



מידע עצום במולקולה זעירה: עידן חדש באחסון מידע על דנ"א (DNA)

Daniella Bar-Lev^{1,†}, Inbal Preuss^{1,2,†}, Leon Anavy^{1,2} | Eitan Yaakobi¹

¹הפקולטה למדעי המחשב ע"ש הנרי ומרילין טאוב, הטכניון – מכון טכנולוגי לישראל, חיפה, ישראל

²בית ספר אפי ארזי למדעי המחשב, אוניברסיטת רייכמן, הרצליה, ישראל

סוקרים צעירים

EISNER
FAMILY

גיל: 11–15



ZALMAN ARAN
JUNIOR HIGH,
HOLON: 8TH
GRADE

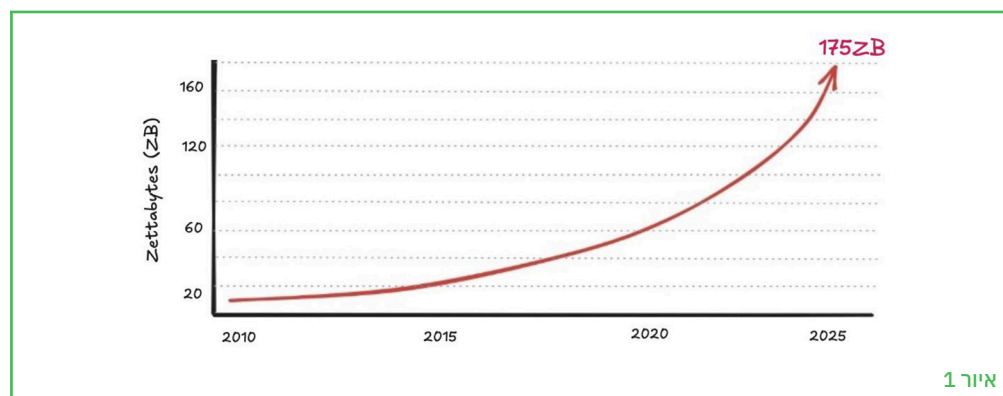
גיל: 13–14



כמה תמונות צילמתם השבוע? האם צפיתם ב-YouTube? ומה עם סדרה ב-Netflix? כל המידע הדיגיטלי מהפעולות האלו נשמר בטלפון, במחשב, ובענן, כדי שתוכלו לשלוף אותו מתי שתמצאו. מכיוון שבשנים האחרונות אנחנו מייצרים יותר ויותר מידע, הטכנולוגיה המשמשת לאחסון הנתונים האלה ניצבת בפני אתגרים מורכבים. פתרון מבטיח להתמודדות עם האתגרים האלה, הוא שימוש במולקולות דנ"א (DNA) מלאכותיות. דנ"א הוא חומר טבעי המצוי בכל תא ותא של יצור חי, ובו מאוחסן המידע הגנטי העצום של אותו היצור. כיום יודעים לייצר מולקולות דנ"א במעבדה. לכן, ניתן לעשות שימוש בפוטנציאל האחסון האדיר של הדנ"א, ולשמור בו מידע דיגיטלי ולא רק ביולוגי. במאמר זה נציג פתרון שמשלב ביולוגיה ומחשבים, שני עולמות שאנחנו מחברים כדי לייצר מולקולות דנ"א מלאכותיות שמאחסנות מידע דיגיטלי גדול לזמן ממושך ובאופן ידידותי לסביבה.

אתגר אחסון המידע

כמות המידע הדיגיטלי שאנחנו יוצרים הולכת וגדלה בקצב מסחרר מידי יום. לפי ההערכות, כמות המידע שנצטרך לאחסון בשנת 2025 תהיה גדולה פי חמישה יותר מכמות המידע שהיה קיים ב-2018 (איור 1). הגידול המשמעותי במידע תלוי במספר גורמים, ביניהם השימוש בטלפונים חכמים, רשתות חברתיות, צמיחה של טכנולוגיות בינה מלאכותית (AI) ועוד. הטכנולוגיות הללו יוצרות מגוון עשיר של נתונים מסוגים שונים, כמו מידע אישי, תכנים ממדיות חברתיות, מידע עסקי, נתונים רפואיים, מידע מחיישנים וכל מידע אחר שמאוחסן במחשב.



