאוטידים, והוא דחוס בגרעין של כל תא ממיליארדי התאים שמרכיבים את גופנו. כל שרשרת כזאת מחולקת למקטעים קטנים שנקראים גנים, כאשר כמעט כל גן מקודד בתוכו מבנה של מולקולה ייחודית וגדולה הנקראת חלבון. הדנ"א של גן ספציפי משועתק קודם לחומר תורשתי אחר שנקרא רנ"א (RNA) (חומצה ריבונוקליאית; Ribonucleic Acid), אשר מתורגם באמצעות מכונה מולקולרית הידועה בשם "ריבוזום" לחלבון ספציפי בעל תפקיד ייחודי בתא. תהליך זה, הנקרא תרגום, הוא מרשים ביותר והוא מונח בבסיסם של כל היצורים החיים.

המבנה הכימי של החלבונים ייחודי מאוד. כפי שהוזכר, כל אחד מהם נבנה בתא לפי הצופן הנמצא בחומר הגנטי, או ליתר דיוק, בגן שמקודד את רצף החומצות האמיניות המרכיבות אותו.

הגוף שלנו, כמו גם הצמחים, בעלי החיים וכל מה שסביבנו בנוי מחומרים שונים בעלי תרכובת כימית ייחודית. חומרים אלה נוצרים מאטומים שמגיבים ונקשרים ביניהם על פי חוקי הכימיה, המקנים להם תכונות גלויות ונסתרות. יש לציין שחומרים אלה פועלים בגופנו בסנכרון אלה עם אלה ובאיזון מושלם, ושיבוש בתפקודם עלול להוביל למחלות, אפילו קטלניות. מה שמדהים הוא שהטבע משתמש במספר מועט של יסודות כדי ליצור את רוב הדברים שסביבנו. כך למשל יותר מ-99% ממסת הגוף שלנו בנויים בעיקר משישה יסודות: חמצן, מימן, פחמן, חנקן, סידן וזרחן, אשר מגיבים בינם לבין עצמם ומייצרים את כל מה שאנחנו צריכים כדי להיות מי שאנחנו. דוגמה לחומר כזה הוא החומר הגנטי הידוע בשמו הנפוץ דנ"א (DNA) (חומצה דאוקסיריבונוקליאית; Deoxyribonucleic Acid), המצוי בגרעין התא ונחשב לחומר המרכזי בכל היצורים אשר מקודד בתוכו את כל המידע התורשתי.

המחקר שלי מתמקד בחקירת חלבונים שעברו שינויים לאחר התרגום ובהשפעתם של שינויים אלו על מגוון תכונות של החלבונים, החל ממעורבותם בתהליכים ביולוגיים שונים וכלה במחלות שונות. יש לציין ששינויים אלה הם למעשה מודיפיקציות כימיות שמתרחשות בעזרת אנזימים שונים בשיירים הצדדיים של חומצות האמינו. שינויים אלה גורמים לשינוי בתכונות הפיזיקליות של החלבון, כמו מסיסות, מטען וגודל, ובכך משנים את תכונותיו הפונקציונליות, כמו מיקומו בתא, האינטראקציה שלו עם סביבתו וגם את גורלו הסופי ופירוקו לאבני הבניין היסודיות. היום ידועים לנו אלפי אנזימים ממשפחות שונות שמעורבים בהוספה של קבוצות כימיות ובהסרתן בעת הצורך. קבוצות אלו יכולות להיות קטנות בהרכבן, כמו קבוצת מתיל שבנויה מפחמן ומשלושה אטומי מימן, או מחלבון שלם כמו אוביקוויטין, המורכב משבעים ושש חומצות אמינו המכילות 1,231 אטומים ($C_{378}H_{629}N_{105}O_{118}S_1$). תהליכים אלו מסונכרנים אלה עם אלה בהתרחשותם, וכל חוסר איזון בהם יכול להוביל לשיבושים ואף למחלות שונות. אין פלא שהרבה מהתרופות המצילות חיים פועלות על אנזימים אלו כדי לתקן כל תקלה בתפקודם.

השאלות הרבות בנוגע להשפעת השינויים לאחר תרגום על תפקודם של חלבונים שונים מונחות בבסיס המדע. תחום זה נחקר ברובו הגדול בידי ביולוגים באקדמיה ובתעשייה, ואכן התקדמות רבה הושגה בו עד היום, והיא השפיעה רבות על חיינו. עם זאת שאלות רבות עדיין נותרו פתוחות בגלל קשיים בהפקת חלבונים שעברו שינויים לאחר התרגום שיאפשרו חקירה מעמיקה יותר. קשיים אלה נובעים מכמה סיבות עיקריות: הקושי בזיהוי האנזים הגורם לשינוי והאתגרים שיכולים להיות בהפקתו; האנזימים מחוץ לתא יכולים לאבד את הסלקטיביות שלהם; האתגר להפיק כמות מספיקה מהחלבון לניסויים המתוכננים. ◀

התא משתמש לרוב בעשרים חומצות אמינו, שהריבזום קושר אותן בקשר כימי מיוחד הנקרא קשר פפטידי, החוזר על עצמו בין כל חומצה אמינית אחת לאחרת. עם תום בניית השרשרת היא מתחילה להתקפל במהירות על עצמה לפי הרכב חומצות האמינו ולובשת צורה מרחבית מרהיבה שקובעת את הפעילות הביולוגית של אותו החלבון. חשוב לציין שהחלבונים הם "סוסי העבודה" של רוב התהליכים המתרחשים בכל רגע נתון בגופם של כל היצורים החיים. כך למשל חלבון ההמוגלובין אחראי להעברת החמצן בגוף בתהליך הנשימה, חלבון האינסולין אחראי לוויסות רמות הסוכר בדם, ולחלבון האופסין, שממוקם ברשתית העין, תפקיד חשוב בתהליך הראייה. למשפחת החלבונים שייכים גם הנוגדנים שמגינים עלינו מפני פולשים זרים והאנזימים שמזרזים את התהליכים הכימיים. למעשה, יש אין-ספור תהליכים שמתרחשים בעודכם קוראים שורות אלה, ובכולם מעורבים חלבונים.

אחת ההפתעות של המיזם למיפוי הגנום האנושי ולריצופו, שתוצאותיו הראשונות התפרסמו בשנת 2000, והוא הושלם במרץ 2022, הייתה מספר הגנים שמוערך בכ-22,000. זהו מספר קטן יחסית ליצור מתוחכם כמו האדם לעומת יצורים אחרים, מתוחכמים הרבה פחות, אשר בהם התגלה מספר גנים דומה או אפילו גדול יותר(!) יש לציין שהיום אנו מבינים שהגורם להיותם של בני אדם מתוחכמים יותר מיצורים אחרים אינו נוגע למספר הגנים אלא לתהליכים ייחודיים, כמו מנגנוני בקרה של גנים, הדנ"א הלא מקודד והשינויים שחלים בחלבונים לאחר תרגום, שמגדילים את מספר החלבונים למספר גדול בהרבה מזה שהיה אמור להיות מהגנים הקיימים. כמובן, לתחכום שלנו יש גם סיבות אחרות, כמו השפה, הקשרים החברתיים וההתפתחות התרבותית.

על כן יש צורך רב בקבלת חלבונים שעברו מודיפיקציה ספציפית בצורה נקייה, הומוגנית ובכמויות מספקות לצורכי מחקר. לכאן בדיוק נכנס כוחה של הכימיה, המתייחסת לחלבון כאל מולקולה כימית, אומנם גדולה, אך כזו שאפשר להכין אותה מאבני הבניין העיקריות למרות האתגר הייחודי, ובכך להתגבר על הבעייתיות ביישום שיטות של ביולוגיה מולקולרית.

כל לימודי האקדמיים היו בתחום הכימיה. תואר המגיסטר היה בהנחייתו של ד"ר ניזאר חדאד, לשעבר חבר סגל בפקולטה לכימיה בטכניון – מכון טכנולוגי לישראל, ובו התנסיתי באומנות הסינתזה הכימית של חומרי טבע, שהם מולקולות קטנות יחסית, אך מורכבות מאוד מבחינה כימית ומרחבית. הדוקטורט היה בהנחייתם המשותפת של פרופ' אהוד קינן מהטכניון ופרופ' פיליפ דוסון (Philip E. Dawson) ממכון סקריפס בסן דייגו שבארצות הברית. בתקופה זו התנסיתי באומנות הסינתזה הכימית של חלבונים כדי להכין אנזימים מלאכותיים. תקופת הבתר-דוקטורט אף היא הייתה במכון סקריפס, בהנחייתו של פרופ' צ'יהוי וונג (Chi-Huey Wong), ובה רכשתי ניסיון בסינתזה כימית של חלבונים שעברו מודיפיקציה עם סוכרים, נוסף על הניסיון ועל הידע בפיתוח מערכים לאנזימים שונים. אין ספק שתקופות אלו חשפו אותי למדע הרב-תחומי של העולם הגדול, ורכשתי ניסיון רב וידע רחב ומגוון. בעיקר הפנמתי עד כמה חשוב להסיר כל חשש מחקר תחומים חדשים, בעלי עניין רב ומאתגרים במיוחד.

מאז התחלתי את הקריירה האקדמית באוניברסיטת בן-גוריון בנגב, ב-2007, כחבר סגל צעיר, ועד לרגע זה בטכניון, עניין אותי מאוד החיבור בין כימיה לביולוגיה. הבנתי מהר מאוד את הכוח העצום שיש לנו ככימאים, עם הכלים המיוחדים שברשותנו, לתרום להבנה של תהליכים ביולוגיים,

נוסף על ההבנה העמוקה של המבנה הבסיסי של המקרומולקולות הבסיסיות (דנ"א, רנ"א, חלבונים וסוכרים) שקובע את פעילותם. נושא שריתק אותי במיוחד הוא סינתזה כימית של חלבונים מורכבים ככל האפשר ובמיוחד אלו שעוברים שינוי לאחר תרגום לצורכי מחקרם ביולוגיים. במשך חמש-עשרה השנים האחרונות הכנו במעבדתי עשרות חלבונים, אשר חלקם הגדול קשה מאוד, ואף בלתי אפשרי, להכנה בדרכים אחרות. חלבונים אלו עזרו לנו לשפוך אור על תהליכים ביולוגיים רבים. אנסה להדגים זאת בכמה דוגמאות, אך קודם אסביר בקצרה את תחום הסינתזה הכימית של חלבונים.

כפי שציניתי קודם, לכל חלבון יש רצף של חומצות אמינו הבונה את השרשרת הפוליפפטידית באורך ספציפי. על כן סינתזה כימית של חלבון דורשת את יצירת הרצף הפפטידי בצורתו המדויקת. כבר בתחילת המאה הקודמת חקרו מדענים רבים שיטות כימיות להכנת פפטידים, ונשאו הצלחות מסוימות, כמו למשל הכנת הורמון האהבה, הידוע בשמו המדעי אוקסיטוצין, בידי המדען וינסנט דו ויניו (Vincent du Vigneaud), אשר זכה בפרס נובל לכימיה ב-1953 על תרומתו זו. המהפכה בסינתזה כימית של פפטידים החלה ב-1963 בידי רוברט ברוס מריפילד (Robert Bruce Merrifield), אשר פיתח שיטה מיוחדת שנקראת "סינתזה של פפטידים על מצע מוצק". שיטה זו מאפשרת חיבור זמני של החומצה האמינית הראשונה למצע מוצק, דבר שמאפשר חיבור של שאר החומצות בזו אחר זו באמצעות יצירת קשר פפטידי חדש בכל פעם, עד סיום בניית השרשרת. בסוף הסינתזה מבצעים ביקוע של השרשרת הפפטידית מהמצע תוך כדי הורדת קבוצות ההגנה מהשיירים הצדדיים של חומצות האמינו וניקוי סופי של התוצר הרצוי. היתרון של השיטה נובע מאלה: 1. במהלך כל הסינתזה, אחרי כל צימוד של חומצה לשרשרת שקשורה

כמו שכבר הזכרתי, המחקר בקבוצתי מתרכז בפיתוח שיטות כימיות-ביולוגיות להבנת ההשפעה של שינויים לאחר תרגום על חלבונים. אחת השאלות שמעסיקות אותי ושמלהיבה אותי במיוחד היא כיצד הוספת חלבון האוביקוויטין, או שרשרת שבנויה מכמה יחידות של האוביקוויטין, לאחד משיירי חומצות האמינו של חלבון מטרה, בתהליך שידוע בשם אוביקוויטינציה, משפיעה עליו ברמה המולקולרית. אוביקוויטינציה היא אחד השינויים החשובים ביותר לאחר התרגום, והיא מעורבת בהרבה תהליכים ביולוגיים, והנפוץ שבהם הוא פירוק חלבונים בעזרת המכונה המולקולרית הנקראת "פרוטאזום". התגלית הזאת העניקה לאברהם הרשקו ולאחריו צ'נובר מהטכניון – מכון טכנולוגי לישראל ולאירוויין רוז (Irwin Rose) מאוניברסיטת קליפורניה באירוויין שבארצות הברית, פרס נובל לכימיה בשנת 2004.

אוביקוויטינציה (איור 1) נחשבת לא רק לאחד השינויים החשובים ביותר לאחר התרגום, אלא גם למורכבת ביותר, מהרבה סיבות: 1. להבדיל משינויים אחרים שחלים בעזרת אנזים אחד, אוביקוויטינציה דורשת שלושה אנזימים (E1-E3) וחלבוני עזר כדי להוסיף את חלבון האוביקוויטין לחלבון המטרה והם ספציפיים לסוג השרשרת ולחלבון המטרה. כיום ידוע לנו על שני E1, כ-40 E2 ויותר מ-600 E3; 2. התהליך צורך אנרגייה (אדנוזין טרי-פוספט, תרכובת אורגנית המאפשרת בין היתר אגירת אנרגייה בתא) להפעלת חלבון האוביקוויטין בעזרת האנזים E1 והעברתו לאנזים השני E2; 3. האוביקוויטין נצמד בקשר פפטידי (איזופיפטידי), לרוב, לקבוצת האמינו של השייר הצדדי של החומצה האמינית ליזין, אך יש מקרים שבהם הוא נצמד לשיירים הצדדיים של החומצות האמיניות סרין, תראונין וציסטאין בקשר אסטרי, או לקבוצה האמינית הטרמינלית של חלבון המטרה בקשר אמיד; 4. האוביקוויטין נצמד לחלבון המטרה כמונומר או כשרשרת אשר

למצע, נדרשת רק שטיפת המצע המוצק מעודף ריאגנטים; 2. בגלל הפשטות היחסית של התהליך ובגלל המחזוריות של השלבים הסינתטיים מתאפשרים אוטומטיזציה של התהליך והשימוש במכשיר מיוחד שמבצע את כל תהליך בניית השרשרת ללא מעורבות יתר של החוקר. בזכות התגלית הזאת זכה מריפילד בפרס נובל לכימיה בשנת 1984.

מאז דווחה, אפשרה סינתזה של פפטידים על מצע מוצק הכנת מיליוני פפטידים המשמשים מדענים בתחומים רבים, מהנדסת חומרים חדשים ועד תרופות מצילות חיים. אחת המגבלות של השיטה היא אורכה של השרשרת שאפשר להכין בשיטה זו. לרוב, השיטה מוגבלת לפפטידים באורך של 30-50 חומצות אמינו, ואילו אורכן של שרשראות פוליפפטידות שמהן בנויים חלבונים הוא לרוב מאות ואף אלפי חומצות אמינו. גם אם נתרכז בחלבונים שאורכם הוא 200-400 חומצות אמינו, ולא מעט חלבונים מצויים בטווח אורכים אלו, הרי ברור שצריך שיטה אחרת שתתגבר על המגבלה של סינתזה של פפטידים על מצע מוצק. פריצת הדרך הייתה בשנת 1994. פורצי הדרך הם סטיבן קנט (Stephen Kent) ופיליפ דוסון. הם הציגו שיטה מהפכנית המאפשרת חיבור יעיל בין פפטידים ליצירת שרשראות ארוכות יותר – בתמיסה מימית. כך, אפשר להכין חלבון המורכב למשל מ-200 חומצות אמינו, מ-4-5 פרגמנטים, והחיבור ביניהם נעשה באמצעות תגובת צימוד שידועה היום בשם "ליגציה כימית טבעית". השיטה אפשרה הכנה של יותר מאלף חלבונים למטרות של מחקר בסיסי ואפילו לטיפולים רפואיים. שלוש שנים לאחר התגלית התמזל מזלי להימנות עם עובדי המעבדה החדשה של פיליפ דוסון במכון סקריפס וללמוד את סודות הכימיה הנפלאה שעד היום משפיעה על המחקר שלי.



בשנת 2009 פיתחנו שיטה כימית המאפשרת לחקות את תהליך האוביקוויטינציה ללא צורך באנזימים (E1-E3). השיטה מבוססת על הכנת חומצה אמינית (תיו-ליזין). כשמכניסים את החומצה הזאת לפפטיד או לחלבון באתר ספציפי בשיטות שהזכרתי לעיל להכנת חלבונים בצורה כימית (איור 1), היא מגיבה ספציפית עם אוביקוויטין מופעל, שאף אותו מכינים בצורה כימית, ליצירת הקשר האיזופפטידי על השייר הצדדי של ליזין.

מאז הפיתוח הזה הכנו במעבדתי מגוון רחב של מצומדי אוביקוויטין למחקרים שונים, כמו שרשראות אוביקוויטין באורכים שונים (2-4) ומסוגים שונים (איור 2), בצורתם החופשית או מצומדים לפפטידים או לחלבונים שונים. חלק ממצומדי האוביקוויטין האלו הוכנו בצורתם המסומנת גם למטרות אחרות, לדוגמה: סימונים איזוטופיים שאפשרו לחקור את המבנה שלהם בעזרת תהודה מגנטית גרעינית (Nuclear Magnetic Resonance, NMR). בחלק הבא אדגים שימושים אלו בפירוט רב יותר, מבלי לפרט על הפיתוחים הכימיים שליוו אותנו כדי לאפשר את הסינתזה המורכבת של חלבונים מצומדי האוביקוויטין, שחלקם שברו שיאים עולמיים מבחינת מורכבותם וגודלם.

אחד החלבונים הראשונים המצומד לאוביקוויטין שהתנסו בהכנתו היה אלפא-סינוקלאין (איור 3), שרובו נמצא במוח, והוא נחשב למרכיב העיקרי של גופי לואי האופייניים למחלת הפרקינסון. בגופים אלה אלפא-סינוקלאין מצטבר כסיבים לא מסיסים וגורם למצב הפתולוגי המאפיין את המחלה. מחקרים רבים הראו שאלפא-סינוקלאין בגופים אלו מצומד ליחידת אוביקוויטין או לשרשרת של אוביקוויטין, אך לא ברור מה התפקיד של מערכת האוביקוויטין בפתופיזיולוגיה של אלפא-סינוקלאין, ועל כן דווחו השערות שונות. ◀

נוצרת מקישור האוביקוויטין עם יחידות אחרות דרך קשרים בין אחד הליזינים של האוביקוויטין לקבוצה הקרבוקסילית הטרמינלית שבקצה החלבון של יחידת האוביקוויטין השני. יתרה מזאת, האוביקוויטין מכיל שבעה ליזינים (שמספרם בשרשרת הפפטידית 6, 11, 27, 29, 33, 48, 63) ואת האמין שבקצה הטרמינלי, שמשמשים לבניית שרשראות מסוגים שונים. הטבע משתמש שימוש אפקטיבי מאוד במערכת האוביקוויטין בהשתמשו בשרשראות השונות כדי להשפיע על תהליכים ביולוגיים שונים. כך למשל שרשרת מסוג ליזין 48 מעורבת בפירוק חלבונים, ואילו זאת של ליזין 63 מעורבת בתיקון דנ"א פגום.

למרות ההתקדמות המרשימה בהבנת מערכת האוביקוויטין, עדיין קיימים אתגרים רבים בהבנת אספקטים שונים, ושאלות בסיסיות רבות עדיין מחכות לתשובות כדי להבין אותה הבנה מקיפה יותר ועמוקה יותר וכדי לנצל הבנה זו בפיענוח התערבותה במחלות שונות ובמציאת דרכי טיפול בהן. מהתהליך שנזכר לעיל קשה מאוד, ולפעמים בלתי אפשרי, להפיק חלבונים שעברו מודיפיקציות באמצעות האוביקוויטין או באמצעות שרשרת האוביקוויטין מסוג מסוים שיהיה בהם כדי לשפוך אור על אופן השפעתם על חלבון מסוים ועל תפקידו בתהליך ביולוגי, מהסיבה שלא תמיד יודעים מהי הקומבינציה של שלושת האנזימים (E1-E3) הדרושים לאוביקוויטינציה של חלבון המטרה, וגם אם יודעים, ייתכן שיהיה קשה להפיקם. גם כשהאנזימים זמינים, מחוץ לתא הם לרוב עובדים בצורה לא סלקטיבית באשר למקום האוביקוויטינציה על חלבון המטרה, לסוגה ולאורכה של השרשרת. נוסף על זה, קשה מאוד לקבל כמות מספקת מהחלבון שעבר את המודיפיקציה למחקר ספציפי. ולבסוף, קשה מאוד להכין נגזרות מיוחדות מחלבון שעבר אוביקוויטינציה למטרות שונות, כמו הכנסת סימון פלואורסצנטי.

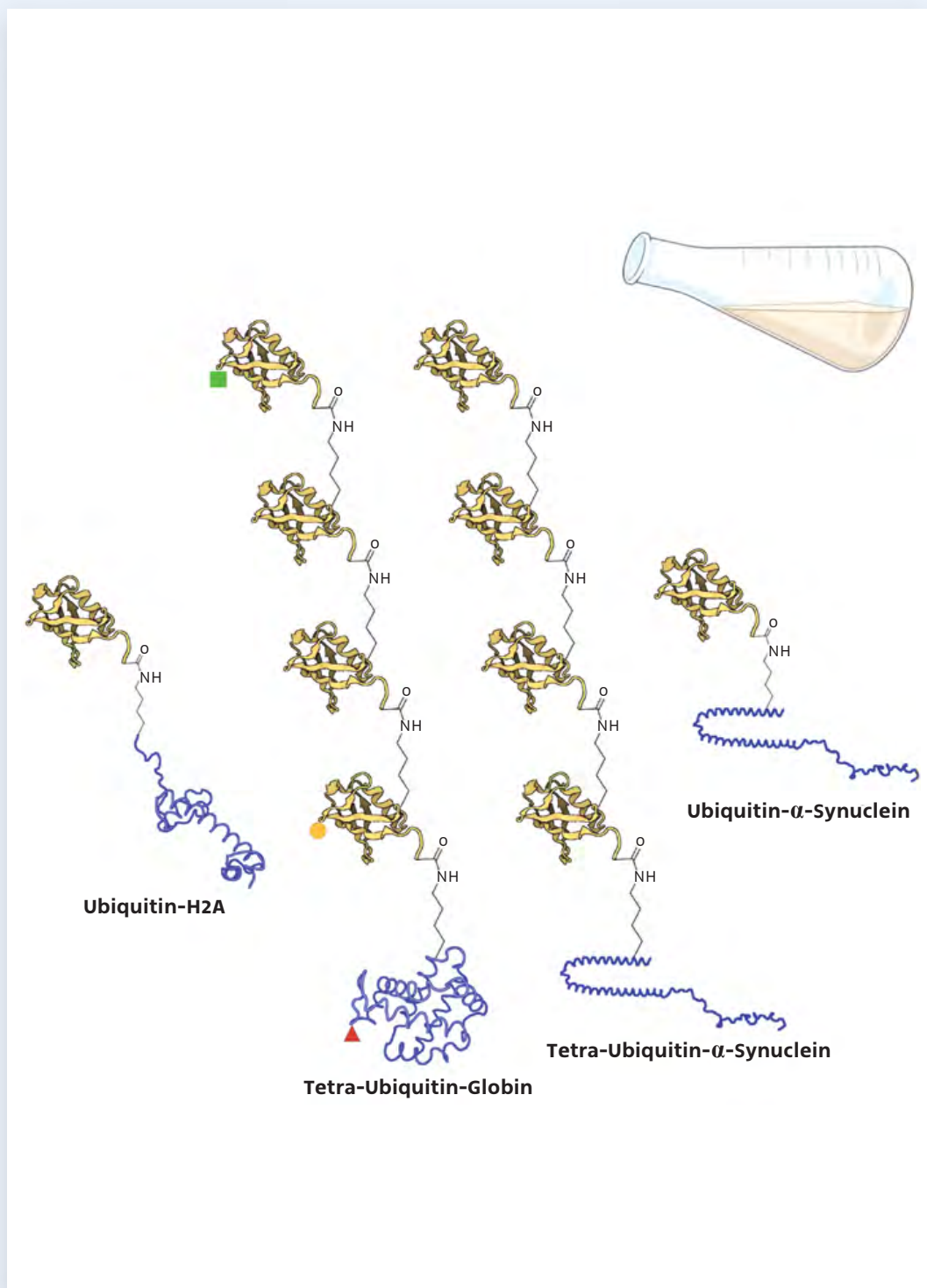
הראו שהאוביקוויטין הראשון והקרוב ביותר לאלפא-גלובין עובר פירוק עם הסובסטרט, ואילו הרביעי עובר הצלה ומשתחרר לשימוש חוזר בתהליך האוביקוויטינציה לחלבונים אחרים. ההשערה שלנו היא שהאוביקוויטין הראשון מאפשר ייצוב של הסובסטרט בחלק הקטליטי של הפרוטאזום לאורך זמן כדי לאפשר פירוק מלא, ובכך האוביקוויטין מקריב את עצמו למטרה זו. ואילו האחרון תפקידו להגן על השרשרת מהאנזימים האחרים שיכולים לשבור את השרשרת למונומרים של אוביקוויטין, ובכך מקבלים פירוק יעיל של חלבון המטרה.

מערכת דומה סונתזה במעבדתי, שבה החלבון סייקלין B, שעובר פירוק בזמן חלוקת התא, שימש חלבון המטרה, ובשיתוף פעולה עם פרופ' מיכאל גליקמן, מהפקולטה לביולוגיה בטכניון, חקרנו את מנגנון פירוק החלבונים באמצעות הפרוטאזום, שהיה עם החלקיקים הרגולטוריים המזהים את הפוליאוביקוויטין כאות פירוק ובלעדיהם.