איור 1

ככל שהטכנולוגיה שלנו מתפתחת, נרצה לאחסן יותר מידע ולאפשר גישה אליו. לכן, על פניו, נראה כי הגידול בכמות המידע הוא דבר נפלא, אז למה זו בעצם בעיה? הריבוי ההולך וגדל של מידע שאנחנו יוצרים וצריכים לאחסן מציב בפני האנושות אתגרים רבים שקשורים לאחסון הנתונים הללו. בפרט, אנחנו מתקרבים לנקודה שבה טכנולוגיות האחסון הקיימות היום לא יעמדו בעומס. יש לכך השלכות מרחיקות לכת, שכן העולם הטכנולוגי שבו אנחנו חיים תלוי באחסון מוצלח של מידע דיגיטלי.

בשנים האחרונות, נאמר לנו "תשמרו את הקבצים שלכם בענן, כך יהיה לכם מקום" כאילו היה אותו "ענן" מרחב אינסופי ובלתי נראה המסוגל לאחסן בתוכו מידע ללא גבול. אבל, חשוב להבין מה באמת עומד מאחורי המילה הזו "ענן". לא מדובר במרחב אינסופי ובלתי נראה, אלא במבנים עצומים של מרכזי נתונים אשר מתפרסים על פני שטח של מספר מגרשי כדורגל המחוברים זה לזה. מרכזים אלה מכילים אלפי ואפילו מיליוני מחשבים המשמשים לאחסון וניהול המידע הרב ששמור בהם. מסיבה זו, לא רק שהם גוזלים מקום ואדמה יקרים, צריכת החשמל בהם משתווה לזו של עיר בגודל בינוני. לכן, לא נוכל להמשיך ולאחסן מידע באופן זה, וכבר בעתיד הקרוב יהיה עלינו למצוא פתרונות אחסון חלופיים (איור 2).

יתרונות האחסון של הדנ"א

ישנן מספר דרישות שפתרונות אחסון המידע צריכים לענות עליהן: לאפשר אחסון של כמויות מידע גדולות, להיות ידידותיים לסביבה ובעלי תוחלת חיים ארוכה. אחד הפתרונות

בינה מלאכותית (Artificial Intelligence (AI))

מערכות או מכונות המחקות אינטליגנציה אנושית לביצוע משימות.

איור 1

צפי כמות המידע הדיגיטלי בעולם בטווח השנים 2010–2025, ביחידות זטה-ביט.

איור 2

מרכז אחסון המידע המתוכנן של חברת Meta (Facebook) קרדיט לאיור: Meta (Facebook).



איור 2

דנ"א מלאכותי (Synthetic DNA)

נקרא גם דנ"א סינטטי. רצפים של מולקולות דנ"א שנוצרו באופן מלאכותי במעבדה ולא נגזרו ממקורות טבעיים.

המבטיחים להתמודדות עם אתגרים אלו הוא השימוש במולקולות דנ"א מלאכותיות לאחסון מידע דיגיטלי. אבל, איך? מה יש במולקולה הזו ובמבנה שלה שמאפשר זאת?

דנ"א הוא מולקולה הקיימת בטבע בכל יצור חי, מחיידקים ועד בני אדם. הדנ"א מכיל את כל המידע הגנטי הדרוש ליצירת חיים. מולקולת דנ"א בנויה כשרשרת ארוכה המורכבת מארבע אבני בניין, והן אדינין (המסומן באות A), גואנין (G), תימין (T) וציטוזין (C). הסדר שבו ארבע אבני הבניין הללו מרכיבות את שרשרת הדנ"א הוא ייחודי לכל יצור חי.

כיום ניתן לייצר דנ"א במעבדה באופן מלאכותי, ולתכנן את המולקולה כך שתורכב כמעט מכל רצף של ארבע אבני הבניין שנרצה. טכנולוגיה זו של ייצור דנ"א מלאכותי נמצאת בראשית דרכה, וישנם שני אילוצים עיקריים שעלינו להביא בחשבון. ראשית, אנחנו יכולים לייצר מולקולות קצרות בלבד. שנית, מכל מולקולה בודדת שנרצה לייצר, יתקבלו אלפי עותקים (כמעט) זהים שלה.

בעוד שטכנולוגיית הייצור של דנ"א נמצאת עדיין בחיתוליה, מזה שנים רבות אנחנו יודעים לקרוא ולזהות את הסדר של ארבע אבני הבניין שמרכיבות את המולקולה [1]. כיום ניתן בקלות ובדיוק רב "לרצף" מולקולת דנ"א, כלומר לזהות את רצף אבני הבניין שבה.

"למה בעצם דנ"א?" למולקולות דנ"א יתרונות רבים כרכיב אחסון מידע, וזאת בהשוואה לחלופות הדיגיטליות שבהן אנחנו משתמשים כיום:

1. נפח אחסון

מולקולת הדנ"א אמנם זעירה בגודלה אך היא יכולה להכיל כמות מידע עצומה. לכן לא יהיה צורך במבנים ענקיים כמו מרכזי אחסון המידע שקיימים היום. למשל, אם נשמור הרבה מולקולות דנ"א עם מידע דיגיטלי בתוך כלי אחסון שגודלו כשל אדם ממוצע, נוכל לשמור כ-150 מיליארד טרה-ביט. זהו נפח אחסון אדיר, השקול למה שניתן לאחסן בכ-150 אלף מרכזי אחסון.

ריצוף דנ"א "קריאה" (DNA Sequencing)

שיטה מעבדתית המשמשת לקביעת הסדר המדויק של ארבע האותיות המרכיבות את מולקולת ריצוף DNA מאפשר למדענים "לקרוא" את המידע המאוחסן

2. יציבות לאורך זמן

למולקולת דנ"א יש מבנה יציב שיכול להישמר למשך זמן ארוך ולכן מדענים כיום מצליחים לרצף דנ"א ממאובנים של יצורים שחיו בכדור הארץ לפני מאות אלפי שנים. מסיבה זו, אחסון מידע דיגיטלי על דנ"א יוכל להישמר למשך זמן רב, בעוד משך החיים של טכנולוגיות האחסון הנוכחיות הוא כ-30-3 שנים.

3. חיסכון באנרגיה

דנ"א אינו דורש חיבור תמידי לחשמל כדי לשמור את הנתונים שעליו. לכן, פתרונות אחסון מבוססי דנ"א עתידים לאפשר חיסכון עצום בצריכת אנרגיה ולהוות פתרון ידידותי לסביבה.

שיטת העבודה לאחסון מידע על דנ"א

איך לוקחים מידע דיגיטלי שהאדם מייצר, כמו קובץ מוזיקה, וידאו, או תמונה, ושמים אותו על מולקולות דנ"א זעירות? הסוד הוא בשפה. מידע דיגיטלי מאוחסן על מחשב בשפה בינארית שמורכבת משתי אותיות בלבד, 0 ו-1. לעומת זאת, מידע ביולוגי מאוחסן על מולקולת דנ"א בשפה אחרת לגמרי, שפת קוד גנטי של דנ"א, ובה ארבע אותיות, A, C, G, T. אם נדע לתרגם שפה אחת לשנייה, נוכל לאחסן את המידע הדיגיטלי במולקולות דנ"א קטנטנות, בהן נשמרות כמויות אדירות של מידע. לכן, מה שאנחנו עושים הוא לייצר מולקולות דנ"א מלאכותיות שבנויות מראש לפי המידע הדיגיטלי שאנחנו רוצים לשמור, וזאת על ידי תרגום השפה הבינארית לשפת הדנ"א. לפניכם דוגמה להבנת תהליך התרגום.