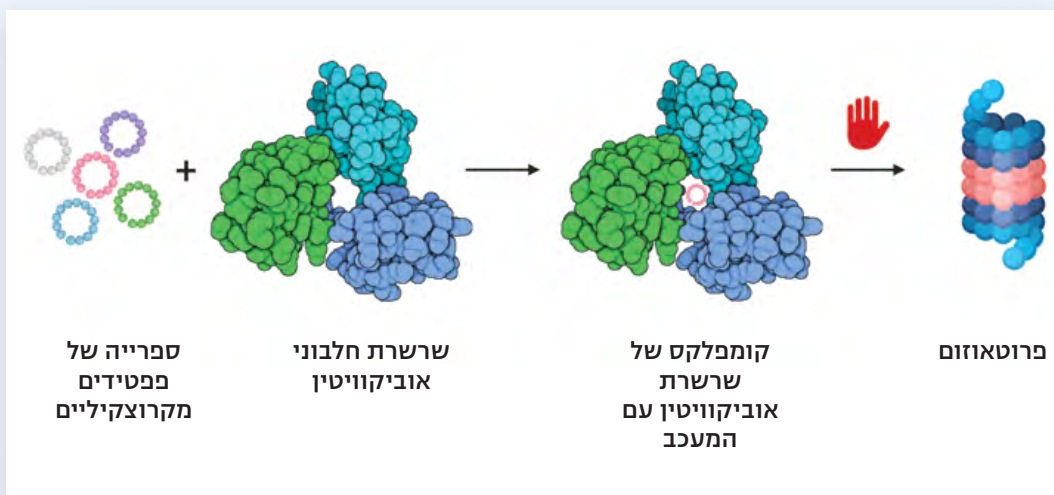
הכלים הכימיים שפיתחנו אפשרו לנו לא רק להבין את מעורבותה של מערכת האוביקוויטין במחלות כמו פרקינסון וסרטן, אלא גם למצוא מולקולות בעלות פוטנציאל רפואי. על כן ניצלנו את היכולת שלנו להכין שרשראות אוביקוויטין בצורה הומוגנית וברמת ניקיון גבוהה, נוסף על האפשרות להכניס, כעיקרון, כל מודפיקציה בשרשרת, כדי לגלות מולקולות שקושרות את השרשרת ומתערבות בתפקידה בתא. כך למשל סינתזנו שרשראות מסוג ליזין 48 באורכים שונים, כאשר בקצה הטרמינלי חובר ביוטין, שנקשר לחלבון אבידין בחוזקה רבה. בשיתוף פעולה עם פרופ' הירוואקי שוגה (Hiroaki Suga) מאוניברסיטת טוקיו השתמשנו בשרשראות אלו למצוא, בעזרת סריקת ספרייה ענקית של פפטידים ציקליים, מולקולות שקושרות את השרשראות בחוזקה

קבוצתי הייתה הראשונה להכין אלפא-סינוקלאין מצומד לאוביקוויטין בצורה הומוגנית וברמת ניקיון גבוהה, שאפשרה לנו, בשיתוף פעולה עם פרופ' הילאל לאשוואל (Hilal Lashuel) מבית הספר הפוליטכני הפדרלי של לוזאן, להראות שהאוביקוויטינציה על ליזין 12 מעכבת לחלוטין את יצירת הסיבים הלא מסיסים. לאחר מכן צעדנו כמה צעדים קדימה והכנו את אלפא-סינוקלאין מצומד לשרשרת של ארבעה אוביקוויטין מסוג ליזין 48, ושוב בדקנו את ההשפעה על תכונותיו. במקרה הזה אלפא-סינוקלאין יצר אגרגטים (משקעים לא מסיסים של חלבון) שאינם דומים לעמילואידים (גם אלה משקעים לא מסיסים של חלבון) המאפיינים את המחלה. בשיתוף פעולה עם פרופ' אהרן צ'חנובר הראינו שמצומד כזה עובר פירוק פרוטאזומלי. ובכן, אחת המסקנות מעבודה זו היא שהאוביקוויטינציה של אלפא-סינוקלאין אינה מעודדת יצירת גופי לואי, וייתכן שיש לה תפקיד אקטיבי בפירוק הסיבים הלא מסיסים ובהרחקת אלפא-סינוקלאין באמצעות פירוקו בעזרת הפרוטאזום.

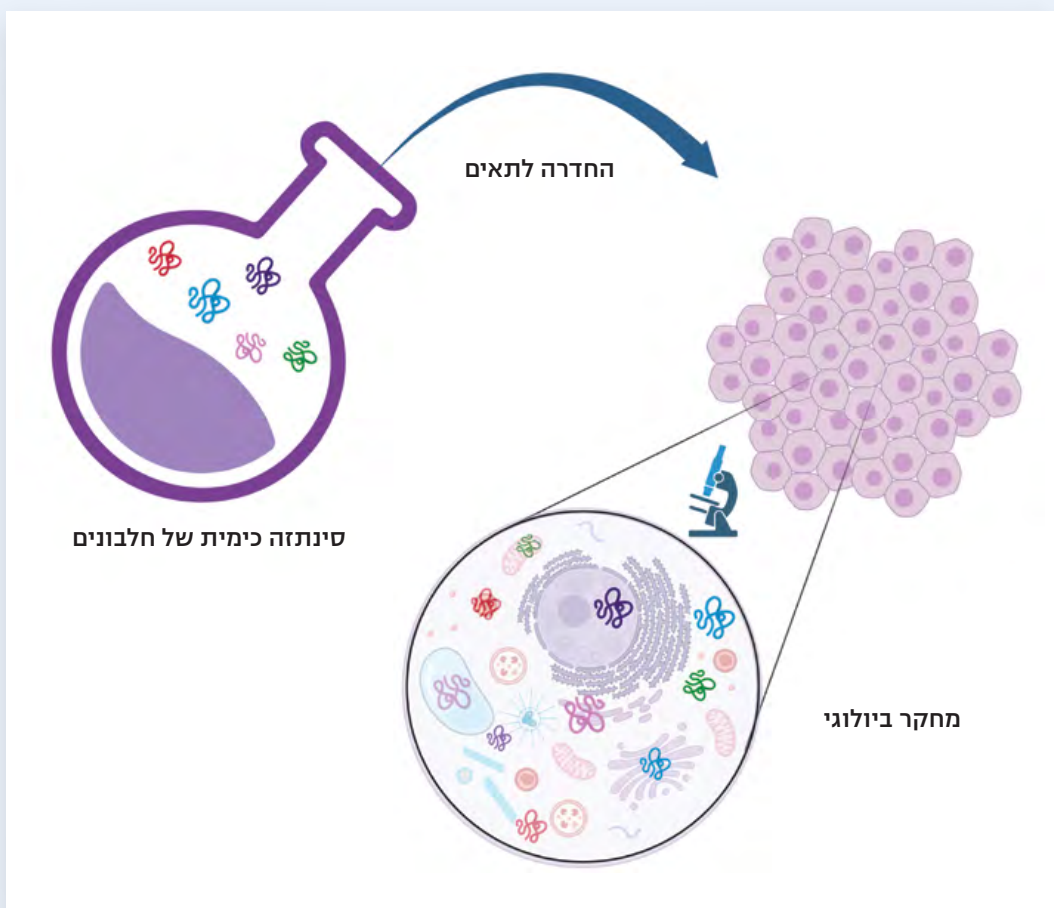
דוגמה נוספת, גם היא מתוך שיתוף הפעולה עם פרופ' אהרן צ'חנובר, קשורה בהבנת גורל האוביקוויטין בשרשרת בתהליך פירוק חלבונים בעזרת הפרוטאזום. כדי לענות על שאלה זו הכנו מצומד אוביקוויטין שבו חלבון בשם אלפא-גלובין שהוכן כימית, וחיברנו לו שרשרת של אוביקוויטין מסוג ליזין 48. מכיוון שכל תהליך הסינתזה נעשה בצורה כימית, התאפשר לנו לסמן את חלבון המטרה (אלפא-גלובין), את האוביקוויטין הראשון בשרשרת ואת הרביעי, שהוא הרחוק ביותר מאלפא-גלובין, בשלושה סימונים שונים (איור 3). מצומד האוביקוויטין הזה, שהכיל 472 חומצות אמינו והוכן בצורה כימית מאבני הבניין היסודיות, כמו הרכבת מבנה עצום מאבני לגו קטנות, נחשף לפירוק פרוטאזומלי, שבו עקבנו אחרי גורלו של האוביקוויטין בשרשרת. התוצאות



איור 3. סינתזה כימית של חלבונים מצומדים לאוביקוויטין ולשרשראות אוביקוויטין



איור 4. עיכוב פירוק חלבונים מושג בעזרת פפטידים מקרוצקליים באמצעות קשירה לשרשרת האוביקוויטין



איור 5. סינתזה כימית של חלבונים מסומנים והחדרתם לתאים חיים למטרת מחקר ביולוגי

לאחרונה מושקע מאמץ רב במעבדתי להחדיר חלק מהחלבונים המורכבים שאנו מסנתזים לתוך תא חי כדי ללמוד עליהם יותר בסביבתם הטבעית. כבר הראינו בכמה דוגמאות שהתפרסמו לאחרונה שחלבונים אלו, שאותם אנו מסמנים בצבענים אורגניים קטנים, מראים בתוך התא החי את ההתנהגות המצופה מהם, ובכך הדבר פותח לפנינו אופקים חדשים לחקור אותם בצורה יצירתית וחדשנית כדי להבין את עולמם המופלא מחוץ לתא ובתוכו (איור 5).

בתיאוריי כאן השתדלתי להמחיש את כוחה של הכימיה הטמון בבניית ארגז כלים כימי המסייע להבנת תהליכים ביולוגיים בסיסיים. כמו כן ליכולת שלנו לשלוט בהרכב הכימי וברמת האטום הבודד, מתוך אלפי האטומים שמרכיבים מולקולה כלשהי, כמו חלבון, יש כוח עצום בהבנת תפקודו של הטבע. לזה יש השלכות גם על הבנת מנגנוני מחלות ועל פיתוח דרכי טיפול חדשניות בהן. חשובה לא פחות להצלחה ביישום כלים אלה היא יצירת שיתופי פעולה עם ביולוגים שצברו ידע רב על הנושא הביולוגי הספציפי, ובכך לחדד יותר את השאלות המדעיות ולעזור להבין את התוצאות ואת חשיבותן בהקשר הנכון. ■

רבה ובסלקטיביות גבוהה לאורכה ולסוגה של השרשרת (איור 4). פפטידים ציקליים אלו הראו פעילות ביולוגית חזקה בעיכוב פירוק חלבונים בתוך התא ובמודל עכברים שהוחדרו להם תאי סרטן מסוג מיאלומה נפוצה. הדבר דומה לאפקט שיוצרות התרופות שמשמשות בקליניקה, כמו בורטוזומיב, אשר מעכבות פירוק חלבונים בעכבן את החלק הקטליטי של הפרוטאזום. מנגד, הפפטידים הציקליים שגילינו מעכבים פירוק חלבונים במניעתם קישור השרשרת לפרוטאזום, ובכך קיים פוטנציאל רב שמולקולות אלו יעבדו על תאים שפיתחו עמידות נגד התרופות הקיימות. אנו ממשיכים לחקור את המולקולות שגילינו בחברת הזנק, בתקווה שנגיע בקרוב לניסויים קליניים ולהצלחה בטיפול בחולים.

את האסטרטגיה הזאת, שמשלבת סינתזה כימית של שרשראות עם סריקת ספריות ענקיות של פפטידים ציקליים, יישמנו גם בשרשרת מסוג ליזין 63, והמולקולות שהתגלו נחקרו בשיתוף פעולה עם פרופ' נביה איוב מהפקולטה לביולוגיה שבטכניון. מחקר זה הראה עיכוב תוך-תאי לתיקון נזקי דנ"א, שבו מעורבות שרשראות מסוג ליזין 63, שלהן תפקיד חשוב בגיוס האנזימים הדרושים לתיקון.

תודות

ברצוני להודות מקרב לב לחברי הקבוצה שלי, בעבר וכיום, על התרומה הגדולה והמסורה שלהם למחקר שנעשה עד כה. תודה רבה לפקולטה לכימיה באוניברסיטת בן-גוריון בנגב, שהייתה ביתי האקדמי הראשון. לפקולטה לכימיה ע"ש שוליק ולחברי הסגל הנהדרים, על תמיכתם הגדולה זה כעשור. תודה מיוחדת לד"ר גיא קמינצקי על ניהול יוצא דופן של המעבדה ולגברת יעל ניר על העזרה בניהול האדמיניסטרטיבי. תודה ענקית לכל השותפים לדרך על שיתופי הפעולה הפוריים והמהנים מאוד, שלמדתי מהם כה הרבה על העולם המרתק של הביולוגיה. תודה מכל הלב לפרופ' אהרן צ'חנובר, שותפי מאז תחילת דרכי, על התמיכה האינסופית ועל האמון הגדול בכימיה שפיתחנו לאורך השנים. תודה רבה לחברי היקרים על תמיכתם ועל העידוד שהפגינו לאורך כל הדרך, למשפחתי היקרה והאהובה, הורים אחים ואחיות, שלא הפסיקו ליום אחד לעזור, לתמוך ולאהוב. ואחרונים חביבים, לשני ילדיי, היקרים לי מכול, ג'וד וריאן, שמוסיפים הרבה טעם ומתיקות לחיי.

הוכחות אקראיות



מאת פרופ' עודד גולדרייך

בכל המערכות הללו המוודא משתמש באקראיות ומחליט על סמך מידע הסתברותי, אלא שהסתברות הטעות שלו חסומה באופן מפורש וניתנת להקטנה באמצעות הרצות חוזרות של המערכת.

על סוג הטענות שבהן נדון

אפתח בשתי הערות על אופיין של הטענות שיהיו במוקד הדיון. ראשית אדגיש שמדובר בטענות המתייחסות למידע הכלול בתוכן בלבד ושאינן מתייחסות למציאות חיצונית כלשהי. אף שכל המידע הרלוונטי לאמיתות נמצא בהן, ייתכן שקבלת מידע נוסף (שייקרא הוכחה) מקל את וידוא אמיתותן (verification). טענה אופיינית היא שלמערכת של משוואות יש פתרון בשלמים (אי-שליליים).

המושג המסורתי של הוכחה, ובייחוד מערכות הוכחה מסוג NP, מוגדר ביחס לתהליך וידוא יעיל ודטרמיניסטי. בניגוד לכך, המוכנות לחרוג מהמסורת ולהשתמש בתהליכי וידוא יעילים אך אקראיים מאפשרת כמה יתרונות:

- מערכות הוכחה אינטראקטיביות, שמשתמשות בתהליך וידוא אקראי, הן בעלות כושר ביטוי רב מזה של המערכות המסורתיות (מסוג NP) ומאששות את היתרון של דו-שיח על תקשורת חד-כיוונית.
- מערכות כאלו עשויות לאפשר וידוא באפס מידע ולהפריך את הקשר ההכרחי כביכול שבין השתכנועות בנכונות של טענה לבין לימוד של דבר-מה נוסף בנוגע אליה.
- ניתן לתרגם ביעילות הוכחות מסוג NP לצורה בעלת יתירות אשר תומכת בשיערוך מקורב של אמיתות ההוכחה על בסיס קריאה של חלק זעיר ממנה.

שהתהליך הלא יצירתי של וידוא הוכחות הוא שנותן להוכחות את ערכן. מבחינה מושגית הוכחות הן משניות ביחס לתהליך הווידוא, ואילו מבחינה פורמלית מערכות הוכחה מוגדרות על סמך תהליך הווידוא שלהן.

המושג של תהליך וידוא מניח – כמובן מאליו – את המושג של חישוב, ולמעשה גם את המושג של חישוב יעיל. ההנחה הסמויה הזאת הופכת למפורשת בהגדרה של הוכחות מסוג NP, שם מזהה חישוב יעיל עם חישוב דטרמיניסטי שזמן הריצה שלו עולה במתינות כפונקצייה של אורך הקלט (השם NP אינו מוצלח, אבל הוא המקובל). מכאן שמערכות הוכחה מסוג NP הן מערכות המשתמשות בתהליכי וידוא יעילים המופעלים על הוכחות שאורכן גדל במתינות עם אורך הטענות המוכחות (כאשר בדרך כלל פונקציות הגדלות במתינות מזהות עם פונקציות החסומות בפולינום).

הערת אגב: שאלת P-vs-NP

אני משער שהקוראים מניחים כמובן מאליו שלהוכחות יש ערך, וגם אני מאמין בכך. אלא שהאמונה הזאת מבוססת על ההנחה שקל יותר לוודא נכונות של הוכחה לטענה מאשר להעריך את אמיתות הטענה כאשר היא נתונה ללא הוכחה. אך האם אמונה זו נכונה?

התשובה היא שהדבר אינו ידוע. שאלה זו היא אחד מן הניסוחים של השאלה המרכזית ביותר במדעי המחשב אשר ידועה בשם "שאלת P-vs-NP". ההשערה המקובלת היא שהתשובה היא חיובית, זאת אומרת שקל לוודא נכונות של הוכחה לטענה יותר מאשר להעריך את אמיתות הטענה כאשר היא נתונה ללא הוכחה. תשובה שלילית לשאלה זו שומטת את הקרקע מתחת למושג ההוכחה, משום שבמקרה זה להוכחות אין ערך רב בוודוא הנכונות של טענות.

הסתכלו למשל במערכת המשוואות הזאת:

$$x+y+z = 2$$

$$x-y \geq 0$$

$$2y+z \leq 2$$

$$x \leq 1$$

מובן שתוכלו לאמת בקלות את הטענה שלמערכת זו יש פתרון בשלמים (אי-שליליים), אלא שנראה לי שתודו שמתן הוכחה – בדמות הצבה (כגון $x=y=1$, $z=0$) למשתנים – מקילה את וידוא הטענה. שימו לב שההוכחה אינה מופיעה במפורש בגוף הטענה, אבל היא כלולה בה במובלע. גם הטענה שלמערכת מן הסוג הזה אין פתרון בשלמים כוללת את כל המידע הנחוץ לצורך וידוא שלה, אלא שבמקרה זה הוכחה בדמות הצבה יחידה למשתנים אינה מספיקה.

אני מתכוון להשתמש בדוגמה זו (קרי: פתרון של מערכות משוואות הכוללות הרבה משוואות בהרבה נעלמים) בכל מהלך הדיון. מכך מתברר שהטענות שנדון בהן, שכל אחת מהן מתייחסת למערכת מסוימת שהיא חלק מהטענה, הן טענות ספציפיות חסרות חשיבות כללית, בניגוד לטענות כלליות (קרי: משפטים מתמטיים) כגון משפט פיתגורס או המשפט האחרון של פרמה.

הערה למתקדמים: אני מתעקש על פתרון בשלמים של משוואות משום שבמקרה זה אפילו שאלת הקיום של פתרון למערכת משוואות ליניארית היא בעיה NP-שלמה. מכאן שכל מה שייאמר על הבעיה הזאת (של פתרון בשלמים של מערכת משוואות) חל על כל הטענות במחלקת הסיבוכיות NP.

המושג המסורתי של הוכחה: מערכות מסוג NP

היצירתיות הכרוכה במציאת הוכחות והיוקרה המתלווה אליה משכיחות מאיתנו את העובדה

למערכת משוואות, פתרון של המערכת הוא בבחינת הוכחה לטענה, ותהליך הווידוא מתמצה בהצבת הערכים למשתנים ובבדיקה שערכים אלו מקיימים את כל אחת מן המשוואות.

נראה לי מועיל, בעיקר לצורך ההמשך, להציג מערכות הוכחה כמשחקים בין שני שחקנים: מוודא שמפעיל את תהליך הווידוא, ומוכיח שהוא מקור ההוכחות הפוטנציאליות. במילים אחרות, תהליך הווידוא מואנש על ידי המוודא (verifier), ומקור ההוכחות הפוטנציאליות הוא במוכיח (prover), שאינו מופיע במפורש בהגדרת המערכת (קרי: מערכת ההוכחה).

אם נשתמש בהאנשה זו, נוכל לראות במערכת הוכחה מסוג NP תקשורת חד-כיוונית מהמוכיח למוודא: המוכיח כותב הוכחה (לכאורה) ושולח אותה למוודא, וזה קורא אותה לשם וידוא נכונותה (ראו איור 1). אכן, המושגים "כותב" ו"קורא" מתאימים לראייה המסורתית של הוכחות ככתובות על ספר (או מאמר) ונקראות על ידי החפצים בדעת.

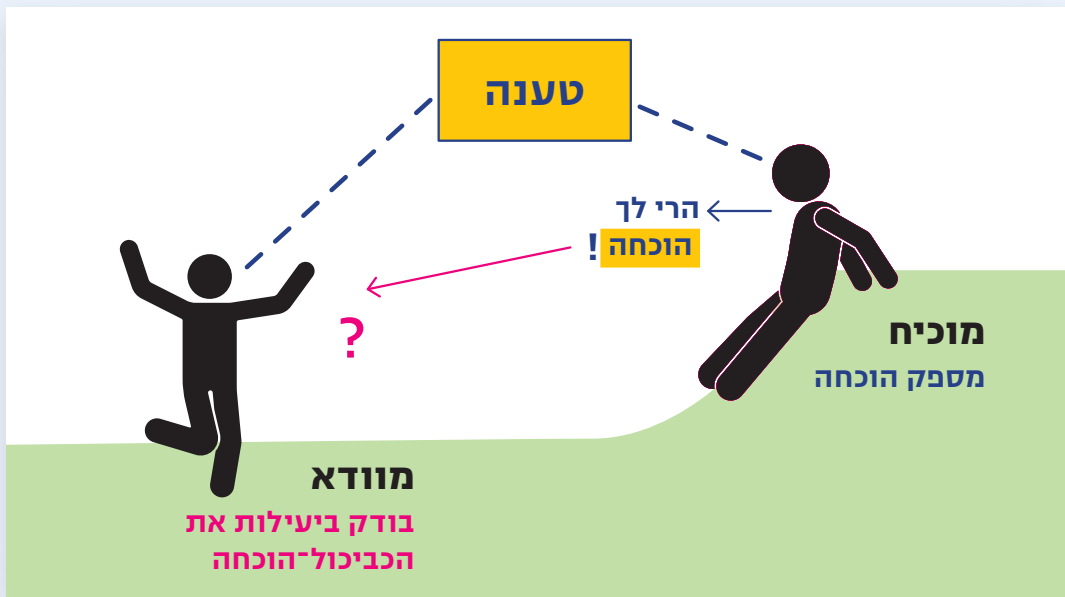
עיון נוסף במושג של מערכות הוכחה

הדיון שלנו במערכות הוכחה התמקד בתהליך הווידוא. כעת אני מבקש להדגיש במפורש את התנאים הנדרשים מתהליך וידוא (קרי: שלמות ונאותות). תנאים אלו מתייחסים לטענות מסוג מסוים אשר מערכת ההוכחה חלה עליהם (כגון הטענה על קיום פתרון בשלמים למערכת משוואות):

- **תנאי השלמות** (completeness) דורש כי לכל טענה נכונה (מהסוג הרלוונטי) קיימת הוכחה אשר מתקבלת כתקפה באמצעות תהליך הווידוא.

- **תנאי הנאותות** (soundness) דורש שלטענות שקריות אין "הוכחה כביכול" אשר מתקבלת כתקפה באמצעות תהליך הווידוא.

תנאי השלמות והנאותות הם בסיס המושג של מערכת הוכחה: השלמות דורשת שטענות נכונות יהיו ניתנות להוכחה, ואילו הנאותות דורשת שטענות שקריות לא יהיו ניתנות להוכחה. בדוגמה של טענות המתייחסות לקיום פתרון



איור 1. הוכחות מסורתיות: תקשורת חד-כיוונית

במפורש, ושאפשר יהיה להקטין אותה כרצוננו באמצעות מספר מתאים של הפעולות חוזרות של מערכת ההוכחה. מובן שלא היינו מסתבכים בעימות עם תחושות מקובלות לולא הייתה בכך תועלת רבה. כמו כן אדגיש כי כמו במערכת מסוג NP, בכל מערכות ההוכחה ההסתברותיות תהליך הוידוא הוא יעיל.

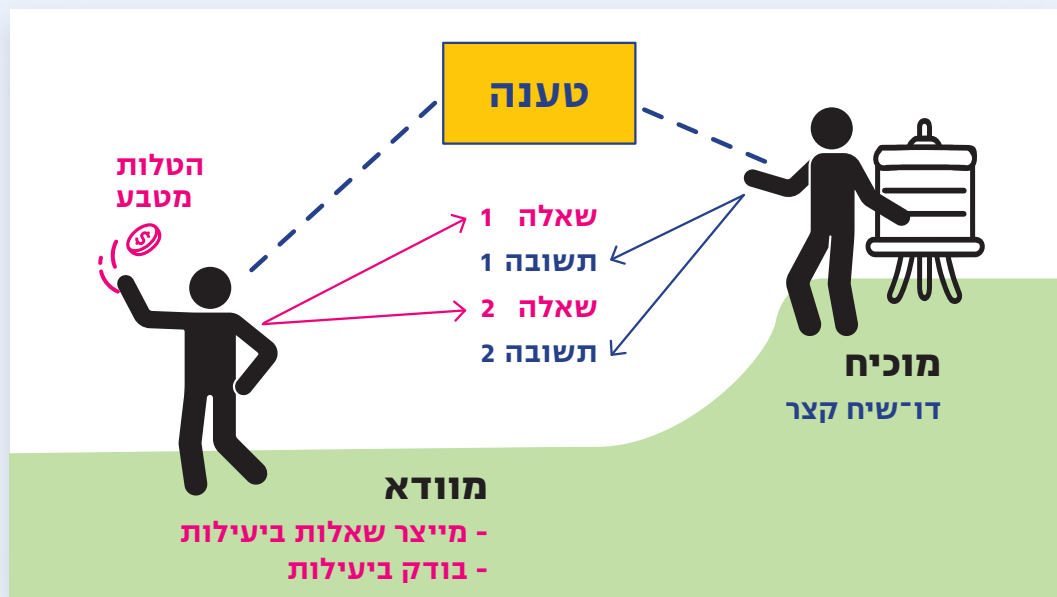
הוכחות אינטראקטיביות (ואקראיות)

ראייה במערכת הוכחה משחק בין מוודא לבין מוכיח פוטנציאלי מעלה באופן טבעי את האפשרות לקיום תקשורת דו-כיוונית בין השחקנים, בניגוד לתקשורת החד-כיוונית שעליה מיוסדת מערכת הוכחה מסוג NP. תקשורת דו-כיוונית כזאת היא אכן דו-שיח (או אינטראקציה) בין המוכיח למוודא, ולפיכך ייקראו מערכות הוכחה כאלו בשם הוכחות אינטראקטיביות (interactive proofs) או הוכחות מסוג IP (ראו איור 2).

אם נמשיך בתהליך ההאנשה נוכל להציג כך גם את מושגי השלמות והנאותות: תנאי השלמות אומר שמוכיח מתאים (שייתכן שהוא בעל ידע רב מזה של המוודא) יכול לגרום למוודא להשתכנע בכל טענה נכונה, ותנאי הנאותות אומר שאין דרך לגרום למוודא להשתכנע בטענות שקריות.

מעבר להוכחות מסוג NP

תכונה מרכזית של מערכות הוכחה מסוג NP היא שהן מבוססות על תהליכי וידוא דטרמיניסטיים (זאת אומרת תהליכי חישוב שבהם כל צעד נקבע באופן חד-ערכי על סמך המצב הנוכחי). אף שציינתי את העובדה הזאת, אני מניח שהקוראים לא הקדישו לכך תשומת לב רבה, משום שהם ראו בה מובנת מאליה. בניגוד לכך, מאמר זה יתמקד במערכות הוכחה אשר מבוססות על תהליכי וידוא אקראיים אשר כרוכים בהסתברות של שגיאה. עניין זה מעורר התנגדות טבעית, משום שנראה שהסתברות שגיאה מנוגדת למושג ההוכחה, אלא שאני מבקש לכפור בתחושה זו. אני מבקש להדגיש שהסתברות השגיאה תהא חסומה



איור 2. הוכחות אינטראקטיביות: תקשורת דו-כיוונית

כמו במקרה של הוכחות מסוג NP, השלמות דורשת שטענות נכונות יהיו ניתנות להוכחה, ולפי הנאותות טענות שקריות אינן ניתנות להוכחה (למעט בהסתברות זניחה).

דוגמה: איזומורפיזם בין מערכות של משוואות

נגדיר שתי מערכות של משוואות כאיזומורפיות אם ניתן לעבור מאחת לאחרת באמצעות שינוי של שמות המשתנים ושינוי של סדר המשוואות. הוכחה מסוג NP של איזומורפיזם בין משוואות יכולה להיות מורכבת מתיאור של החלפת שמות המשתנים ותיאור הפרמוטציה של סדר המשוואות.

בניגוד לכך, לא ידועה לנו הוכחה מסוג NP לטענה ששתי מערכות של משוואות אינן איזומורפיות. כאן באות לעזרה הוכחות אינטראקטיביות. במערכת הוכחה מסוג IP המוצעת להלן המוודא בוחר אחת משתי מערכות המשוואות באקראי ויוצר עותק איזומורפי אקראי שלה (באמצעות החלפה אקראית של שמות משתנים וסידור אקראי של המשוואות). המוודא שולח את מערכת המשוואות שהתקבלה למוכיח ומבקש ממנו לציין את מקורה (קרי: אם היא איזומורפית למערכת המשוואות הראשונה או לשנייה). תנאי הנאותות מתקיים, משום שאם המערכות איזומורפיות, אין דרך לדעת את מקורה של מערכת המשוואות שנשלחה למוכיח, ולא ניתן לשטות במוודא בהסתברות העולה על $1/2$. מנגד, תנאי השלמות מתקיים, משום שאם המערכות אינן איזומורפיות, גם עותקים איזומורפיים שלהם יהיו לא איזומורפיים.

תוצאה כללית

נחזור לשאלה הטבעית יותר של קיום פתרון (בשלמים) למערכת של משוואות. כזכור, לטענה שקיים פתרון כזה יש הוכחה פשוטה מסוג NP, אבל מה בדבר הטענה על אי-קיום פתרון כזה? גם

המילה "אקראיות" אינה מופיעה בשם "הוכחות אינטראקטיביות", אבל לא קשה לראות שאקראיות חיונית ליתרון של הוכחות מסוג IP לעומת הוכחות מסוג NP. לו היה המוודא במערכת האינטראקטיבית דטרמיניסטי, היה המוכיח יכול לדעת מראש את כל הודעותיו. במקרה כזה הוא יכול היה פשוט לשלוח הודעה יחידה (אכן הוכחה מסוג NP) אשר כוללת את כל השיח בין שני השחקנים המקוריים. הלכה הכללית היא שאין טעם לנהל שיח עם שחקן שניתן לחזות בקלות את כל הודעותיו. שיח הוא בעל ערך עבורנו רק אם הודעותיו של הצד השני אינן ידועות מראש, אם משום שהן אקראיות ואם משום שלרשות הצד השני משאבי חישוב רבים יותר.

בשלב זה ראוי שנפנה להגדרה המפורשת של **מערכות הוכחה מסוג IP**, אשר מבוססת על פרשנות מחודשת של תנאי השלמות והנאותות, פרשנות אשר מתייחסת למושג של עדות מסתברת (קרי: מושגי השלמות והנאותות יהיו הסתברותיים):

- **תנאי השלמות** דורש כי עבור כל טענה נכונה (מהסוג הרלוונטי) יש למוכיח דרך (קרי: "אסטרטגיה") לגרום למוודא לקבל את הטענה כתקפה בהסתברות 1.

יש טעם גם בתנאי שלמות מוחלש יותר אשר דורש שהסתברות הקבלה תהא לפחות $2/3$. למעשה ניתן להמיר מערכות מהסוג המוחלש למערכות מהסוג החזק הנ"ל.

- **תנאי הנאותות** דורש כי כל ניסיון לשטות במוודא ולגרום לו לקבל טענה שקרית ייכשל בהסתברות לפחות $1/2$.

אומנם נפילה בפח בהסתברות $1/2$ היא דבר שקשה להסכין עימו, אלא שניתן להוריד כרצוננו את ההסתברות שניפול בפח בהפעלות חוזרות של המערכת.

ההערכה (ללא הוכחה נלווית). מערכות הוכחה כאלו, שהן בעלות חשיבות מעשית רבה, נקראות דו־יעילות (doubly efficient).

הוכחות באפס־מידע

תחושה בסיסית שלנו בנוגע להוכחות היא שהן מלמדות אותנו על הטענה יותר מאשר על עצם היותה של הטענה נכונה. אכן, הוכחות נקראות ונלמדות בדרך כלל כדי להעמיק את הבנת הטענה ואת ההקשר הרחב שלה. בניגוד לכך, הוכחות באפס־מידע (zero-knowledge) מתוכננות מתוך כוונה שלא למסור דבר מלבד עצם נכונות הטענה. זו תכונה מבלבלת ולא טבעית בעליל, והיא אינה יכולה להתקיים בהוכחות מסוג NP. לכן היא מנוסחת, ולעיתים אף מושגת, בהוכחות מסוג IP.

הבה נתבונן בהוכחה מסוג IP שבה השתמשנו להוכחת אי־קיום איזומורפיזם בין שתי מערכות של משוואות. בהוכחה זו המוודא אינו לומד דבר מהמוכיח, משום שהוא רק בודק שתשובת המוכיח מתאימה לבחירה הראשונית שלו (של המוודא) אשר ידועה למוודא. הטעם היחיד בבדיקה זו הוא השתכנועות בנכונות הטענה שהמערכות הנתונות (של משוואות) אינן איזומורפיות.

בשלב זה ראוי לתהות איך ניתן להגדיר את האמירה "ההוכחה אינה מגלה דבר מלבד עצם נכונות הטענה" אשר השתמשנו בה לתיאור המושג של "הוכחה באפס־מידע". התשובה היא שההגדרה של הוכחה באפס־מידע של טענה מפרשת את האמירה הזאת כדרישה כי כל דבר אשר ניתן לחשב ביעילות לאחר קבלת הוכחה באפס־מידע, ניתן לחישוב יעיל גם על סמך הטענה המוכחת עצמה (בהנחה שהיא נכונה). במילים אחרות, ההגדרה מכוונת לשני עולמות שונים: העולם הממשי שבו מתנהל תהליך

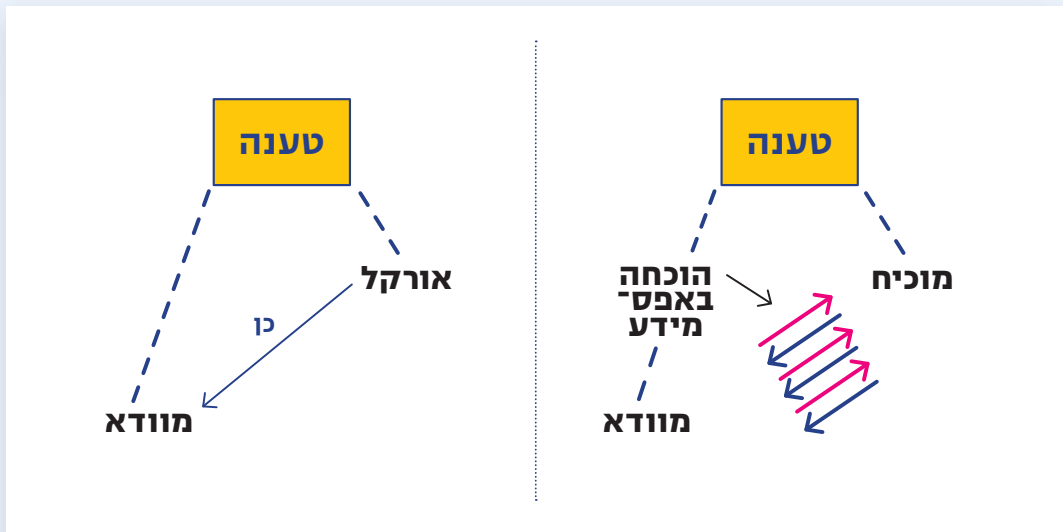
כאן באות לעזרה הוכחות אינטראקטיביות, אלא שבמקרה זה לא אוכל להציג כאן את ההוכחה (מסוג IP), משום שהיא מסובכת מדי. אבל אני מבקש לומר במפורש את התוצאה המתקבלת: **קיימות הוכחות אינטראקטיביות לטענה שלמערכת משוואות נתונה אין פתרון בשלמים.**

באופן כללי יותר, **לכל סוג של טענות שיש להן מערכת הוכחה מסוג NP, יש מערכת הוכחה מסוג IP לטענות ההפוכות** (מובן שלכל טענה ספציפית והיפוכה, רק אחת ממערכות ההוכחה מצליחה לשכנע את המוודא המתאים). אינטואיטיבית, הוכחות מסוג NP מספיקות לשם שכנוע בקיום של דבר־מה, ואילו לשם שכנוע באי־קיומו של אותו דבר אפשר להשתמש בהוכחות מסוג IP (אולם ככלל, הוכחות מסוג NP לא יצלחו למטרה זו).

שתי הערות

בהוכחה האינטראקטיבית לטענה ששתי מערכות אינן איזומורפיות נעשה שימוש מהותי בעובדה שהבחירה האקראית של המוודא נשמרת בסוד, ורק התוצר שלה נמסר למוכיח. מסתבר שלאותו סוג טענות יש הוכחה אינטראקטיבית שמשתמשת רק באקראיות שאינה נשמרת בסוד. באופן כללי, כל מערכת הוכחה אינטראקטיבית ניתנת להמרה למערכת שמשתמשת רק באקראיות גלויה. במילים אחרות, בהקשר של קיום מערכות הוכחה מסוג IP אין יתרון לשאלות מתוחכמות (אשר מסתירות את האקראיות) על שאלות אקראיות.

הדיון שלנו בהוכחות מסוג IP התמקד ביעילות של המוודא ולא עסק כלל בסיבוכיות האסטרטגיה של המוכיח. דיון מעודן יותר עוסק בסיבוכיות של שתי המשימות ומתמקד במקרה שבו הסיבוכיות של אסטרטגיית המוכיח אינה עולה בהרבה על סיבוכיות הערכת האמת של הטענה (ללא הוכחה נלווית), ואילו סיבוכיות המוודא נופלת מסיבוכיות



איור 3. הוכחות באפס-מידע: העולם הממשי נגד העולם הדמיוני

פונקציות שהן קלות לחישוב אך קשות להיפוך (one-way functions), שזו הנחה הכרחית לקיום הקריפטוגרפיה המודרנית, ובייחוד לקיום מערכות הצפנה בטוחות וחתומות דיגיטליות שאינן ניתנות לזיוף.

באופן כללי יותר, כל טענה אשר יש לה הוכחה מסוג NP ניתנת להוכחה באפס-מידע. יתר על כן, אסטרטגיית המוכיח בהוכחת האפס-מידע הזאת ניתנת למימוש ביעילות בהינתן הוכחה מסוג NP לאותה טענה. (נזכיר כי גם לכל הוכחה מסוג IP יש הוכחה באפס-מידע.)

הוכחות הניתנות לבדיקה הסתברותית

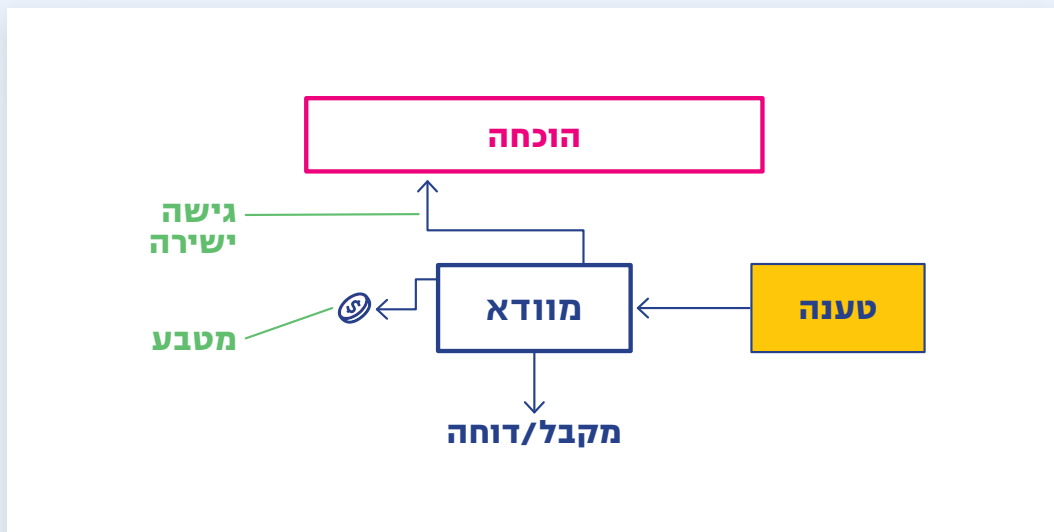
נחזור כעת להוכחות מסוג NP ונשים מאחורינו את ההוכחות מסוג IP, אבל נשמור על האפשרות להשתמש באקראיות לשם וידוא של הוכחות.

תחושה בסיסית שלנו בנוגע להוכחות מסורתיות – ובייחוד מסוג NP – היא שיש לקרוא אותן במלואן. הבוחרים לדלג על חלק מן ההוכחה מסתכנים

ההוכחה האינטראקטיבית ועולם דמיוני שבו ישות מהימנה אומרת לנו שהטענה נכונה (ראו איור 3). הגדרת אפס-מידע אומרת שכל חישוב שניתן לבצע בעולם הממשי ניתן לביצוע, בערך באותו מאמץ, גם בעולם הדמיוני.

אכן, הטעם היחיד בקבלת הוכחה באפס-מידע הוא ההשתכנועות עצמה בנכונות הטענה המוכחת, ויש בכך טעם רק כאשר אין לנו אמון גמור בישות הטוענת לנכונות הטענה. היעדר אמון בין ישויות שונות הוא המצב המייסד של תחום הקריפטוגרפיה, ואכן להוכחות באפס-מידע יש שימושים רבים בתחום זה. בעיקר הן מאפשרות לישות להוכיח שהיא נוהגת כהלכה, לפי סודותיה, מבלי לגלות דבר על סודותיה.

אם נחזור לדוגמה של טענות על קיום פתרון בשלמים של מערכת משוואות, הרי שהוכחה באפס-מידע של טענה כזאת משכנעת בקיום פתרון מבלי למסור מידע אף לא על אחד מהפתרונות. העובדה המדהימה היא שהוכחות אפס-מידע כאלו קיימות, בהנחה שקיימות



איור 4. מערכות PCP: למוודא יש גישה ישירה לביטים שבהוכחה.

מהאורך המינימלי הנחוץ להוכחה מסוג NP על פי ההשערות המקובלות בנוגע למחלקת הסיבוכיות (NP).

לצד, הרעיונות שבבסיס הבנייה של מערכות הוכחה מסוג PCP אינם ניתנים לתיאור במסגרת מאמר זה. לפיכך אסתפק בציטוט של תוצאה מרכזית בתחום שאומרת כי כל הוכחה מסוג NP ניתנת לתרגום יעיל להוכחה מסוג PCP. במערכת ה-PCP המתקבלת המוודא קורא רק שלושה ביטים אקראיים בהוכחה ודוחה בהסתברות של לפחות 0.49 כל "הוכחה שקרית" לכל טענה שקרית, ואילו בהסתברות 1 הוא מקבל הוכחה (מתורגמת כנ"ל) לטענה נכונה. הקבוע 0.49 מייצג מספר קבוע כלשהו הקטן מ-1/2, וגודל זה הוא אופטימלי עבור PCP שבו נקראים רק שלושה ביטים, ושלושה ביטים הם המינימום שיש לקרוא בהוכחת PCP.

לסיום אציין כי לבניית הוכחות מסוג PCP הייתה השפעה דרמטית על חקירתן של בעיות קרוב. הקשר בין הנושאים הללו מיוסד על היותה של הערכת ההסתברות שמערכת PCP מסוימת

בקבלת טענה שקרית, אלא אם הם יודעים ממקור אחר את החלק שעליו דילגו. בניגוד לכך, הוכחות הניתנות לבדיקה הסתברותית, שייקראו הוכחות מסוג PCP (Probabilistically Checkable Proofs), מאפשרות להעריך את נכונותן באמצעות קריאה של חלקים קטנטנים בהן (ראו איור 4). כפי שיודגם מיד, על הוכחות אלו להכיל הרבה יתירות (redundancy), ואת החלקים הנבחרים בהן יש לבחור באקראי.

אם נחזור לדוגמה ששימשה אותנו עד כה – קיום פתרון בשלמים למערכת משוואות – הרי שהוכחה מסוג NP שמתארת פתרון כזה אינה ניתנת לבדיקה הסתברותית, משום שקיימות מערכות של משוואות שבהן סתירה בנוגע לערך של משתנה יחיד היא שאחראית להיעדר פתרון בשלמים למערכת. בכך אני רואה עדות להכרח שהוכחה מסוג PCP תכיל יתירות. באשר לאקראיות, יש לשים לב שמוודא דטרמיניסטי שבדק מספר קטנטן של מקומות בהוכחה מסוג PCP מגדיר למעשה הוכחה מסוג NP שהיא קצרה באופן לא סביר (קרי: אורך ההוכחה החדשה קטן



איור 5. באדיבות הראל לוז

כמו בקריפטוגרפיה ובחישוב מבוזר, יש יתרון חישובי ביכולתו של צד אחד לנקוט פעולות שאינן ניתנות לחיזוי על ידי הצד השני. הקשר שבין חישוב לאקראיות נמצא ביסוד התורה של פסאודו־אקראיות שם מוגדרים אובייקטים כ"אקראיים למעשה" אם לא ניתן להבחין ביעילות בינם לבין אובייקטים אקראיים ממש. ■

מקבלת טענה נתונה – בעיית קירוב, וניתן לתרגם אותה להרבה בעיות קירוב טבעיות. אציין גם כי הוכחות מסוג PCP קשורות לתחום המחקר הידוע בשם "בדיקת תכונות" (property testing).

ההקשר הרחב

מערכות הוכחה אקראיות הן מקרה מובהק של הקשרים שבין חישוב לאקראיות. במקרה זה,

מקורות

חרגתי במודע מ"הקוד האקדמי" אשר מחייב אזכור של שמות החוקרים אשר תרמו לגוף הידע שהצגתי במאמר זה. אזכורים כאלו נראים לי חסרי טעם בסקירה המיועדת לקהל הרחב. יתר על כן, אזכור שמות ספורים מרחיב את הפער בין "ידוענים" לבין "חוקרים מהשורה", פער אשר סותר את העובדה שהמדע הוא פרויקט קהילתי.

המקורות להלן (פרי עטי) מיועדים ל"תלמידי חכמים" (קרי: סטודנטים בלימודי הסמכה ומוסמכים במדעי המחשב ומתמטיקה). המקורות [3-5] מכסים בהרחבה את עיקר החומר שהוצג במאמר, ואילו המקורות [1, 2, 6, 7] מכסים נושאים שהוזכרו בקצרה.

- 1) Oded Goldreich. Foundation of Cryptography: Volume 1 – Basic Tools. Cambridge University Press, 2001.
- 2) Oded Goldreich. Foundation of Cryptography: Volume 2 – Basic Applications. Cambridge University Press, 2004.
- 3) Oded Goldreich. Probabilistic Proof Systems – A Primer. In Foundations and Trends in Theoretical Computer Science, Volume 3, Issue 1, 2007.
- 4) Oded Goldreich. Computational Complexity: A Conceptual Perspective. Cambridge University Press, 2008.
- 5) Oded Goldreich. P, NP, and NP-Completeness: The Basics of Complexity Theory. Cambridge University Press, 2010.
- 6) Oded Goldreich. Introduction to Property Testing. Cambridge University Press, 2017.
- 7) Oded Goldreich. On Doubly-Efficient Interactive Proof Systems. In Foundations and Trends in Theoretical Computer Science, Volume 13, Issue 3, 2018.

מערכות אקולוגיות בעידן של שינויים גלובליים



מאת פרופ' תמר דיין

ועל המבנה של חברות אקולוגיות. מכיוון שמדובר במערכות הביולוגיות המורכבות ביותר – מדובר באתגר מדעי עצום.

מחקריי התמקדו בהבנת הגורמים שמשפיעים על המבנה ועל ההרכב של חברות אקולוגיות לפי קנה המידה האקולוגי והאבולוציוני וברתימת הממצאים המדעיים והתובנות האקולוגיות למאמץ להגנה על חברות אקולוגיות בעידן של שינויים גלובליים.

מבנה, צורה ויחסי הגומלין בחברות אקולוגיות

שאלה קלאסית באקולוגיה של חברות היא כיצד מתקיימים כל כך הרבה מינים זה בצד זה, במיוחד

מדע האקולוגיה עוסק בהבנת הגורמים המשפיעים על השפע ועל התפוצה של יצורים חיים, אך מספרם של אלו עדיין אינו ידוע. עד כה במאמץ מדעי מאמצע המאה השמונה-עשרה תוארו כשני מיליון מינים, אלא שיצורים אאוקריוטים (בעלי גרעין תא מובחן) לבדם מונים מיליונים רבים, ומאליו יובן שהמספר המוערך של המינים הפרוקריוטים (חסרי גרעין) הוא עצום, כדי טריליון מינים. מכאן שבמקומות שונים מתקיימות חברות אקולוגיות המורכבות ממינים רבים ומגוונים, והם מקיימים ביניהם יחסי גומלין מורכבים וכמובן משפיעים על הסביבה הפיזית שבה הם מתקיימים מחד, ומושפעים ממנה מאידך. תחום האקולוגיה של חברות עוסק בהבנת יחסי הגומלין הללו וכן בהשפעתם ובהשפעת תנאי הסביבה על ההרכב

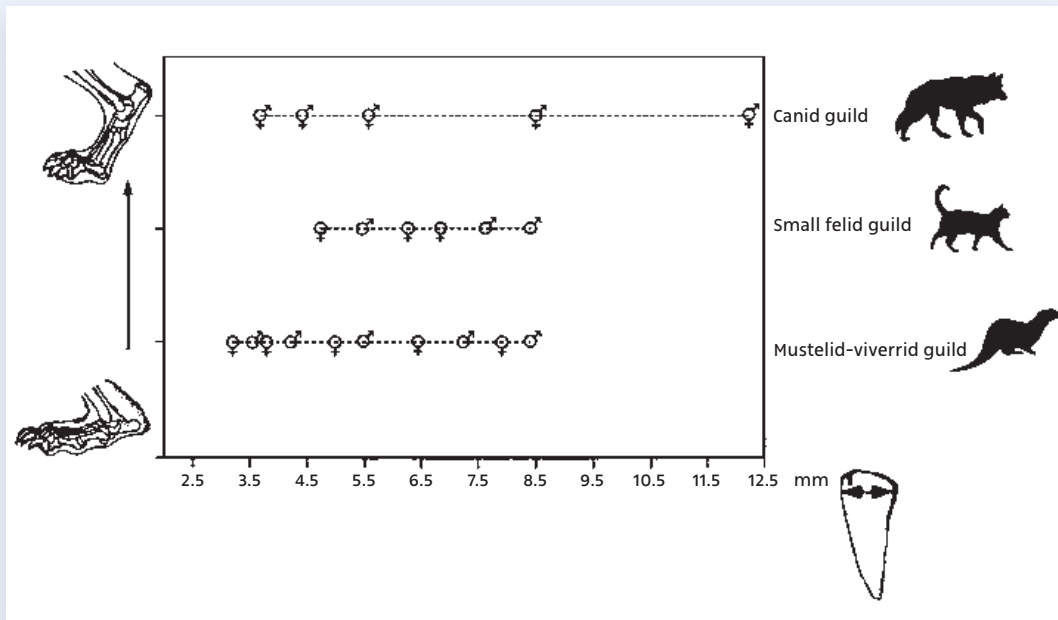


איור 1. אוסף האב שמיץ, המוצג במוזיאון הטבע ע"ש שטיינהרדט שבאוניברסיטת תל אביב, כולל כמה מהמוצגים הנדירים במוזיאון: הנמר האחרון שניצוד בהרי ירושלים; תנין יאור, שהיה אחד האחרונים שחיו בנחל התנינים; הברדלס האחרון שניצוד בסביבות ים המלח וחתולי בר טהורי גזע, שאינם נראים עוד בטבע בישראל. לצידם מוצגים פריטים מארצות רחוקות. המוזיאון פועל בחסות האקדמיה הלאומית הישראלית למדעים. הוא נוסד בידי פרופ' דיין (כותבת מאמר זה), שמכהנת בו כיושבת ראש, ומנהלו הוא אלון ספן. (צילום: איתי בנית)

צריכות להיות קבוצות ההתייחסות ליחסי הגומלין הללו בין מינים.

אלו הן שאלות מפתח להבנת אופיין של חברות אקולוגיות, ולמרות חשיבותן הן היו שנויות במחלוקת עמוקה במשך שנים. בראשית דרכי האקדמית התמקדו מחקריי בשאלות הבסיסיות האלו ובמיוחד בשאלה כיצד אנחנו מגדירים גילדות אקולוגיות, קרי קבוצות מינים דומים המנצלים אותו סוג משאבים ובאופן דומה, ואם לתחרות בין-מינית ותוך-מינית יש השפעה על גודלם של המינים המתחרים, ומכאן – אם לגודלם של בעלי חיים יש השפעה על הרכב חברות אקולוגיות. ◀

כאשר מדובר במינים קרובים או דומים זה לזה, ולכן – בעלי פוטנציאל להתחרות זה בזה. ההנחה היא שהמינים מתחלקים על צירים שונים של הנישה האקולוגית, ובכך מתקיימת ביניהם הפרדה במידה המאפשרת דו-קיום. צירי הנישה האקולוגית העיקריים שנחקרו רבות היו הפרדה בשימושי בתי-גידול או מיקרו-בתי-גידול (micro habitats) והפרדה בגודל פריטי המזון, שמתאפשרת הודות להבדלי גודל בין מינים מתחרים. עם זאת מורכבותן של חברות אקולוגיות היא כה גדולה, שבמהלך השנים עלו שאלות חשובות ובסיסיות, אפילו בסוגיה כיצד מאפיינים את המינים המקיימים יחסי גומלין ישירים ביניהם, ומכאן השאלה מי



איור 2. קוטר הניב המשמש לטריפה בגילדות הטורפים של ישראל המוגדרות על פי ההתאמה שלהן לתנועה, קרי המורפולוגיה הפונקציונלית שלהן. קוטרי הניב מציגים דגם השונה באופן מובהק מן האקראי ומעיד על תפקיד התחרות בקביעת הרכב חברות אקולוגיות.

מקור: Dayan, T., and D. Simberloff. *Patterns of size separation in carnivore communities*. In: Gittleman, J.L. ed. *Carnivore Behavior*, 2nd ed. Cornell University Press: Ithaca and London. pp. 243–266, 1996.

ובכך מתאפשר קיום זה בצד זה של מינים בעלי פוטנציאל לתחרות. נראה שההפרדה בגודל הגוף שנחקרה רבות בעבר היא בעיקר תוצר של הבחירה הטבעית הישירה שפעלה על האברים הקשורים בתזונה ומשקפת את המתאם (קורלציה) הכללי שבינם לבין גודל הגוף של בעל החיים. ייתכן שמכאן נבעו חילוקי הדעות העמוקים על קיומה, או היעדרה, של הפרדה בציר הגודל: ההפרדה בגודל הגוף הייתה חלקית משום שהבחירה הטבעית לא פעלה עליה ישירות (איור 2).

המפתח להבנת הרכב גילדות של בעלי חיים בחברות אקולוגיות ולהפרדה בציר המזון היה גם המנוף להתמודדות עם שאלה מהותית נוספת – מהם הגורמים שמשפיעים על האבולוציה של גודל גופם של בעלי חיים על גבי איים. מינים על

ההתמודדות במחקרי עם שאלות אלו התבססה על תובנות מתחום המורפולוגיה הפונקציונלית שמשקפת הן את ההיסטוריה האבולוציונית והן את התכונות האקולוגיות של המינים. ההתבססות עליה מלמדת אותנו מי הם המינים הדומים זה לזה מבחינה מורפולוגית בהבנה שהדמיון הזה משקף את התפקוד שלהם, ועל כן הם עשויים להתקיים באותה גילדה אקולוגית, דהיינו קבוצת המינים המשתמשים באותו סוג משאבים ובאופן דומה.