כדי לבצע תרגום נדרש מכנה משותף המחבר בין שתי השפות. האם תוכלו לחשוב על מכנה משותף כזה?

נתחיל ונחפש קודם כל בשפה הבינארית. שחקו עם האותיות 0 ו-1, ונסו לסדר אותן בזוגות בצורות שונות, למשל 1 עם 0, או 0 עם 0, וכדומה... במהרה תגלו שהשילובים האפשריים הם רק אלו:

00

01

10

11

ארבעת השילובים האלה הם מכנה משותף מספק, כי גם בשפת הדנ"א יש רק ארבע אפשרויות, והן האותיות A, C, G, T. אהא! מצאנו את המכנה המשותף. נוכל לכתוב כל זוג בינארי עם אות אחת בשפת הדנ"א:

שפה בינארית (Binary Language)

השפה המשמשת מחשבים ובאמצעותה מיוצג מידע במחשבים. שפה זו מבוססת על מערכת המספרים הבינארית העושה שימוש בספרות 0 ו-1 בלבד כדי לייצג את המידע.

במקום 00 נכתוב A.

במקום 01 נכתוב C.

במקום 10 נכתוב G.

במקום 11 נכתוב T.

בעזרת תוכנת מחשב, נתרגם את כל המידע מהקובץ הדיגיטלי הכתוב בשפה בינארית, ונכתוב אותו בשפת הדנ"א.

למשל:

אם בקובץ הדיגיטלי כתוב:

000100111110010011

נחלק את הרצף הבינארי לזוגות ונסמן כל זוג בצבע:

00 01 00 11 11 10 01 00 11

ואז נתרגם כל זוג בינארי לאות שקבענו בשפת הדנ"א:

A C A T T G C A T

חשוב לציין שזוהי רק דוגמה, בפועל משתמשים בתרגומים יותר מתוחכמים מאלו שהוצגו כאן. זאת במטרה לשמור על המידע גם אם מתרחשות שגיאות במערכת [2].

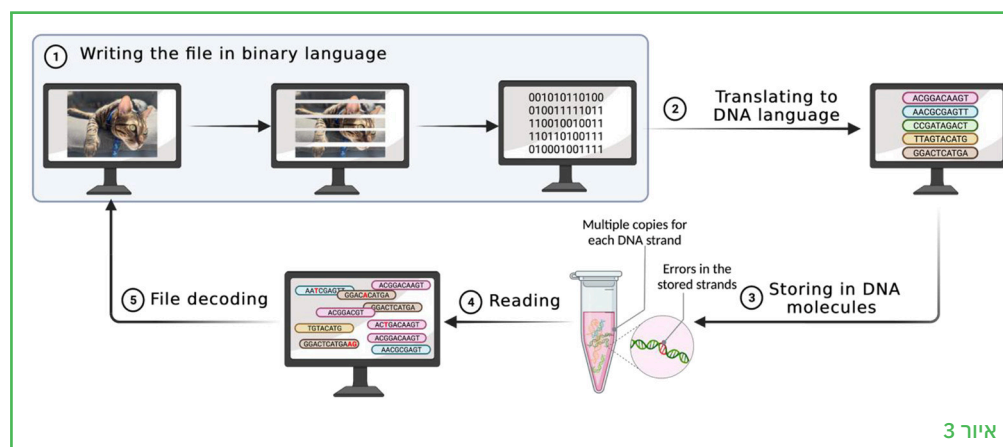
התרגום לשפת הדנ"א מאפשר לנו להתקדם לשלבים הבאים בתהליך אחסון המידע [3].