המורפולוגיה מלמדת אותנו גם כיצד מינים צורכים את המשאבים, ולכן כאשר אנחנו מתמקדים בהפרדה על ציר המשאבים, מתברר שהמאפיינים המורפולוגיים הקשורים ישירות בצריכת המשאבים הם שמאפשרים הפרדה במשאבי המזון בין בעלי חיים ממינים שונים (ואפילו בין זכרים לנקבות),

צוהר לעולם שלא נחקר עד אותה עת – תפקידו החשוב של ציר הזמן היממתי בדו־קיום בין מינים שונים של בעלי חיים והשפעתו של מכלול לחצי הברירה של יחסי גומלין ושל אקלים על עיצוב זמני הפעילות של מינים שונים ובתנאים שונים. כמו כן למדנו את תפקידן החשוב של מגבלות אבולוציוניות בעיצוב זמני הפעילות של בעלי חיים.

מבט מקור-אבולוציוני על גודל גוף זמני פעילות

נשאלת השאלה עד כמה ההפרדה לאורך צירי הנישה האקולוגית משפיעה על האבולוציה של בעלי חיים בממד הזמן. דוגמה מרתקת לזה אנחנו מוצאים באבולוציה של גודל גוף ושל זמני פעילות יממתיים בין דינוזאורים לבין יונקים. היונקים הם מחלקה של בעלי חיים שהתפתחה לפני כ־225 מיליון שנה, ובמשך כ־160 מיליון שנה התקיימה בצד הדינוזאורים. הדינוזאורים היו יצורים גדולים, ורבים מהם אפילו ענקיים, ששלטו ביבשות, ואילו היונקים שהתקיימו בצידם היו קטנים, והתאוריה הניחה שהיו פעילי לילה. הדינוזאורים נכחדו לפני כ־65 מיליון שנה, בהרף עין גאולוגי, כנראה בעקבות פגיעת מטאוריט בכדור הארץ.

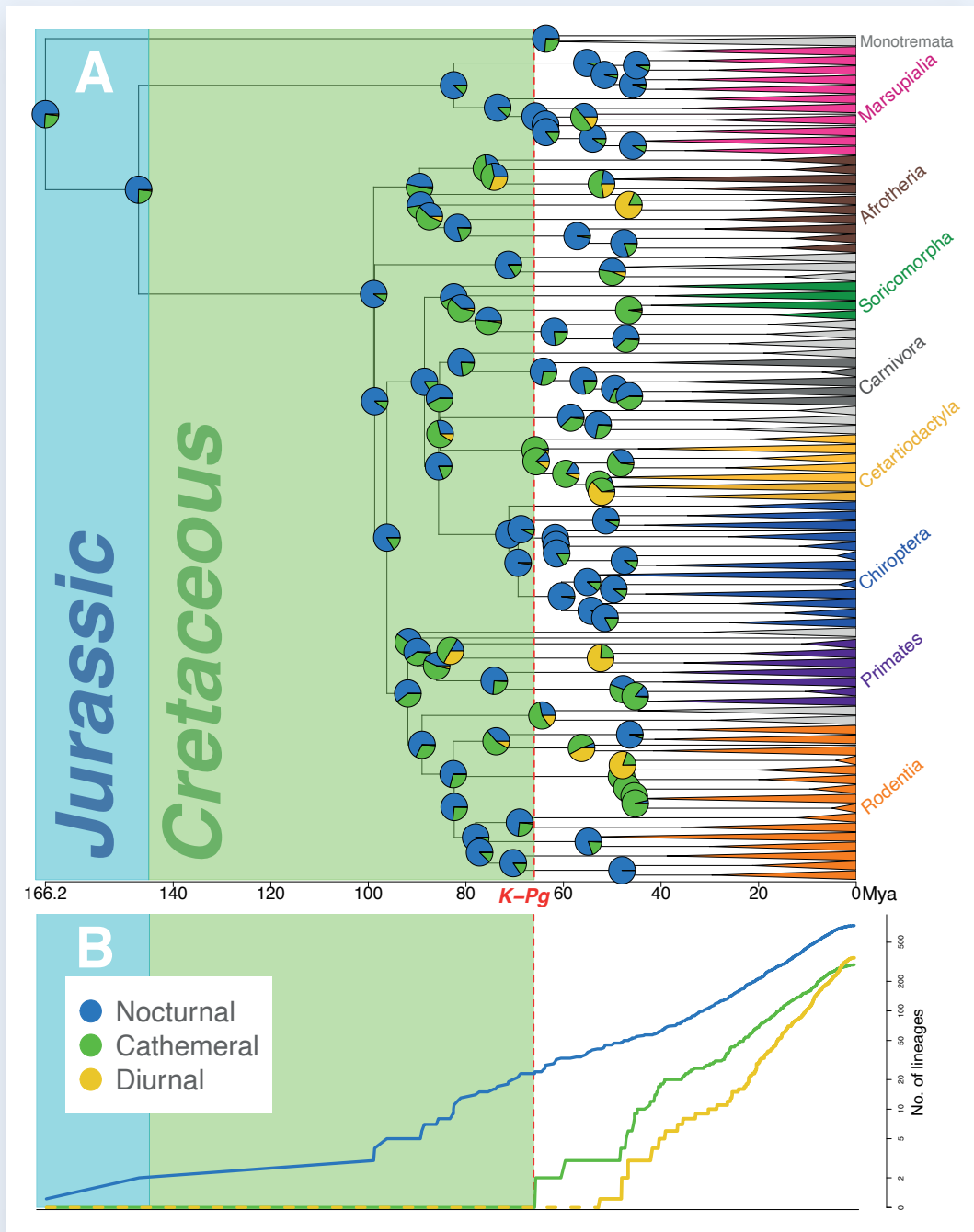
מייד לאחר מכן, בסוף הקרטיקון, אנחנו מגלים זינוק אקספוננציאלי בגודל הגוף המרבי של היונקים. משמעות הדבר היא שהדינוזאורים שלטו בנישות אקולוגיות מגוונות, והיונקים יכלו לפלוש אליהן ולמלא אותן רק עם הכחדת הדינוזאורים. אנחנו רואים אותו דגם ביונקים מקווים אבולוציוניים שונים, חלקם מינים שנכחדו ואחרים עדיין קיימים, ביבשות שונות, והדבר מצביע על חוקיות: גידול אקספוננציאלי ועצירה באותו סף של גודל גוף מרבי.

גבי איים שונים לעיתים שינוי דרמטי בגודל גופם מאותם מינים שעל גבי יבשות – ממותות זעירות וצבי ענק, לדוגמה. המינים בחברות אקולוגיות שעל גבי איים מעטים מאלה שביבשות, הן בשל גודלם הקטן יחסית של איים והן, לעיתים קרובות, בשל הקושי לאכלס חלק מן האיים.

גודל גופם של מינים של בעלי חיים אנדותרמיים (משרעת הטמפרטורות הצרה של גופם נשמרת בעזרת תהליכים פיזיולוגיים פנימיים) מושפע גם מטמפרטורת הסביבה, ולכן האבולוציה של גודל הגוף של בעלי חיים מושפעת הן ממבנה החברה האקולוגית, הן מקיומם של מינים מתחרים והן מן התנאים הא־ביוטיים, כשכולם פועלים בו־זמנית.

ציר הזמן היממתי בחברות אקולוגיות

במאמץ להבין את ההרכב ואת המבנה של חברות אקולוגיות הוזנח מחקרית ציר חשוב במשך שנים ארוכות והוא ציר הזמן היממתי, ועל כן הוא היה נושא נוסף שבחרתי להתמקד בו עם קבוצת המחקר שלי בד בבד עם המחקרים שהתמקדו באבולוציה של גודל גוף. מחקר זה החל במערכת ניסויי שדה בעין גדי שמתקיימים בה שני מיני מכרסמים מן הסוג קוצן זה בצד זה – אחד פעיל יום ואחד פעיל לילה – ומחקר קודם, כבר משנות השישים של המאה העשרים, הראה כי כאשר מסלקים את המין הלילי מן השטח המשותף, המין היומי עובר גם לפעילות לילה, מה שמרמז על דחיקה תחרותית שגורמת להפרדה אקולוגית בזמני פעילות. על כן כדי להבין את תפקיד ציר הזמן היממתי במערכת האקולוגית בחרתי למקד את המחקר ביחסים שבין המינים הללו וכן במכלול יחסי הגומלין שלהם עם הטורפים שלהם (עופות, יונקים וזוחלים), בהשפעת זמינות המזון (פרוקי רגליים) עליהם, בהשפעת מבנה בית הגידול ובהשפעת תנאי האקלים. אלו קרעו לנו



איור 3. למעלה: שחזור האבולוציה של זמני פעילות לאורך אילן היוחסין של היונקים. תרשימי עוגה מייצגים את התמיכה הסטטיסטית בדפוסי הפעילות השונים בכל ענף אבולוציוני (כחול – פעיל לילה; צהוב – פעיל יום; ירוק – פעיל יום ולילה). אורך ענפי האילן האבולוציוני פרופורציוני לזמן. לא פורטו ענפים שהתפצלו לפני פחות מ-45 מיליון שנה כדי להקל את ההתמצאות. למטה: מספר המינים (ענפים אבולוציוניים) המשתתפים לכל דפוס פעילות לאורך האבולוציה של היונקים. פעילות יום (מעורבת) מופיעה לראשונה מייד לאחר הכחדת הדינוזאורים לפני 66 מיליון שנה (קו אדום מרוסק). מקור: Maor, R., T. Dayan, H. Ferguson-Gow, and K.E. Jones. Temporal niche expansion in mammals: from a nocturnal ancestor after dinosaur extinction. *Nature Ecology & Evolution* 1:1889–1895, 2017.

איש בסוף המאה העשרים ואחת. יתר על כן, בשנים אלו חלו חידושים טכנולוגיים עצומים ופותרו חומרים סנתטיים חדשים בקצב חסר תקדים. התוצר המקומי הגולמי (תמ"ג) הממוצע לאדם גדל מאוד, ויש לזה השלכות עצומות על קצב צריכת המשאבים על פני כדור הארץ ועל קצב ייצור הפסולת, ומכאן על השפעת האדם על מערכות אקולוגיות.

שינויים אלו גורמים לירידה בתחום התפוצה של מינים, בגודל אוכלוסייתם, ובסופו של דבר – להכחדה מואצת של אוכלוסיות ומינים, הנחשבת לאירוע ההכחדה ההמוני הגדול ביותר מאז אירוע ההכחדה הגדול האחרון, שבו נכחדו הדינוזאורים, וכפי שראינו לעיל, השפעתו של אירוע זה על האבולוציה של בעלי חיים הייתה דרמטית. משמעות השינויים האלו היא השפעה גדולה על המבנה ועל התפקוד של חברות אקולוגיות בהיבטים מגוונים. מכיוון שהמין האנושי עבר אבולוציה במערכת אקולוגית קיימת, הוא תלוי תלות מוחלטת בתפקודים של מערכות אקולוגיות שזכו לכינוי "שירותי המערכת האקולוגית", והם למעשה תפקודים תומכי־חיים. אם המערכת נפגעת, אספקת השירותים הללו נפגעת. דוחות ומחקרים בין־לאומיים כבר מצביעים על הפגיעה הזאת ועל הסיכון הגלום בה לעתיד המין האנושי.

ההכרה בעוצמת השינויים הללו הייתה איטית גם בקהילה המדעית, אולם בעשורים האחרונים מדענים ודוחות בין־לאומיים מצביעים על התהליכים שמשפיעים על המגוון הביולוגי ועל תפקודי המערכות האקולוגיות. עוצמת השינויים הללו כה גדולה, עד שהיום רבים מכנים את העידן שבו אנחנו מצויים "אנתרופוקן" – עידן המתאפיין בראש ובראשונה בהשפעת האדם על מערכות כדור הארץ.

גודל הגוף כאמור הוא אחד מצירי הנישה האקולוגית והוא מתקיים במתאם כללי גבוה עם גישה למשאבים, ולכן נראה שהתקיימה תחרות בין דינוזאורים ליונקים בקנה המידה המקרו־אבולוציוני על הציר הזה. ברור גם שיש מגבלה אקולוגית־אבולוציונית לגודל הגוף המרבי של יונקים.

עוד מתברר שהדינוזאורים שלטו גם בנישה של פעילות יום. אימתנו מחקרית את ההשערה שעד להכחדתם היו היונקים ליליים בלבד, ורק עם היעלמם של הדינוזאורים התאפשרה האבולוציה של חלק מקבוצות היונקים לפעילות יום, ולמעשה כבני אדם אנחנו שייכים לקבוצה כזאת – לפרימטים, שרוב חבריה הם פעילי יום (איור 3). לכן אין ספק שגם ציר הזמן היממתי הוא ציר של הנישה האקולוגית שהיה מושא לתחרות גם בקנה המידה הזה. על כן קנה המידה המקרו־אבולוציוני מלמד אותנו על החשיבות העצומה של שני הצירים האלו – ציר הגודל וציר הזמן היממתי – לא רק בקנה המידה האקולוגי אלא גם בקנה המידה האבולוציוני.

מערכות אקולוגיות באנתרופוקן

בעודנו עמלים לפענח את החוקיות שבהרכב ובמבנה של חברות אקולוגיות, דהיינו להבין את הכללים ואת הסדר המתקיימים במערכת האקולוגית, חלו שינויים עצומים בסביבה הטבעית שהשפיעו השפעה עצומה על הסדר הזה. במאה השנים האחרונות גדלה אוכלוסיית האדם בעולם ביותר מפי ארבעה, והיום יש יותר מ־8 מיליארד איש על פני כדור הארץ. מדובר באירוע חסר תקדים בהיסטוריה של המין האנושי והוא גם לא יישנה: קצב גידול האוכלוסייה הואט בממוצע עולמי, ואוכלוסיית האדם צפויה להגיע לשיא של 10–11 מיליארד

משפיעים על הרכב מינים, על מבנה החברה ועל יחסי הגומלין בין המינים השונים לסביבתם. להלן אציג מעט דוגמאות להמחשה, מתוך מחקרים של קבוצת המחקר שלי.

הרס, קיטוע וטרנספורמציה של שטחים טבעיים

הרס, קיטוע וטרנספורמציה של בתי גידול טבעיים הם הגורמים הראשונים בעולם ובisrael לאובדן המגוון הביולוגי. מחקרנו שלנו התמקדו בשטחים הגדולים שעברו טרנספורמציה בישראל – בראש ובראשונה בשטחי חקלאות ומרעה ובשטחי יער נטוע. מחקר דגמי המגוון הביולוגי בשטחים אלו שעברו טרנספורמציה גדולה מצביע על הבדלים עמוקים בין טיפולים חקלאיים ויערניים שונים ומראה כי מינים מסוימים נמשכים לפעולות ממשק שונות, ואילו מינים אחרים נפגעים מהן, ולדבר השפעה ניכרת על יחסי הגומלין בין מינים שונים. לימוד הדגמים הללו מאפשר להבין את השינויים המתרחשים בחברות אקולוגיות ובה בעת נותן את הכלים להמליץ על התנהלות שתמזער את הפגיעה במגוון הביולוגי ותאפשר שימור רציפות ככל הניתן כדי להקטין את הקיטוע ולמזער את הפגיעה באוכלוסיות בעלי חיים. הכלים הללו הם כלים ממשקיים (כלים של ניהול שטח), כלים תכנוניים וכלים אסדרתיים, ושאלה חשובה היא מהי מידת האפקטיביות שלהם בהגנה על המגוון הביולוגי וכיצד ניתן למקסם את יכולותיהם. בגלל המורכבות של מערכות אקולוגיות נחוץ גם פיתוח אינדיקטורים אקולוגיים שיהוו קיצור דרך למעקב אחר מצבן לצורך שימור וניהול בר-קיימה. בעולם שאוכלוסייתו גדלה במידה דרמטית ובמדינה צפופה לידע הזה חשיבות קריטית לניהול ההון הטבעי.

חלק מן המחקרים הללו התמקד גם בהבנת השפעתם של שינויים בשימושי שטח על

כיום ברור שמדובר באתגר עצום הניצב בפני האנושות, ושעל המדע להירתם להתמודדות איתו, להבין את השפעת השינויים על חברות אקולוגיות ולפתח כלים מבוססי-מדע כדי למזער אותם. מדובר בראש ובראשונה בשאלות אקולוגיות, אך ההתמודדות עימן דורשת כלים גם מתחום התכנון, האסדרה, החינוך, הכלכלה, היחסים הבין-לאומיים, המשפט, החקלאות, המדיניות ואפילו מדיניות המדע, וכל אלו נוספו למורכבות המדעית העצומה במחקר חברות ומערכות אקולוגיות. במענה לאתגר העצום הזה נוסד באמצע שנות השמונים של המאה הקודמת תחום המחקר הביולוגי של שמירת הטבע (conservation biology), שלמעשה הפך לתחום מדעי מולטידיסציפלינרי (conservation science), כשהוא מטמיע בו את הכלים מתחום מדעי החברה, ובתוך התקופה הזאת נוסדו עשרות כתבי עת מדעיים המתמקדים בהיבטים שונים של המדע הרב-תחומי הזה.

במענה לאתגר זה הסב דור של אקולוגים את המחקר שלו ממחקר בסיסי המנסה להתמודד עם שאלות מורכבות בהבנת חברות אקולוגיות ומתמקד בחברות אקולוגיות טבעיות, למחקר יישומי בתחום שמירת הטבע ברותמו את התובנות האקולוגיות ומתוך הבנת הדחיפות העצומה של ההתמודדות עם אתגרים אלו. גם הרבה מן המחקר שלי הוסב להתמודדות עם משברי הסביבה, ובמעבדתי צמח דור של מדענים צעירים ואיכותיים שהתמודדו עם שאלות מגוונות של מחקר שמירת טבע בשילוב של כלים מתחום המדיניות, האסדרה, המשפט, הסוציולוגיה, האנתרופולוגיה והכלכלה. המחקרים הללו עסקו בהיבטים שונים ששייכים לחמש הקטגוריות הראשיות של גורמים עיקריים לאובדן המגוון הביולוגי בעולם ובisrael: הרס, קיטוע וטרנספורמציה של בתי גידול טבעיים, פלישות ביולוגיות, זיהום לסוגיו, ניצול יתר של אוכלוסיות ושינוי אקלים. התהליכים האלו כולם

שינוי אקלים, זיהום אור וציר הזמן היממתי באתרופוקו

למעלה התייחסתי לציר הזמן היממתי, ועתה אחזור ואדגיש נושא זה. ראשית, אנחנו בעיצומו של שינוי אקלים שמשמעותו שתנאי הפעילות בסביבה משתנים, ואחת ההשלכות שלו היא שבאזורים חמים ומתחממים טמפרטורות יום קיצוניות מאלצות בעלי חיים יומיים שאינם מותאמים להן לצמצם את פעילותם למספר שעות קטן ביממה, ובכך מצטמצמים המשאבים שעומדים לרשותם, מה שמגדיל את התחרות ביניהם על ציר הזמן היממתי, או להעביר חלק מן הפעילות שלהם ללילה, ללא ההתאמות הנחוצות לזה ותוך כדי תחרות עם מינים אחרים המותאמים יותר לפעילות לילית.

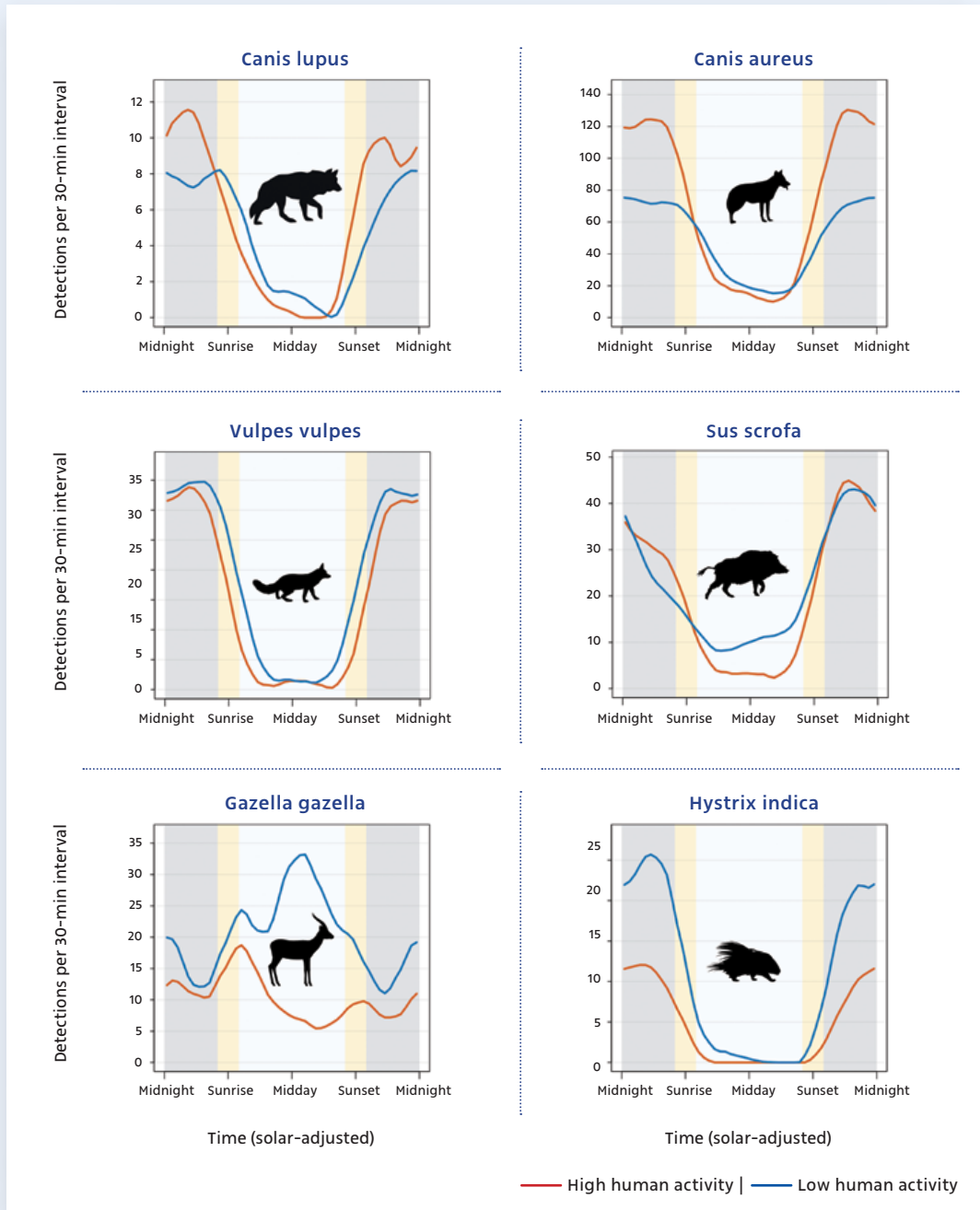
כיונקים יומיים (ראו לעיל) אנו מרגישים בטוחים לפעול ברמות תאורה גבוהות שאלהן הראייה שלנו מותאמת, ועל כן הציף האדם את כדור הארץ בתאורה - תופעה שנקראת "זיהום אור אקולוגי", תופעה נרחבת מאוד בעולם ובמיוחד היום בישראל. התוצאה היא שגם מינים ליליים נאלצים להפחית את שעות הפעילות שלהם בגלל התאורה שחושפת אותם לטורפים ליליים, וזה פוגע באוכלוסיות שלהם, במצבם הפיזיולוגי וברבייה שלהם, כמו גם ביחסי הגומלין בין מינים שונים ובין פרטים שונים באותה אוכלוסייה.

נוסף על הנאמר לעיל, צפיפות האוכלוסייה בעולם, ובייחוד בישראל, עצומה, ואנחנו פעילים כאמור ברמה גבוהה בשעות היום. מחקרנו מגלים כי באזורים שבהם רמת פעילות האדם גבוהה, ואלה שטחים נרחבים בישראל שיש בהם חקלאות, טיילות או פעילויות אחרות, בעלי חיים גדולים אחרים - טורפים כגון זאבים ותנים ונטרפים כמו צבאים - מצמצמים את שעות הפעילות היומית שלהם לשעות שבהן אין פעילות אדם, <

אספקת שירותי המערכת האקולוגית, למשל: מחקרים על השפעת ניהול שטחי החולה משנות החמישים ואילך הן על אספקת שירותי המערכת האקולוגית והן, היום, על המחירים הכלכליים של ניהול השטח. הכלים הנחוצים להתמודדות עם האתגרים שהטרנספורמציה הזאת מייצרת הם בראש ובראשונה מתחומי התכנון, החקלאות והיערנות וכן קבלת הנתונים המדעיים שיאפשרו לייצר איזון בין שימושי שטח ליעדים שונים. למשל, רעיייה מקטינה את כמות החומר האורגני הדליק, ובכך מועילה להקטנת השפעתן של שרפות, אך בה בעת מתברר שעדרי בקר מושכים מיני טורפים והם פוגעים באוכלוסיית הצבי הארץ-ישראלי הנתון בסכנת הכחדה. ומאליו יובן שכל זה מתקיים על רקע שינויי אקלים המשפיעים, וצפויים להשפיע עוד הרבה יותר, על התפוצה ועל השרידות של מיני צמחים ובעלי חיים.

פלישות ביולוגיות

השלכות אקולוגיות נרחבות יש גם לתופעת הפלישות הביולוגיות. פלישות ביולוגיות הן התופעה שבה מינים מועברים ממקום למקום בשל פעילות אדם, ואוכלוסיותיהם גדלות במקום החדש ומסיבות שם נזקים סביבתיים, חקלאיים, תשתיתיים או בריאותיים. מאליו יובן שלמינים חדשים שנוספים לחברות אקולוגיות השפעה דומיננטית על הרכבן ועל מבנן של החברות הללו ועל מכלול יחסי הגומלין שבהן. ההתמודדות המחקרית כללה מיפוי של המינים הזרים בישראל המשתייכים לקבוצות חי שונות, לימוד ההשפעה ההתנהגותית של מינים פולשים על הביולוגיה ועל האקולוגיה של מינים מקומיים, מחקר הנתיבים שדרךם מינים פולשים חודרים למערכות היבשתיות של ישראל ומחקר השוואתי על הכלים האסדרתיים בעולם ובישראל להתמודדות עם התופעה הזאת.



איור 4. דפוסי פעילות ימתיים של שישה מיני יונקים באזורים בעלי פעילות אנושית רבה ומעטה ברמת הגולן (קיץ-סתיו 2020). כל גרף מציג ספירת תצפיות בלתי תלויות במצלמות שביל לאורך היממה, מחצות ועד חצות. עקומות כתומות מייצגות אזורים בעלי פעילות אנושית רבה (הרבעון העליון של המצלמות לפי מספר תצפיות אדם), ועקומות כחולות מייצגות פעילות אנושית מעטה (הרבעון התחתון). הצללת הרקע מציינת לילה (אפור), שחר ושקיעה (צהוב בהיר) ויום (כחול בהיר). המינים המוצגים (משמאל לימין, מלמעלה למטה): זאב אפור (*Canis lupus*), תן זהוב (*Canis aureus*), שועל מצוי (*Vulpes vulpes*), חזיר בר (*Sus scrofa*), צבי ארץ-ישראלי (*Gazella gazella*), דורבן מצוי (*Hystrix indica*). פעילות אדם דוחקת את המינים ובמיוחד את הצבי הארץ-ישראלי לפעילות לילה, ובכך גדלה החפיפה שלו בזמני פעילות עם מיני הטורפים. מקור: פרייטבלום 2025, עבודת דוקטור בהכנה

שורשיה מוקדמים, וככל שאנו מבינים יותר את השפעת האדם היום על המערכת האקולוגית, כן אנו מבינים יותר את השורשים הללו ואת אופיין של המערכות האקולוגיות הטבעיות. גם קבוצת המחקר שלי נדרשה לסוגיות אלו במחקר המתבסס על ממצאים מחפירות ארכאולוגיות. רבים מן המחקרים שקורעים לנו צוהר לאירועי עבר נשענים על שרידים של צמחים ושל בעלי חיים מהקשרים ארכאולוגיים ועל תובנות אקולוגיות ואנתרופולוגיות כאחת. הם מלמדים אותנו על הניצול של אוכלוסיות בר כבר בידי ציידים-לקטים-דייגים, על טרנספורמציה של שטחים טבעיים בסביבת יישובי אדם קדומים ועל השפעתה על אוכלוסיות בעלי חיים, על ראשית הביות והחקלאות ועל הגורמים להם ועל התפתחות הכלכלה האנושית. עוד מגלים לנו המחקרים הללו שלבני אדם הייתה השפעה רבה על סביבתם עוד טרם הביות, וייתכן שזו הייתה אחת הסיבות לראשית החקלאות, וגם על אופיין של אוכלוסיות בעלי חיים שנוצלו ביתר, ולעומתן על מינים שמגלים משיכה למגורי אדם כבר מתקופות ארכאולוגיות קדומות.

אין ספק שהמאה העשרים ואחת היא התקופה המרתקת ביותר שניתן להעלות על הדעת למדע האקולוגיה ולמחקר סינתטי בתחום שמירת הטבע. הפריחה העצומה של התחום בעולם, הרב-תחומיות המתרחבת, הרלוונטיות הגדולה לנושאים המהותיים ביותר לקיומנו כמין האנושי, האינטראקציה הקרובה בין המדע לעשייה בשטח והמאמץ הבין-לאומי להתמודד עם האתגר הזה – כל אלה מייצרים כר פורה לעשייה מדעית חשובה ולאתגר מדעי, מוסדי ומוסרי שעלינו להירתם להתמודד איתו לטובת החברה היום ולתועלת הדורות הבאים. ■

בדרך כלל לשעות הלילה (איור 4). זה כמובן מצמצם את פעילותם על ציר הזמן היממתי, מגדיל מאוד את התחרות על משאב הזמן, מקטין את הגישה למשאבים אחרים, ואשר לצבאים, זה כופה עליהם להיות פעילים בעיקר בשעות שהטורפים שלהם פעילים, מה שמגדיל את הסיכון שלהם להיטרף.

על כן בין שינוי אקלים לזיהום אור ולצפיפות פעילות – בני אדם, בעולם ובישראל, עשו שינויים מפליגים בציר הזמן היממתי. אנחנו נמצאים היום בעשור השיקום האקולוגי של האו"ם, ואנחנו עמלים לפתח כלים מבוססי-מדע לשיקום מערכות אקולוגיות ותפקודיהן, למשל הבנת השפעתו של ייבוש החולה ואחר כך של שיקום השטח על אספקת שירותי המערכת האקולוגית, שיקום אקולוגי לאחר כריתת חורשות אקליפטוס, שיקום של מְשָׁאָרֵי שדה (שטחים טבעיים במרקם או בשולי שטחי חקלאות) ועידוד מאביקים לטובת החקלאות ועוד. יש לקוות שבראייה זאת יהיה אפשר לשקם גם את ציר הזמן היממתי ולהחזיר למערכת האקולוגית את סדר הזמנים הנכון של הפעילות הטבעית שתואמת את האבולוציה זה מאות מיליוני שנים וכן את מבנה החברה של המינים השונים.

יחסי אדם וחי בממד הזמן

עם התובנה שלפיה אנו נמצאים בעידן של שינוי דרמטי במערכות אקולוגיות גבר העניין בהבנת ההיסטוריה של מערכות היחסים בין האדם לבין המערכת הטבעית, שהחלו לגרום לשינוי כבר לפני אלפי שנים, ובמיוחד עם ראשית החקלאות. אומנם השפעת האדם על המערכת האקולוגית הואצה מאוד במאה האחרונה, אך

חשיבה מחודשת על קרימינולוגיה: המיקום כמפתח לחקר הפשיעה



מאת פרופ' דייוויד וייסבורד

תופס את תופעת הפשיעה ושיחק תפקיד מרכזי בחשיבה המחודשת שלי על קרימינולוגיה ועל מניעת פשיעה.

בפועל, רוב זמנם של השוטרים הוקדש לכמה רחובות ספציפיים בתוך כל אזור סיום. מסיום עם השוטרים באזורים שלהם היה ברור לי שהבעיות שעיימן הם התמודדו לא היו מפוזרות באופן שווה ברחבי האזור, אלא היו ממוקדות בכמה רחובות בעייתיים. תובנה זו הובילה אותי למה שכיניתי אז: "עולמות קטנים של פשיעה" – מה שלימים זכה לכינוי "נקודות חמות של פשיעה". מדובר היה ביחידת ניתוח חדשה לקרימינולוגיה ולמניעת פשיעה.

אף על פי שלמיקום היה תפקיד מרכזי בקרימינולוגיה האמריקאית מאז אסכולת שיקגו (The Chicago School) והוא זכה להתעניינות מחודשת של

התעניינות שלי ב"נקודות חמות של פשיעה" (Hot spots of crime) החלה כאשר עמדתי לסיים את לימודי לדוקטורט באוניברסיטת ייל והתחלתי לעבוד כחוקר בכיר ב"מכון ורה" (Vera Institute of Justice) בניו יורק בשנת 1984. תפקידי היה לבצע הערכת תהליך של מיזם מחקר החלוץ (פיילוט) של משטרת ניו יורק בנושא שיטור קהילתי בתחנת המשטרה של המחוז ה-72 בברוקלין. לפי המסורת ארוכת השנים של קרימינולוגיה מבוססת-קהילה ומניעת פשיעה, מטרת התוכנית הייתה לזהות אזורי סיום בתוך המחוז כדי להעניק להם תשומת לב מיוחדת. כל אחד מתשעת השוטרים הקהילתיים הוקצה לאחד מאזורים אלו. הם הוגדרו "האזורים הבעייתיים" במחוז, ושטחם נע בין 12 ל-30 בלוקים מרובעים. במשך שנה שלמה ליוויתי את השוטרים באזורי הסיום שלהם, בין ארבעה לחמישה ימים בשבוע. מה שלמדתי בברוקלין שינה את האופן שבו אני

העשורים האחרונים הראו מחקר אחר מחקר כי הפשיעה מתרכזת במספר קטן של מקומות בעיר, וכי מוקדי פשיעה אלו אינם מוגבלים לשכונה "בעייתית" אחת אלא מפוזרים ברחבי העיר.^{2,3} עם זאת שני מחקרים שערכתי לפני כ-15 שנים הובילו אותי צעד אחד אל מעבר להצהרה הכללית שהפשיעה נוטה להתרכז ביחידות מיקרו-גאוגרפיות. הם הובילו אותי לשאול אם יש עקיבות בריכוזי הפשיעה, הן בין ערים שונות והן בתוך אותן ערים לאורך זמן.

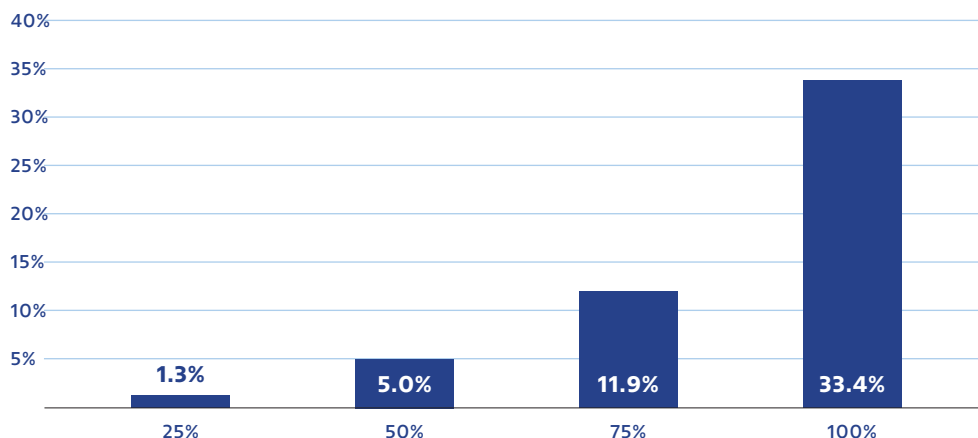
שי עמרם, שהיה אז דוקטורנט באוניברסיטה העברית בירושלים, ואני קיבלנו נתונים ברמה המיקרו-גאוגרפית מתל אביב לפרק זמן של שנה אחת. השתמשנו במדד כללי של אירועי פשיעה וקיבצנו אותם לרמת מקטעי הרחוב (הכוללים את שני צידי הרחוב בין צומת לצומת). שאלנו באיזה שיעור מהרחובות מתרחשים 50% ו-25% מהפשיעה בעיר. כפי שניתן לראות מאיור 1, מחצית מהפשיעה בעיר התרכזה בחמישה אחוזים ממקטעי הרחוב, ואילו רבע מהפשיעה נמצאה באחוז אחד בלבד ממקטעי הרחוב.⁴ כלל הפשיעה הייתה מרוכזת בשליש מהרחובות בעיר.

קרימינולוגים בשנות השמונים של המאה הקודמת, ההתמקדות במקום ברמת המיקרו הייתה רעיון חדשני, ועם הזמן היה לבעל השלכות חשובות על האופן שבו קרימינולוגים מבינים את בעיית הפשיעה.

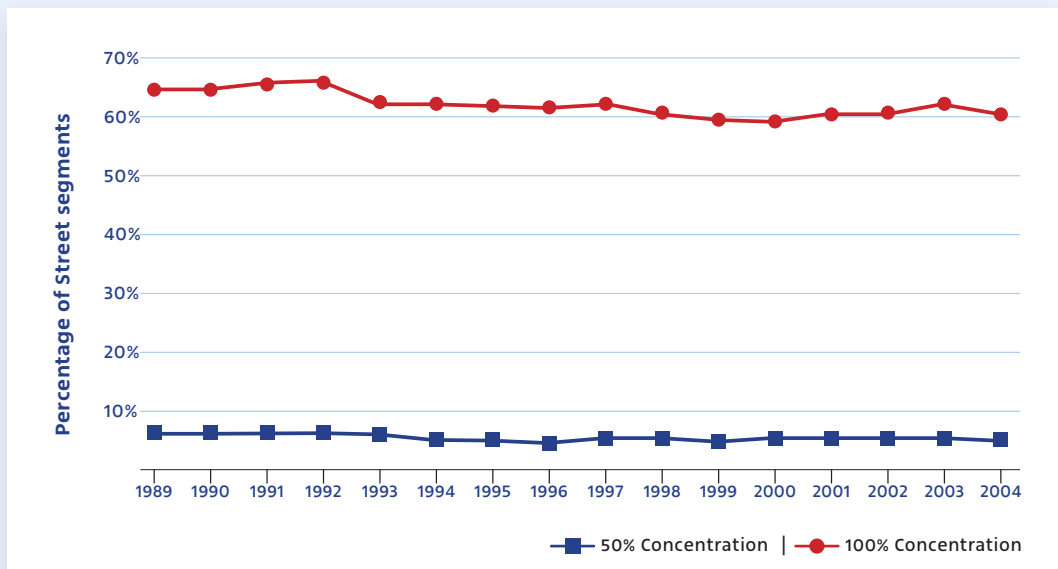
כאמור לעיל, לזמן שביליתי בסיוור רגלי עם השוטרים הקהילתיים הייתה השפעה רבה על האופן שבו תפסתי את יכולתה של המשטרה למנוע פשיעה. בתקופה שקדמה לעבודתי במכון ורה התפרסמו כמה וכמה מחקרים שהטילו ספק ביכולתה של המשטרה להשפיע על שיעורי הפשיעה. אולם ההתנסות שלי במחוז ה-72 הובילה אותי לפקפק בנרטיב המקובל הזה, מאחר שהבחנתי בשיפור משמעותי בנקודות החמות שבהן בילו השוטרים את רוב זמנם.

חוק ריכוזיות הפשיעה

הממצא החשוב ביותר שתומך בחקר נקודות חמות מיקרו-גאוגרפיות הוא מה שכינתי "חוק ריכוזיות הפשיעה במקומות" (the law of crime concentration at places).¹ במהלך שלושת



איור 1. ריכוזיות הפשיעה בתל אביב לפי מקטעי רחוב



איור 2. ריכוזיות הפשיעה בסיאטל שבושינגטון לפי מקטעי רחוב, בשנים 1989–2004

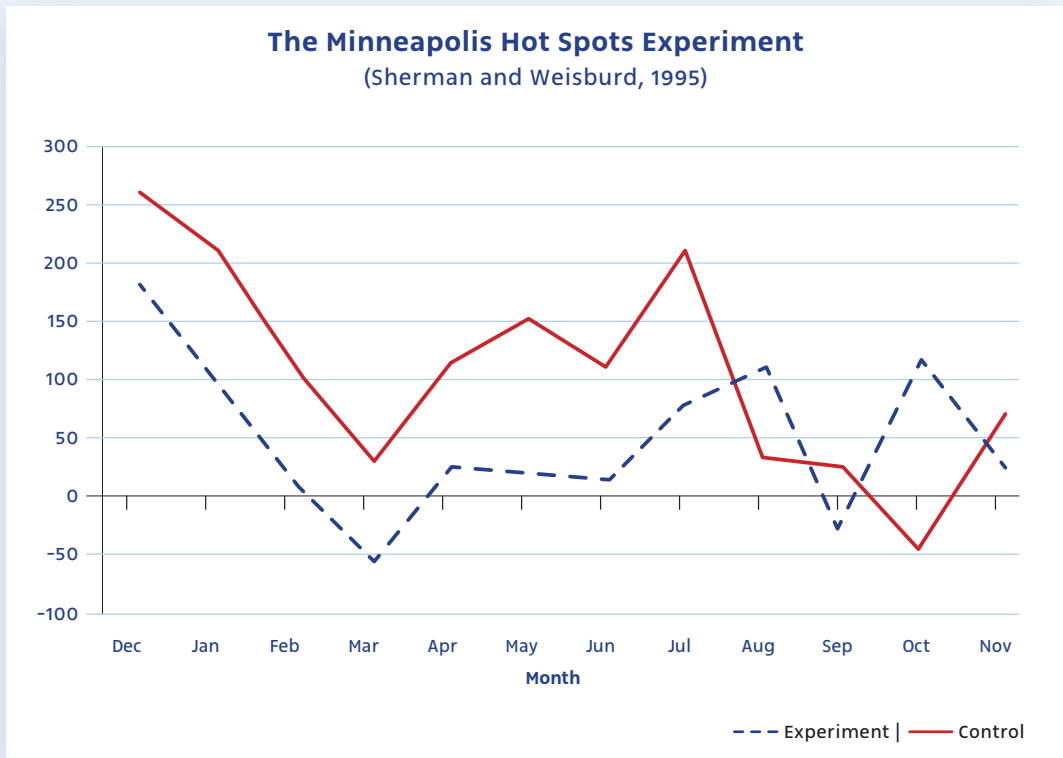
(אירועי פשיעה) ובאותו מדד לפשיעה (מדד רחב של אירועי פשיעה). מצאתי שבערים שונות, 50% מהפשיעה התרכזו ב-4.2% עד 6% ממקטעי הרחוב, ואילו 25% מהפשיעה התרכזו בטווח של 0.8% עד 1.6% בלבד ממקטעי הרחוב.

חשוב לציין כי הנקודות החמות לא היו מרוכזות כולן באזור "רע" אחד בעיר. כדרך מסורת התמקדה הקרימינולוגיה במה שכונה "אזורי עבריינות" – שכונות שבהן מתרכזת הפשיעה. עם זאת העבודה שלי העלתה שאפילו באזורי עבריינות אלה, ברוב הרחובות יש מעט פשיעה. ניתן לראות זאת במפה של סיאטל, שבה רחובות שמגמות הפשיעה בהם היו דומות על פני תקופה של 16 שנה זוהו וקובצו לדפוסים דומים תוך כדי שימוש בניתוח נתיבים מבוסס-קבוצה (group-based trajectory analysis). המפה מציגה את האזורים הדרומיים של סיאטל, הנתפסים בדרך כלל כאזורים מוחלשים וכבעלי שיעורי פשיעה גבוהים (איור 3). אולם כפי שניתן לראות במפה, ברוב הרחובות שב"אזורי

לו הייתי בוחן רק את הנתונים הללו, הייתי מסיק כי אנו שוב עדים לריכוזיות הפשיעה בערים ברמה המיקרו-גאוגרפית. אולם במחקר שערכנו באותה תקופה בסיאטל שבושינגטון, שבו הצלחנו לקבל נתונים שנפרסו על פני 16 שנים, היו תוצאות דומות ברמה מפתיעה לממצאים מתל אביב.⁵ בכל שנה מהשנים שנבדקו כ-5% ממקטעי הרחוב בסיאטל הפיקו 50% מהפשיעה. ממצא זה מעניין במיוחד בשל העובדה שהייתה ירידה של 25% בסך כל הפשיעה בעיר בתקופה זו (איור 2).

ממצאים אלו הובילו אותי לטעון ב"הרצאת סאת'רלנד" לפני האגודה האמריקאית לקרימינולוגיה, בשנת 2015, כי אין מדובר רק בריכוזיות של פשיעה במקומות מסוימים, אלא בריכוזיות שהיא עקבית למדי כאשר בוחנים מדדים דומים של פשיעה ושל יחידות ניתוח מיקרו-גאוגרפיות דומות. כדי להמחיש את חוק ריכוזיות הפשיעה אספתי נתוני פשיעה משלוש ערים גדולות נוספות תוך כדי שימוש באותה יחידת ניתוח מיקרו-גאוגרפית (מקטעי רחוב), באותו סוג נתונים





איור 4. תוצרי פשיעה בניסוי הסיור בנקודות חמות במיניאפוליס

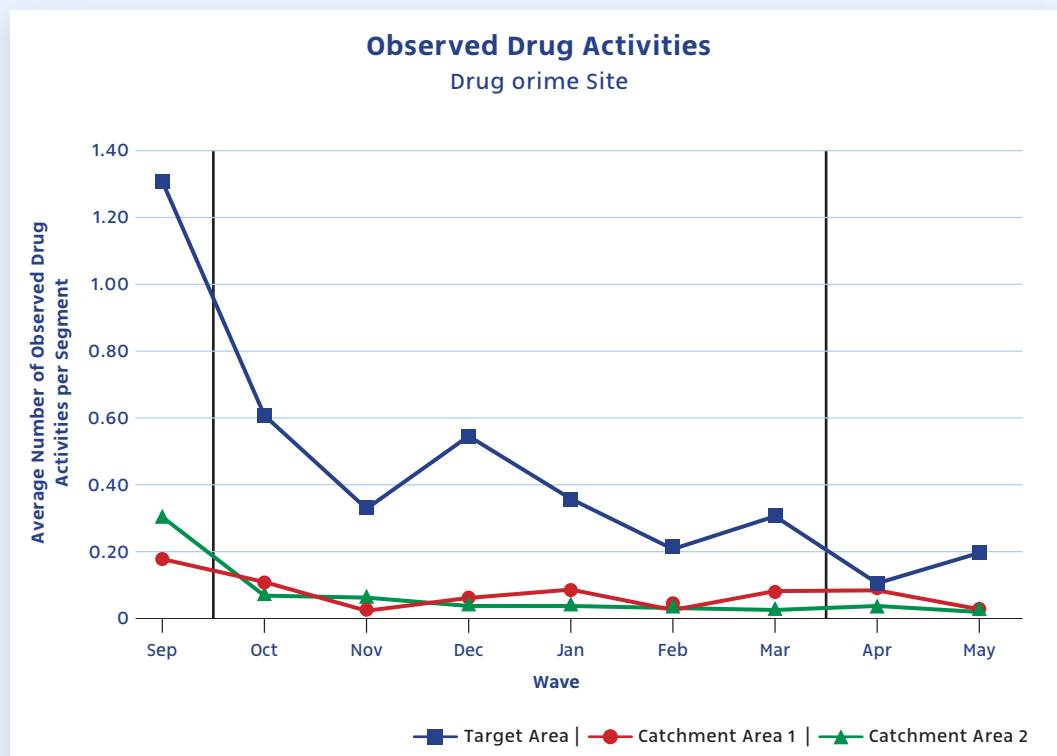
ולתנאי ביקורת. אתרי הטיפול קיבלו בממוצע פי שניים עד שלושה יותר סיור משטרתי מונע מאשר אתרי הביקורת. במשך שמונת החודשים שבהם יושם הניסוי באופן תקין, מצאנו שיפור מובהק באתרי הטיפול ביחס לנקודות החמות שבקבוצת הביקורת מבחינת קריאות לעזרה למשטרה והפרות הסדר הציבורי.

אכן, השפעת התוכנית על הפשיעה, כפי שנמדדה בהפרש שבמספר הקריאות למשטרה בין התקופה שלפני הניסוי לבין התקופה שבה התקיים הניסוי, נמצאה יציבה לאורך כל שמונת החודשים שבהם התוכנית יושמה כראוי (איור 4). בעקבות זאת טענו כי הגיע הזמן ש"קרימינולוגים יפסיקו לומר כי 'אין ראיות' לכך שסיור משטרתי יכול להשפיע על הפשיעה" (ראו הערה 6). מטא־אנליזה עדכנית

עבריינות" אלו יש מעט מאוד פשיעה, אם בכלל. יש נקודות חמות כרוניות, אך הן מפוזרות ברחבי האזור. למעשה, המפה ממחישה כי קיימת שונות משמעותית ברמות הפשיעה מרחוב לרחוב.

הקרימינולוגיה של המקום ומניעה מבוססת־מיקום

בהתבסס על תובנות מוקדמות אלו פעלנו לורנס שרמן (Lawrence Sherman) ואני להבאת הרעיון של "נקודות חמות" לעבודת המשטרה.⁶ יחד פיתחנו את אחד מניסויי השדה הגדולים הראשונים בסיור משטרתי. השתמשנו בניסוי בחלוקת "בלוקים" אקראית (block randomized experimental design), שבו חולקו 110 נקודות חמות בגודל של כמקטע רחוב לתנאי טיפול



איור 5. פעילות סמים נצפית בנקודה חמה בג'רזי סיטי

הסמים שנצפתה באחד מאתרי המחקר – נקודה חמה של סחר בסמים. באזור היעד של ההתערבות נרשמה ירידה משמעותית בפשיעה לאחר תחילת ההתערבות (באוקטובר). אך חשוב מזה, הירידה בפשיעה לא חלה רק בנקודה החמה אלא גם בשני אזורים סמוכים – במרחק רחב אחד מאזור ההתערבות ובמרחק שני רחובות ממנו. לא נצפתה תופעה של "אפקט הבלון", כלומר הפשיעה לא נדדה לאזורים הסמוכים, כפי שניבאה הנחת התקת הפשיעה, אלא דווקא פחתה גם שם, כפי שקרה באזור ההתערבות. ממצא זה מעיד על התפשטות של יתרונות האכיפה סביב הנקודה החמה בעקבות ההתערבות. תוצאה דומה נמצאה גם באתר שני שבחן נקודה חמה של זנות. ממצאים אלו של התפשטות יתרונות האכיפה אוששו במספר רב של מחקרי שטח ניסויים ודמויי-ניסויים.¹¹

שכללה 60 מחקרים מצאה כי יש השפעה חזקה ומשמעותית של שיטור בנקודות חמות על שיעורי הפשיעה.⁷ יתר על כן, שתי ועדות של האקדמיה הלאומית למדעים בארצות הברית^{8, 9} הסיקו כי שיטור בנקודות חמות הוא אסטרטגיית שיטור מבוססת-ראיות (evidence-based).

חשש מרכזי בפיתוח של שיטור בנקודות חמות היה שהפשיעה תעבור לאזורים סמוכים ("התקת פשיעה" [crime displacement]). במחקר שערכנו בג'רזי סיטי שבניו ג'רזי הראינו כי לא רק שהפשיעה לא עברה לאזורים סמוכים, היא אף פחתה בהם הודות להתערבות שבוצעה בשתי נקודות חמות, תופעה המכונה "התפשטות יתרונות האכיפה" (diffusion of crime control benefits).¹⁰ הממצאים מומחשים באיור 5, המתאר את פעילות

הלכתי [לאזור החדש] ולא חשבתי שאעשה שם כסף. הוא היה זר לי... לא הכרתי את הבחורים [לקוחות]. בקורנליסון [המקום הקבוע] אני מזהה את הבחורים. מלהיות שם כל יום [בקורנליסון], אני מכירה את המכונות, את הפנים. זה שונה. באזור שלי אני מכירה את האנשים. למעלה ב"גבעה" – אני לא באמת מכירה את האנשים בצד הזה של העיר.

מסקנות

במאה השנים האחרונות התעלמו קרימינולוגים לרוב מהמיקום הספציפי שבו מתרחשת הפשיעה. המחקרים שלי מיקדו קרימינולוגים ביחידת ניתוח חדשה, המדגישה את המיקומים המיקרו־גאוגרפיים של פשיעה. נקודות חמות של פשיעה הפכו לא רק לנושא מחקרי חשוב בקרימינולוגיה אלא גם ליעד חשוב של מאמצים למניעת פשיעה. ■

מה מנע את התקת הפשיעה? עבודה אתנוגרפית־איכותנית שביצענו, שכללה ראיונות עם עצורים ועצורות, העלתה כי לפי המודל הלוגי של התערבות משטרתית מבוססת־מיקום, למקומות מסוימים יש מאפיינים שהופכים אותם לרגישים לפשיעה, אך אותם מאפיינים לרוב אינם קיימים באזורים הסמוכים שנבדקו. לדוגמה, נקודות חמות של זנות מצויות בדרך כלל ברחובות שמתגוררים בהם מעט תושבים (העשויים להזעיק את המשטרה), ולכן העוסקות בזנות אינן עוברות לרחובות סמוכים שבהם התושבים רבים יותר. בדומה לזה, שוקי סמים מצויים בדרך כלל במקומות המוכרים לעבריינים, והתקת הפשיעה משמעה מעבר לאזורים מוכרים פחות ופעמים רבות מסוכנים יותר. עבריינים, ככל אדם, מתקשים לשנות את מקומם. הם מכירים מקום מסוים ומתרגלים אליו, לעומת אזורים אחרים שאומנם נוח לבצע בהם עבירות אך אפשר שהם נתונים בשליטת קבוצות עבריינים מתחרות. אחת מהעוסקות בזנות שהתראיינה במחקר שלנו המחישה היטב את הקושי האנושי במעבר ממקום למקום:

מקורות

- 1) Weisburd, D. (2015). The law of crime concentration and the criminology of place. *Criminology*, 53, 133–157.
- 2) Weisburd, D., Eck, J. A., Braga, A., Telep, C., Cave, B., Bowers, K., Gerben Bruinsma, Charlotte Gill, Groff, E., Hinkle J., Hibdon, J., Johnson, S., Lawton, B., Lum, C., Ratcliffe, J., Rengert, G., Taniguchi, T., & Yang, S. M. (2016). *Place Matters: Criminology for the 21st Century*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- 3) Weisburd, D., Zastrow, T., Kuen, K., & Andresen, M. (2024). Crime concentrations at micro places: A review of the evidence. *Aggression and Violent Behavior*, 78.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359178924000697?via%3Dihub>
- 4) Weisburd, D., & Amram, S. (2014). The law of concentrations of crime at place: The case of Tel Aviv-Jaffa. *Police Practice and Research*, 15, 101–114.
- 5) Weisburd, D., Groff, E. R., & Yang, S. M. (2012). *The Criminology of Place: Street Segments and Our Understanding of the Crime Problem*. New York: Oxford University Press.
- 6) Sherman, L. W., & Weisburd, D. (1995). General deterrent effects of police patrol in crime "hot spots": A randomized, controlled trial. *Justice Quarterly*, 12(4), 625–648. Retrieved from doi.org/10.1080/07418829500096221
- 7) Braga, A. A., & Weisburd, D. (2022). Does hot spots policing have meaningful impacts on crime? Findings from an alternative approach to estimating effect sizes from place-based program evaluations. *Journal of Quantitative Criminology*, 38, 1–22.
<https://doi.org/10.1007/s10940-020-09481-7>
- 8) Skogan, W., & Frydl, K. (eds.) (2004). *Fairness and Effectiveness in Policing: The Evidence*. Committee to Review Research on Police Policy and Practices. Committee on Law and Justice, Division of Behavioral and Social Sciences and Education. Washington, DC: National Academies Press.
- 9) Weisburd, D., & Majmudar M. K. (eds.) (2018). *Proactive policing: Effects on crime and communities*. Committee on proactive policing, Washington, DC: National Academies Press,
- 10) Weisburd, D., Wyckoff, L. A., Ready, J., Eck, J. E., Hinkle, J. C., & Gajewski, F. (2006). Does crime just move around the corner? A controlled study of spatial displacement and diffusion of crime control benefits. *Criminology*, 44, 549–592.
- 11) Braga, A. A., Turchan B, Papachristos A. V., & Hureau D. M. (2019). Hot spots policing of small geographic areas effects on crime. *Campbell Syst Rev*, 15(3), e1046.