איור 3 מציג תקציר של הדרך שבה אנחנו שומרים מידע דיגיטלי על גבי מולקולות דנ"א, ואז שולפים אותו חזרה לפי השלבים הבאים:

1. **כתיבת הקבצים בשפה בינארית.** בגלל האורך המוגבל של מולקולות הדנ"א שאותן אנחנו יכולים לייצר, נחלק את הקבצים לחתיכות קטנות ונכתוב כל חתיכה בשפה בינארית.
2. **תרגום** של המידע הדיגיטלי הכתוב בשפה הבינארית לשפת הדנ"א. שלב זה נעשה בעזרת תוכנת מחשב.
3. **שמירת המידע במולקולות דנ"א** ע"י ייצור המולקולות הרצויות במעבדה בעזרת מכשור מתקדם. בגלל אופן הפעולה של המכשור שבו אנחנו משתמשים כיום, מכל מולקולה בודדת שאנחנו רוצים לייצר, נקבל מספר רב של עותקים, וכל המולקולות

איור 3

תהליך אחסון מידע דיגיטלי על מולקולות דנ"א במעבדה ופענוח חזרה של קבצי המקור הדיגיטליים. התהליך מתחיל מכתיבת הקבצים בשפה בינארית (שלב 1). בשלב השני, מתבצע תרגום (שלב 2) של המידע הדיגיטלי הכתוב בשפה הבינארית לשפת הדנ"א. לאחר מכן מתבצעת שמירה של המידע במולקולות דנ"א (שלב 3) ע"י ייצור המולקולות הרצויות במעבדה בעזרת מכשור מתקדם. מאוחר יותר, גישה למידע מתבצעת בעזרת קריאה (שלב 4) של מולקולות הדנ"א שנמצאת בכלי האחסון למילים בשפת הדנ"א ופענוח (שלב 5), שלהן, כלומר לתרגם אותן חזרה לקבצים שלנו באופן ממוחשב. (Created with BioRender.com).



איור 3

הללו נשמרות יחד בכלי אחסון ללא סדר בניהן. כמו כן, בגלל התהליך הרגיש יתכנו שגיאות בחלק מהמולקולות.

כאן מסתיים תהליך העברת המידע הדיגיטלי אל מולקולות הדנ"א המלאכותיות, אשר שומרות את המידע בצורה יציבה לאורך זמן רב. בכל עת ניתן לשלוף את המידע מהמולקולות, ולהפוך אותו חזרה לקובץ הדיגיטלי המקורי בעזרת השלבים הבאים:

4. **קריאה** של מולקולות הדנ"א הנמצאות בכלי האחסון. מתהליך הקריאה מתקבל אוסף של מילים בשפת הדנ"א.
5. **פיענוח** רצף המילים משפת הדנ"א (תרגום) בחזרה לקבצים בשפה הבינארית. תהליך זה נעשה בעזרת תוכנת מחשב שמייצרת את הקובץ המקורי כפי שהיה בראשית הדרך.

סיכום

במאמר הזה דנו באתגרים הקיימים כיום לאחסון מידע והצענו פתרון חדש ומבטיח בדמות מולקולות הדנ"א. כמובן שהדרך עוד ארוכה עד שנוכל להעלות את המידע שלנו לענן מבוסס דנ"א, כי עוד צריך למצוא שיטות להוזיל עלויות ולשפר את הטכנולוגיה. אך בפעם הבאה שתצלמו תמונה, או תראו סדרה, חשבו לאן המידע הזה הולך והיכן הוא מאוחסן, כי יכול להיות שבקרוב תשלפו אותו מתוך מולקולות דנ"א ששומרת על כמות עצומה של מידע, לטווח ארוך, תוך כדי שמירה על הסביבה – דבר שמתאפשר בזכות חיבור בין שני עולמות, הביולוגיה והמחשבים.

עבודה זאת נעשתה במימון האיחוד האירופי (DiDAX, 101115134). עם זאת, הדעות וההשקפות המובעות הן של המחברים בלבד ואינן משקפות בהכרח את אלו של האיחוד האירופי או של הסוכנות המבצעת של מועצת המחקר האירופית. האיחוד האירופי או הרשות המממנת אינם יכולים להיחשב כאחראים להן.