פרופסור, איך נשמעה המוזיקה בבית המקדש? דמיון ומציאות במורשת המוזיקלית היהודית



מאת פרופ' אדוין סרוסי

ואף מתגבר, כשהצורך להוכיח המשכיות לאורך הזמן משמש עוגן עיקרי שעליו נשענות הזהויות הלאומיות העכשוויות. במשך כמעט ארבעה עשורים של הוראה ומחקר בתחום המוזיקה היהודית הרציתי מאות פעמים בנושא בארץ ובעולם לפני קהלים מגוונים, אקדמיים וציבוריים. ללא קשר לנושא ההרצאה, כששלב השאלות היה מגיע, אחת השאלות הראשונות שהייתי נשאל, אם לא הראשונה שבהן, בעיקר מפי יהודים אך לא רק מפייהם, היא "פרופסור, איך נשמעה המוזיקה בבית המקדש (השני)?"

תשובתי הקצרה לשאלה זו, תשובה המסכמת את מה שהייתי עונה לקהלים הצמאים לחוות כיום הד מהמצלול הקסום והמרהיב של בית המקדש המתואר במקרא ובמשנה, היא "אין לי מושג".

ה היסטוריון-הגאוגרף האמריקאי-בריטי רב המוניטין דייוויד לוונטאל (David Lowenthal) כינה את העבר, בעקבות הסופר ל"פ הארטלי (L. P. Hartley), "ארץ זרה". כוונתו הייתה, בין היתר, שככל שאנו מתרחקים מן ההווה, ההיכרות שלנו עם המציאות של אותם זמנים רחוקים הופכת אפשרית פחות ופחות. כך גם ההיכרות שלנו עם העבר היהודי הרחוק, שהוא לוט בערפל ככל שמצאי המסמכים הממשיים המאפשרים שחזור של חוויות קודמינו הולך ומידלדל. יתרה מזאת, כיוון שהזיכרונות של קודמינו הועברו בחלקם הלא מבוטל בעל פה, היכולת שלנו לשחזר כיום את חוויית העבר היהודי מוגבלת מאוד בגלל התערערות הזיכרון והתגברות השכחה. אף על פי כן הרצון שלנו, המודרניים, להכיר את הארץ הלא נודעת של העבר לא נחלש

הליטורגיה הספרדית-פורטוגזית". רוצה לומר, עתיקות המנגינות הללו היא נתון אפריורי שאין לערער עליו.

"המנגינות העתיקות" הוא ספר ייחודי לא רק בשל התווים הכלולים בו אלא גם בשל מבוא מלומד ומפורט שדי סולה הקדים למוזיקה. כבר בפתח הדבר של הספר הגדיר די סולה את מטרת

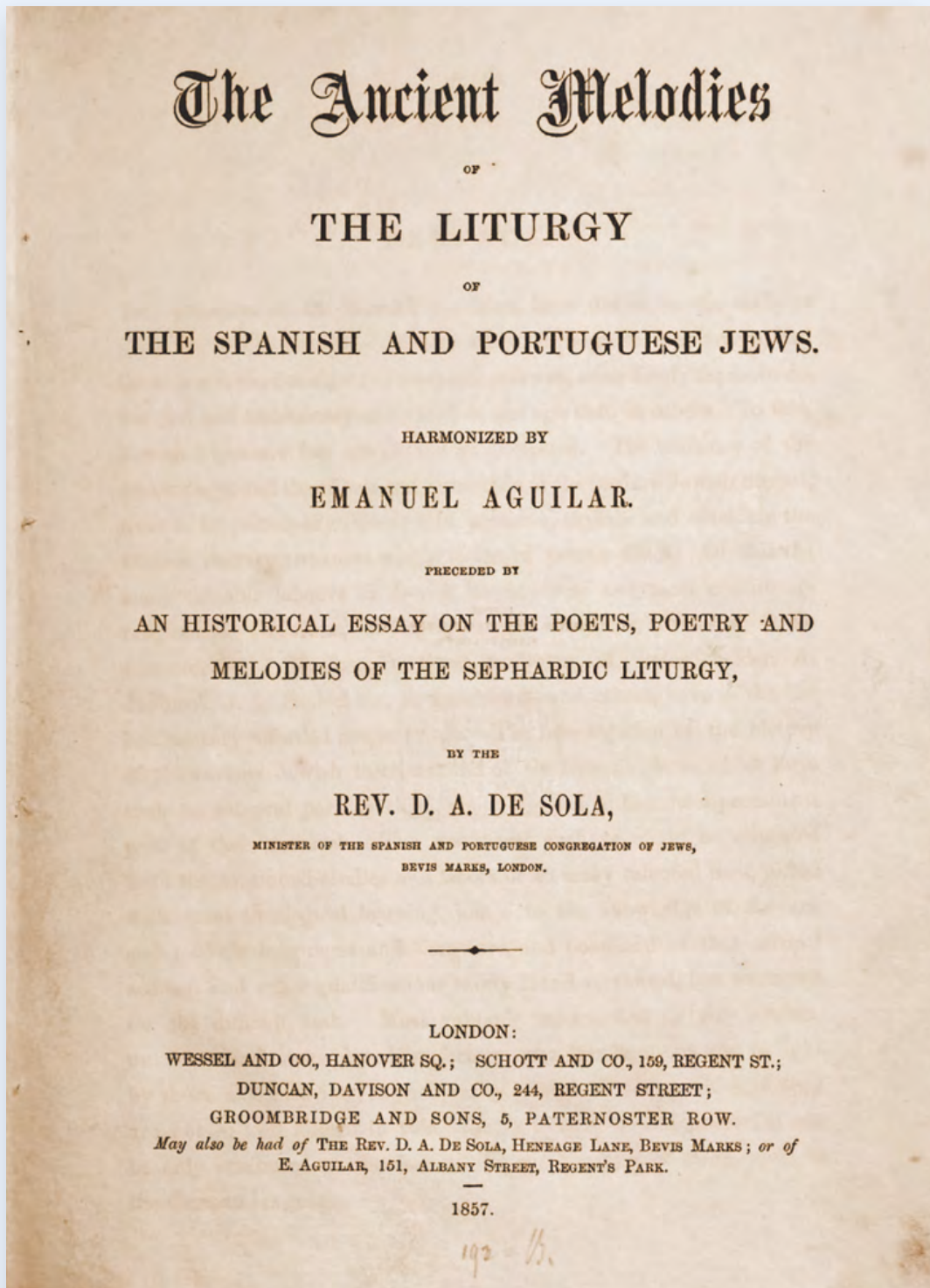


איור 1. החזן דוד אהרן די סולה (1796–1860). באדיבות ארכיון אוניברסיטת מקגיל (McGill University Archives, MG2053-1-P8) (התמונה עברה תיקון).

מובן שרחשי אכזבה גדולים היו מתפשטים באולמות ההרצאה למשמע התשובה החד-משמעית הזאת. איך ייתכן שלמנהל המרכז לחקר המוזיקה היהודית במכון למדעי היהדות של האוניברסיטה העברית בירושלים אין מושג איך נשמעה המוזיקה בבית המקדש?!

אחת השאלות שעניינו אותי בתור חוקר הייתה למה אנשים מודרניים כה כמהים לדעת על המצלול של הרגע הקדום הזה בתולדות המוזיקה אצל היהודים, ולא דווקא איך נשמעה המוזיקה בבית המקדש. לפני שאסכם את דעתי על שאלה זו, הנוגעת ליסודות התודעה היהודית המודרנית, אדגים בדוגמה אחת מה כן ניתן לדעת עליה, וזאת על בסיס מחקר מדעי (כיאה לפורום של האקדמיה הישראלית הלאומית למדעים), כלומר על בסיס נתונים אמפיריים.

אחד מגיבורי התרבות הבולטים בכמה מכתביי היה החזן של בית הכנסת הספרדי-פורטוגזי בלונדון באמצע המאה התשע-עשרה, ר' דוד אהרן די סולה (David Aharon de Sola, 1796–1860), שנולד והתחנך באמשטרדם על ברכי המסורת הספרדית-פורטוגזית היוקרתית. בשנת 1857 פרסם די סולה ספר ייחודי וחשוב ביותר לחקר המוזיקה של היהודים הספרדים. חשיבותו של הספר נובעת מהיותו כולל בעיקר תווים שרשם המוזיקאי היהודי הבריטי ממוצא פורטוגזי עמנואל אגילאר (Emanuel Aguilar, 1824–1904) על פי מה שדי סולה שר באוזניו. במילים אחרות, הספר מציג תיעוד אמפירי של מוזיקה יהודית מלפני כמעט מאתיים שנה למרות הבעייתיות המתודולוגית הכרוכה ב"תרגום" של מסורת מוזיקלית שבעל פה לכתב התווים המערבי המודרני. עם זאת נניח שהתווים הללו משקפים מציאות צלילית קרובה לזו שהיינו חווים לו היה החזן די סולה שר לפנינו כיום. שם הספר של די סולה ואגילאר הוא "המנגינות העתיקות של



איור 2. עמוד השער של "המנגינות העתיקות של ליטורגיית היהודים הספרדים-פורטוגזים" (לונדון, 1857)

המוקדמים של תולדות המוזיקה במערב, האב ג'ובאני באטיסטה מרטיני (Giovanni Batista Martini, 1706–1784), עדות למודעות הפרוטו־מוזיקולוגית של החזן המלומד מלונדון.

די סולה קידם רעיון נוסף בניסיונו לחשוף את צלילי הקדם של היהודים על בסיס מה שאנו שומעים בהווה. לטענתו, היהודים הספרדים נותרו נאמנים לזיכרון המוזיקלי היהודי ארוך הטווח, בניגוד לאשכנזים. אמונה זו משקפת תפיסות שרווחו בקרב חכמי מדעי היהדות בגרמניה באמצע המאה התשע־עשרה (שכאמור די סולה ראה עצמו שייך אליהם) בנושא ה"עליונות" הספרדית בשמירת טוהר המסורת היהודית. בנקודה זו נתלה די סולה באילן גבוה אחר, החוקר היהודי הגרמני הדגול מוריץ שטיינשניידר (Moritz Steinschneider, 1816–1907). לפי שטיינשניידר, המוזיקה הליטורגית של בני עדתו האשכנזים דורדרה בשל הראויות של החזנים, המסלסלים בקולם על חשבון מה שהוא הגדיר כפשטות הבסיסית של עבודת הקודש הקדומה. לעומת זאת החזנות של הספרדים "נשארה צמודה יותר לפשטות המקורית של המוזיקה ושמרה משהו מהפייטנות הקדומה, ומכאן שעברה פחות שינויים, הודות לאופי של עבודת הקודש הציבורית שלהם שהיא נוקשה יותר ובלתי משתנה". די סולה אימץ את הרעיון האסתטי־פילולוגי הזה, שמה שפשוט יותר הוא אותנטי יותר, והוא המנחה את האנליזה של קדמות כל מנגינה ומנגינה באוסף שלו.

שתי מנגינות באוסף זה, לטענת די סולה, הן העתיקות ביותר, וייתכן שאפשר למשוך את קו ההמשכיות שלהן מימי בית המקדש ועד לימיו שלו: הראשונה היא הלחן לברכת כוהנים; השנייה היא מנגינה מס' 12 באוסף, הלחן הספרדי המסורתי לשירת הים (שמות טו). השירה הזאת מושרת כחלק מפסוקי דזמרא (או ליתר

מדעי היהדות החדשים (Wissenschaft des Judenthums), שהוא ראה עצמו שותף בהם (ומכאן כינויו "החזן המלומד"): "לשמר, לפרש ולבאר את האוצרות ואת השרידים מזמנים עברו". אומנם "זמנים עברו" הוא מושג מעורפל, אבל הדיון של די סולה בכל מנגינה ומנגינה שכלולה בספרו מבהיר היטב את התייחסותו של העבר הזה. הוא משתרע מימי המקרא, ליתר דיוק מיציאת מצרים ועד חורבן בית שני, דרך ימי הזהר של יהדות ספרד בימי הביניים ועד לימיו שלו. לאור כרונולוגיה זו די סולה טוען כי המסורת היהודית, כפי שהיא מתגלה לאוזנינו כיום, משמרת רבדים שונים של זיכרון מוזיקלי, שאת הקדומים שבהם אפשר למקם בימי בית שני, ואולי אף לפני כן. הפאר המוזיקלי של עבודת בית המקדש, כפי שהוא מתואר במקרא ובמשנה, מוכיח לדעת די סולה את השלמות המוזיקלית שבני ישראל השיגו בימי קדם. ואולם פאר זה הלך והתעמעם עם הגליית העם מארצו ופיזורו בגלויות השונות.

חורבן הבית הוא אפוא גם חורבנו של הזיכרון המוזיקלי המפואר הזה. אך לא אלמן ישראל, או מוטב לומר לא חירש ישראל. הגליה, רדיפות ופיזור בין האומות לא הותירו ליהודים ברירה אלא לשקם את עבודת הקודש שלהם במקדשי המעט ולשחזר בהם מדמדומי הזיכרון את הממד המוזיקלי של "עבודת השפתיים" שבאה תחת "עבודת הפרים", בלשונו של די סולה. יתרה מזאת, די סולה גם אימץ אקסיומות שהיו מקובלות בשיח הקדם־מוזיקולוגי של זמנו באשר לשורשים היהודיים של המסורות הליטורגיות הנוצריות, בעיקר בשירת פרקי תהלים, ובמילים אחרות, ראשית המוזיקה של הנוצרים, ובהרחבה: אף ראשיתה של תולדות המוזיקה המערבית היא בעבודת המקדש של בני ישראל. ראוי לציין שכסימוכין לרעיון זה, שראשית המוזיקה הנוצרית היא במוזיקה היהודית, הסתמך די סולה על אחד מגדולי ההיסטוריונים המודרניים

לפי הזיכרון של חז"ל, כמצוין בתלמוד הבבלי, מסכת ראש השנה 31א: "במנחת[א] דשבתא מה היו אומרי[ם]? אמר רבי יוחנן: אז ישיר [שמות טו: א-י] ומי כמוך [שמות טו: יא-יט] ואז ישיר [ישראל; כלומר שירת הבאר, במדבר כא: יז-כ]. במילים אחרות, שירת הים היא מאושיות הליטורגיה היהודית מאז ימי הבית השני ועד לימינו.

כך רשם די סולה את מנגינת שירת הים:

דיוק, בלשון הספרדים - הזמירות) הפותחים את תפילות השחרית מדי יום ביומו, שבת בשבתו, חג בחגו. פרק מקראי זה אינו מושר על פי טעמי המקרא המסורתיים אלא בלחן מיוחד, למעט כמובן בקריאתו מתוך ספר התורה בשבת פרשת "בשלח" (המכונה בשל כך "שבת שירה"). חשובה לענייננו לא פחות היא העובדה ששירת הים היא אחד הטקסטים הלא רבים שמתועדים כחלק מעבודת הקודש בבית המקדש השני.

AZ YASHIR MOSHE. 9

ALLEGRETTO MODERATO. (♩ = 100)

N.º 12.
a 4 Voci.

Az yu-shir Mo-she ub-he yis-ra-
-el et ha-shi-ra ha-zot... la-do-nai va-yo-me-ru le-
-mor mor A-do-nai ish mil cha-ma A-do-nai she-
-mo mar-ke-bot Pa-rang-ho ve-che-lo yn-ra ba-
-yam u-mib-char shali-shav tubeng-u buyam suf.

איור 3. רישום בתווים של המנגינה של שירת הים מתוך "המנגינות העתיקות", עמ' 9, מס' 12

לאילו שטענו לפניו שלחן זה הוא הלחן שבני ישראל שרו כשיצאו מן הים, כלומר אפילו זמן רב מאוד לפני ייסוד בית ראשון (!).

פחות זהיר מדי סולה היה המלומד הבריטי פרנסיס לאיון כהן (Francis Lyon Cohen, 1862–1934), עורך המוזיקה באנציקלופדיה היהודית החשובה ביותר בשפה האנגלית שראתה אור בין השנים 1901 ו-1906. כהן הכיר היטב את ספרו ואת כתביו של די סולה, העריך אותם מאוד וציטט מהם בשפע. במאמרים שכתב באנציקלופדיה על לחנים של פיוטים ושל תפילות נכלל מאמר שכותרתו "אשירה", על שם המילה הראשונה של שירת הים עצמה. במאמר מקיף זה גם השווה כהן את הלחן הספרדי ללחן האשכנזי המסורתי המיוחד לכמה פסוקים משירת הים, כפי שקוראים אותה מתוך ספר התורה בשבת שירה ובשביעי של פסח. בשל מה שהוא פירש כדמיון מוזיקלי בין ספרדים לאשכנזים בהווה, הוא לא התאפק במסקנותיו וקבע במאמרו האנציקלופדי שמנגינה זו של שירת הים "בסבירות מסוימת מגלמת שריד אמיתי של המוזיקה בבית המקדש". הינה כי כן, לפנינו טיעון "מדעי" לכאורה, המבוסס על תזה פשוטה: אם יהודים שחיו בגלות הארוכה בסביבות תרבותיות שונות מאוד זו מזו שומרים כולם על לחן דומה, כי אז בוודאות מדובר בזיכרון מוזיקלי שקדם לפיזורם. אלא שזוהי תזה מופרכת מעיקרה, שכן היא אינה מתחשבת בהגירות מאוחרות של יהודים ובמגעים שתנועות אלו יצרו בין יהודים מקיבוצים שונים לאורך ההיסטוריה. יתרה מזאת, היא מבוססת על השוואה רופפת מאוד בין צירופי צלילים נבחרים מתוך רצף מסוים, כלומר באילוף החומר להתאים לתזה. זו כמובן איננה שיטה מדעית שניתן לקבל אותה.

אבל עדות אחת, שנעלמה מעיני החוקרים, מעגנת בעובדה מוצקה את הטענה שהלחן של שירת הים שבזיכרונם של יהודים ספרדים, כפי שגם

הלחן הפשוט, הקצר והממושקל הזה (כלומר מנגינה בעלת משקל ומקצב קבוע, משולש במקרה הזה) נשתמר במסורת שבעל פה. שמעתי אותו כמעט כלשנו מאחד ממוריי ושותפיי למחקר, החזן אברהם לופס קרדוזו ז"ל (Abraham Lopes Cardozo, 1914–2006), יליד אמשטרדם (כמו החזן די סולה), שהיה חזן ראשי בבית הכנסת הספרדי-פורטוגזי של ניו יורק במשך רוב המחצית השנייה של המאה העשרים. כמעט מאה וחמישים שנים מפרידות בין פרסום די סולה את שירת הים בתווים לבין העדות בעל פה של קרדוזו, והן מעידות על שימור מופלא של לחן זה של שירת הים. המשכיות מרשימה זו של שירת הים במסורת המוזיקלית הספרדית, בתקופה המודרנית הסוערת ביותר (החזן לופס קרדוזו ניצל בנס מהשוואה והיגר לדרום אמריקה לפני שעבר לצפונה), מאפשרת לנו לבחון את המשכיותה גם לפני ימי די סולה. לא זו אף זו, הקלטות מסחריות ואתנומוזיקולוגיות רבות של חזנים בולטים ממסורות ספרדיות שונות, כגון הקלטה של שמואל "סמי" אלמגריבי (Salomon Amzallag, 1922–2008), מחשובי החזנים של יהדות מרוקו במחצית השנייה של המאה העשרים, מאששות את השימור המרשים של וריאנטים של המנגינה שרשם די סולה. בלשון מדעית, לפנינו ראיות מוצקות רבות ליציבותו הצורנית של לחן במסורות שבעל פה השונות אשר שרדו עד ימינו.

לזכותו של די סולה, אשר כאמור ראה בלחן של שירת הים שבפיו את אחד הקדומים ביותר ברפרטואר הליטורגי הספרדי, יש לומר שהיה זהיר בהערכה ההיסטורית שלו. כיוון שרוב היהודים הספרדים שהכיר באמשטרדם ובלונדון בימינו, ובהם גם מהגרים מצפון אפריקה ומאיטליה, שרו וריאנטים של לחן זה, הוא הגיע למסקנה שסביר שמוצאו בימי תור הזהב של יהדות ספרד על אדמת ספרד. הוא התייחס בספקנות רבה

חזן) וקולו היה קול באס. הוא שר במקהלת בית הכנסת העתיק של פראג לפני שהיגר לאמסטרדם, שבה הוא התוודע לקהילה הספרדית-פורטוגזית החשובה של העיר ולצלילי בית הכנסת המפואר שלה, שנוסד בשנת 1675, ממש בימים שבהם הוא שהה באמסטרדם. הוא החליט לאייר את השער לחומש בתעתיק די שלם של לחן שכותרתו "אז ישיר משה". זהו רישום של המנגינה ששבתי באס

די סולה רשם אותו, הוא אכן בן כמה מאות שנים לפחות. בבואו לעצב שער לחומש המפורש החשוב שלו (דיהרנפורט, תנ"ג), החליט המדפיס והביבליוגרף היהודי הדגול (והאשכנזי) שבתי משורר באס (Shabbethai Meshorer Bass, 1641–1718) להשתמש באיור של תווים, מוטיב גרפי שמאפיין גם דפוסים אחרים שפרסם. שבתי, כשמו כן הוא, היה "משורר" (כלומר זמר שמלווה



איור 4. רישום בתווים של המנגינה של שירת הים מתוך עמוד השער של "חמשה חומשי תורה עם תרגום אנקלוס ובאור המאור הגדול רש"י ז"ל" (דיהרנפורט, תנ"ג). באדיבות ספריית המכון למחקר יהודי בניו יורק (From the Library of the YIVO Institute for Jewish Research, New York)

שנים. ואם אברבנאל אכן הכיר את הלחן שלנו, אזי אנו כבר על אדמת ספרד לפני הגירוש.

האם ההמשכיות המרשימה והמוכחת של לחן "שירת הים" הספרדי על פני זמן ממושך מאפשרת לטעון שיש בפרקטיקה הליטורגית של ימינו שריד של הלחן שהלוויים היו מבצעים בו את הפרק הזה בבית המקדש? בהיעדר עדות ממשית אי אפשר לומר זאת. אך העקיבות המרשימה של המסורת שבעל פה המתגלה לאוזנינו, המגובה במקרה הזה במסמכים כתובים מן העבר, פותחת אשנב אל נאמנותו של הזיכרון המוזיקלי היהודי גם במסירה המוזיקלית של טקסטים ליטורגיים אחרים.

אפשר להניח שהעניין הציבורי הרב במוזיקה של בית המקדש לא ירד מהפרק בזמן הקרוב. הצורך הכמעט קיומי בחיזוק תודעת ההמשכיות הלאומית של העם היהודי מאז ועד היום הוא שמניע יהודים מודרניים לחפש, גם בימים אלו של מבוכה, את הגשר הצלילי הקדוש אל נקודת האפס המדומיינת בהווה המוזיקלית הדתית שלהם. דורות של בעלי תפילה, של חוקרים ושל פרשנים (יהודים ולא יהודים), של במאי קולנוע ושל יוצרים אחרים דמיינו את המוזיקה שהלוויים ביצעו בבית המקדש, לרוב תוך כדי השלכה של המוזיקה היוקרתית ביותר של זמנם ושל מקומם אל העבר המקראי. כחוקרי מוזיקה האמונים על הסקת מסקנות על סמך טיעונים המבוססים על נתונים קשיחים (תווים והקלטות) לא נותר בידינו אלא לעסוק בפרשנות ביקורתית של עצם הניסיונות לדמיון את המוזיקה של בית המקדש בהקשרים ההיסטוריים, החברתיים והתרבותיים שבהם אמירות כאלו נאמרו (ועוד נאמרות). מלבד זאת, אם מה שלמדנו על הלחן הספרדי של שירת הים הוא כל מה שמחקר מדעי יכול להציע כמענה לשאלה איך נשמעה המוזיקה בבית המקדש, נאמר בציטוט משיר יהודי עתיק וידוע אחר – "דיינו".

שמע מפהם של ידידי הפורטוגזים באמסטרדם, שאת מורשתם ואת שיטות החינוך ה"מודרניות" שלהם כה העריך. הייתכן שמי מן היהודים הפורטוגזים הללו גם מסר לו שזהו לחן קדום שבו זימרו משה ובני ישראל ועימם מרים ובנות ישראל את השירה כשיצאו מהים? זאת כמובן לא נדע, אך מה שאינו ניתן לערעור הוא שלפנינו תעתיק מרשים של אותו הלחן, כמעט תו אחרי תו, שדי סולה פרסם כמאה ושישים שנה לאחר מכן.

הרישום של שבתי משורר באס מאשש אפוא את העובדה שקהילות ספרדיות ופורטוגזיות שרות עד ימינו את שירת הים בווריאנט זה או אחר של אותה המנגינה. הינה כי כן, לפנינו עדות שאינה משתמעת לשתי פנים להמשכיות של זיכרון מוזיקלי יהודי, עדות המתועדת על פני שלוש מאות וחמישים שנה לפחות. ואם בשלוש מאות וחמישים השנים האחרונות, שנים של זעזועים חברתיים ותרבותיים מרחיקי לכת לכל העם היהודי, המנגינה הזאת שרדה כמעט ללא פגע, למה שלא נניח שאף בתקופות קדומות יותר היא השתמרה כמות שאנו שומעים אותה כיום?

רמז להיותו של אותו הלחן של שירת הים בפי יהודי ספרד בתקופת הגירוש שלהם מחצי האי האיברי בסוף המאה החמש-עשרה נמצא בפירוש לפסוק הראשון של שירת הים ("אז ישיר משה") מאת דון יצחק אברבנאל (ויניציאה, של"ט). פירוש ארוך ומלומד זה, המתפרסם על פני כמה עמודים, מתמיה את הלומדים עד היום הזה. בפירוש זה דן אברבנאל בין היתר בפרטי פרטים ביחס שבין הטקסט של שירת הים ל"ניגון" שלה (זו הטרמינולוגיה שאברבנאל השתמש בה). מובן שאין לדעת מהטקסט הזה לאיזה ניגון בדיוק התכוון הפרשן, אך מתוך הדיון שלו ניתן, לעניות דעתי, להבחין בצורה די משכנעת שהניגון שעמד לפנינו הוא וריאנט של הלחן ששבתי משורר באס והחזן דוד אהרן די סולה רשמו כעבור כמה מאות

באקדמיה



מה חדש באקדמיה?

* הפעילויות הנזכרות בפרק זמינות לצפייה ולקריאה באתר האקדמיה.

פעילות האקדמיה בהקשר המלחמה, המצב בעזה ונגד חרם אקדמי



נשיא האקדמיה פרופ' דוד הראל נושא דברים לפני ועדת המשנה למדיניות חוץ והסברה של ועדת החוץ והביטחון של הכנסת, במסגרת דיון בנושא החרם האקדמי על ישראל.