מקורות

1. Sanger, F., Nicklen, S., Coulson, A. R. 1977. DNA sequencing with chain-terminating inhibitors. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 74:5463–5467. doi: 10.1073/pnas.74.12.5463
2. Cosman, P. 2015. *The Secret Code Menace*. Winchester: Ransom.
3. Grass, R. N., Heckel, R., Puddu, M., Paunescu, D., and Stark, W. J. 2015. Robust chemical preservation of digital information on DNA in silica with error-correcting codes. *Angewandte Chemie Int.* 54:2552–2555. doi: 10.1002/anie.201411378

פורסם אוליין: 16 ביולי 2025

נערך על ידי: Idan Segev

מנחים מדעיים: Janet Benyamin | Yonatan Aizner

ציטוט: Bar-Lev D, Preuss I, Anavy L | Yaakobi E (2025) מידע עצום במולקולה זעירה: עידן חדש באחסון מידע על דנ"א (DNA). *Front. Young Minds*. doi: 10.3389/frym.2025.1579129-he

Bar-Lev D, Preuss I, Anavy L and Yaakobi E (2025) Storing Big Data in Tiny DNA Molecules. *Front. Young Minds* 13:1579129. doi: 10.3389/frym.2025.1579129

הצהרת ניגוד אינטרסים: המחברים מצהירים כל המחקר נערך בהעדר קשר מסחרי או פיננסי שיכול להתפרש כניגוד אינטרסים פוטנציאלי.

זכויות יוצרים © 2025 Bar-Lev, Preuss, Anavy | Yaakobi. זהו מאמר בגישה פתוחה שמופץ תחת תנאי רישיון [Creative Commons Attribution License \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). השימוש, ההפצה או ההעתיקה מותרים לשימוש בפורומים אחרים ובלבד שיינתן קרדיט למחברים המקוריים ולבעל זכויות היוצרים, ושהפרסום המקורי בעיתון זה מצוטט בהתאם למקובל באקדמיה. השימוש, ההפצה או ההעתיקה אינם מותרים אם הם אינם עומדים בתנאים אלה.

סוקרים צעירים

AIZNER FAMILY, גיל: 11–15

אנו ילדי משפחת אייזנר חובבי מדע וטכנולוגיה. שיר, הבכורה, בת 15 אוהבת לקרוא. אורי, האמצעי, בן 13, אוהב ללמוד תורה, מתעניין במדע ובפנטזיה. ישי, הצעיר, בן 11, אוהב פיזיקה ומבוכים ודרקונים.

ZALMAN ARAN JUNIOR HIGH, HOLON: 8TH GRADE, גיל: 13–14

אנחנו תלמידי כיתה ח' סקרנים מחטיבת הביניים זלמן ארן שבעיר חולון. כל השכבה שלנו לקחה השנה חלק בתוכנית שנתית של "פרונטירז מדע לצעירים", שבה אותגרנו עם נושאים מעניינים, למדנו איך קוראים מאמר מדעי וסקרנו מאמרים. הפעילות עם "פרונטירז מדע לצעירים" היא אחד ממקצועות הלימוד שלנו ומופיעה בתעודת סוף השנה.



הכותבים

DANIELLA BAR-LEV

סטודנטית לדוקטורט בפקולטה למדעי המחשב בטכניון – מכון טכנולוגי לישראל. לדניאלה יש תואר ראשון במדעי המחשב, תואר ראשון במתמטיקה וגם תואר שני במדעי המחשב מהטכניון. המחקר שלה עוסק בפתרונות קידוד ואלגוריתמים עבור מערכות אחסון מבוססות דנ"א. דניאלה מאמינה ששיתוף פעולה בין חוקרים בתחומים שונים הוא אחד הדברים ההכרחיים להנעת מחקר חדשני ויצירת תרומה אמיתית. לכן, במחקרה, דניאלה שואפת לשיתוף פעולה ושיתוף ידע עם חוקרים במגוון תחומים, כמו ביולוגים, כימאים, חוקרי בינה מלאכותית ועוד. בזמנה הפנוי דניאלה משתתפת במגוון פעילויות לחשיפת נוער, ונערו בפרט, לתחומי המדעים וההנדסה. *dbarlev@ucsd.edu

INBAL PREUSS

דוקטורנטית בפקולטה למדעי המחשב באוניברסיטת רייכמן. יש לה תואר ראשון שממנו המשיכה במסלול ישיר לדוקטורט, והיא מעורבת במספר חזיתות מחקריות בתחומי הביולוגיה החישובית, מדעי המידע, וביולוגיה סינתטית. במרכז המחקר שלה, ענבל עוסקת בפיתוח פתרונות אחסון מידע מבוססי דנ"א, בשיתוף פעולה בין אוניברסיטת רייכמן והטכניון. ענבל עבדה כמה שנים במרכז הפיתוח של מיקרוסופט בישראל כמתכנתת ועסקה בפיתוח מסך המגע והעט של מחשבי הסרפייס (Surface). כדוקטורנטית האישה הראשונה בפקולטה למדעי המחשב באוניברסיטת רייכמן, ענבל גם פועלת למען שילובן של נשים במקצועות הטכנולוגיים, וזאת מתוך אמונה בכוח של נשים ושל צוות מגוון להעצים את הראיה היצירתית שמובילה לפריצות דרך טכנולוגיות. *inbalpreuss@gmail.com

LEON ANAVY

מרצה בבית הספר למדעי המחשב באוניברסיטת רייכמן וחוקר אורח בחברת Sciences Life Verily מבית אלפאבית. ליאון חוקר ומלמד נושאים בנקודת ההשקה שבין בינה מלאכותית לבין למידת מכונה וביולוגיה חישובית וסינתטית. מחקריו מתרכזים בפיתוח שיטות קידוד לאחסון מידע מבוסס דנ"א ובשימוש בביולוגיה סינתטית ובלמידת מכונה לניתוח ואפיון תהליכים ביולוגיים מולקולריים מורכבים. אחרי תואר ראשון בהנדסת תעשייה וניהול ותואר שני בביולוגיה חישובית השלים ליאון דוקטורט במדעי המחשב, כולם בטכניון. נוסף על עבודתו האקדמית ליאון מעורב במיזמים שונים בתחומי החינוך שמטרתם לשלב אוכלוסיות מוחלשות בתחומי המדעים וההייטק.

EITAN YAAKOBI

פרופ' חבר בפקולטה למדעי המחשב בטכניון – מכון טכנולוגי לישראל. יש לו תואר ראשון במדעי המחשב ותואר ראשון במתמטיקה מהטכניון, תואר שני במדעי המחשב מהטכניון, תואר ד"ר בהנדסת חשמל מאוניברסיטת קליפורניה בסן דייגו ופוסט דוקטורט מקלטק מאוניברסיטת קליפורניה בסן דייגו. איתן זכה במגוון פרסים על תרומתו המחקרית, בניהם פרס החוקר הצעיר מטעם אגודת מרקוני. תחומי העניין שלו כוללים את תורת הצפינה ותורת האינפורמציה עם אפליקציות לרכיבי אחסון מידע, אחסון מידע מבוסס דנ"א, אחסון ואיחזור מידע ואיחזור מידע מאובטח. בזמנה הפנוי איתן נהנה לבלות עם משפחתו, לעשות יוגה ולגלוש גלים.

המחברת הזו תרמה במידה שווה לעבודה זו.



מוזיאון המדע ע"ש בלומפילד ירושלים
متحف العلوم على اسم بلومفيلد القدس
Bloomfield Science Museum Jerusalem



הוצאת פרונטירז מדע לצעירים ישראל
Hebrew version provided by



THE SAGOL NETWORK



קרן משפחת
שעשוע
Shashua
Family Foundation