במהלך השנה המשיכה האקדמיה לפעול במרץ נגד גילויים גוברים של חרם אקדמי בין-לאומי על מדענים ועל מוסדות מחקר ישראליים על רקע התמשכות המלחמה והמצב ההומניטרי בעזה. בפורומים בין-לאומיים שונים ובראיונות שהעניק נשיא האקדמיה פרופ' דוד הראל לתקשורת בארץ ובעולם, יצאנו נגד חרמות אקדמיים שפוגעים במדע הישראלי בכלל ובמדענים ומדעניות צעירים בפרט. קראנו להפסקת הלחימה שהביאה עימה בין השאר את הפגיעה במעבדות ובמוסדות מדעיים, דוגמת הטילים שנורו על מכוון ויצמן למדע,

ועם דרישה בלתי מתפשרת לשחרור החטופים החיים והחללים הבענו דאגתנו להבטחת צרכים הומניטריים בסיסיים לאוכלוסייה בעת לחימה. בחודש מאי פרסמה מועצת האקדמיה [גילוי דעת חריף המזהיר מפני קרע עם האיחוד האירופי](#) והסכנה להמשך השתתפות ישראל בתוכניות מענקי המחקר שלו. כמו כן השתתפו נציגי האקדמיה והאקדמיה הצעירה הישראלית בדיוני ועדות הכנסת השונות שעסקו בנושא.

בחודש יולי פרסם פרופ' הראל [גילוי דעת בנושא המשבר ההומניטרי בעזה](#) המאיים על חיייהם ועל בריאותם של מאות אלפי בני אדם. גילוי דעת זה זכה לתמיכה רחבה וצוטט בהודעה ציבורית שפרסם ארגון ALLEA – הפדרציה המאחדת את כלל האקדמיות הלאומיות למדעים באירופה, וכן בהודעה שפרסמו השירות הגרמני לחילופי אקדמאים (DAAD) וקרן אלכסנדר פון הומבולדט הגרמנית.

פעילות האקדמיה בנושא צמצום החופש האקדמי והתערבות פוליטית בנושאי מדע והשכלה גבוהה

בד בבד עם האתגרים בזירה הבינ-לאומית נאלצה האקדמיה גם השנה להתמודד עם איומים חסרי תקדים מבית על עצמאותה של מערכת ההשכלה הגבוהה והמחקר בישראל. האקדמיה מצאה עצמה נאלצת להתריע באופן חוזר ונשנה מפני פגיעות בחופש האקדמי ומפני איומים על עצמאות המוסדות והמדענים שתוצאותיהם יהיו הרוות אסון למצוינות של המדע הישראלי ולמעמדו בחזית המחקר העולמי. נשיא האקדמיה פרופ' הראל הוביל מערכה ציבורית נרחבת לבלימת המגמות הללו בראיונות לתקשורת ובהופעות לפני ועדות של הכנסת, ובחודש מרס פרסמה מועצת האקדמיה גילויי דעת במחאה על [ההתערבות הפוליטית בהענקת פרס ישראל](#).

[גילויי הדעת והראיונות](#) זמינים לקריאה באתר האקדמיה ובעמודי האקדמיה ברשתות החברתיות.

פעולות ייעוץ וקשרי ממשל

חוק האקדמיה הלאומית הישראלית למדעים מונה עם תפקידה של האקדמיה ייעוץ לממשלה ולזרועותיה בפעולות הנוגעות למחקר, למדיניות ולתכנון מדעי בעלי חשיבות לאומית. במהלך השנה החולפת הגבירה האקדמיה את מימוש תפקיד הייעוץ שלה, בהדגשת מאפייניה הייחודיים, אשר מקנים לה ערך מוסף לעומת גופי ייעוץ אחרים – מוניטין של מצוינות מדעית, גוף עצמאי וממלכתי, רב-תחומיות ומעמד חוקי המאפשר הסתייעות בשירותיה. בשנה האחרונה פורסמו דוחות, מסמכי מדיניות, תוצרי פעולות הייעוץ וימי עיון בנושאים האלה:

בחודש ינואר 2025 התקיים יום עיון שכותרתו הייתה [נלחמים על הרוח – איך לחולל שינוי בלימודי הרוח בישראל?](#), בהמשך לעבודתן של שתי ועדות שעסקו בנושא בשנים קודמות. יום העיון עסק בהיבטים מגוונים של הנושא: מהי חברה ללא מדעי הרוח, הקשרים ההדדיים בין האקדמיה למערכת החינוך ולעולם התעסוקה ודמות המורה למקצועות ההומניסטיקה, וכן הועלו דילמות שונות בהוראת מדעי הרוח.



סגנית נשיא האקדמיה פרופ' מרגלית פינקלברג ביום העיון "נלחמים על הרוח"

בחודש אפריל 2025, במענה לפניית קרן יד הנדיב, פורסם מסמך המסכם את תהליך הלמידה בנושא מסגרות לא מפקחות לגיל הרך - אינדיקטורים לאיכות המסגרות וכלים להערכת התפתחות הילד. תהליך הלמידה כלל סקירה של ספרות אקדמית ושל ספרות מקצועית, ידע שנאסף משיחות עם חוקרים, עם אנשי ממשל ועם מומחים נוספים בישראל.

בחודש מאי 2025 פורסם דוח המסכם את עבודת צוות המומחים בנושא חשיבה חישובית ובינה מלאכותית בהוראה ובלמידה. בשנים האחרונות הולכת ומתחזקת ההכרה בחשיבה החישובית - הידועה גם כחשיבה אלגוריתמית - כאחת ממימוניות החשיבה החשובות הנדרשות במאה העשרים ואחת. הדוח עוסק בשאלות הנוגעות למהותה של מיומנות זו, בדרכים הראויות להוראתה ולשילובה במערכת החינוך הישראלית, וכן מציג תובנות ראשוניות באשר להכשרת הדור הבא של מפתחי מערכות בינה מלאכותית. צוות המומחים הוקם במענה לפניית קרן טראמפ אל האקדמיה.

בחודש יוני 2025 פורסם מסמך עמדה בנושא האתגרים וההזדמנויות בקידום רופאים-חוקרים במדינת ישראל, המסכם את פעילות פורום הצעירים של החטיבה למדעי הטבע באקדמיה. חברי הפורום סקרו במשך יותר משנה ובאופן מקיף את המכשולים העיקריים ואת הקשיים העומדים בפני רופאים-חוקרים בישראל והציעו כמה וכמה צעדים לטיוב האפשרויות הפתוחות בפני רופאים העוסקים בעבודה קלינית ובמחקר רפואי בישראל. במשולב.

בחודש יולי 2025 פורסם הדוח לקראת מערכות מזון בנות-קיימה בישראל: ממדע למדיניות, המפרט גישה רבת-תחומית ומציע תוכנית לאומית ארוכת טווח לביטחון תזונתי, וכן ממפה את פערי מדיניות המזון בישראל ואת האתגרים הניצבים בפניה לשם התוויית מדיניות להתמרתה של מערכת המזון בישראל למערכת עמידה יותר, שוויונית יותר ובת-קיימה.



קשרים בין-לאומיים

קידום קשריה המדעיים הבין-לאומיים של ישראל הוא אחת המשימות החשובות של האקדמיה, וחשיבותו גוברת נוכח גילויי החרם האקדמי המתרבים בעקבות התמשכות הלחימה והחשש לפגיעה בהשתתפותה של ישראל בתוכניות המחקר של האיחוד האירופי, ובראשן תוכנית Horizon Europe. פניותיו ונאומיו של נשיא האקדמיה לפני עמיתים ולפני מקבלי החלטות מחו"ל וראיונות שהעניק לתקשורת הבין-לאומית זכו לתגובות תומכות ברובן. נוסף על זה, האקדמיה וראשיה עוקבים בחשש אחר התפתחויות הנוגעות לצעדי ממשל טראמפ המקפאים מימון פדרלי בהיקף של מיליארדי דולרים למחקר מדעי ומטילים צנזורה על נושאי מחקר כמו שינויי אקלים ומגוון. הקיצוצים בתקציבי המחקר יוצרים אי-ודאות בדבר המשכיותם של מיזמי מחקר משותפים, ועלולים לפגוע בחוקרים ישראלים המשתתפים בקונסורציומים אמריקאיים ולהגביל את הגישה למשאבי מידע ולמאגרי נתונים חיוניים.

ארצות הברית



בחודש אוקטובר 2025 התקיים בווינגטון הבירה הכינוס החמישי במסגרת הפורום המדעי ע"ש בלוטניק, המשותף לאקדמיה הישראלית ולאקדמיה הלאומית למדעים של ארצות הברית (NAS). נושא הכינוס השנה היה [רפואה גנומית](#) [לאורך חיי האדם](#). הפורום הפגיש חוקרים מובילים מישראל ומארצות הברית לדיונים מדעיים מעמיקים על תפקיד הגנומיקה בהבנת הבריאות האנושית לאורך החיים.

בחודש אפריל 2025 התארכה באקדמיה משלחת של נציגי האקדמיות הלאומיות למדעים, להנדסה ולרפואה של ארצות הברית (NASEM). נציגי האקדמיה ליוו את המשלחת גם בקבלת פנים ובשולחן עגול עם שותפים נוספים בביתה של סגנית השגריר האמריקאית לישראל, שם נידונו שיתופי הפעולה המדעיים של ישראל עם ארצות הברית והושם דגש מיוחד על האפשרויות לפיתוח קשרי מדע, מחקר וחדשנות עם מדינות האזור שהן חלק מהסכמי אברהם.



המשתתפים בכינוס "רפואה גנומית לאורך חיי האדם" בווינגטון הבירה. התצלום: באדיבות NAS

גרמניה



בשנת 2025 מלאו 60 שנים לכינון היחסים הדיפלומטיים בין ישראל וגרמניה, ונערכו בה אירועי מדע רבים על מנת להדגיש ששיתופי פעולה מדעיים ומחקרים היוו נדבך חשוב בהפשרת היחסים בין שתי המדינות ובעוצמתם עד היום. נשיא האקדמיה פרופ' הראל, הנשיאה לשעבר פרופ' נילי כהן ונציגים נוספים מהאקדמיה ומהאקדמיה הצעירה הישראלית השתתפו באירועים שארגנו גופים גרמניים וישראלים שונים שהתקיימו בגרמניה לאורך השנה.

עם האירועים החשובים נמנו אלה:



נשיא האקדמיה פרופ' דוד הראל נושא דברים באירוע "מדע ותרבות בונים גשרים" בהאלה.
צילום: Markus Scholz/Leopoldina ©

בחודש מאי 2025 השתתף פרופ' הראל באירוע שנערך בהאלה שבגרמניה שכותרתו הייתה "מדע ותרבות בונים גשרים". האירוע נערך ביוזמת האקדמיה הלאומית הגרמנית למדעים – לאופולדינה ובשיתוף משרד ראש הממשלה והמשרד לענייני תרבות של מדינת המחוז סקסוניה-אנהלט. פרופ' הראל נשא באירוע **נאום חשוב**, שבו הדגיש את חשיבותו של המדע לגישור, לפיוס ולשיתוף פעולה בין-לאומי – למען טובת הכלל. על רקע המלחמה המתמשכת בעזה והמסבר ההומניטרי המחמיר הזהיר פרופ' הראל כי המדע הישראלי נתון בסכנה ממשית להדרה מתוכניות מימון ומחקר חשובות באירופה ויצא נגד שימוש בחרמות אקדמיים. נאומו זכה לתהודה גדולה בגרמניה ופורסם בכמה כלי תקשורת מקומיים.

בחודש מרס 2025 השתתף פרופ' הראל **באירוע המרכזי לציון 60 השנים** לכינון שיתוף הפעולה המדעי בין המדינות. האירוע נערך ביוזמת המשרד הפדרלי לחינוך ומחקר בברלין, בשיתוף משרד החדשנות, המדע והטכנולוגיה הישראלי ומוסדות מובילים נוספים. באירוע נסקרו הישגי העבר ונידון פיתוח הזדמנויות עתידיות בתחומי המחקר והחדשנות.



נשיאת האקדמיה לשעבר פרופ' נילי כהן במהלך הסדנה בברלין

בחודש נובמבר 2025 התקיימה בברלין סדנה דו-לאומית שאורגנה ביוזמת האקדמיה הלאומית הישראלית למדעים, בראשות הנשיאה לשעבר פרופ' כהן, בשיתוף האקדמיה למדעים של ברלין-ברנדנבורג וקרן המחקר הגרמנית-ישראלית (GIF) ועסקה בנושא **העבר, ההווה והעתיד של הבינה המלאכותית**.

עוד בנובמבר 2025, במסגרת פסגת Falling Walls, השתתף נשיא האקדמיה פרופ' דוד הראל **בפאנל לציון שישים השנים ליחסי המדע**. בדבריו הביע הוקרה עמוקה לידידות רבת-השנים בין קהילות המדע בישראל ובגרמניה, דיבר על האחריות המוסרית של מדענים בעיתות מלחמה וקרא לתומכי ישראל בגרמניה להמשיך ולתמוך במדע הישראלי ולהפעיל לחצים להבאת שלום אזורי.

יפן



בחודש אוקטובר 2025 השתתף נשיא האקדמיה פרופ' הראל בכינוס השנתי של פורום Science and Technology in Society (STS) שנערך בקיוטו שביפן. הכינוס, מן הבולטים בעולם העוסקים בממשק שבין מדע לטכנולוגיה ולחברה, מפגיש מאות רבות של משתתפים. במהלך ימי הכינוס קיים פרופ' הראל סדרת פגישות עם נשיאי אקדמיות ועם ראשי מוסדות מדעיים וטכנולוגיים מובילים מרחבי העולם וכן השתתף בפגישה סגורה של נשיאי אקדמיות למדעים בנושא "כיצד מתארגנים למימון מחקר בצורה מועילה?", שעסק בקרנות מימון, בהגדרת מצוינות אקדמית ובאמות המידה למדע איכותי.

בחודש נובמבר 2025 השתתף פרופ' הראל בכינוס ה-63 של ארגון פאגווש (Pugwash) למדע ולעניינים בין-לאומיים, שהתקיים בהירושימה שביפן לציון 80 שנה להפצצות האטומיות על הירושימה ונגסאקי. הכינוס הפגיש כ-180 משתתפים מ-40 מדינות, מדענים, דיפלומטים ומומחי מדיניות, לדיון באתגרים הגלובליים בדרך לשלום עולמי ולמניעת הפצתו של נשק גרעיני. במושב שכותרתו "תפקידם של מדענים בצמצום האיום הגרעיני" הדגיש פרופ' הראל כי החלשת המדע על ידי צעדי ממשלות פוגעניות מפנים, וחרמות אקדמיים מבחוץ פוגעת בטובת הכלל, וכן דיבר על האחריות המוסרית של מדענים ושל אזרחים בשעת משבר ועימות.



המושב בו השתתף פרופ' הראל בכינוס פאגווש, התצלום: באדיבות The Pugwash Conferences

* * *

במהלך השנה ביקרו בבית האקדמיה נציגים דיפלומטיים בכירים, ובהם שגריר איטליה בישראל מר לוקה פרארי וצוות השגרירות, משלחת של נציגים בכירים משגרירות הרפובליקה העממית של סין בישראל, שגריר פולין בישראל מר מאצ'יי חוניה ושגרירת קנדה בישראל, גב' לזלי סקלון וצוותה. כמו כן ביקרה באקדמיה משלחת של סגני נשיאי אוניברסיטאות מגאנה.



מימין: שגריר איטליה בישראל מר לוקה פרארי ונשיא האקדמיה פרופ' דוד הראל. באמצע: ביקור המשלחת של סגני נשיאי אוניברסיטאות מגאנה. משמאל: שגרירת קנדה בישראל גב' לזלי סקלון ונשיא האקדמיה פרופ' דוד הראל.

ארגון ALLEA (All European Academies)

בחודש פברואר 2025 הצטרפה האקדמיה לחתימה על [גילוי דעת חריף שפרסם ארגון ALLEA](#) בתגובה לצווים נשיאותיים שהוציא נשיא ארצות הברית דונלד טראמפ, המקפאים מימון פדרלי בהיקף של מיליארדי דולרים למחקר מדעי ומטילים צנזורה על נושאי מחקר כמו שינויי אקלים ומגדר. גילוי הדעת מזהיר כי צעדים אלה מאלצים סוכנויות מחקר ומוסדות מדעיים רבים בארצות הברית להשעות את פעילותם השוטפת. המסמך מדגיש כי הגבלות אלו על חופש המחקר – אם באמצעות קיצוצי תקציב, אם בפיקוח חקיקתי ואם בהתערבות מוסדית – פוגעות בחופש המדעי לא רק בארצות הברית אלא בעולם כולו, בשל האופי הבין-לאומי של המערכת המחקרית.

אירועים ופעילויות בבית האקדמיה

האקדמיה עורכת מדי שנה עשרות כינוסים והרצאות בכל תחומי הידע – המדעים המדויקים, מדעי החיים, מדעי החברה והרוח – בהשתתפות חוקרים מובילים מישראל ומהעולם. הכינוסים פתוחים הן לקהל הרחב המתעניין והן לקהילת החוקרים והסטודנטים. חטיבות האקדמיה מקיימות כינוסים מדעיים לרגל גבורות ויובלות של חברות וחברי האקדמיה, בהשתתפות מדענים מובילים בתחומי מחקרם, וכן כינוסים המוקדשים לתחומי המחקר של חברים שהלכו לעולמם. המידע המלא על כלל פעילויות האקדמיה וכל הקלטות האירועים זמינים באתר האקדמיה ובערוץ היוטיוב שלה.

אלו מקצת האירועים שמטרתם הנגשת המדע לקהל הרחב:

הרצאות שנתיות

ההרצאה השנתית על שם מרטין בובר



פרופ' דיוויד נירנברג נושא את ההרצאה השנתית על שם בובר.

פרופ' דיוויד נירנברג, היסטוריון של דתות בימי הביניים ומנהל המכון ללימודים מתקדמים בפרינסטון, נשא בחודש אוגוסט 2025 את ההרצאה השנתית ע"ש מרטין בובר [The Powers of History in Judaism, Christianity, and Islam](#). פרופ' נירנברג בחן בהרצאתו את מקומה המרכזי של החשיבה ההיסטורית בעיצוב שלוש הדתות המונותאיסטיות הגדולות.

ההרצאה השנתית על שם צ'ארלס דרווין

את ההרצאה השנתית על שם צ'ארלס דרווין, המתקיימת זו השנה השלישית, נשא בחודש דצמבר 2025 פרופ' לירן כרמל מהמחלקה לגנטיקה במכון למדעי החיים ע"ש אלכסנדר סילברמן שבאוניברסיטה העברית בירושלים. ההרצאה עסקה בנושא [Ancient DNA is rewriting human evolution: A journey through genetics and epigenetics](#). פרופ' כרמל הסביר בהרצאתו מהו DNA עתיק, מהם הישגי המחקר המרכזיים בתחום, וכיצד שינו תגליות אלו את סיפור מוצא האדם.

הרצאות מבית

סדרת "הרצאות מבית", אשר נוסדה לפני כשנה ביוזמת נשיא האקדמיה פרופ' הראל, מביאה לציבור הרחב הרצאות מפי חברי וחברות האקדמיה – כל אחד בתחום מחקרו. את ההרצאה הרביעית בסדרה נשא חבר האקדמיה פרופ' אלי קשת בחודש יוני 2025, בנושא [יצירת כלי דם: מתובנות בסיס ליישומים רפואיים](#), ואת ההרצאה החמישית נשאה חברת האקדמיה פרופ' נעמה פרידמן באוקטובר 2025, בנושא [דיסלקסיות: מתאוריה לאנשים, מאנשים לתאוריה](#).



חברי האקדמיה, פרופ' אלי קשת ופרופ' נעמה פרידמן, בסדרה "הרצאות מבית"

בשערי האקדמיה

סדרת המפגשים ["בשערי האקדמיה"](#) נערכת זו העונה העשירית. בסדרה משתתפים חברי אקדמיה, חוקרים ואנשי רוח, ומטרתה להנגיש לציבור הרחב נושאים מדעיים. בכל שנה מתמקדת הסדרה בנושא רב־תחומי אחר. בשנת תשפ"ה עסקה הסדרה בנושא "אחריות", ובשנת תשפ"ו היא עוסקת בנושא "התחלות". סדרת המפגשים זוכה להצלחה רבה בציבור הרחב בקרב אלפי שומעים מכל רחבי הארץ, הן באולם והן בשידור החי.



חברת האקדמיה פרופ' אורה אנטין־וולמן, פרופ' רנן ברקנא ופרופ' צחי פלפל במפגש "התחלות ביקום", בסדרת בשערי האקדמיה תשפ"ו

טיפול הצעירים במדע

האקדמיה רואה חשיבות רבה בהידוק הקשר עם דור המדענים הצעירים ועם המדענים לעתיד, ופועלת לקידום צעירים מצטיינים במערכת ההשכלה הגבוהה. גם השנה נמשכה פעילותה של האקדמיה הצעירה הישראלית, התקיים כינוס GISFOH במדעי הרוח והחברה, הוענקו מלגות אדמס ומלגות רות ארנון, מלגות ע"ש אליכס דה רוטשילד במדעי הרוח והחברה, פרסי בלווטניק (בשיתוף האקדמיה של ניו יורק) ומלגות קרן פולקס, ופעלו קבוצות פורום הצעירים של החטיבות למדעי הרוח והטבע. גם השנה השתתפה האקדמיה בשלב הלאומי של פרס כדור הארץ פרונטירס למאמרים מדעיים, ולראשונה הייתה מעורבת בארגון השלב הישראלי בתחרות Falling Walls Lab למדענים צעירים. פעילויות אלו נועדו לעודד חוקרים ישראלים צעירים ומבטיחים ולקדם קשר מקצועי ואישי הדוק בין מדענים מצטיינים. כל תוכניות המלגות והפרסים מפורטות באתר האקדמיה.



למעלה: משתתפות ומשתתפי הכינוס ה־15 של פורום GISFOH בגרמניה, ספטמבר 2025
למטה - מימין: פרופ' ניקולס דירקס, נשיא ומנכ"ל האקדמיה למדעים של ניו יורק, ופרופ' דוד הראל, וביניהם זוכי פרסי בלווטניק לשנת 2025, בטקס הענקת הפרסים. התצלום באדיבות: Blavatnik Awards, The New York Academy of Sciences; משמאל: הדס עומר, הזוכה בשלב הישראלי של תחרות Falling Walls Lab 2025, במהלך ההצגה שלה.

האקדמיה הצעירה הישראלית

האקדמיה הצעירה הישראלית היא גוף הפועל עצמאית, בגיבויה ובסיועה של האקדמיה הלאומית הישראלית למדעים. חברי וחברות האקדמיה הצעירה הם אנשי ונשות מדע



האקדמיה הצעירה הישראלית
الأكاديمية الشابة الإسرائيلية
THE ISRAEL YOUNG ACADEMY

מצטיינים מהשורה הראשונה בתחומם, המחויבים למעורבות ציבורית חברתית פעילה בנושאים הקשורים לענייניה של האקדמיה. במהלך השנה ערכה האקדמיה הצעירה אירועים רבים הפונים למדעניות ולמדענים הצעירים בישראל כדי לספק להם כלים לקידומם ולהרחבת האפשרויות לשיתופי הפעולה ביניהם. נוסף על זה מפרסמת האקדמיה הצעירה בכל כמה שנים את תוצאותיו של סקר הבוחן את מצבם של חוקרות וחוקרים צעירים, וכן ערכה כמה סקרים הקשורים להשפעות המלחמה וההפיכה המשטרית. ניתן לקרוא על כל הפעילויות הללו [באתר האקדמיה הצעירה](#).

מיזם ראיונות החברים

בשנת 2016 פתחה האקדמיה, ביוזמתה של פרופ' נילי כהן, נשיאת האקדמיה לשעבר, [בצילום ראיונות עומק עם חברה](#) כדי להנגיש את הביוגרפיה האישית והמדעית שלהם לציבור הרחב, ובכך להכיר לו את הישגי המדע, וכן לצורכי תיעוד. חברי האקדמיה המרואיינים מתבקשים לבחור את המראיין או המראיינים שלהם, משורות האקדמיה או מחוצה לה, והריאיון מתנהל כשיחה אינטימית. הראיונות מועלים לערוץ היוטיוב ולאתר האקדמיה, והם נגישים לקהל הרחב. עד כה הועלו למרשתת ראיונות עם יותר ממאה חברי וחברות אקדמיה.



חבר האקדמיה פרופ' יצחק פריד ובוגרת האקדמיה הצעירה הישראלית פרופ' ליעד מודריק בריאיון במסגרת המיזם "ראיונות החברים"

האקדמיה בדיגיטל

השנה המשיכה האקדמיה להשקיע משאבים בהנגשת פעילויותיה השונות במרשתת וברשתות החברתיות



[יוטיוב](#), [פייסבוק](#), [X](#) (לשעבר טוויטר) ו[לינקדאין](#). נוסף על אלה פתחה האקדמיה [קבוצות ווטסאפ](#) לעדכונים על כל אירועי האקדמיה, וחברים בהן אלפי מתעניינים. הנהגתם של שידורים חיים מכינוסי האקדמיה הרחיבה את מעגל השומעים מקרב הציבור הרחב, והוא כולל עתה תושבים מכל רחבי הארץ וממדינות שונות בעולם. מספר העוקבים אחר עמודי האקדמיה הולך וגדל, וערוץ היוטיוב של האקדמיה מכיל יותר מ-2,000 הרצאות מדעיות הזמינות ונגישות לציבור בחינם.

רוצים להיות בעניינים?

הצטרפו לקבוצת ה- השקטה של האקדמיה לכל העדכונים על אירועי המדע הקרובים



בהוצאה לאור



מנדלי מוכר ספרים: מבטים חדשים

בעריכת ישראל ברטל, אבנר הולצמן ויונתן מאיר

יצירתו הדור־לשונית של שלום יעקב אברמוביץ, הוא מנדלי מוכר ספרים, הילכה קסם על דורות של קוראים והניבה שפע של כתיבה ביקורתית ומחקרית במאה השנים האחרונות. הכרך 'מנדלי מוכר ספרים: מבטים חדשים' מציע שורה של התבוננויות רעננות בליבת הקנון של אברמוביץ כמו גם בפניות והיבטים שטרם הוארו במכלול הענף של פועלו. כיצד התייצב אברמוביץ כאינטלקטואל יהודי בן זמנו לנוכח טלטלות ההיסטוריה היהודית במאה ה־ט? כיצד ניתן להבין את עמדתו המסובכת ורונית הסתירות כלפי המהפכה הציונית שהתחוללה לנגד עיניו? מדוע גיבוריו נוטים לשוב במעגלים ולא להגיע לשום מקום? מה טיבו של 'הנוסח' המהולל, שנעשה אמת מידה לסגנון עברי משוכלל? מדוע כשל הפרויקט הגרנדיזי של פרסום מהדורת כתביו השלמה? כיצד נראית היום קאפולי, העיירה הבלרוסית שבה נולד וגדל, ובאיזה אופן השתמר בה זכרו? ומדוע נכון להכתיר את אברמוביץ כאבי הסיפורת האקולוגית היהודית? סוגיות אלה ואחרות נדונות בכרך העשיר, פרי עטם של אחד־עשר מחוקרי אברמוביץ המובהקים.

תוכן העניינים

פתח דבר

ישראל ברטל

'מה לו ליהודי בימינו ולנבוכדנאצר בימים ראשונים?' מנדלי בהיסטוריה, מנדלי וההיסטוריה

דן מירון

קו כלוא בתוך מעגל: על הדגם הסיבובי במרחב ובעלילה בסיפוריו של ש"י אברמוביץ

אבנר הולצמן

בימי הרעש: שלום יעקב אברמוביץ לנוכח המהפכה היהודית המודרנית

חיים באר

מנדלי מוכר ספרים לפני ארון הספרים

עמינדב דיקמן ז"ל

הנוסח של מנדלי – בין מזרח, מערב, דרום וצפון: סקירת התגובות הראשונות ומקצת דברי אחרונים

חזה טורניאנסקי

מקרא, פיוט וזמירות בתרגומו של ש"י אברמוביץ ליידיש

יונתן מאיר

עלייתו ונפילתו של מפעל מנדלי

דור בורשטיין

האקולוגיה הרליגיוזית של 'ספר תולדות הטבע'

שי עבדי

'ולכולם בשם אקרא': התפתחות המחשבה הסביבתית ביצירת שלום יעקב אברמוביץ

ירין רבן

'האפלוט את נשמתי הכסלונית?' העיירה היהודית המנדלאית בשיחתם של יוסף חיים ברנר ואהרן דוד גורדון

דוד אסף

הדר יערים והוד החיים: אל קאפולי בעקבות מנדלי מוכר ספרים

המשתתפים בספר

תשפ"ה/2025. 278 עמודים. 24.5 x 15.5 ס"מ. כריכת בד



קונטרס ימי שמואל: תולדות ר' שמואל הורוויץ וסדר נסיעתו לאומן

יונתן מאיר

בחודש אלול תרפ"ח נסע החסיד הארץ ישראלי ר' שמואל הורוויץ (1905–1972) בדרך פתלתלה ומסוכנת לאומן הסגורה והמסוגרת. נדודיו ארכו יותר משלוש שנים. לאחר מפגש עם חסידי ברסלב בפולין הבריח את הגבול והגיע לאומן, הוא נע ונד במקומות שונים בניסיונות לשוב לירושלים, ולבסוף נאסר במוסקבה ושהה ארבעה חודשים בכלא עד ששוחרר והועלה באודסה על אונייה לארץ ישראל. פרשת הנסיעה עוררה רעש גדול, והעיתונות היהודית נתמלאה ידיעות על החסיד שמסר את נפשו כדי להשתטח על קברו של ר' נחמן מברסלב. את הרפתקאותיו העלה הורוויץ על הכתב סמוך לחזרתו באיגרת ארוכה ששלח לחסידי ברסלב בפולין, היא 'קונטרס ימי שמואל' (מאי–יוני 1933).

הורוויץ מתאר כאן בהרחבה את עולמם של חסידי ברסלב הבודדים בארץ ישראל בשנות העשרים (קודם שנתארגנו במסגרות), את עולמם של חסידי ברסלב בפולין ובפרט 'הקיבוץ הגדול' בלובלין בראש השנה 1928 (אחד ה'קיבוצים' המרשימים, שנוצר כאלטרנטיבה ל'קיבוץ' באומן עם סגירת הגבולות) ואת עולמם של חסידי ברסלב באומן בשנים 1929–1932 (קודם למאסרים האגרסיביים, לסגירה ולחתימה של הקלויז ולהאשמת חסידי ברסלב בקליקליות וקונטרה־רבולוציונריות בשלהי שנות השלושים).

מהדורה מוערת של 'קונטרס ימי שמואל', על פי כתב־היד השמור בספריית שוקן, מובאת כאן לראשונה במלואה. זהו מסמך היסטורי רב חשיבות, וניתן לדלות ממנו גם תמונה תאולוגית חדשנית. חסידות ברסלב איננה חסידות סטטית, ובכל תקופה ותקופה מתחדשים בה עולמות. קונטרס זה הוא הצצה לאחד מאותם עולמות מתחדשים.

תשפ"ו/1. 2025. 198 עמודים. 15.5 x 24.5 ס"מ. כריכת בד

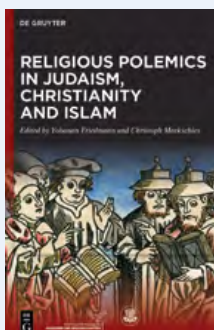


Religious Polemics in Judaism, Christianity and Islam

Edited by Yohanan Friedmann and Christoph Marksches

יצא לאור במשותף עם האקדמיה הגרמנית למדעים ולמדעי הרוח ברלין-ברנדנבורג ועם הוצאת De Gruyter הגרמנית.

תוכן העניינים



Christoph Marksches

Introduction

Johannes Zachhuber

Doctrinal Debates as Religious Polemics: Rationality and Identity Formation in Late Ancient Christianity

Christoph Marksches

Polemics in Non-Polemic Ancient Genres, or: "Polemic" in the Context of a New Literary History of Ancient Christianity

Meira Polliack, Arye Zoref, Orly Mizrahi

"Are You The One to Build Me a House?" Interreligious Aspects of Medieval Jewish, Christian and Islamic Exegesis on David's Role in Building the Temple

Simon Gerber

Catholicism versus Protestantism and Vice Versa: The Controversy Surrounding Johann Adam Möhler's "Symbolism"

Nimrod Luz

The Materialities of Interfaith Spatial Dialogues: Lessons from a Mixed Israeli City

Elisa Farinacci and Nurit Stadler

Religious Polemics in Motion: Mythologies and Territorial Controversies over Rachel's Tomb, Our Lady of the Wall and the Bilāl Ibn Rabāḥ Mosque

Christoph Schmidt

The Trauma of God's Excessive Transcendence and the Option of Interreligious Dialogue: The Regensburg Speech of Benedict XVI as a Polemic and Post-Traumatic Appeal

Index of Names

Index of Places and Institutions

2025. 160 עמודים. 16 x 23.5 ס"מ. כריכה קשה

The Onomasticon of Iudaea-Palaestina and Arabia in the Greek and Latin Sources

Volume III (Baaras-Bycoyca)

by Leah Di Segni and Yoram Tsafrir, with Chaim Ben David and Judith Green

מפעל האונומסטיקון של ארץ ישראל מרכז את כל המובאות ביוונית ובלטינית המזכירות שמות גאוגרפיים ואתניים בארץ ישראל ובסביבתה הקרובה מאמצע המאה הרביעית לפני הספירה (ערב כיבוש הארץ בידי אלכסנדר הגדול) עד הכיבוש המוסלמי באמצע המאה השביעית לספירה. את המפעל יזם בשנות השישים של המאה העשרים פרופ' מיכאל אבי-יונה ז"ל, ופרופ' יורם צפריר ז"ל עמד בראשו משנות השבעים ועד למותו בכסלו תשע"ו (נובמבר 2015).

המובאות לוקטו מכל המקורות הידועים ביוונית ובלטינית – יותר מ-1,300 טקסטים שנכתבו או נערכו על ידי למעלה מ-750 כותבים ועורכים, ובהם חיבורים גדולים, מכתבים, דרשות, רשימות מנהליות וכנסייתיות, כתובות ומטבעות – וכן ממקורות בלשונות המזרח, בעיקר סורית, אם אלה תורגמו מן היוונית ולא שרדו בלשון המקור. שמות האתרים מסודרים בערכים על פי סדר האלף-ביתי, ובכל ערך הקטעים מובאים בלשון המקור ובתרגום לאנגלית בלויית הערות טקסטואליות חיוניות, דיון גאוגרפי-היסטורי ובמידת האפשר גם דיון ארכאולוגי וכן ביבליוגרפיה מחקרית רלוונטית. בכל מקום שהדבר אפשרי מצוינים זיהוי האתר ותיאורו בהסתמך על מחקר עדכני. הכרכים השני והשלישי מלווים במפות צבעוניות המראות את האתרים לאזורים.

הכרך הראשון יצא לאור בשנת 2015, ובו טקסטים מרכזיים ארוכים שמוזכרים בהם שמות רבים ולפיכך הם מצוטטים בערכים שונים, וכן רשימה מוערת של המקורות הראשוניים, רשימת קיצורים כללית, רשימה של כל האתרים שייכללו בסדרה, מבוא ומפתחות.

בשנת 2017 יצא לאור הכרך השני, בשני חלקים. הכרך מכיל את הערכים המתחילים באות A, ובכללם הערך Arabia הגדול.

בשנת 2025 יצא לאור הכרך השלישי, שמכיל את הערכים המתחילים באות B, ובכללם הערכים הגדולים Beth Govrin (Eleutheropolis), Bethlehem ו-Bethsan (Beth Shean, Scythopolis).

כרך I - 2015. 456 עמודים + 2 מפות. 28 x 18.5 ס"מ. כריכת בד

כרך II - 2017. 1,430 עמודים בשני חלקים. 28 x 18.5 ס"מ. כריכת בד

כרך III - 2025. 1,138 עמודים. 28 x 18.5 ס"מ. כריכת בד (בדפוס)

Proceedings of the Israel Academy of Sciences and Humanities Volume IX

הכרך מאגד את חוברות ההרצאות של מרצים אורחים באקדמיה שיצאו לאור בשנים 2015–2024.

תוכן העניינים

1. Lorraine Daston

Before the Two Cultures: Big Science and Big Humanities in the Nineteenth Century
The Martin Buber Memorial Lectures

2. Michael Walzer

States and Communities
The Martin Buber Memorial Lectures

3. Ute Deichmann

The Beginnings of Israeli–German Collaboration in the Sciences: Motives, Scientific Benefits, Hidden Agendas

4. Guido Calabresi

Equality – A Fable: Understanding the Recent American Election
The Martin Buber Memorial Lectures

5. Guy G. Stroumsa

Arthur James Balfour's Religious and Intellectual World

6. Jonathan Israel

Jewish Emancipation in the Western World (1780–1860): What Kind of Enlightenment Made It Possible?
The Martin Buber Memorial Lectures

7. Michael Cook

The Spread of Islam Around the Indian Ocean
The Martin Buber Memorial Lectures

8. Stephen Greenblatt

Shakespeare's Second Chance
The Martin Buber Memorial Lectures

2025. 172 עמודים. 15.5 x 24.5 ס"מ. כריכת בד

הגלגול שנעצר בטרם הושלם

מאת דן מירון

דברי האקדמיה הלאומית הישראלית למדעים, כרך תשיעי, חוברת 10 (תשפ"ה. 24 עמודים)

ביסוד מאמר זה עומדת התזה שפרנץ קפקא פיתח לכל אורך יצירתו קצרת הימים של מושג הגלגול הטרגי, גלגול שנעצר בטרם הושלם. כשאדם נהפך לבעל חיים הוא איננו נעשה בעל חיים ממש, אלא מפתח צורה ותכונות פיזיות של בעל החיים בעוד בתוכו הוא נותר אדם בעל מודעות ותשוקות אנושיות – ומכאן אומללותו. אילו היה גיבור 'הגלגול' גרגור סמסא נהפך לחרק אמיתי, הוא היה חי חיי חרק ולא היה אומלל.

תסמונת הגלגול שנקטע באיבו הופיעה לראשונה ביצירת הנעורים הבלתי גמורה של קפקא 'הכנות לחתונה בכפר', שבה הגיבור הנוסע לחתונתו באי-חשק מתנחם בפנטזיה ילדותית שהייתה לו: התגברות על מצבים לא נוחים באמצעות פרדה מהגוף האנושי ופיתוח צורה של חיפושית הנכנסת לתרדמת חורף. בסיפוריו המאוחרים של הסופר התרחב השימוש במוטיב לתחומים אחדים: תמורה שהפכה קוף לאדם בר דעת בכל זאת הותירה אותו קוף מבחינה מינית (בסיפור 'דין וחשבון לאקדמיה'), והתוצאה הייתה שסע בין כושר הדיבור והמחשבה שלו לזהותו הגופנית והמינית; יהודי מערב אירופה סברו שהפכו לאירופים גמורים אך נותרו למעשה יהודים למחצה; והציונים שהאמינו בחיסול זהותם הגלותית נותרו למעשה יצורי כלאיים, שילוב של שח ושל חתול טורף (בסיפור 'יצור כלאיים'), בהשראת גדיא ושונרא שבפזמון 'חד גדיא'. באמצעות תסמונת הגלגול שנעצר בטרם הושלם המחיש קפקא את תפיסתו הטרגית את מהות ה'התפתחות' האנושית.

Shakespeare's Second Chance

by Stephen Greenblatt

Proceedings of the Israel Academy of Sciences and Humanities

vol. IX, no. 8 (2024. 19 pp.)

The Martin Buber Memorial Lectures

בלב הקומדיות של שייקספיר עומד חלום חזרתה של ההזדמנות הראשונה – משפחה או יקרים שנחשבו אבודים לעד. בלב הטרגדיות שלו עומד העדרה של הזדמנות שנייה, או ליתר דיוק, העדר הזדמנות שנייה הכרוך בכמיהה עזה באופן בלתי נסבל אך בלתי ניתנת למימוש להזדמנות כזאת. בערוב ימיו שיחק שייקספיר עם האפשרות להעניק לדמויות שלו את ההזדמנות השנייה שאליה השתוקקו.



משה בראשר, תורת ההגה של לשון התנאים, ירושלים: מוסד ביאליק, 2025.

משה בראשר, תרגום המקרא לערבית יהודית מגרבית, כרך ה: השרח לספרים במדבר, דברים, מזמורי תהלים ודניאל, ירושלים: יד הרב נסים, קרן הרב משה דוד ועמליה רוזן, 2025.

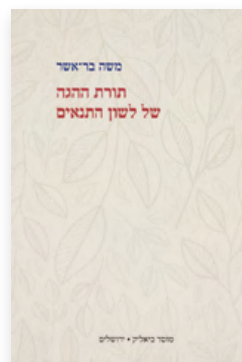
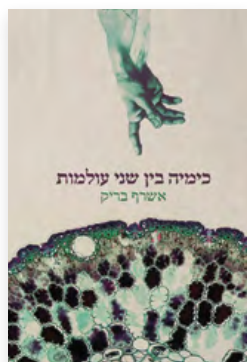
ישראל ברטל, **אבנר הולצמן ויונתן מאיר** (עורכים), מנדלי מוכר ספרים: מבטים חדשים, ירושלים: האקדמיה הלאומית הישראלית למדעים, תשפ"ה/2025.

ישראל ברטל, שמעון הכופר: היסטוריה שכנגד, ירושלים וברלין: ספרי בלימה, תשפ"ה/2025.

אשרף בריק, כימיה בין שני עולמות, תרגמה מערבית ברוריה הורוביץ, ערכה שלומית הרלינג, חיפה: פרדס הוצאה לאור, 2025.

ישראל גרשוני, נאורות במצרים הקולוניאלית: מודרניות, לאומיות, קולוניאליזם ומגדר במשנתו של אחמד לוטפי אל-סייד, סדרת נהדה, תל-אביב-יפו: רסלינג, 2025.

אבנר הולצמן (עורך), אחד העם – לא זה הדרך, שמונה מאמרים, ירושלים וברלין: ספרי בלימה, תשפ"ה.



גרשון בקון (עורך), סקוט אורי, **אבנר הולצמן** ואדם טלר (עורכי משנה), גלעד: לתולדות יהודי פולין ותרבותם, כח, תל אביב: המכון לחקר תולדות יהדות פולין ויחסי ישראל-פולין, המרכז לחקר התפוצות ע"ש גולדשטיין-גורן, אוניברסיטת תל אביב, תשפ"ה.

יונתן מאיר (עורך), גרשם שלום, התנועה השבתאית בפולין, ירושלים וברלין: ספרי בלימה, תשפ"ו/1.

יונתן מאיר (עורך), הלל צייטלין, רבי נחמן מברסלב: שתי מסות, ירושלים וברלין: ספרי בלימה, תשפ"ה/2025.

יונתן מאיר (עורך), יוסף וייס, תורת הדיאלקטיקה והאמונה לר' נחמן מברסלב, ירושלים וברלין: ספרי בלימה, תשפ"ה/2025.

יונתן מאיר (מהדיר), ר' שמואל הורוויץ, קונטרס ימי שמואל, ההדיר על פי כתב-היד והוסיף מבוא וביאורים: יונתן מאיר, ירושלים: האקדמיה הלאומית הישראלית למדעים, תשפ"ו/2025.

יונתן מאיר ולי ברטוב (עורכים), הלל צייטלין, עמקי תהום: שלוש מסות, ירושלים וברלין: ספרי בלימה, תשפ"ה/2025.

יונתן מאיר ושמואל גלובר (עורכים), הלל צייטלין, יחידים: שלוש קריאות, ירושלים וברלין: ספרי בלימה, תשפ"ה/2025.

יונתן מאיר ושמואל גלובר (עורכים), הלל צייטלין, שירות ותפילות: שבעה מחזורים, ירושלים וברלין: ספרי בלימה, תשפ"ה/2025.

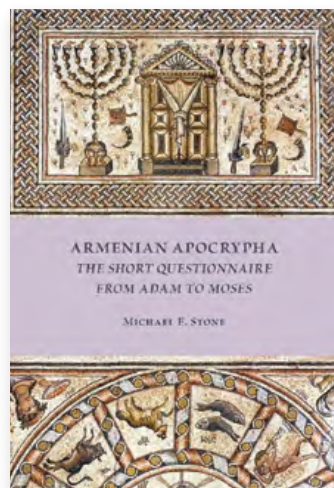
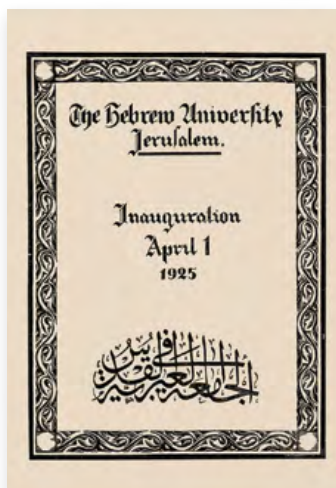
יונתן מאיר ויוסי שוויג (מביאים לדפוס), האוניברסיטה העברית ירושלים – חגיגת הפתיחה, ז' ניסן תרפ"ה, ירושלים וברלין: ספרי בלימה, תשפ"ה/2025 (עברית, ערבית ואנגלית).

דן מירון, הגלגול שנעצר בטרם הושלם (דברי האקדמיה הלאומית הישראלית למדעים ט, חוברת 10), ירושלים: האקדמיה הלאומית הישראלית למדעים, תשפ"ה/2025.

דן מירון, צמתים וצמרות: מסעות וחניות ביערות השירה העברית של אורי צבי גרינברג, ירושלים: מוסד ביאליק, תשפ"ה.

שמואל פיינר (מהדיר), נפתלי הרץ וייזל, דברי שלום ואמת, מהפכת החינוך היהודי המודרני, ירושלים: מוסד ביאליק תשפ"ה/2025.

ב"ז קדר, הממלכות הפראנקיות של ירושלים ועכו, ירושלים: מוסד ביאליק, 2025.



Amnon Aharony, Ora Entin-Wohlman, *Gendai Kotai Butsuri Gaku Nyumon* (translated by Yasuhiro Tokura) (Original Title: Introduction to Solid State Physics), Tokyo: Kyoritsu Shuppan Co., Ltd, 2025.

Robert J. Aumann, *Selected Contributions to Game Theory*, Singapore: World Scientific, 2025.

Daniel Bell & **Avner de Shalit** (eds.), *Cities and Identities*, London: Routledge, 2025.

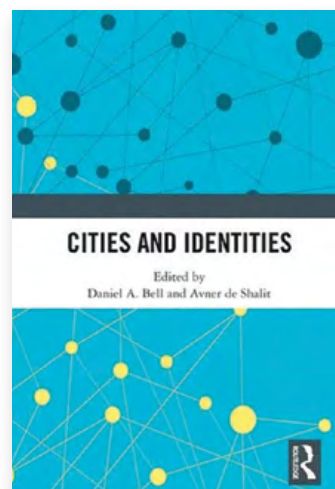
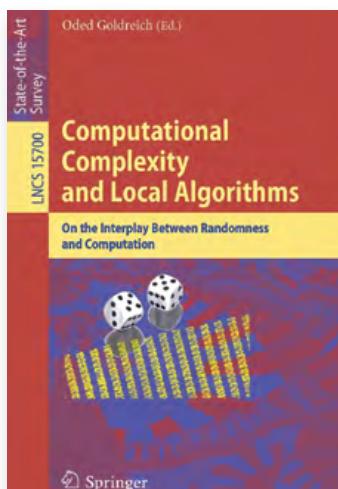
Margalit Finkelberg, Donna Shalev, & Rachel Zelnick-Abramovitz (eds.), Special issue on Textualization, *Mnemosyne* 78, 2025.

Matthew J. Adams, Melissa S. Cradic, & **Israel Finkelstein** (eds.), *Megiddo VII: The Shmunis Excavations of A Monumental Middle Bronze Tomb and its Environs* (Monograph Series of the Institute of Archaeology of Tel Aviv University, 43), University Park, PA, 2025.

Israel Finkelstein & Thomas Römer, *Kiriath-Jearim, The Shmunis Family Excavations* (Monograph Series of the Institute of Archaeology of Tel Aviv University, 45), University Park, PA, 2025.

Yohanan Friedmann & Christoph Markschies (eds.), *Religious Polemics in Judaism, Christianity and Islam*, Berlin: De Gruyter – The Israel Academy of Sciences and Humanities – Berlin-Brandenburg Akademie der Wissenschaften, 2025.

Oded Goldreich (ed.), *Computational Complexity and Local Algorithms: On the Interplay Between Randomness and Computation* (Lecture Notes in Computer Science, LNCS, 15700), Cham: Springer, 2025.



Benjamin Z. Kedar, *Cultures of the Medieval Kingdom of Jerusalem: Frontier Inventiveness in the Age of the Crusades*, Ithaca and London: Cornell University Press, 2025.

David Shulman, *Singing the Wind, Four Essays on Muttusvāmi Dīkṣitar*, New Delhi: Primus Publications, 2025.

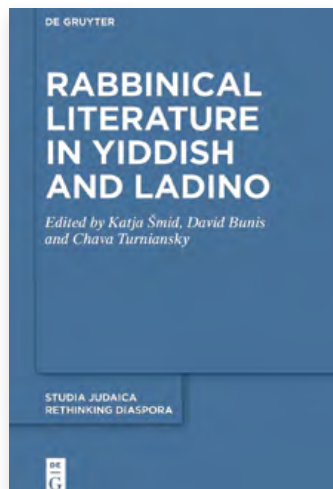
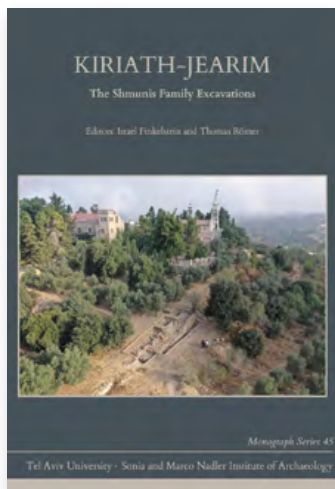
Leah Di Segni & **Yoram Tsafrir**, with Chaim Ben David and Judith Green, *The Onomasticon of Iudaea · Palaestina and Arabia in the Greek and Latin Sources*, Vol. III (Baaras–Bycoyca), Jerusalem: The Israel Academy of Sciences and Humanities, 2025 (in print).

Michael E. Stone, *Armenian Apocrypha: The Short Questionnaire from Adam to Moses*, Atlanta: The Society of Biblical Literature, 2025.

Emanuel Tov, *Scribal Practices and Approaches Reflected in the Texts Found in the Judean Desert: Material Culture and Writing Practices in Modern Research*, Revised Second Edition (Studies on the Texts of the Desert of Judah, 153), Leiden: Brill, 2025.

Katja Šmid, David Bunis and **Chava Turniansky**, *Rabbinical Literature in Yiddish and Ladino*, Berlin: De Gruyter, 2025.

David Weisburd, Barak Ariel, Anthony A. Braga, John Eck, Charlotte Gill, Elizabeth Groff, Clair V. Uding, & Amarat Zaatut, *The Future of the Criminology of Place: New Directions for Research and Practice*, Cambridge Elements in Criminology, Cambridge UK: Cambridge University Press, 2025.



רשימת חברי האקדמיה תשפ"ו

החטיבה למדעי הטבע

דוד הראל נשיא	שפריה גולדוסר עודד גולדרייך	יוסף ירדן מאיר להב	עדי קמחי שרית קראוס
יוסף קוסט יו"ר החטיבה	אלון גני יורם גרונר	אלכסנדר לובוצקי יוסי לוייה	דוד קשדן אלי קשת
עודד אברמסקי	גדעון דגן ידין דודאי	רפאל דוד לויין אלכסנדר לויצקי	מיכאל רבין מישל רבל
יקיר אהרונב אמנון אהרוני	תמר דיין מרדכי (מוטי) הייבלום	לסלי ליזרוביץ אילון לינדנשטראוס	יאיר רייזנר גדעון רכבי
שמעון אולמן משה אורן	אהוד הרושובסקי חיים הררי	דוד מילשטיין אילן מרק	מרדכי (מוטי) שגב רותם שורק
מיכל אירני יונינה אלדר	אברהם הרשקו איתמר וילנר	נעם ניסן אברהם ניצן	עדיאל (עדי) שטרן יוסף שילה
אורי אלון נוגה אלון	מאיר וילצ'ק דניאל ויס	חיים סידר הלל פורסטנברג	יהודה שינפלד דן שכטמן
מיכאל אלעד אורה אנטין-וולמן	עופר זיתוני אלי זלדוב	דב פרוהמן יצחק פריד	שהרן שלח שלמה שמאי
רות ארנון צבי בן-אברהם	אילן חת ישעיהו (אישי) טלמון	ששון צחייק אהרן צ'חנובר	עדי שמיר מיכה שריר
ינון בן-נריה אשרף בריק	רשף טנא עדה יונת	רוג'ר ד' קורנברג יעקב קליין	זאב תדמור יגאל תלמי
יוסף ברנשטיין נעמה ברקאי	יהושע יורטנר	גיל קלעי	

החטיבה למדעי הרוח

מרגלית פינקלברג סגנית הנשיא	נעמה גורן-ענבר ישראל גרשוני	יונתן מאיר עמיחי מזר	יוחנן פרידמן מרדכי עקיבא פרידמן
אבנר הולצמן יו"ר החטיבה	אבנר דה שליט סימון הופקינס	דן מירון בילי מלמן	נעמה פרידמן בנימין זאב קדר
ישראל אומן משה אידל	משה הלברטל אלחנן הלפמן	אהרן ממן אבישי מרגלית	איתן קולברג אשר קוריאט
בנימין איזק שולמית אליצור	דון הנדלמן סרג'יו הרט	נדב נאמן דוד נבון	אשר קוריאט יעקב קליין
רחל אלתרמן יצחק אנגלרד	שולמית וולקוב דוד וייסבורד	מארן ר' ניהוף מיכאל אדוארד סטון	יוסף קפלן מיכאל קרייני
יורם בילו מיכל בירן	מוחמד חאג' יחיא עמנואל טוב	גדליה סטרומזה שרה סטרומזה	אריאל רובינשטיין רונית ריצ'י
איל בנבנישתי יזאב בנימיני	לאונה טוקר חנה טורניאנסקי	סמי סמוחה אדוין סרוסי	שלומית רמון-קינן יואל רק
מאיר מיכאל בראשר משה בראשר	חנה יבלונקה מנחם יערי	שמחה עמנואל אריאל פורת	יגאל שוורץ דוד שולמן
ישראל ברטל רות ברמן	יעקב כדורי נילי כהן	שמזאל פיינר ישראל פינקלשטיין	בן-עמי שילוני אניטה שפירא
גיא בר-עוז אהרן ברק	יהודה ליבס נירה ליברמן	אנדרו פלקס דניאל פרידמן	אריאל ששה-הלוי



האקדמיה הלאומית הישראלית למדעים
المجمع الوطني الإسرائيلي للعلوم والآداب
THE ISRAEL ACADEMY OF SCIENCES AND HUMANITIES



רח' ז'בוטינסקי 43, כיכר אלברט איינשטיין, ת"ד 4040, ירושלים 9104001
טל' 02-5676222, דוא"ל naama@academy.ac.il

    www.academy.ac.il



למהדורה הדיגיטלית